

**MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS
STATE COMMITTEE ON STANDARDIZATION OF THE REPUBLIC
OF BELARUS
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY

**INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

INSTRUMENTATION ENGINEERING-2022

**Proceedings
of the 15th International Scientific and Technical Conference**

November 16–18, 2022
Minsk, Republic of Belarus

**Minsk
BNTU
2022**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2022

**Материалы
15-й Международной научно-технической конференции**

16–18 ноября 2022 года
Минск, Республика Беларусь

**Минск
БНТУ
2022**

УДК 681.2(063)
ББК 34.9я431
П 75

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор О.К. Гусев (председатель);
канд. техн. наук, доцент Р.И. Воробей; канд. техн. наук, доцент В.Л. Гуревич;
д-р физ.-мат. наук, профессор М.А. Князев;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, профессор Н.В. Кулешов;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, профессор А.М. Малярович;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор Ю.М. Плескачевский;
канд. техн. наук, доцент А.Л. Савченко; канд. техн. наук, доцент А.И. Свистун;
д-р техн. наук, профессор П.С. Серенков; д-р техн. наук, профессор В.Л. Соломахо;
академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор С.А. Чижик;
д-р физ.-мат. наук, профессор К.В. Юмашев;
канд. техн. наук, доцент Н.Н. Ризноокая (отв. секретарь)

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор А.В. Белый;
д-р техн. наук, профессор Н.И. Мухуров

Издание включает материалы 15-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2022» по направлениям: измерительные системы и приборы, технические средства безопасности; методы исследований и метрологическое обеспечение измерений; физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения; оптико-электронные системы, лазерная техника и технологии; микромеханические датчики и системы.

Материалы конференции могут представлять интерес для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и магистрантов, специалистов реального сектора экономики, занимающихся исследованиями, разработкой и производством приборов и измерительных систем.

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

ПРИВЕТСТВИЕ УЧАСТНИКАМ 15-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ–2022»

Уважаемые участники и гости конференции! Сегодня Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» отмечает небольшой юбилей, поскольку проводится уже в 15-й раз. С 2008 года всеми нами – и организаторами, и постоянными участниками конференции, проделан немалый путь. Некоторые итоги этого пути отражены в докладах, которые прозвучат сегодня на пленарном и секционных заседаниях конференции, либо представлены в опубликованном сборнике материалов конференции. Итоги, разумеется, не окончательные, ведь наука, инженерное дело, образование развиваются непрерывно. К традиционным участникам добавляются новые, ежегодно обновляется круг обсуждаемых тем и научных результатов.

На нынешней конференции представлено 234 доклада – больше, чем в предыдущем году. Все доклады прошли тщательный отбор организационного комитета и включены в сборник материалов, традиционно издаваемый к началу конференции. В нынешнее непростое время по-прежнему высоким остается уровень международного участия в конференции. Сегодня свои доклады представляют ученые, инженеры, специалисты, аспиранты и преподаватели из 9 стран мира – Беларуси, России, Таджикистана, Узбекистана, Казахстана, Польши, Венесуэлы, Швеции, Норвегии. В числе организаций-участников – такие научные, промышленные и образовательные центры, как НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, ОАО «МНИПИ», ОАО «Минский автомобильный завод», РУП "НПЦ многофункциональных беспилотных комплексов" НАН Беларуси, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, МГТУ имени Н.Э. Баумана, ФГБОУ ВО "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова", Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Таджикский технический университет имени М.С. Осими, Ташкентский государственный технический университет, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), Национальный центр оптических технологий (Мерида, Венесуэла), Люблинский технический университет (Люблин, Польша), Королевский технологический институт (Стокгольм, Швеция), Норвежский Университет науки и технологий (Трондхейм, Норвегия) и многие другие – всего около 70 организаций. Это является наглядным свидетельством того, что Республика Беларусь, Белорусский национальный технический университет, конкретно конференция «Приборостроение» поддерживают статус надежной площадки для международного общения по научно-техническим вопросам.

Приборостроение является одной из наиболее наукоемких отраслей промышленности, и в этой области Республика Беларусь традиционно занимает сильные позиции, ее приборостроительная отрасль пользуется высоким авторитетом в мире. Особенно сильны позиции Беларуси в области оптического, оптоэлектронного и лазерного приборостроения (достаточно

вспомнить продукцию НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО), беспилотных авиационных систем, микромеханики и нанотехнологий, биотехнического и медицинского приборостроения, где, как с гордостью можно отметить, ведущую роль играет деятельность Научно-технологического парка БНТУ «Политехник». Новейшие достижения отечественных и зарубежных организаций в этих областях отражены в представляемых на сегодняшней конференции докладах. Следует отметить, что акцент при этом делается не только на разработках как таковых, но и на их практическом применении в смежных отраслях. Ряд представленных докладов посвящен применению микромеханических сенсоров в автомобильной технике и беспилотных авиационных системах, использованию автоматических компьютерных систем управления и контроля в обучающем процессе в рамках проектов «умный класс» и «умная аудитория», практическому применению метаматериалов в медицинском приборостроении.

Характерно, что еще до начала конференции ее оргкомитет получил ряд запросов от различных промышленных организаций, не планирующих представлять свои доклады, но желающих оперативно ознакомиться с материалами других участников. Это подчеркивает практическую направленность научного мероприятия, значимость конференции как площадки для установления деловых связей между научными, образовательными и производственными организациями. При этом ведущая роль в подготовке специалистов в области приборостроения в Республике Беларусь принадлежала и принадлежит БНТУ, являющемуся ведущим высшим научно-техническим учебным заведением в национальной системе образования Республики Беларусь и базовой организацией государств-участников СНГ по высшему техническому образованию.

На приборостроительном факультете БНТУ обучается около 900 студентов на дневном отделении и около 500 – на заочном, работают 110 преподавателей, среди которых: 18 докторов наук и профессоров, в том числе 2 академика и 3 члена-корреспондента НАН Беларуси, и 52 кандидата наук, доцента, имеются магистратура, аспирантура и докторантура, функционирует научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий, отраслевая лаборатория инновационных приборов МЭМС-технологий и две научно-исследовательские лаборатории: полупроводниковой техники и оптико-электронного приборостроения, а также две студенческие научно-исследовательские лаборатории и совет по защите диссертаций.

От имени всего коллектива преподавателей, сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов БНТУ поздравляю всех участников 15-й МНТК «Приборостроение–2022» с началом ее работы и хочу выразить уверенность, что нынешняя конференция вновь послужит плодотворному обмену идеями, поспособствует укреплению международных научных связей, даст новый толчок развитию науки, образования и экономики!

*Ректор Белорусского национального технического университета,
доктор технических наук
Сергей Васильевич Харитончик*

УДК 621

РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДАТЧИКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Кernasовский Ю.М.¹, Моспанов А.Н.¹, Таратын И.А.^{1,2}

¹ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены ключевые задачи и приоритеты научных и прикладных исследований по направлению разработки технологий для датчиков нового поколения.

Ключевые слова: датчик, сенсорная техника, микроэлектромеханические системы, импортозамещение.

DEVELOPMENT OF NEW DESIGNS AND TECHNOLOGIES FOR NEW GENERATION SENSORS

Kernasowski Y.¹, Mospanov A.¹, Taratyn I.^{1,2}

¹JSC «Minsk Research Institute of Radio Materials»

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The key tasks and priorities of scientific and applied research in the direction of developing technologies for new generation sensors are considered.

Key words: sensor, sensor technology, microelectromechanical systems, import substitution.

Адрес для переписки: Таратын И.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: mnt@bntu.by

Актуальность развития данного направления в Республике Беларусь обусловлена, прежде всего, ситуацией в мире, которая характеризуется ограничениями, накладываемыми на доступ к наукоемкой продукции, санкциями, стремлением государств самостоятельно развивать высокотехнологичные производства и обеспечивать импортозамещение критических электронных компонентов.

В нашей стране потребителями датчиков являются структурообразующие предприятия автомобилестроения, машиностроительного комплекса, различных отраслей народного хозяйства, включая организации жилищно-коммунального хозяйства и др., для которых вопрос импортозамещения в настоящее время стоит весьма остро. Подтверждением этому являются совместные совещания представителей Министерства промышленности Республики Беларусь и Минпромторга России по вопросам импортозамещения электронных комплектующих, которые состоялись в текущем году. В совещаниях принимал участие и наш институт.

Поэтому важнейшей задачей является практическая реализация результатов научно-технической деятельности, скорейшее освоение производства критических компонентов сенсорной техники в интересах белорусских и российских предприятий.

Рабочей группой инновационно-промышленного кластера «Микро-, опто- и СВЧ-электроника» определены задачи и перечень основных НИОКР, которые необходимы для развития данного направления и организации производства датчиков нового поколения.

Задачи:

– развитие критических технологий МЭМС;

– разработка и изготовление чувствительных мэмс элементов и датчиков;

– разработка и изготовление систем на основе датчиков;

– совершенствование материально-технической базы для выполнения исследований и разработок;

– разработка и освоение производства импортозамещающей номенклатуры сенсорной техники.

Приоритеты научных исследований:

– технологии сборки 2-d, 3-d для многофункциональных МЭМС;

– создание новых типов интегральных микроэлектромеханических чувствительных элементов на основе сегнетоэлектриков;

– разработка интегральных газовых сенсоров с низким энергопотреблением и высокой избирательностью контролируемых газов;

– технологии высокоточных датчиков угла наклона навигационного уровня с использованием мэмс технологий;

– оптические сенсоры.

НИОКР выполняются в рамках ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», «Материаловедение, новые материалы и технологии»; «Фотоника и электроника для инноваций», ГП «Наукоемкие технологии и техника» и за счет собственных средств. Работы являются комплексными, выполняются совместно с организациями Министерства образования и НАН Беларуси, входящими в состав кластера.

Примеры совместных НИОКР:

– НИР «Исследование и разработка методов формирования интегральных сенсоров на основе сегнетоэлектрических нанокompозитов группы перовскита» (МНИИРМ);

– НИР «Разработка структурированных и многослойных метаматериалов и метаповерхностей для гибридных микроэлектронных сенсорных систем» (МНИИРМ);

– НИР «Моделирование и расчет характеристик датчика угла наклона навигационного уровня» (БНТУ, МНИИРМ);

– НИР «Разработка научных основ, конструкции и технологии изготовления малоомощной мультисенсорной системы для детектирования составов газов» (БГУИР, БНТУ, МНИИРМ);

– НИР «Технология сварки стекло-кремний, стекло-металл с использованием процесса анодной сварки» (БНТУ, МНИИРМ); задание формируется;

– НИР «Разработка многопараметрических оптических сенсоров изображений» (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», БГУ);

– ОКР «Разработать семейство датчиков на основе кремниевых лавинных фотодиодов и фотоумножителей с системами регистрации и обработки оптических излучений малой интенсивности» (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ);

– ОКР «Разработка системы контроля нагрузки на ось автомобиля» (МНИИРМ);

– НИР «Разработка и создание встречно-штыревой структуры в качестве коллектора тока для микросуперконденсатора» (БГУИР, МНИИРМ);

– ОКР «Создание пленочных высокочувствительных селективных газовых сенсоров высокого быстродействия на основе тонкопленочных углеродных наноструктур» (НИИ ЯП БГУ, БГУ).

При выполнении исследований будут активно использоваться возможности отраслевых лабораторий, созданных и укомплектованных современным оборудованием, в том числе оборудованием ОАО Планар, входящего в состав Кластера.

«Отраслевая научно-исследовательская лаборатория инновационных приборов МЭМС-технологий», которая организована на кафедре «Микро- и нанотехника» БНТУ. Лаборатория является базой не только для подготовки высококвалифицированных специалистов по направлению «микромеханические системы», но и выполнения НИР в области МЭМС.

«Отраслевая лаборатория разработки критических технологий производства МЭМС и СВЧ электронных компонентов в интересах гражданского и оборонного сектора экономики Республики Беларусь», которая организована в ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов» в 2021 году.

В рамках отраслевой лаборатории МЭМС и СВЧ будут сформированы 9 участков:

- участок деионизованной воды;
- участок химической обработки;
- участок сборки;
- участок контрольно-измерительный;
- участок напыления металлических слоев и травления;
- участок испытаний;

– участок ионного легирования и отжига, участок нанесения диэлектриков;

– участок фотолитографии.

В 2022 году за счет средств инновационного фонда Мингорисполкома приобретено 11 единиц оборудования, в том числе камера микроклиматическая. Камера микроклиматическая предназначена для создания в ОАО «МИНСКИЙ НИИ РАДИОМАТЕРИАЛОВ» новых чистых помещений площадью 300 м² в соответствии с требованиями микроэлектронного производства.

Процесс освоения критических технологий МЭМС и формирования соответствующей отрасли выстраивается по следующей схеме: подготовка высококвалифицированных специалистов, выполнение исследований – БНТУ, исследования, разработка и изготовление опытных партий и мелких серий МЭМС и датчиков – МНИИРМ, освоение массового производства МЭМС – ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Принимая во внимание необходимость создания импортозамещающей продукции, к важнейшим результатам следует отнести следующие изделия:

1. В соответствии с требованиями ОАО «МАЗ» доработана Система мониторинга концентрации метана в критичных точках автомобиля. Ближайший аналог компании TEQ SA (Тек, Швейцария). Система повышает безопасность и надежность автомобильной техники и увеличивает ее экспортный потенциал.

Система обеспечивает мониторинг концентрации CH₄ в моторном отсеке, в местах установки газовых баллонов, отсеке предпусковых жидкостных подогревателей двигателя и у редукторов газовых баллонов транспортного средства.

Конструкция датчиков CH₄, имеет устройство нагрева и охлаждения обеспечивающее работу датчиков при температуре окружающей среды до плюс 95 °С.

Унифицированная аппаратная часть и стандартные протоколы обмена позволяет менять конфигурацию системы без доработки ПО и блока мониторинга.

Система введена в КД на автобусы МАЗ 203946, 206946, 203948, 206948. Заключен договор с ОАО «МАЗ» от 14.06.2022 № 516/97257 на поставку двух систем мониторинга метана. В соответствии с запросом ОАО «МАЗ» (письмо от 05.07.2022 № 516-8-7/7927) о поставке 889 штук таких систем ведется подготовка серийного производства. Объем реализации в 2023 году может составить около 2 100 000 рублей.

2. «Индукционный датчик конечного положения (ИДКПТ). Разработан по техническим требованиям ОАО «МТЗ».

Предназначен для бесконтактной коммутации исполнительных устройств в составе электронных систем управления тракторов «Беларус».

Надежность и долговечность датчика обеспечивается за счет применения новых схемотехнических решений и материалов корпуса, а также расширенного температурного диапазона (– 40...+ 85°С).

Получено заключение ОАО «МТЗ» № 7231 о допуске датчиков конечного положения на серийное производство. Поставка ведется в соответствии с запросами ОАО «МТЗ».

3. Бесконтактные индуктивные выключатели ВИБ М12 и ВИБ М18. Разработаны по требованиям ОАО Станкозавод «Красный борец» на базе конструктивных решений датчика ИДКПТ. Поставляются по договору с ОАО Станкозавод «Красный борец» от 31.05.2022 № 03-2022/80.

4. Дифференциальный зонд (ДЗ) с магнитным сердечником. Предназначен для контроля дефектности круглого стального проката. (трещины шириной более 0,1 мм и длиной более 11,5 мм). Решает проблему регулярной замены дорогостоящего импортного комплектующего стоимостью 6 тыс. евро на ОАО «БМЗ».

Датчик обеспечит стабильную работу трубопрокатного цеха при отсутствии оригинальных импортных запчастей (Корпорация Fluke, США). Потребность ОАО «БМЗ» – 20 штук в год. Заключен договор от 22.08.2022 № 22013598 с ОАО

«БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» на поставку первой партии (4 штуки) датчиков на сумму 63 595,06 рублей.

Дальнейшее развитие разработки – замена двух микрокатушек на микроминиатюрные преобразователи Холла белорусского производителя. Это позволит расширить область применения для контроля дефектности различных металлических конструкций.

5. Датчик угла наклона ДУН-15-1. Датчик угла наклона ДУН-15-1 (рис. 1) предназначен для определения угла наклона транспортных средств (тангаж, крен). Датчик определяет положение объекта в пространстве относительно двух координатных осей и передает информацию по CAN протоколу стандарта SAE J1939.

Потребители – ОАО «МАЗ», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «МТЗ» и др.

Получено разрешение ОАО «БЕЛАЗ» (Протокол от 09.09.2022) на применение датчика угла наклона ДУН-15-1. в конструкции карьерных самосвалов и спецтехнике ОАО «БЕЛАЗ».



МИНСКИЙ НИИ РАДИОМАТЕРИАЛОВ

Датчик угла наклона ДУН-15-1

Датчик угла наклона для определения угла наклона транспортных средств (тангаж, крен). Датчик определяет положение объекта в пространстве относительно двух координатных осей и передает информацию по CAN протоколу стандарта SAE J1939.

Потребители – МАЗ, ОАО «БЕЛАЗ», МТЗ и др.

Получено разрешение ОАО «БЕЛАЗ» (Протокол от 09.09.2022г.) на применение датчика угла наклона ДУН-15-1 в конструкции карьерных самосвалов и спецтехнике **ОАО «БЕЛАЗ».**

Технические характеристики:

Диапазон углов наклона, град, не менее	±15
Количество осей чувствительности	2
Погрешность измерения угла наклона в диапазоне рабочих температур (с термокомпенсацией), град, не более	±0.25
Напряжение питания, В	от 18 до 36
Рабочий диапазон температур, С	-40...+70
Габаритные размеры, мм, не более	87x58x30
Тип выходного интерфейса	CAN 2.0 А/В
Скорость выходного интерфейса, кбит/с	250
Масса, г	450



Рисунок 1 – Описание датчика угла наклона ДУН-15-1

Автоматизированный метеорологический комплекс

Аналог финской фирмы Vaisala.

Области применения:

- военная техника (ОАО «ВОЛАТАВТО»), ОАО «Агат - электромеханический завод», БСВТ, ОАО «Пеленг»),
- системы точного земледелия,
- гидрометеослужбы и пр.

Характеристики:

- диапазон измерения скорости ветра, м/с – от 0 до 50.
- точность измерения при скорости ветра от 0 до 40 м/с - ±3%.
- диапазон измерения давления, гПа – от 300 до 1100.
- точность измерения давления, гПа - ±0,5.
- диапазон измерения температуры, °С - от -40 до +60.
- точность измерения температуры, °С - ±0,5.
- диапазон измерения влажности, % - от 0 до 100.
- точность измерения влажности от 0 до 90, % - ±3.
- точность измерения влажности от 90 до 100, % - ±5.



Рисунок 2 – Описание автоматизированного метеорологического комплекса

6. Автоматизированный метеорологический комплекс. Комплекс (рис. 2) разработан для ряда предприятий Республики Беларусь. В настоящее время выполняется сертификация разработанного в институте автоматизированного метеорологического комплекса (аналог финской фирмы Vaisala). Метеокомплекс обеспечивает контроль параметров атмосферы: давления, температуры, влажности воздуха, скорости ветра (до 50 м/с) и направления ветра с обработкой текущей информации. В данный комплекс возможна интеграция других

датчиков (например, детектирования гамма-излучения, выносные датчики температуры и влажности почвы и др.). Области применения: военная техника (ОАО «ВОЛАТАВТО», ОАО «Агат – электромеханический завод», БСВТ), гидрометеослужбы, системы точного земледелия и пр.

Выполняемые НИОКР в полной мере соответствуют тенденциям развития данного направления в мире и будут способствовать созданию востребованной предприятиями Республики Беларусь и Российской Федерации продукции.

УДК 621

ПРОБЛЕМЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МИКРОМЕХАНИКЕ

Чижи́к С.А.^{1,2}, Чи́кунов В.В.², Лапи́цкая В.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены диагностическое оборудование и оригинальные методики для количественной оценки данных факторов с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии. Рассмотрены примеры использования предложенных подходов.

Ключевые слова: микромеханика, контактное взаимодействие, микроэлектромеханические системы, сканирующая зондовая микроскопия.

PROBLEMS OF CONTACT INTERACTION IN MICROMECHANICS

Chizhik S.^{1,2}, Chikunov V.², Lapitskaya V.²

¹Belarusian National Technical University

²A.V. Luikov heat and mass transfer institute of the Academy of sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper presents diagnostic equipment and original methods for the quantitative assessment of these factors using the method of scanning probe microscopy. Examples of using the proposed approaches are considered.

Key words: micromechanics, contact, microelectromechanical systems, scanning probe microscopy.

Адрес для переписки: Чижи́к С.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: mnt@bntu.by

Проектирование и эксплуатация микроэлектромеханических систем (МЭМС) сопряжены с необходимостью учета специфики физико-механического поведения материалов и рабочих поверхностей на микронном масштабном уровне. В качестве основных факторов влияющих на формирование площади фактического контакта и адгезионного сцепления подвижных поверхностей можно определить капиллярные силы, силы межмолекулярного взаимодействия, упругие свойства материала и шероховатость. Силы, которыми можно пренебречь при эксплуатации машин на макроуровне, оказываются критически значимыми для МЭМС, приводящими к разрушению микроконструкций.

В работе представлены диагностическое оборудование и оригинальные методики для количественной оценки данных факторов с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии. Изображения топографии и фазового контраста позволяют получить информацию о структуре, пространственной геометрической и материаловедческой неоднородности материала

поверхностных слоев микроизделий. С помощью методик статической и динамической силовой спектроскопии определяются локальные упругие свойства и поверхностная энергия контактирующих материалов, в том числе, и молекулярнотонких покрытий. Разработаны методы осциллирующей трибологии для экспериментальной оценки характеристик трения и изнашивания поверхностей при эксплуатации микромашин. Также обсуждаются компьютерные модели контактного взаимодействия шероховатых поверхностей МЭМС с учетом внешней нагрузки, упругих свойств материалов, молекулярных и капиллярных сил. При этом представлены возможности 3D-визуализации зоны фактического контакта.

Рассмотрены примеры использования предложенных подходов к проектированию сочленения в системах магнитной записи (магнитный диск – магнитная головка), рабочих поверхностей в микропинцетах и при решении задачи подбора материалов для реализации технологии «печатания» микро- и наноструктур.

УДК 621

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Багдюн А.А.^{1,2}, Соломахо В.Л.¹, Макаревич В.Б.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Метрологическое обеспечение измерений микро- и наночастиц предполагает создание комплекса эталонных средств измерений, позволяющего обеспечить прослеживаемость результатов измерений размеров частиц и, тем самым, распространить Систему обеспечения единства измерений на нанометровый диапазон.

Ключевые слова: частица, диаметр, единство измерений, погрешность.

ENSURING THE UNITY OF MEASUREMENT OF SOLID PARTICLES IN THE NANOMETER RANGE

Bagdun A.^{1,2}, Solomacho V.¹, Makarevich V.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian state institute of metrology
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Metrological assurance of measurements of micro- and nanoparticles involves the creation of a set of reference measuring instruments, which makes it possible to ensure the traceability of the results of measurements of particle sizes and, thereby, to extend the System for ensuring the uniformity of measurements to the nanometer range.

Key words: particles, diameter, uniformity of measurements, error.

Адрес для переписки: Багдюн А.А., Старовиленский тракт, 93, Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: bagdun@gmail.com

Квантовый характер нанотехнологий определяет их существенную зависимость от точности количественной оценки параметров нанообъектов, входящих в состав исходных материалов, физико-химический состав технологических сред во всем диапазоне их использования, получаемых технологических продуктов. Это стимулирует широкое использование средств измерений (СИ), имеющих необходимые метрологические характеристики для проведения измерений. Отдельной, сложной научно-технической и методической задачей является метрологическое обеспечение измерений размеров наночастиц. Достаточно сказать, что ее решение носит комплексный характер и предполагает:

- анализ физических принципов и методов измерения размеров наночастиц;
- конкретизацию терминов и определений, связанных с понятием размер наночастиц;
- создание необходимой эталонной базы;
- разработку схем прослеживаемости и передачи единицы физической величины.

Применяемые методы измерений размерных параметров наночастиц базируются на различных физических принципах, имеют ограниченное применение и носят взаимодополняющий характер. Их можно разделить на два класса [1]: предназначенные для измерения размеров в ансамблях частиц («аналитические» методы измерений) и измерение единичных частиц. К первому классу

относятся методы, базирующиеся на динамическом рассеянии света (ДРС), сорбтометрии или методе многослойной адсорбции Брюнера-Эммета-Теллера (БЭТ), рентгенофазовом анализе (РФА), акустической спектроскопии (АС), аналитическом центрифугировании (АЦ), системе анализа дифференциальной электрической подвижности (САДЭП). Для методов данного типа, как правило, применяется принцип аддитивности сигналов отклика от отдельных частиц в предположении отсутствия их взаимного влияния. Интегральный сигнал от ансамбля частиц является основой для восстановления распределения частиц по размерам при определенных физических принципах.

В методах второго класса распределение частиц по размерам формируется из набора независимых измерений размера каждой отдельной наночастицы. К этому классу относятся все методы, базирующиеся на анализе изображений объектов: просвечивающая (ПЭМ) и растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и все их модификации.

Важно понимать, что каждый метод основан на измерении различных физических характеристик частиц, при этом, специфичность измерений в наноразмерном диапазоне связана с зависимостью механических, электрических, магнитных, оптических свойств частиц от их формы (от сферы до сложного объемного элемента). Как

следствие, «размеры», полученные разными методами, будут различаться. Поэтому, для их анализа и определения характеристики размера принята модель в виде сферы, и для ее размерной характеристики вводится понятие эквивалентного диаметра сферического объекта – объекта, имеющего такие же физические свойства, что и измеряемая частица [2].

К физическим свойствам частиц, например, относят скорость осаждения частиц или размеры частиц (объем и площадь поверхности), определенные по проекциям частиц под микроскопом.

Однако ввиду того, что размеры наночастиц являются случайными величинами, принято отображать информацию о них в виде распределения.

Такой подход позволяет создавать эталонные технические средства, используя различные физические принципы измерений. Принимая во внимание, что твердые наночастицы могут находиться в однородном или дисперсном (в виде взвеси или аэрозоля) состоянии эталонное оборудование представляет собой комплекс из трех средств измерений, предназначенных для определения размеров наночастиц, находящихся в виде россыпи, взвеси или аэрозоля.

Основой оборудования, применяемого для измерения линейных размеров наночастиц, является наноизмерительная машина (NMM), реализующая абсолютный метод измерения, в полном соответствии со стандартным определением единицы длины – метра. В качестве средства измерений длины в измерительном комплексе используются интерферометры, которые обладают необходимой точностью измерения за счет реализации принципа компаратора Аббе по всем трем измерительным осям [3]. Технические характеристики NMM представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики NMM

Диапазон измерений, мм	25×25×5
Разрешение, нм	0,1
Встраиваемые датчики	Атомно-силовой микроскоп, лазерный фокусный микроскоп, интерферометр белого света, щуп для 3D-измерений

Для измерения диаметра наночастиц (в качестве зондирующей системы) используется атомно-силовой микроскоп (АСМ). После контакта с объектом измерений сигнал АСМ используется для регулирования вертикального положения стола, что позволяет сканировать поверхность объекта измерения. Применение АСМ позволяет реализовать два способа измерения размера наночастиц: измерение в вертикальной плоскости, когда измеряется расстояние между вершиной одиночной частицы и подложкой, и латеральной плоскости, когда измеряется расстояние между двумя вершинами двух соседних частиц.

Динамическое рассеяние света (ДРС) – физический принцип, положенный в основу метода определения свойств и размера наночастиц (их гидродинамического диаметра) в жидкой фазе, который является эталонным для такого вида измерений, в соответствие со стандартом ISO 22412. Техническим средством реализации этого метода является анализатор размера наночастиц [4].

Источник излучения, в качестве которого выступает лазер, обеспечивающий когерентность и монохроматичность генерируемого светового потока, испускает оптическое излучение, которое через аттенюатор и попадает на приемник излучения, не искажая при этом форму сигнала. Падающее излучение попадает в ячейку, содержащую образец наночастиц, после контакта с которыми, часть света преломляется и купуруется фотоловушка, а часть рассеивается и под определенным углом собирается фотодетектором, в качестве которого выступает фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), преобразовывающий оптическое излучение в электрический сигнал. Электрический сигнал с ФЭУ попадает в коррелятор, который вычисляет автокорреляционную функцию и строит ее зависимость от времени задержки электронного сигнала. Гидродинамический диаметр выражается аналитически. Технические характеристики анализатора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики анализатора размера наночастиц

Диапазон измерений	диаметров частиц, нм	от 0,6 до 4000
	дзета-потенциала, мВ	от –200 до 200
Диапазон измерений молекулярного веса, г/моль		от $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7$
Величина пробы для измерения, мл		от 0,012 до 4,000

Метод анализа дифференциальной электрической подвижности частиц применяется для измерения размеров наночастиц в аэрозолях. Данный метод применяется в большинстве национальных метрологических институтов как эталонный [5].

Система анализа дифференциальной электрической подвижности частиц (САДЭП) позволяет разделять частицы аэрозоля на основании их электрической подвижности и, соответственно, формировать на выходе поток монодисперсных частиц, обеспечивая их счет и определение размеров. САДЭП включает три основных устройства: электростатический классификатор, колонну анализа дифференциальной электрической подвижности частиц и конденсационный счетчик частиц. Электростатический классификатор корпус с сенсорным экраном для управления САДЭП, в котором размещен источник высокого напряжения, насос, датчики температуры, влажности, давления и скорости потока воздуха, а также воздушные фильтры. Колонна анализатора дифференциальной электрической подвижности представляет собой длинную цилиндрическую камеру с радиусом

1,958 см. Внутри камеры находится стержень радиусом 0,937 см, концентричный стенкам камеры, расположенный таким образом, чтобы между стержнем и стенками камеры образовалось кольцевое пространство. Поток аэрозоля поступает в зазор между коаксиально расположенными центральным стержнем и наружным цилиндром. Напряжение на стержень подается от источника высокого напряжения и регулируется в диапазоне от 0 до 10000 В. Регулируя напряжение, отбираются частицы с узким диапазоном подвижности, чем достигается их монодисперсность. Поток, состоящий из моноразмерных частиц, направляется в конденсационный счетчик частиц. Таким образом, изменяя напряжение в необходимом диапазоне, происходит сканирование аэрозоля и строится функция распределения размеров частиц. Технические характеристики САДЭП представлены в табл. 3.

Таблица 3. Технические характеристики САДЭП

Диапазон измерений диаметров частиц, нм		от 2 до 1000
Диапазон	скорости потока измеряемого аэрозоля, л/мин	от 0,2 до 2,1
	скорости потока воздуха обдува, л/мин	от 2 до 30
	напряжений анализатора, В	от 10 до 10000

Основой обеспечения прослеживаемости результатов измерений размеров частиц являются стандартные образцы (СО) диаметра частиц. Они являются неотъемлемым элементом в цепочке прослеживаемости, так являются связующим звеном между эталонами и рабочими средствами измерений. Также СО могут быть универсальными для измерений в различных дисперсных средах, для этого, например, подходят частицы полистирольных латексов.

В итоге для реализации обеспечения единства измерений размеров наночастиц будут реализованы три схемы прослеживаемости.

Первая схема определяет прослеживаемость результатов измерений линейных размеров наночастиц, обеспечивающая прослеживаемость к единице длины – метру. Данная схема является универсальной и реализуется через частицы, нанесенные на подложку. Подробнее об этом было сказано в [6]. Упрощенная схема выглядит следующим образом:

Рабочие средства измерений → Рабочие эталоны (СО) → Национальный эталон единицы длины – метр в нанометровом диапазоне (НММ) → Национальный эталон единицы длины метра – метра в области аттестации источников излучений и средств измерений длин волн длиной 0,63 мкм.

Вторая схема определяет прослеживаемость результатов измерений гидродинамического диаметра наночастиц, который является эквивалентным, к эталонному анализатору размеров наночастиц, работающему по принципу динамического рассеяния света. Данная схема распространяется на измерения частиц в жидкости и выглядит следующим образом:

Рабочие средства измерений → Рабочие эталоны (СО) → Эталонный анализатор размеров наночастиц.

Третья схема определяет прослеживаемость результатов измерений диаметра наночастиц эквивалентного по электрической подвижности к эталонному анализатору дифференциальной электрической подвижности. Данная схема распространяется на измерения аэрозольных частиц и выглядит следующим образом:

Рабочие средства измерений → Рабочие эталоны (СО) → Эталонный анализатор дифференциальной электрической подвижности.

В итоге были проанализированы физические принципы и методы измерения размеров наночастиц, конкретизировано определение размера наночастиц, описана созданная необходима эталонной базы и разработаны схемы прослеживаемости и передачи единицы размера наночастиц, позволяет реализовать обеспечение единства измерений размеров наночастиц.

Литература

- Jillavenkatesa, A. Nanopowder characterization: challenges and future directions / A. Jillavenkatesa, J. F. Kelly // *J. Nanopart. Res.* – 2002. – V. 4. – P. 463–468.
- Rawle, A. Основные принципы анализа размеров частиц // Техническая аннотация MRK0034R-01, Malvern [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rusnanonet.ru/download/equipment/mrk0034r_01.pdf. – Дата доступа: 03.01.2020.
- Bagdun, A. A. The error of transferring the size of a unit of length - a meter in the nanometer range of measurements when using a nanomeasuring machine / A. A. Bagdun, V. L. Solomakho // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences.* – 2022. – Vol. 67, № 1. – P. 86–93.
- Bagdun, A. A. Determination of the measurement error of the diameter of nanoparticles by the method of dynamic light scattering / A. A. Bagdun, V. L. Solomakho // *Non-destructive testing and diagnostics.* – 2021. – № 4. – P. 32–37.
- Solomakho, V. L. The current state of traceability in the field of nanoparticle measurement / V. L. Solomakho, A. A. Bagdun // *Quality, standardization, control - theory and practice: materials of the 20th International Scientific and Technical Conference* – Kyiv: ATM of Ukraine. – 2020. – P. 15–17.
- Багдюн, А. А. Схема прослеживаемости измерений диаметров наночастиц / А. А. Багдюн, А. Н. Горошкова, В. Л. Соломахо // *Метрология–2022. Материалы международной научно-технической конференции*, Минск: БелГИМ. – 2022. – С. 142–145.

УДК 621.375.826

**НОВЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СИСТЕМЫ
С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ НА ИХ ОСНОВЕ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ**
Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В.

*НИЦ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета,
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Приведен обзор основных направлений научно-исследовательских работ НИЦ оптических материалов и технологий. Рассмотрены основные полученные результаты, показаны последние инновационные разработки.

Ключевые слова: лазер, кристаллический материал, эрбий, иттербий, разработка, применение.

**NEW CRYSTALLINE LASER MATERIALS AND BASED ON IT LONGITUDINALLY
PUMPED SYSTEMS: DEVELOPMENT AND APPLICATION**

Kisel V., Gorbachenya K., Yasukevich A., Kuleshov N.

*Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University
Minsk, Republik of Belarus*

Abstract. The review of the main areas of research work of the Research Center for Optical Materials and Technologies was presented. The main obtained research results were considered, the latest innovative developments were shown.

Key words: laser, crystalline material, erbium, ytterbium, development, application.

*Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vekisel@bntu.by*

Основным направлением научно-исследовательских работ НИЦ оптических материалов и технологий филиала БНТУ НИПИ является разработка новых лазерных материалов и твердотельных лазерных систем с диодной накачкой на их основе. Наибольшее распространение получили лазерные излучатели спектрального диапазона около 1 мкм и 1,5 мкм на основе иттербий и эрбий содержащих материалов, соответственно. Подобные лазеры имеют широкий круг практических применений в различных областях науки и техники от изучения быстропротекающих процессов в различных наноматериалах до прецизионной обработки различных материалов и систем локации и дальнометрии.

Основные результаты выполнения научных исследований за последние годы в области лазерной техники и новых материалов:

– проведен цикл работ по спектроскопии ионов Yb^{3+} в кристаллах алюминатов $LuAlO_3$, $YAlO_3$, $CaYAlO_4$ и $CaGdAlO_4$; ванадатов YVO_4 ; боратов $YAl_3(BO_3)_4$ и $GdAl_3(BO_3)_4$; вольфраматов $KY(WO_4)_2$ и $KGd(WO_4)_2$; гранатов $Y_3Al_5O_{12}$ [1–4]; исследованы особенности создания компактных импульсных лазерных систем на основе материалов, легированных ионами Er^{3+} с продольной диодной накачкой, работающие в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимися поглотителями на кристаллах $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ [5];

– разработаны новые высокоэффективные активные и пассивные лазерные материалы на основе указанных кристаллов, а выпуск кристаллов вольфраматов, ванадатов и магний-алюминиевой

шпинели освоен отечественными предприятиями (завод «Оптик», г. Лида, НПП «Соликс», Минск);

– разработаны эффективные лазерные системы с продольной диодной накачкой, работающие в различных режимах генерации (непрерывные лазеры, лазеры с пассивной и активной модуляцией добротности, фемтосекундные лазеры с пассивной синхронизацией мод) и усилении chirпированных ультракоротких импульсов.

Для большинства исследованных материалов лазерная генерация при продольной диодной накачке продемонстрирована впервые в мире, а для известных лазерных материалов, таких как кристаллы вольфраматов $KY(WO_4)_2$ и $KGd(WO_4)_2$ получена генерация фемтосекундных импульсов с рекордным сочетанием выходных параметров излучения, а также разработаны лазеры, работающие в режиме активной модуляции добротности со средними высокими средними выходными мощностями и рекордной оптической эффективностью генерации, что представляет существенный интерес для применений в микрообработке и маркировке различных материалов.

Регенеративное усиление chirпированных фемтосекундных импульсов в лазерных системах на основе кристаллов ванадатов, боратов и алюминатов, легированных трехвалентными ионами иттербия Yb^{3+} , реализовано впервые в мире.

Впервые разработаны и нашли применения в системах локации микрочип-лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната с трехвалентными ионами иттербия, работающие в режиме непрерывной генерации с высокими выходными

мощностями. Установлены преимущества иттербий-содержащих материалов по сравнению с традиционными для спектральной области около 1 мкм неодим-содержащими кристаллами для применения в лазерных системах с прямой диодной накачкой работающих в широком температурном диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ без системы принудительной стабилизации температуры отдельных частей излучателя. Серийный выпуск данных лазерных излучателей освоен ОАО «Пеленг» для использования в системах управления движущимися объектами.

Сотрудниками НИЦ ОМТ разработана оригинальная схема осевой продольной накачки, обладающая пространственной, спектральной и поляризационной независимостью излучения накачки и генерации, что обеспечивает получение генерации излучения с минимальным квантовым дефектом между длинами волн накачки и генерации, что представляет существенный интерес для квазитрехуровневых лазерных материалов, имеющих полосы поглощения и генерации в рамках переходов между различными штарковскими компонентами двух мультиплетов.

Сотрудниками НИЦ ОМТ налажен выпуск кристаллов магний-алюминиевой шпинели, легированной ионами Co^{2+} (рис. 1), являющихся наиболее эффективным материалом для использования в качестве насыщающихся поглотителей эрбиевых лазеров условно безопасного для глаз спектрального диапазона около 1,5 мкм.



Рисунок 1 – Кристаллы магний-алюминиевой шпинели, легированной ионами Co^{2+}

В рамках выполнения НИР совместно с ОАО «Пеленг» разработана линейка лазерных излучателей на основе эрбиевого стекла с продольной диодной накачкой, работающих в режиме пассивной модуляции добротности на базе которых ОАО «Пеленг» освоен выпуск современных импульсных лазерных дальномеров. Предложен принцип построения таких систем, обеспечивающий значительное снижение энергопотребления излучателя по сравнению с лазерами, имеющими боковую схему накачки.

Основными направлениями инновационных разработок НИЦ ОМТ являются:

- разработка новых активных и пассивных кристаллических материалов для твердотельных лазеров, работающих в различных режимах генерации;
- разработка лазерных систем генерации и усиления ультракоротких световых импульсов с диодной накачкой;
- разработка микролазеров и микрочип лазеров с использованием новых лазерных материалов для применений в системах локации и дальнометрии.

Указанные разработки востребованы предприятиями Беларуси (ОАО «Пеленг», УП «НТЦ ЛЭМТ» БелОМО, заводом «Оптик» г. Лида, НПП «Соликс», ЗАО «Солар ЛС» и др.).

Литература

1. $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ crystal as a gain medium for efficient broadband chirped pulse regenerative amplification / A. Rudenkov [et al.] // Opt. Lett. – 2017. – Vol. 42. – P. 2415–2418.
2. $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ -based chirped pulse regenerative amplifier / A. Rudenkov [et al.] // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 2249–2252.
3. Efficient high-power femtosecond $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ laser / A.A. Kovalyov [et al.] // Laser Phys. Lett. – 2015. – Vol. 12, 075801.
4. Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser / K. N. Gorbachenya [et al.] // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41. – P. 918–921.
5. Monolithic 1.5 μm Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ eye-safe laser / K. N. Gorbachenya [et al.] // Optical Materials. – 2019. – Vol. 88. – P. 60–66 (2019).

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 628.74

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОЖАРНЫЕ ИЗВЕЩАТЕЛИ
В СИСТЕМАХ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ

Антошин А.А.¹, Галузо В.Е.², Пинаев А.И.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Дан анализ существующих автоматических пожарных извещателей. Предложен программируемый адаптивный тепловой пожарный извещатель.

Ключевые слова: система пожарной сигнализации, автоматические пожарные извещатели, тепловой пожарный извещатель.

PROGRAMMABLE HEAT FIRE DETECTORS
IN FIRE PROTECTION SYSTEMS

Antoshin A.¹, Haluzo V.², Pinaev A.²

¹Belarusian State Technical University

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The analysis of existing automatic fire detectors is given. A programmable adaptive thermal fire detector is proposed.

Key words: fire alarm system, automatic fire detectors, thermal fire detector.

Адрес для переписки: Галузо В.Е., ул. П. Бровки, 6, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: valga51@yandex.ru

Согласно строительным нормам СН 2.02.03-2019 «Пожарная автоматика зданий и сооружений» выбор оборудования пожарной автоматики в значительной степени определяется функциональным назначением здания (помещения). Одним из наиболее сложных объектов противопожарной защиты являются здания, в которых размещено технологическое оборудование со значительным выделением тепла в процессе работы. Сложность защиты такого объекта обусловлена трудностью в применении пожарных извещателей из-за высокой вероятности ложного срабатывания. Как правило, это обусловлено наличием в окружающей среде вблизи технологических установок большой концентрации примесей в виде аэрозоля, неравномерного распределения температуры среды в разных технологических циклах работы оборудования, а также возникающими пиковыми выделениями тепла. Использование для защиты таких объектов автоматических систем пожаротушения предъявляет высокие требования к своевременности обнаружения пожара при исключении ложных срабатываний. При позднем обнаружении возгорания высок риск снижения эффективности пожаротушения, при ложном срабатывании - возникает угроза персоналу и оборудованию от непосредственного воздействия огнетушащих составов при отсутствии пожара. Все это автоматически поднимает требования к пожарным извещателям.

В таких условиях наиболее широко используются тепловые пожарные извещатели в том числе максимально-дифференциальные. Интерес к те-

пловым пожарным извещателям в последнее время не ослабевает [1]. В указанном обзоре отмечается, что в настоящее время интенсивно развиваются системы раннего предупреждения о пожаре с возможностью обнаружения факторов пожара, возникающих в процессе до пламенного горения. Обращается внимание на то, что системы пожарной сигнализации становятся все более и более «умными», т.е. более широко используются элементы искусственного интеллекта. Например, в [2] предлагается, используя машинное обучение распознавать стадию пожара. Однако основное внимание в обзоре [1] уделяется принципам обнаружения факторов пожара.

Широкое применение для этих целей современных максимально-дифференциальных тепловых извещателей т.е. извещатели с индексом S ограничивается их особенностями, к которым следует отнести отсутствие возможности изменять в процессе эксплуатации минимальную статическую температуру срабатывания, соответствующую классу извещателя. Названная особенность может привести к необходимости устанавливать параметры извещателя на наиболее высокую температуру срабатывания, соответствующую наиболее «тяжелому» режиму работы оборудования, в противном случае повышается вероятность ложных срабатываний.

Решением возникшей проблемы может служить реализация теплового пожарного извещателя с индексом R согласно СТБ ЕН 54-5-2009 или СТБ 2218-2011. Предлагается реализация такого извещателя как автоматически программируемого

теплового извещателя в котором температура срабатывания или время обнаружения пожара будет определяться скоростью нарастания температуры воздушного потока, соответствующей пожару. Управление температурой срабатывания извещателя осуществляются автоматически блоком управления, представляющим из себя либо единое целое с датчиком температуры, либо отдельно расположенным.

Управление извещателем может осуществляться как по командам дополнительных датчиков, так и по командам самого технологического оборудования. Например, оборудование находится в технологическом цикле с минимальным тепловыделением, которое способно вызвать рост температуры со скоростью 1 °С/мин. В этом случае по соответствующей команде показатели чувствительности извещателя автоматически «повышаются», при работе в более «тяжелом» цикле – «понижаются». Аналогичным образом это можно осуществить по сигналам от других датчиков (температуры, освещенности, загазованности и т. п), реализовав дополнительный канал контроля. Если извещатель

контролирует время срабатывания, то по соответствующей команде извещатель сформирует сигнал «пожар» через 29 мин, когда температура изменится на 29 °С и достигнет значения 34 °С при температуре окружающей среды 5 °С. Если тепловыделение и как следствие этого скорость роста температуры больше, то время срабатывания извещателя будет меньше, а температура ниже.

Таким образом используя автоматический программируемый тепловой извещатель, можно существенно повысить эффективность обнаружения возгорания без риска ложных срабатываний. Практическое применение продемонстрировало его высокую эффективность в системах пожаротушения транспортных средств.

Литература

1. Recent Advances on Early-Stage Fire-Warning Systems: Mechanism, Performance, and Perspective / Xiaolu Li [et al.] // Nano-Micro Lett. – 2022. – Vol. 14.
2. Development of a machine-learning approach for identifying the stages of fire development in residential room fires / H. Fang et al.] // Fire Saf. J. – 2021. – Vol. 126.

УДК 629.8

УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАНЫХ

Баранова В.С., Спиридонов А.А., Лешкевич С.В., Ушаков Д.В., Саечников В.А.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены аппаратная и программная реализация архитектуры системы обработки видео данных, интегрированная в оптическую наземную станцию наблюдения за низкоорбитальными космическими объектами Белорусского государственного университета. Система позволяет проводить угловые измерения орбит и идентификацию космических объектов до 7-ой звездной величины в режиме автономного динамического детектирования с точностью до 0,1 град. и независимой временной синхронизацией с точностью до 1 мс.

Ключевые слова: низкоорбитальный космический объект, оптическая станция наблюдения, угловые измерения орбиты, обработка видеоданных.

SPACE OBJECTS ORBIT ANGULAR MEASUREMENTS BY VIDEO DATA PROCESSING SYSTEM

Baranova V., Spiridonov A., Liashkevich S., Ushakov D., Saetchnikov V.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents the video data processing system architecture hardware and software implementation integrated into the optical ground station for monitoring low-orbit space objects of the Belarusian State University. The system allows carrying out orbit angular measurements and space objects identification up to the 7th magnitude in the autonomous dynamic detection mode with an accuracy of 0.1 deg. and independent time synchronization with an accuracy of 1 ms.

Key words: low-orbit space object, optical observation station, orbit angular measurements, video data processing.

*Адрес для переписки: Баранова В.С., ул. Курчатова, 5, Минск 220108, Республика Беларусь
e-mail: vbaranova@bsu.by*

Введение. Методы обработки видеоданных в режиме реального времени позволяют разрабатывать автономные программируемые системы распознавания для астрометрических измерений,

проводимых наземными оптическими станциями. Астрометрические измерения подразумевают определение угловых небесных координат космического объекта в нескольких точках во время его

пролета над пунктом наблюдения с последующей его идентификацией [1].

В работе представлена система обработки видео данных наземной оптической станции наблюдения [2], используемая для угловых измерений орбит космических объектов.

Архитектура системы обработки видео данных. Основные аппаратные и программные компоненты представлены на рис. 1 и включают: компьютеризированное поворотное устройство с сидерическим слежением и максимальной скоростью движения 4 град/сек, оптическую систему с эффективным полем зрения $8^{\circ}14'$ угловых минут на базе широкоугольного апохроматического объектива и полноформатной камеры со скоростью передачи видео данных через HDMI порт до 480 Мбит/с, блок синхронизации времени с функциональными компонентами в виде платы Raspberry Pi 4 и лазера мощностью 5 мВт длиной волны 650 нм, встроенного в призматический корпус для направления импульсного мигания частотой 0,1 Гц в поле зрения объектива, программный блок управления поворотным устройством и считывания данных угловых координат, программный блок считывания видео данных в режиме наблюдения, программный блок обработки видео данных для детектирования космического объекта, программный блок идентификации обнаруженного космического объекта (рис. 1).

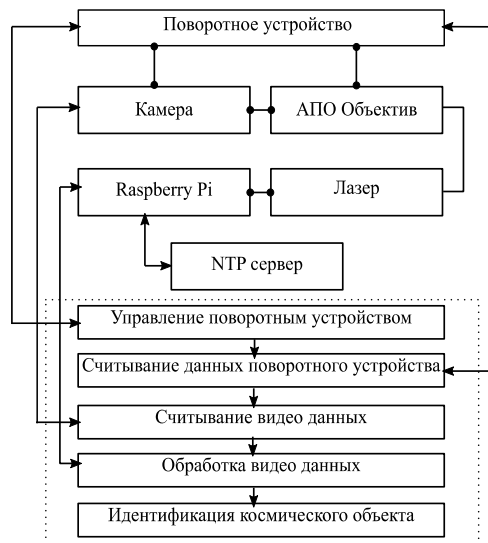
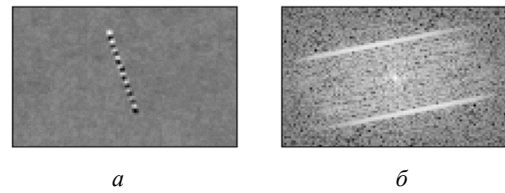


Рисунок 1 – Архитектура системы обработки видеоданных

Метод обработки видеоданных. Видео обработка выступает в качестве оптимизации программных компонентов обнаружения космических объектов, создавая интерактивную платформу всех модулей обработки – фильтрацию, сегментацию, обнаружение, астрометрическую калибровку, конвертацию значений пикселей в угловые координаты и идентификацию космического объекта.

В предлагаемой архитектуре системы обработки видео данных используется метод дифференциации кадров с элементами оптимальной фильтрации для исключения появления шумовых выбросов при обнаружении космических объектов. Шумовые выбросы провоцируются различной степенью тусклости космических объектов, эффектом мерцания звезд и нестабильной турбулентностью атмосферы. Для обнаружения, определения скорости и ориентации движения космического объекта в плоскости кадра используются методы Фурье анализа [3]. Фурье образ разностного изображения 20 последовательных кадров с размером окна 64×96 представлен на рис. 2, а и б).



а – разностное изображение 20 последовательных кадров, б – амплитудный спектр разностного изображения

Рисунок 2 – Фурье анализ разностного изображения

Для преобразования координат пикселей в угловые координаты алгоритм дополнен модифицированной астрометрической калибровкой на основе данных обратной связи с компьютеризированным поворотным устройством оптической системы. Синхронизация времени осуществляется привязкой импульсных миганий лазера к одноранговым эталонным часам удаленных серверов.

Результаты наблюдений. В процессе сопровождения космического объекта методом прыжков предложенная система осуществляет обработку видеопотока, обнаружение объекта в плоскости кадра, конвертацию координат пикселей в угловые небесные координаты, считывание координат в текстовый файл с соответствующими временными метками модуля синхронизации времени, а также идентификацию космического объекта на основе полученных данных. В рамках экспериментальной съемки с целью верификации работы алгоритмов обнаружения системой обработки видео данных и проверки точности определения угловых координат детектируемого космического объекта проведены серии наблюдения.

Согласно сведениям о предстоящих видимых пролетах над точкой наблюдения с координатами $53^{\circ} 54' 16,2''$ с.ш, $27^{\circ} 32' 43,4''$ в.д. проводилось наведение оптической системы на космический объект для интервальной видео съемки с частотой 25 к/с. Масштабирование долей градусов топоцентрической экваториальной системы координат прямого восхождения (RA) и склонения (Dec) составило $0,000811 RA/\text{пиксель}$, $0,001928 DEC/\text{пиксель}$ соответственно.

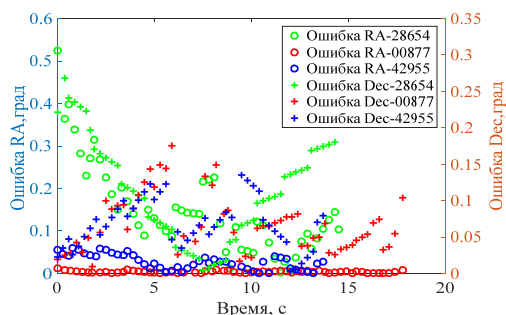


Рисунок 3 – Распределение ошибки угловых измерений

Для оценки точности определения угловых координат детектированных космических объектов разработанной системы проводилось сравнение полученных угловых координат следующих космических объектов с предсказанными значениями SGP модели: NOAA 18(28654), IRIDIUM 133(42955), SL-3 R/B(00877). Распределение ошибки измерения иллюстрирует рис. 4. Исходя из

полученных результатов, следует заключить, что средняя ошибка угловых измерений системой обработки видеоданных составляет 0,1 град в направлении прямого восхождения (*RA*) и 0,05 град. в направлении склонения (*Dec*). Полученные данные позволяют однозначно детектировать и идентифицировать космические объекты.

Литература

1. Baranova, V. S. Autonomous Streaming Space Objects Detection Based on a Remote Optical System / V. S. Baranova, V. A. Saetchnikov, A. A. Spiridonov // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12. – P. 272–279.
2. University Mobile Optical Surveillance System For Low-Earth Space Object Orbit Determination / A. Spiridonov [et al.] // Proc. 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Pisa, Italy, 27–29 June 2022 / IEEE; edited by M. Marracci. – 2022. – P. 486–490.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.

УДК 621.314

ДИАГНОСТИКА МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРАХ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРНОГО УЧЕТА ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Громыко И.Л., Белькин В.О.

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье рассмотрены методы диагностики межвитковых замыканий трансформатора с помощью комплексного анализа данных и сверточных нейронных сетей. Применение искусственного интеллекта позволит в режиме реального времени, не выводя оборудование из работы, анализировать информацию, классифицировать различные отклонения и диагностировать дефекты.

Ключевые слова: трансформатор, нейронная сеть, диагностика, классификация, прибор.

DIAGNOSTICS OF INTER-TURN CIRCUITS IN TRANSFORMERS USING INSTRUMENT DATA ACCOUNTING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Hramyka I., Belkin V.

*Belarusian State University of Transport
Gomel, Republic of Belarus*

Abstract. The article discusses methods for diagnosing transformer inter-turn circuits using complex data analysis and convolutional neural networks. The use of artificial intelligence will allow analyzing information in real time, classifying various deviations and diagnosing defects without taking the equipment out of operation.

Key words: Transformer, neural network, diagnostics, classification, device.

*Адрес для переписки: Громыко И.Л., ул. Громыковой, 3, кв. 27, Гомель 246030, Республика Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru*

На сегодняшний день более 50 % трансформаторов системы электроснабжения железнодорожной отрасли страны отработали установленный срок службы – 25 лет. В соответствии с положением разработан новый комплексный метод технической диагностики, который позволяет повысить надежность работающих трансформаторов; сократить время ремонтов; увеличить срок службы трансформаторов; значительно сократить стоимость ремонтных работ.

Суть метода заключается в следующем: первичные преобразователи подключаются к трансформатору, регистрируют параметры и отправляют сигнал в базовый блок микроконтроллера

прибора, в котором искусственный интеллект сравнивает измеренные значения с заданными и классифицирует неисправность.

При проведении экспериментальных исследований, были предусмотрены следующие мероприятия:

- МКЗ проводились в режиме реального времени на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением;
- МКЗ выполнялось на двух, пяти и десяти витках;

В тоже время проводился анализ информации с использованием следующих данных:

- напряжений и токов первичной и вторичной обмоток;
- активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;
- анализировался состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;
- измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток;
- проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения;
- выполнено более 500 измерений при нормальном режиме работы и при межвитковом замыкании с интервалом в 1 секунду при 7 различных активных и активно-индуктивных нагрузках.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным и масляным охлаждением, применяемые при продольном электроснабжении железнодорожных потребителей и в линиях автоматической блокировки [1].

Микропроцессорное устройство (рис. 1) включает следующее оборудование: датчики; часы реального времени; модернизированный под микропроцессорное устройство пробник Паздникова; платы Z7-Lite 7010.



Рисунок 1 – Внешний вид микропроцессорного устройства

Применяемые датчики:

1. Датчики температуры MLX90614ESF (более трех). Это инфракрасный термометр для бесконтактных измерений температуры. Датчик измеряет температуру объекта бесконтактным способом и температуру окружающей среды на кристалле датчика.
2. Датчик температуры, давления и влажности VME280.
3. Энергометры PZEM-004t-100A (шесть). Данный энергометр позволяет измерять переменные ток, напряжение, активную мощность, электроэнергию, частоту.
4. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADS1115.

Пробник Паздникова. Предназначен для проверки обмоток трансформаторов, дросселей, электродвигателей, реле, магнитных пускателей, контакторов и других катушек. Пробником удается определить не только целостность обмотки, но и наличие в ней короткозамкнутых витков.

В качестве основы микропроцессорного устройства использовалась плата Z7-Lite 7010. Это программно-аппаратная платформа, предназначенная для приема, анализа, хранения и пере-

дачи информации. На данной программно-аппаратной платформе был разработан одноплатный компьютер, который принимает информацию с датчиков, обрабатывает ее, анализирует и затем через локальную сеть выводит на экран полученные результаты.

Основой данной платы служит программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) XCZCLG400-1 для данной интегральной схемы, в САПР Vivado 2018.3 был разработан блок-дизайн программной части микропроцессорного устройства [2].

Для классификации неисправностей используется сверточная нейронная сеть, которая в режиме реального времени анализирует информацию, не выводя трансформатор из работы, что предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения. При этом затраты на внедрение данной технологии нейромоделирования относительно невелики, а эффективность от применения будет существенной.

Примеры изображений, которые передаются на нейронную сеть, отвечающую за идентификацию по отношению напряжений, приведены на рис. 2.

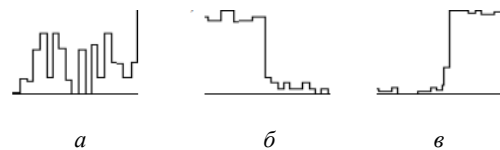


Рисунок 2 – Изображения на входе нейронной сети
а – нормальный режим работы, б – МКЗ на первичной обмотке, в – МКЗ на вторичной обмотке

После детектирования изображений производится окончательный анализ, результатом которого является одно из чисел: 0, 1 или 2. Данные числа обозначают те же неисправности, что и номера классов на выходе нейронной сети. В ходе исследования были построены графики (рис. 3 и 4), где по вертикальной оси были отложены номера неисправностей, а по горизонтальной – время, измеряющееся в секундах.

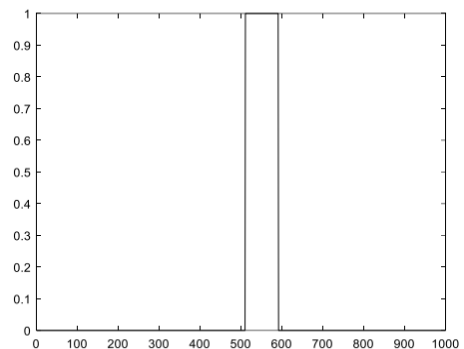


Рисунок 3 – Результаты проведения испытаний при обнаружении МКЗ на первичной обмотке

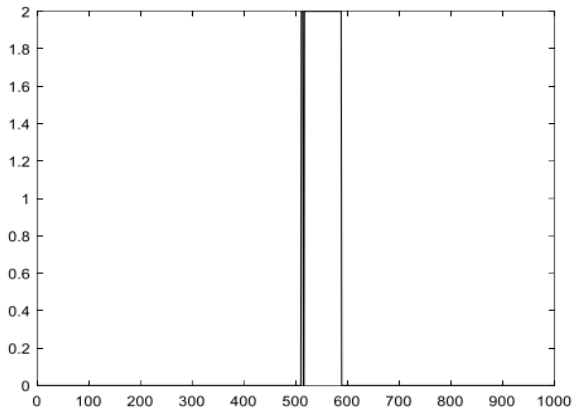


Рисунок 4 – Результаты проведения испытаний при обнаружении МКЗ на вторичной обмотке

Научная новизна материала статьи заключается в практическом применении сверточных нейронных сетей, которые в режиме реального времени анализируют информацию, классифицируют различные отклонения и диагностируют определенный вид дефекта. Практическая значимость – в снижении неплановых отказов, заблаговременном предупреждении о развитии повреждения.

Литература

1. Пехота, А. Н. Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2020. – № 2. – С. 24–28.

2. Пехота, А. Н. Диагностика трансформаторов с помощью сверточных нейронных сетей / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 30–36.

УДК 004.021

КРИТЕРИИ ОПТИМУМА ПРИ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ СИГНАЛОВ

Горин А.В.

ФГБОУ «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Для задачи, имеющей место в теории оптимального управления и заключающейся в выборе оператора, приближающего обрабатываемые сигналы к истинному, рассматриваются критерии оптимума при комплексировании сигналов.

Ключевые слова: комплексирование, критерий оптимума.

OPTIMAL CRITERIA BY SIGNAL FUSION

Gorin A.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. For a problem that takes place in the theory of optimal control and consists in choosing an operator that approximates the processed signals to the true one, optimal criteria are considered for fusion.

Key words: fusion, optimum criterion.

Адрес для переписки: Горин А.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: tongornani@mail.ru

При комплексировании информации возможны различные подходы к определению критерия оптимума. Среди возможного множества задач выделим задачу, имеющую место в теории оптимального управления (1): случайная функция $\Sigma(s)$ наблюдается в некоторой области \mathcal{S} изменения аргумента s , необходимо найти оператор P , приближающий ее возможно более близко к случайной функции $\mathcal{W}^*(y)$ ($\mathcal{W}^*(y)$ является оценкой случайной функции $\mathcal{W}(y)$) в области \mathcal{Y} изменения аргумента y :

$$\mathcal{W}^*(y) = P\Sigma(s). \quad (1)$$

При комплексировании N случайных функций (1) можно переписать как

$$S_f = P(\Sigma) = P(\sigma_1, \dots, \sigma_N)$$

где S_f – комплексированный сигнал; P – оператор, доставляющий экстремум некоторому критерию; $\Sigma = \sigma_1, \dots, \sigma_N$ – множество сигналов, к которому применяется оператор P ; σ_i ($i = \overline{1, N}$) – комплексированный сигнал, представляющий собой аддитивную смесь полезного сигнала и шума.

После постановки задачи следует определение критерия оптимума. Одними из самых распространенных критериев являются критерии, оценивающие ошибку приближения.

Критерий минимума среднеквадратической ошибки:

$$E(y) = \mathcal{W}^*(y) - \mathcal{W}(y) = P\Sigma(s) - (y),$$

$$\eta = M[|E(y)|^2] = \min. \quad (2)$$

Обобщение (2) критерия минимума среднеквадратической ошибки:

$$f(M[E], D[E]) = extr, \quad (3)$$

где M и D – операторы математического ожидания и дисперсии.

Если закон распределения ошибки (шума) определяется математическим ожиданием и дисперсией, частным случаем (3) является критерий максимума вероятности того, что ошибка не выйдет из заданных пределов:

$$P(|E(\psi)| < \varphi(\psi)) = max, \quad (4)$$

где $\varphi(\psi)$ – заданная функция.

Вторым частным случаем является критерий минимума предела, который не превышает модулем ошибки:

$$\varphi(\psi) = min \text{ при } P(|E(\psi)| < \varphi(\psi)) = p, \quad (5)$$

где p – данное положительное число, меньшее единицы.

Если комплексуются векторные сигналы, обобщением (3) является критерий экстремума заданной функции математических ожиданий, дисперсий и корреляционных моментов составляющих вектора ошибки:

$$f(\xi_1, \dots, \xi_M; k_1, \dots, k_{MM}) = extr, \quad (6)$$

$$\text{где } \xi_v = M[E_v(\psi)], k_{v\mu} = M[E_v^0(\psi)E_\mu^0(\psi)],$$

$$v\mu = \overline{1, N}.$$

Критерии (3) и (4) – частные случаи (6).

Другим важным критерием, обобщающим (2), является критерий минимума среднего риска [3]:

$$\rho = \iint_{\lambda \hat{\lambda}} r(\lambda, \hat{\lambda}) p(\lambda, \hat{\lambda}) d\lambda d\hat{\lambda}, \quad (7)$$

где λ – оцениваемые параметры вероятностных распределений, которые также могут являться характеристиками параметров принимаемых сигналов; $\hat{\lambda}$ – результаты измерения параметров; $r(\lambda, \hat{\lambda})$ – функция потерь; $p(\lambda, \hat{\lambda})$ – совместная плотность вероятности параметров λ и их оценок $\hat{\lambda}$.

Если в качестве функции потерь принимается квадратичная функция потерь $r(\lambda, \hat{\lambda}) = (\lambda - \hat{\lambda})^2$, средний риск $\rho = \langle (\lambda - \hat{\lambda})^2 \rangle$ является средне-

квадратической ошибкой, а критерий минимума среднего риска – критерием минимума среднеквадратической ошибки.

Другим типом критерия, отличным от рассмотренных выше, являются экспертные системы, реализуемые, например, теорией Демпстера-Шефера [4]. Имея преимущество над байесовским подходом, которое заключается в отсутствии необходимости знать предыдущее состояние измеряемых процессов, теория Демпстера-Шефера (обладая ассоциативностью и коммутативностью) позволяет комплексировать произвольное число сигналов.

Общее для методов, рассмотренных выше и теории Демпстера-Шефера является уменьшение метрики: если критерии (2)–(7) уменьшают евклидово расстояние между комплексированными векторами, то теория Демпстера-Шефера уменьшает расстояние Минковского.

Для критериев (2), (3), (6) и (7) и теории Демпстера-Шефера общим является выражение, определяющие весовые коэффициенты:

$$\omega_i = \frac{1}{\sum \frac{1}{d_i}}$$

где d_i – дисперсия сигнала.

Для задачи, возникающей в теории оптимального управления, рассмотрены критерии оптимума, их связи и обобщения.

Литература

1. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – 3-е изд., исправ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1962. – 883 с.
2. Андреев, Н. И. Общее условие экстремума заданной функции среднеквадратичной ошибки и квадрата математического ожидания ошибки динамической системы / Н. И. Андреев // Автоматика и телемеханика. – 1959. – Т. 20, вып. 7. – С. 833–838.
3. Волосюк, В. К. Статистическая теория систем дистанционного зондирования и радиолокации / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко ; под ред. В. Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
4. Clarence, W. de Silva. Sensor Systems. Fundamentals and Applications / W. de Silva Clarence. – Boca Raton.: Taylor & Francis Group, 2017. – 720 p.

УДК 539.21, 535.317.61-34, 548.732

ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

Дудчик Ю.И., Субач А.А.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описана методика цифровой рентгенографии слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов с использованием лабораторных источников рентгеновского излучения. Методика включает получение двух изображений объекта под различными углами к оси рентгеновского пучка и последующую цифровую обработку изображений путем вычитания одного изображения из другого. Применение указанной методики позволило существенно повысить контраст изображения объекта.

Ключевые слова: рентгеновские лучи, цифровая рентгенография.

DIGITAL RADIOGRAPHY OF WEAKLY ABSORBING X-RAY OBJECTS

Dudchik Y., Subach A.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A technique for digital radiography of weakly absorbing X-ray objects using laboratory X-ray sources is described. The technique involves obtaining two images of an object at different angles to the X-ray beam axis and subsequent digital image processing by subtracting one image from the other. The use of this technique made it possible to significantly increase the contrast of the object image.

Key words: X-rays, X-ray radiography.

Адрес для переписки: Дудчик Ю.И., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Рентгеновские лучи широко используются для просвечивания изделий с целью определения внутренних неоднородностей. Для этих целей используются, например, проекционные рентгеновские микроскопы. Для получения контрастного изображения объекта необходимо, чтобы различные участки объекта по-разному поглощали излучение. Это условие, как правило, не выполняется для материалов с небольшим порядковым номером – полимеров, пластиков, полимерных композитов, которые слабо поглощают рентгеновские лучи. Изображения таких объектов получают методом фазового контраста [1]. В таких материалах показатель преломления рентгеновского излучения, как правило, больше, чем показатель ослабления. Поэтому задача состоит в том, чтобы выделить из общего потока излучения, формирующего изображение объекта, ту часть, которая получается в результате преломления излучения на границах раздела неоднородностей объекта. Известны несколько методов практической реализации метода фазового контраста: с использованием микрофокусных рентгеновских аппаратов; с использованием квазипараллельного рентгеновского пучка, с использованием кодирующей диафрагмы. Основным недостатком вышеуказанных методов является то, что для получения изображения объектов требуется длительная экспозиция из-за малой интенсивности рентгеновского пучка.

Нами разрабатывается метод получения изображения обсуждаемых объектов, который включает получение двух изображений объекта под различными углами к оси рентгеновского пучка и последующую цифровую обработку изображений путем вычитания одного изображения из другого.

Этот метод близок к описанному нами ранее методу рентгеновской стереофотографии [2].

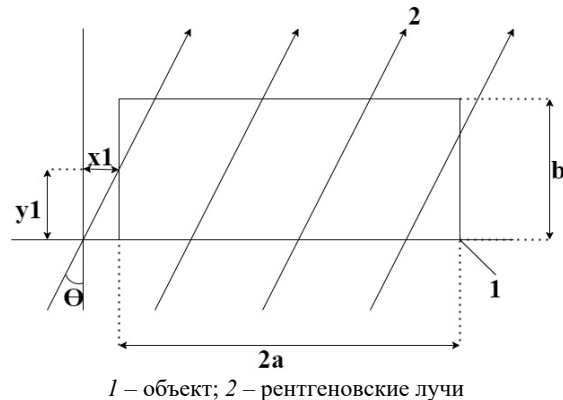


Рисунок 1 – Расположение объекта относительно рентгеновского пучка

Суть методики поясняет рис. 1, на котором показан объект в виде прямоугольника (1), на который падают рентгеновские лучи 2. Длина прямоугольника в направлении оси x равна $2a$, в направлении оси y – b . Рентгеновские лучи падают на объект под углом θ к оси y . Интенсивность пучка I , прошедшего через объект определяется как $I = I_0 T$, где I_0 – интенсивность падающего пучка, T – пропускание объекта. Пропускание объекта T зависит от угла падения θ рентгеновских лучей и от расстояния x_1 между точкой пересечения лучом оси x и объектом (рис. 1). Для рентгеновских лучей, которые пересекают объект под углом $\theta = 0$ пропускание $T_1 = \exp(-kb)$, при $-a < x < a$ и $T = 1$ для лучей, которые не пересекают объект, где k – показатель ослабления рентгеновских лучей для материала объекта. Контраст изображения объекта K определяется по Веберу как $K = (I_{max} - I_{min}) / I_{max}$, где

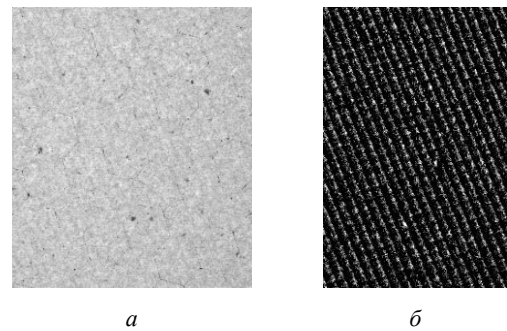
I_{max} и I_{min} – интенсивность прямого и прошедшего пучка соответственно, или яркость изображения и фона. Для случая $\vartheta = 0$ контраст $K_1 = (1 - \exp(-kb))$. Для рентгеновских лучей, которые пересекают объект по заданным углом $\vartheta > 0$ и на расстоянии x_1 от границы объекта (рис. 1) пропускание для малых углов ϑ определяется как $T_2 = \exp(-k(b-x_1/\vartheta)) = \exp(-kb)\exp(kx_1/\vartheta)$, где $x_1 < b\vartheta$. Для рентгеновских лучей, пересекающих ось x из интервала $-a < x < (a-b\vartheta)$ при малых ϑ пропускание $T_2 \approx \exp(-kb)$. Для изображения объекта, которое получается путем вычитания изображения при угле $\vartheta = 0$ из изображения, полученного при $\vartheta \neq 0$ значение параметра I_{min} близко к нулю для интервала значений x : $(-a) < x < (a-b\vartheta)$. Для x из интервала $(-b\vartheta - a) < x < (-a)$ и $(a-b\vartheta) < x < a$ значение яркости изображения больше нуля и приблизительно определяется как $I_0 \exp(-k(b-x/\vartheta))$. Таким образом, в результате вычитания двух изображений, полученных при различных углах ϑ , получается более контрастное изображение с контрастом $K \approx 1$.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть источником излучения служит рентгеновская трубка с медным анодом. Энергия фотонов K_α -линии атомов меди равна 8 keV . Пусть в качестве объекта используется параллелепипед из полипропилена толщиной $b = 200 \text{ мкм}$. Химическая формула полипропилена $(C_3H_6)_n$, плотность $0,9 \text{ г/см}^3$, длина пробега $(1/k)$ фотонов с энергией 8 keV в полипропилене составляет 2920 мкм . При нулевом угле падения квазипараллельного рентгеновского пучка на образец ($\vartheta = 0$) его пропускание пучка $T_1 = \exp(-kb) = 0,93$. Для угла падения $\vartheta = 1^\circ$ значение расстояния $x = b\vartheta = 35 \text{ мкм}$. Для фотонов, пересекающих образец под углом $\vartheta = 1^\circ$ и в интервале от $x = -b\vartheta - a$ до $x = -a$ пропускание образца меняется от 1 до 0,93.

Необходимо отметить, что предлагаемый метод получения изображений объектов применим именно для объектов из материала с малым порядковым номером и соответственно с большим значением пробега фотонов в веществе. Например, пробег фотонов $(1/k)$ с энергией 8 кэВ в полипропилене составляет 2920 мкм , в стекле – 130 мкм , в меди – 22 мкм , в молибдене – $6,4 \text{ мкм}$. Для таких материалов параметр $(1/k)\vartheta$ мал, и заметить изменения в яркости изображения на пленке или матрице камеры затруднительно.

В качестве объекта исследования выбрана сетка из пластика, изображение которой получено с использованием рентгеновских лучей от рентгеновской трубки с медным анодом, напряжение

на аноде составляло 16 кВ , ток 2 мА . Изображение было записано с помощью рентгеновской камеры Photonic Science: число пикселей камеры равно 4008×2670 . Размер пикселя камеры составляет $4,5 \text{ мкм}$. При съемке объекта использовалась функция биннинга. Расстояние от источника до объекта = 700 мм , расстояние от объекта до камеры 10 мм . Были получены два снимка объекта: один при угле ориентации относительно пучка ϑ , равном 0° , второй – при ϑ , равном 1° .



a – изображение сетки в рентгеновских лучах;
 b – субтракционное изображение сетки

Рисунок 2 – Изображения пластиковой сетки в рентгеновских лучах

На рис. 2 показано исходное изображение пластиковой сетки в рентгеновских лучах (a) (контраст $K = 0,59$) и изображение (b) (контраст $K = 0,98$). Контраст K изображения сетки рассчитывался по методу, предложенному Михельсоном: $K = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$, где I_{max} и I_{min} – максимальное и минимальное значение яркости пикселя в матрице данных изображения.

Таким образом, показано, что использование разработанной субтракционной методики для получения изображений объектов позволяет повысить контраст изображения.

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Endrizzi, M. X-ray phase-contrast imaging / M. Endrizzi // Nucl. Instr. Meth. A. – 2018. – V. 878. – P. 88–98.
2. Дудчик, Ю. И. Получение изображения объектов в рентгеновских лучах методом стереофотографии / Ю. И. Дудчик // Материалы двенадцатой Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2019». – Минск, БНТУ. – 2019. – С. 19–20.

УДК 681.2

СРАВНЕНИЕ АППАРАТОВ РЕО В РАЗРЕЗЕ МОБИЛЬНОГО МОНИТОРИНГА Ермакович С.А.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен ряд аппаратов реографии, существующих на данный момент в разрезе мобильного мониторинга.

Ключевые слова: мобильная реография, реограф, неинвазивные исследования.

COMPARISON OF REO DEVICES IN MOBILE MONITORING Yermackovich S.

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. A number of rheography devices that currently exist in the context of mobile monitoring are considered.

Key words: mobile rheography, rheograph, non-invasive examinations.

Адрес для переписки: Ермакович С.А., пр. Науки, 27, Санкт-Петербург 195256, Российская Федерация
e-mail: ermak7673@gmail.com

Данная работа является обзорной и носит обобщающий характер. Далее будут рассмотрены проблемы современных методов реографии, а также поставлена цель, задачи и обусловлена актуальность дальнейших разработок в данной сфере.

Актуальность вопроса реабилитации после медицинского вмешательства или получения травм не ставится под сомнение. О ходе восстановления тканей можно судить многими прямыми и косвенными способами, в числе которых простой визуальный осмотр, анализы или физиологические исследования.

В настоящее время, при всем разнообразии методов исследования органов и тканей имеется возможность судить о скорости и качестве восстановления локальной гемодинамики с помощью реографии. Преимущества выбранного метода раскрываются при рассмотрении случаев, в которых требуется исследовать гемодинамику на протяжении длительного периода. В отличие от доплеровского сканирования не требуется введение контрастного вещества в кровь, что ускоряет процесс. Ангиография же позволяет получить объемное изображение сосудов, но является инвазивной [1].

Реовазография (РВГ) – частный случай реографии, при котором исследуются периферийные кровеносные сосуды, является одним из самых эффективных методов исследования кровообращения, обеспечивающий получение непрерывной информации о состоянии гемодинамики на протяжении длительного периода [2]. Следовательно данный метод можно использовать для суточного мониторинга, получая статистику восстановления сосудов в формате «online».

Так как возобновление трофики тканей является основополагающим фактором регенерации [3], возможность круглосуточного наблюдения может помочь в подборе эффективных мероприятий при реабилитации. Но встает вопрос мобильности аппаратов, позволяющих производить мониторинг на

протяжении длительного времени. На отечественном рынке есть ряд решений, которые активно используются в медицине на данный момент:

– реограф-полианализатор РГПА-6/12 «Реан-Поли» (рис. 1) производится в Таганроге фирмой ООО «Медиком МТД». Кроме реограмм, такой полианализатор может регистрировать электрокардиограмму, фотоплетизмограмму, рекурсию дыхания, электроэнцефалограмму, кожно-гальваническую реакцию, температуру, электромиограмму. Является стационарным прибором [4]. Финальная обработка и визуализация данных производится на персональном компьютере. Существует 2 вариации 6-канального реографа с двуканальным и шестиканальным полиграфом, но с точки зрения реографии оба варианта идентичны. Первичную обработку сигналов производит 22-х разрядный АЦП, аппарат обладает ультранизким уровнем шума с амплитудой не более 0,003 Ом, зондирующий ток имеет частоту 56 или 112 кГц при силе в 1.5 мА [5].



Рисунок 1 – Реограф-полианализатор РГПА-6/12 «Реан-Поли»

– реограф «Мицар-РЭО» (рис. 2) также производится в России (С-Петербург). Этот портативный прибор может использоваться как в стационарных условиях, так и на выездных обследованиях. Одного комплекта аккумуляторов хватает на 50 часов работы (снятие реограммы или ЭКГ) без подзарядки. Аппарат является портативным, но финальное представление данных производится на компьютере. Прибор имеет 4 реографических канала, 4 канала дифференциальной реограммы и 1 канал электрокардиограммы. Первичная обра-

ботка сигнала осуществляется с помощью 12 разрядного АЦП, частота зондирующего тока 50 и 100 кГц, при силе 0,5 мА. Существенный минус данного варианта – устаревший порт подключения к ПК («СОМ») [6].



Рисунок 2 – Реограф «Мицар-РЭО»

Реограф «Диамант-Р» (рис. 3) также производится в С-Петербурге. Аппарат имеет 4 РЕО канала и 1 ЭКГ канал, частоты зондирующего тока 28, 115 и 230 кГц. Подключение к компьютеру осуществляется с помощью «СОМ» порта [7].



Рисунок 3 – Реограф «Диамант-Р»

Сравнив существующие приборы РЕО на отечественном рынке, можно сделать вывод, что аппараты, имеющие возможность проведения исследования не в стационарных условиях, не могут использоваться для круглосуточного мониторинга, так как передача данных в ПК осуществляется посредством кабеля через устаревший последовательный порт. По той же причине необходимо при-

сутствие медицинского работника непосредственно в месте проведения исследования.

Цель дальнейших разработок – создание аппарата, способного передавать данные реографии по современным каналам связи, удаленно. Это позволит производить мониторинг гемодинамики в комфортных для пациента условиях и избавит от необходимости присутствия обслуживающего прибор персонала.

Литература

1. Столыпинский вестник / Д. А. Узеньков [и др.] // Теоретические основы проектирования блока регистрации реовазографического сигнала. – 2021. – Т. 4, № 3.
2. Мугерман, Б. И. Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта / Мугерман Б. И., Багманова Р. Г. // О целесообразности применения реоэнцефалографии для диагностики при шейном остеохондрозе с недостаточностью вертебробазиллярного кровообращения. – 2007. – № 2.
3. Вестник восстановительной медицины / М. А. Хан [и др.] // Современные технологии медицинской реабилитации при травме верхней конечности у детей. – 2020. – № 4.
4. Официальная информация производителя: брошюра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://medicom-mtd.com/PDF/booklet/catalogue_Rean-Poly_Ru.pdf.
5. Официальная информация производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medsnab.ru/shop/diagnosticheskoe/reografy/reograf-mitsar-geo>.
6. Официальная информация производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ambimed.ru/product>.

УДК 621.382

КЛАССИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭКБ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР Ефименко С.А., Смолич В.А.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Работоспособность электронной аппаратуры в широком диапазоне температур окружающей среды определяется в первую очередь работоспособностью используемой элементной компонентной базы (ЭКБ). В работе приведены обзор и классификация оборудования для тестирования в серийном производстве микросхем и полупроводниковых приборов в диапазоне температур. Показаны основные характеристики автоматизированных и неавтоматизированных устройств, предназначенных для задания температур при тестировании.

Ключевые слова: измерение, тестирование, микросхемы, полупроводниковые приборы, диапазон температур.

CLASSIFICATION OF DEVICES FOR THE ORGANIZATION OF ECB TESTING IN THE TEMPERATURE RANGE

Efimenko S., Smolich V.

JSC "INTEGRAL"
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The operability of electronic equipment in a wide range of ambient temperatures is determined primarily by the operability of the element component base (ECB) used. The paper provides an overview and classification of equipment for testing in the mass production of microcircuits and semiconductor devices in the temperature range. The main characteristics of automated and non-automated devices designed to set temperatures during testing are shown.

Keywords: measurement, testing, microchips, semiconductor devices, temperature range.

Адрес для переписки: Ефименко С.А., ул. Казинца И.П., 121-А, Минск 220108, Республика Беларусь
e-mail: SEfimenko@integral.by

ЭКБ для аппаратуры массового применения (коммерческой) должна быть работоспособна в диапазоне от минус 10 °С до плюс 70 °С, для промышленной аппаратуры – от минус 20 (иногда указывают минус 40) до плюс 85 °С, для автомобильной электроники – от минус 40 до плюс 125 °С, для аппаратуры специального применения и для космоса – от минус 60 °С до плюс 125 °С. Для того, чтобы гарантировать работоспособность элементной базы в этом диапазоне температур необходимо проводить их тестирование с использованием специального оборудования. Процесс тестирования обычно включает в себя проведение функционального контроля и проверки электрических параметров в соответствии конструкторской документацией и техническими условиями на микросхему [1]. В серийном производстве особую важность приобретает производительность процесса тестирования, поскольку большая длительность тестирования может привести к росту стоимости микросхем.

В общем случае для проведения тестирования ЭКБ в диапазоне температур в серийном производстве используется программно-аппаратный комплекс, состоящий из тестера или автоматизированной измерительной системы (АИС) с персональным компьютером (ПК) и устройства, обеспечивающего задание температуры с требуемой точностью.

ПК обеспечивает управление комплексом, разработку и отладку специальных измерительных программ. АИС обеспечивает процесс проведения функционального контроля и измерение электрических параметров микросхем [2]. В настоящее время в отечественном серийном производстве для тестирования ЭКБ в широком диапазоне температур используется большое количество АИС, которые работают в комплексе с проходными камерами и УИК.ИМ. Однако в последнее время появилось ряд новых устройств для задания температуры при тестировании ЭКБ, классификация которых приведена на рис. 1.

В качестве основных неавтоматизированных устройств здесь представлены два типа УИК.ИМ 1-019 (АО «НПЦ «ЭлТест», Санкт-Петербург), и ThermoJet (SP SCIENTIFIC, США).

В мелкосерийном производстве для тестирования микросхем в диапазоне температур обычно применяются устройства типа УИК.ИМ. Диапазон подаваемых температур устанавливается в пределах от минус 110 °С до плюс 150 °С. Время достижения теплового режима составляет 10–20 минут, расход жидкого азота – 4 кг/ч, производительность – до 60 приборов в час. Устройства УИК.ИМ отличаются относительно низкой стоимостью.

Устройства термостатирующие ThermoJet и Thermostream используют терморукав, обеспечивают контролируемый диапазон температур от минус 80 °С до плюс 225 °С с точностью 0,5–1 °С.

Они позволяют производить интенсивное изменение температуры даже в режиме 24/7 (24 часа, 7 дней в неделю) в цикле от +125 °С до –55 °С / от –55 °С до + 125 °С. Эти устройства характеризуются самым малым временем достижения требуемой температуры – 10–15 секунд. Устройства не требуют использования внешнего источника охлаждения, такого как жидкий диоксид углерода или азот, а используют стандартные, экологически чистые хладагенты.



Рисунок 1 – Классификация устройств для задания температур при тестировании ЭКБ

Отсутствие длинных соединительных кабелей у неавтоматизированных устройств позволяет производить тестирование ЭКБ на частотах более 20 МГц.

Недостатком таких устройств является возможность одновременного тестирования только одной микросхемы. Автоматизировать процесс тестирования на крайних температурах возможно путем использования устройств термостатирующих ThermoJet ES и ATS-710-M Thermostream в комплекте с гравитационными хендлерами MH200 EVO/ MH250 EVO, о чем более подробно рассмотрено в литературе [2].

Более производительными устройствами по сравнению с выше рассмотренными являются проходные камеры ПКВ-1, ПКВ-2, ПКВ-2М, ПКВ-3, ПКВ-4, ПКВ-5 (НИИПП г. Воронеж).

Отличаются камеры ПКВ друг от друга размерами используемых спутников-носителей 19×25 мм (ПКВ-1), 32×32 мм (ПКВ-2 и ПКВ-2М), 51×51 мм (ПКВ-3), 94×94 мм (ПКВ-4), 63×63 мм (ПКВ-5). Отклонение температуры в рабочей зоне от ±3 до ±5 °С, производительность тестирования – от 400 до 2000 приборов в час. Недостатком проходных камер является наличие дополнительного жгута, что создает серьезные проблемы на высоких частотах.

Проходная камера ЗАО «ПКК Миландр» имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с камерами ПКВ: более высокая точность поддержания заданной температуры ±1,5 °С, меньший

интервал времени достижения предельных температур – 20 вместо 30–50 мин., уменьшенный расход азота – 2 литра в час вместо 6.

Хендлер (англ. Handler) – манипулятор, специализированное устройство для сортировки микросхем по группам. Для измерения микросхем при крайних температурах при наличии существенных объемов выпуска используются хендлеры компаний: Multitest, Exatron, Rasco, Microtec, Seiko-Epson, Chroma, JHT, Advantest и др.

Хендлеры обеспечивают автоматизированное перемещение микросхем в температурной камере с лотка в контактирующий узел, подключенный к АИС, и перемещение в другие лотки после тестирования. Лотки отдельные для годных по электрическим параметрам микросхем и для бракованных. Хендлеры обеспечивают одновременное тестирование как одной микросхемы так и параллельное тестирование 2, 4 или даже 8 микросхем («Multiple Site»-режим) и обеспечивают производительность тестирования от 500 до 6600 приборов в час. Оборудование такого типа стоит сотни тысяч дол-

ларов, поэтому основной недостаток установок Хендлер является высокая стоимость.

Более подробно характеристики установок рассмотрены в литературе [2].

Таким образом, сегодня на рынке существует достаточно большой ряд автоматизированных и неавтоматизированных устройств, задающих температуру при тестировании ЭКБ. Выбор конкретного устройства осуществляется исходя из требуемого температурного диапазона, объема выпуска ЭКБ и финансовой возможности осуществить закупку.

Литература

1. Ефименко, С. А. Модернизация метода тестирования мощной интегральной микросхемы или полупроводникового прибора в диапазоне температур / С. А. Ефименко, Н. В. Кособуцкая // 14-я международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2021». – Минск: БНТУ. – 2021.

2. Белоус, А. Особенности организации тестирования ЭКБ в диапазоне температур / А. Белоус, С. Ефименко, В. Смолич // «Электроника: Наука, Технология, Бизнес». – 2022. – № 6.

УДК 621.3.049.77: 681.586

МОДУЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Шевченко А.В.

ОАО «МНИПИ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты разработки модуля параметрического контроля для измерения параметров окружающей среды: температуры, влажности, атмосферного давления, освещенности, скорости потока воздуха.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, контроль температуры, влажности, атмосферного давления, освещенности, скорости потока воздуха.

PARAMETRIC CONTROL MODULE FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS Zdorovtsev S., Kushnerov D., Shevchenko A.

OJStock "MNIPI"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of the development of a parametric control module for measuring environmental parameters such as: temperature, humidity, atmospheric pressure, illuminance, air flow rate are presented.

Keywords: wireless sensor networks, temperature control, humidity, atmospheric pressure, illuminance, air flow rate.

Адрес для переписки: Здоровцев С.В., ул. Я. Коласа, 73, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ieic@mail.ru

В настоящее время широкое распространение получили беспроводные сенсорные сети. Последние разработки в области MEMS-сенсоров и беспроводной связи позволили создать высокоэффективные, маломощные, миниатюрные, интеллектуальные датчики, которые могут быть развернуты в широком пространстве и могут быть связаны через беспроводные каналы связи и Интернет для различных гражданских и военных приложений [1–2].

В работе представлены результаты разработки модуля параметрического контроля для беспроводных сенсорных сетей, предназначенного для измерения параметров окружающей среды: температуры, влажности, атмосферного давления, освещенности, скорости потока воздуха.

Структурная схема модуля представлена на рис. 1. В состав модуля входят датчики температуры, влажности, атмосферного давления, освещенности, скорости потока воздуха. Для отоб-

ражения измерительной информации непосредственно в самом приборе использован модуль TFT дисплея 1.8 Inch ST7735 TFT LCD 4 IO 128*160 [3]. Модуль удобен для применения в качестве индикатора различных радиоэлектронных приборах, требующих одновременного представления текстовых данных и графики. Информация передается на дисплей по шине SPI. Модуль TFT дисплея предназначен для работы совместно с различными микроконтроллерами. В данном случае индикатор модуля содержит контроллер ST7735S и светодиодную подсветку.

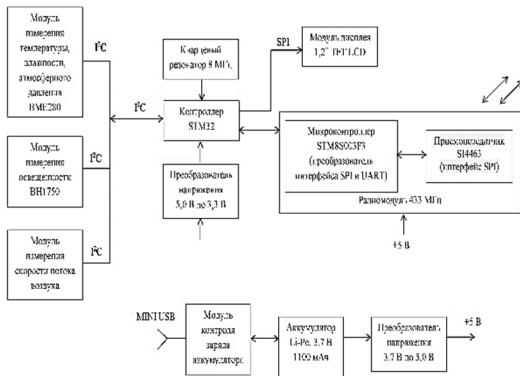


Рисунок 1 – Структурная схема модуля параметрического контроля

Дистанционная передачи измерительной информации осуществляется с помощью модуля приемо-передатчика на базе микросхемы SI4463 (микросхема в корпусе QFN-20), к этой же микросхеме подключен необходимый для работы кварцевый резонатор на 30 МГц. Модуль приемо-передатчика включает микроконтроллер STM8S003F3, который выступает в роли преобразователя интерфейсов. Кроме этого микроконтроллер STM упрощает взаимодействие с SI4463. Микроконтроллер STM реализует все необходимые команды для этого и упрощает настройку и управление модулем приемо-передатчика посредством собственных AT команд.

На рис. 2 показан внешний вид модуля параметрического контроля. Изделие выполнено на одной печатной плате и помещено в пластиковый корпус.

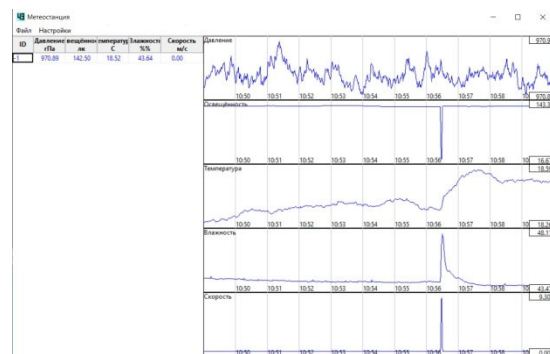


Рисунок 2 – Внешний вид модуля параметрического контроля

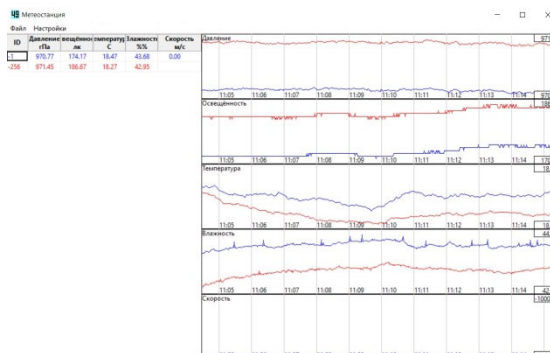
В табл. 1 приведены основные технические параметры модуля .

Таблица 1. Основные параметры модуля параметрического контроля.

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых температур, град, С	от -30 до +40
Точность измерения температуры, град, С	±1,0
Диапазон измерения влажности, %	от 10 до 100
Точность измерения влажности, %	±3,0
Диапазон измерения атмосферного давления, ГПа	от 300 до 1100
Точность измерения атмосферного давления, ГПа	±1,0
Диапазон измерения освещенности (видимый спектр), лк	от 10 до 60000
Точность измерения освещенности (видимый спектр), лк	±1,0
Диапазон измерения скорости потока воздуха, м/с	от 0,1 до 25
Точность измерения скорости потока воздуха, м/с	от 0 до 2 м/с 0,1 + 5 % более 2 м/с 0,3 + 10 %
Дальность приема-передачи данных, м	100
Весогабариты, мм, кг	170×75×25, 0,35



а



б

Рисунок 3 – Информационные окна ПК при сборе данных с одного (а) и двух (б) модулей

Текущая измерительная информация, регистрируемая модулем, отображается на встроенном ЖК-дисплее. Кроме того, за счет использования беспроводного интерфейса, полученные данные могут быть переданы на центральный ПК для сбора, обработки и сравнительного анализа измерительной информации.

На рис. 3, а и б представлены информационные окна ПК при сборе данных с одного и двух модулей, соответственно.

В информационном окне ПК отображаются в цифровом виде текущие значения измеряемых параметров и в графической форме временные изменения этих параметров за контрольный период времени. Полученные данные могут сохраняться в архиве для проведения последующего анализа событий.

Разработанный модуль предназначен для использования в составе беспроводных сенсорных

сетей и систем мониторинга и контроля окружающей среды на промышленных предприятиях, объектах повышенной опасности, складах, хранилищах, жилых зданиях, сооружениях, объектах коммунальных служб и др.

Литература

1. Беспроводная сенсорная сеть (WSN): структура, классификация, топологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digitrode.ru/articles>.

2. Принципы построения и архитектура перспективных информационно-измерительных систем мониторинга, диагностики и управления на базе интеллектуальных датчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microsystems.ru/files/publ>.

3. 1.8 inch SPI TFT LCD Display Module for ST7735 128x160 51/AVR/STM32/ARM 8/16 bit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amazon.com/Display-Module>.

УДК 621.317

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРВЕРА В ТЕХНОЛОГИИ «УМНЫЙ ДОМ»

Зуб Е.А., Романов А.Ф., Ходасевич А.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описано устройство и функциональные возможности серверной части в технологии «Умный дом» на основе сети LoRaWan. Представлен вариант использования технологии при реализации построения системы «Умный дом» на основе ультразвуковых смарт-приборов учета с беспроводной передачей данных на удаленный сервер.

Ключевые слова: сетевой сервер, сервер приложений, LoRaWan.

SERVER ORGANIZATION IN "SMART HOUSE" TECHNOLOGY

Zub E., Romanov A., Khodasevich A.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The principle of construction and functionality of the server part in the "Smart Home" technology based on the LoRaWan network. A variant of using such a technology implementing the construction of the "Smart Home" system based on ultrasonic smart meters with wireless data transmission to a remote server is described.

Key words: network server, application server, LoRaWan.

*Адрес для переписки: Зуб Е.А., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: evgeniys1@tut.by*

Целью реализации сети LoRaWAN для системы «Умный дом» является обеспечение обмена сообщениями от приборов учета потребления энергоносителей и устройств контроля/управления объектов с сервером приложений. Сетевой сервер напрямую связан с архитектурой сети, в случае с технологией LoRa используется сетевая топология «звезда». Это позволяет уменьшить энергопотребление устройств и упростить архитектуру сети.

Для организации сети LoRaWAN используется сетевой сервер, который подключается к серверу приложений по стандартному IP соединению.

Сервер приложений представляет собой программную платформу, предназначенную для эффективного выполнения процедур (программ/скриптов), на которых построены приложения.

Связь между конечными устройствами и сетевыми хабами осуществляется на различных частотных каналах и скоростях. Выбор скорости передачи данных – это компромисс между дальностью связи и длительностью сообщения. Благодаря использованию технологии с расширением спектра, передаваемые данные от различных конечных узлов с различными скоростями не мешают друг другу и создают набор «виртуальных» каналов и увеличивают пропускную способность сетевого хаба.

Поскольку переданная информация хранится на выделенных площадках (серверах), а доступ для пользователей может осуществляться через личный кабинет с различных устройств, подключенных к сети Интернет (ПК, планшет,

смартфон), возникает необходимость обеспечить конфиденциальность персональных данных и иной информации. Этой задачей занимается сетевой сервер, и в сетях LoRaWAN это решается с помощью нескольких слоев шифрования, используя:

- уникальный ключ сети (Unique Network key, EUI64) обеспечивает безопасность на сетевом уровне;

- уникальный ключ приложений (Unique Application key, EUI64) обеспечивает сквозную безопасность на уровне приложений;

- ключ устройства (Device specific key, EUI128).

Сетевой сервер LoRaWAN сети в системе «Умный дом», адресно отправляющий приборам сети управляющие команды через сетевой хабы и выделяя тайм-слоты передачи/приема индивидуально для каждого прибора, решает проблему возможных коллизий при одновременной передаче данных несколькими приборами.

Сетевой сервер является транспортным узлом, занимаясь управлением и обслуживанием сети LoRaWAN. Он позволяет обеспечить обмен данными между сервером приложений и сетевым хабом. Сетевой сервер получает все пакеты сообщений согласно региональному стандарту. Кроме вышеперечисленного, с помощью сетевого сервера реализуется регистрация сетевого хаба в сети, в том числе установка частотного диапазона, производится задание расписания сеансов связи сервера приложений и конечных устройств, выполняются проверки безопасности, изменяется скорость передачи данных, планируется оптимальный маршрут передачи подтверждающего сообщения, изменяется мощность передатчика, выбирается канал передачи, уточняется ее (передачи) начало и продолжительность по времени, контролируется заряд батарей конечных узлов. Управление конечными устройствами обеспечивается с помощью LoRaWAN mac-layer команд.

Сетевой сервер предоставляет три ключевые функции:

- аутентификация и авторизация устройств;
- управление и оптимизация сети;
- взаимодействие с вышестоящими серверами.

Важной частью LoRaWAN сети является и сервер приложений. С его помощью визуализируется весь функционал сетевого сервера и предоставляется доступ к нему пользователям посредством веб-интерфейса. Сервер приложений действует как набор компонентов, доступных

разработчику программного обеспечения через API (интерфейс прикладного программирования), определенный самой платформой.

Функции сервера приложений:

- авторизацию и управление пользователями;
- настройку профайлов и сервисов для устройств LoRaWAN;
- менеджмент конечных устройств и базовых станций;
- документирование в реальном времени всех событий и сообщений в сети LoRaWAN.

Также сервер приложений предназначен для обработки информации из пакетов данных. Поскольку зачастую данные приходят в зашифрованном виде, то стоит отметить, что именно на сервере приложений происходит расшифровка показаний счетчиков. После этого данные находятся в понятном виде и такую информацию можно обрабатывать. На основе полученных данных и строятся сервера приложений, которые взаимодействуют с пользователем, позволяя ему получать информацию с конечного устройства и запрашивать новую. Так же с их помощью осуществляется удаленный контроль конечных устройств.

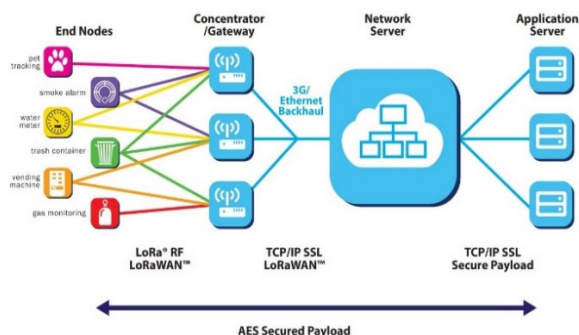


Рисунок 1 – LoRaWAN сеть с несколькими серверами приложений

Как видно из рисунка 1 в сети LoRaWAN может находиться несколько серверов приложений. В качестве примера реализации сервера приложений можно привести одностраничное приложение (ОП) (SPA – Single page application).

Литература

1. Обзор технологии LoRa [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itechinfo.ru/content/обзор-технологии-lora>. – Дата доступа: 10.06.2022.
2. Умный дом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.beltelecom.by/private/smart-home>. – Дата доступа: 10.06.2022.

УДК 621.396.96

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ КОНТРОЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Зеленко В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Работа посвящена организации методики получения контрольно-диагностических сигналов обладающих максимально стабильными параметрами. Одним из таких подходов является формирование комбинированной прерывистой импульсной последовательности, в которой с помощью задания временных параметров можно выделять отдельные спектральные составляющие путем подавления соседних с ней. В результате исследования были определены основные правила методики для выделения отдельных гармонических составляющих.

Ключевые слова: прерывистая импульсная последовательность, время задержки импульсной последовательности, подавление спектральных составляющих.

INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING TIME PARAMETERS WITH INSTABILITY OF THE PARAMETERS OF PULSE SIGNALS

Isaev A., Suchodolov U., Zelenko V.

Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work is devoted to the organization of methods for obtaining control and diagnostic signals with the most stable parameters. One of these approaches is the formation of a combined discontinuous pulse sequence, in which, by setting the time parameters, it is possible to isolate individual spectral components by suppressing neighboring ones. As a result of the study, the basic rules of the methodology for isolating individual harmonic components were determined.

Key words: intermittent pulse train, pulse train delay time, spectral component suppression.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

Одной из важных проблем современной диагностики является получение контрольно-диагностических сигналов, имеющих максимально точные и стабильные параметры, такие как частота, амплитуда, фаза, наличие дополнительных составляющих (шума), что бы их корреляция не влияла на результаты исследования. Еще более актуальна эта проблема при проведении процедур диагностики в энергетике, когда диагностические сигналы должны дополнительно обладать высокими параметрами по мощности. Общепринятыми подходами добиться таких показателей затруднительно, а иногда и невозможно, что в большинстве своем, связано с принципами их получения [1].

Одним из способов решения данной проблемы – это получение определенной гармонической составляющей из сформированного импульсного сигнала, характеристики которого можно контролировать и получать на порядок выше, чем монохромного гармонического. Однако применение фильтров из-за не достаточно высокой крутизны среза ограниченно решает эту проблему. Кроме этого, необходимость переустраивания параметров диагностического сигнала еще больше ухудшает характеристики реализованных аппаратных фильтров [2].

Одним из способов решения проблем фильтров это реализация методики по выделению отдельных составляющих путем формирования сложных импульсных последовательностей.

Так, согласно [3] амплитудно-спектральная характеристика одиночного импульса определяется зависимостью

$$|U_n| = \frac{2E}{\pi n} \left(\sin \frac{n\omega t_i}{2} \right), \quad (1)$$

где E – амплитуда импульсов; t_i – длительность импульсов; n – номер спектральной составляющей; ω – циклическая частота, определяемая по формуле $\omega = 2\pi/T$ (T – период импульсной последовательности).

Откуда амплитуды спектральных составляющих, которые равны нулю (n_{0t_i}), определяются из соотношений:

$$\sin \frac{n\omega t_i}{2} = 0,$$

а номера спектральных составляющих, амплитуды которых равны нулю:

$$n_{0t_i} = N \frac{T}{t_i},$$

где $N = 1, 2, 3$ и т.д. – номер нуля. А, следовательно, задавшись длительностью импульсов можно подавить определенную составляющую.

Если необходимо подавить две спектральных составляющих, можно рассмотреть последовательность из двух импульсов. Амплитудно-спектральная характеристика такой последовательности также рассмотрена в [3]. Амплитуда n -ой спектральной составляющей в этом случае определяется их зависимости:

$$|U_n| = \frac{2E}{\pi n} \left(\sin \frac{n\omega t_i}{2} \right) \left(\cos \frac{n\omega t_{z1}}{2} \right), \quad (2)$$

где t_{z1} – задержка между импульсами в двойной последовательности.

Следовательно амплитуды спектральных составляющих, которые равны нулю

$$(n_{0t_i} \text{ и } n_{0t_{z1}}),$$

определяются из соотношений:

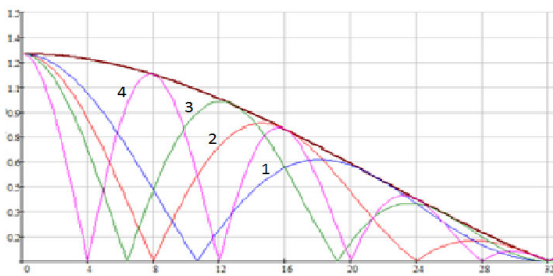
$$\sin \frac{n\omega t_i}{2} = 0, \quad \cos \frac{n\omega t_{z1}}{2} = 0.$$

Номера спектральных составляющих, амплитуды которых равны нулю:

$$n_{0t_i} = N \frac{T}{t_i}, \quad n_{0t_{z1}} = N \frac{T}{2t_{z1}},$$

где $N = 1, 2, 3 \dots$ – номер нуля.

Следовательно, выбрав номер дополнительной спектральной составляющей, амплитуду которой необходимо свести к нулю, можно рассчитать время задержки между импульсами t_{z1} в формируемой двойной импульсной последовательности. Амплитудно-частотный спектр такой последовательности при различных значениях времени задержки между импульсами при равных остальных параметрах представлен на рис. 1



$$1 - t_{z1} = 1,5t_i; \quad 2 - t_{z1} = 2t_i; \quad 3 - t_{z1} = 2,5t_i; \quad 4 - t_{z1} = 4t_i$$

Рисунок 1 – Амплитудно-частотный спектр последовательности из двух импульсов при длительности импульса $t_i = T/32$

Для подавления большего количества соседних спектральных составляющих, относительно информативной можно сформировать дополнительную импульсную последовательность из полученной на предыдущем этапе через необходи-

мое время задержки при равных остальных параметрах. В этом случае, согласно [4], амплитуда n -й спектральной составляющей такой последовательности будет определяться как

$$|U(n)| = \frac{8E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_i}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_{z1}}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_{z2}}{2} \right|, \quad (3)$$

где t_{z2} – время задержки между двумя последовательностями из двух импульсов

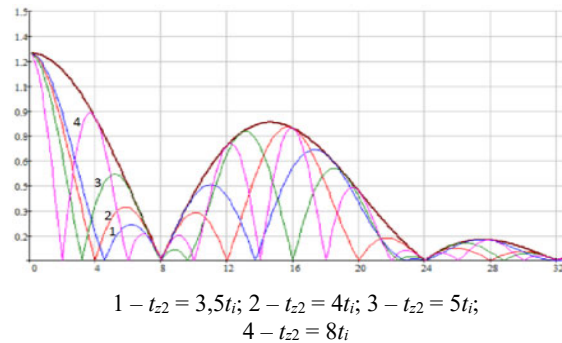
И в спектре сигнала появится дополнительный набор спектральных составляющих ($n_{0t_{z2}}$), амплитуды которых равны нулю, а номера этих спектральных составляющих определяются из соотношения

$$\cos \frac{n\omega t_{z2}}{2} = 0,$$

откуда

$$n_{0t_{z2}} = N \frac{T}{2t_{z2}}.$$

Амплитудно-частотный спектр получаемой комбинированной импульсной последовательности при различных значениях t_{z2} и прочих равных параметрах представлен на рис. 2.



$$1 - t_{z2} = 3,5t_i; \quad 2 - t_{z2} = 4t_i; \quad 3 - t_{z2} = 5t_i; \quad 4 - t_{z2} = 8t_i$$

Рисунок 2 – Спектральный состав двух двойных последовательностей импульсов при длительности импульса $t_i = T/32$ и времени задержки между импульсами $t_{z1} = 2t_i$

Для решения задачи с подавлением соседней с информативной спектральной составляющей, необходимо повторить полученную ранее двойную последовательность из двух импульсов через время задержки t_{z3} . В этом случае выражение для определения амплитуды n -й спектральной составляющей будет определяться формулой

$$|U(n)| = \frac{16E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_i}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_{z1}}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_{z2}}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_{z3}}{2} \right|, \quad (4)$$

где t_{z3} – время задержки между двойными комбинациями двойных импульсных последовательностей.

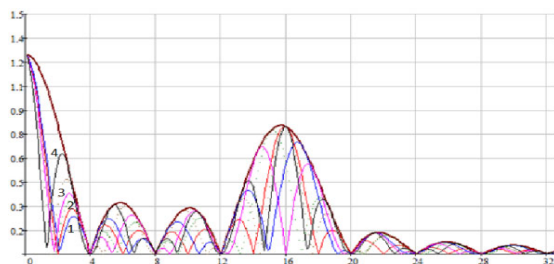
И в спектре сигнала появится еще один набор спектральных составляющих $n_{0t_{z3}}$, амплитуды которых равны нулю и чей номер определяется из соотношения

$$\cos \frac{n\omega t_{z3}}{2} = 0.$$

Откуда

$$n_{0t_{z3}} = N \frac{T}{2t_{z3}}.$$

Амплитудно-частотный спектр такой последовательности при различных значениях t_{z3} и равных прочих параметрах представлен на рис. 3



$$1 - t_{z3} = 7,5t_i; 2 - t_{z3} = 8t_i; 3 - t_{z3} = 8,5t_i; 4 - t_{z3} = 10t_i$$

Рисунок 3 – Спектральный состав двойной комбинации двойных импульсных последовательностей при длительности импульса $t_i = T/32$, $t_{z1} = 2t_i$ и $t_{z2} = 4t_i$

Учитывая вышеизложенные соотношения, можно сделать вывод, что с помощью конструкций последовательностей импульсов, составленных из комбинаций импульсных последовательностей,

можно свести к нулю максимальное количество спектральных составляющих в непосредственном окружении от необходимой нам информирующей составляющей. И в этом случае выражение для амплитуд спектральных составляющих импульсных последовательностей, построенных из комбинаций двойных импульсов, будет иметь вид

$$|U(n)| = \frac{2EK}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_i}{2} \right| \times \prod_{L=1}^K \left| \cos \frac{n\omega t_{zL}}{2} \right|, \quad (5)$$

где K – количество последовательных комбинаций из импульсных последовательностей; L – порядковый номер комбинации из импульсных последовательностей.

Литература

1. Вангенхайм, Л. Активные фильтры и генераторы. Проектирование и схемотехника с использованием интегрированных микросхем / Л. Вангенхайм. – Техносфера: Мир электроники, 2010. – 416 с.
2. Баженов, А. В. Пространственно-временная обработка сигналов в авиационных радиоэлектронных комплексах / А. В. Баженов. – Ставрополь: СВВАИУ, 2006. – 219 с.
3. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
4. Спектральный метод измерения изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов / Шейников, А. А. [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 178–184.

УДК 621.396.96

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ АДРЕСНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛЕНТ В СИСТЕМАХ ОПОВЕЩЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ

Сушко А.А., Перевитый Е.П., Ситница А.С., Исаев А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Работа посвящена выбору типа подключения светодиодных матриц и подключению к микроконтроллерам, используется адресная светодиодная лента. В адресной светодиодной ленте используются светодиоды, но данный светоизлучающий диод может управляться отдельно и независимо от других. Применяется для более интеллектуального управления световым потоком на отдельных участках ленты, включая или выключая подсветку в нужное время и в нужном месте.

Ключевые слова: адресная светодиодная матрица, тип подключения, схема подключения, рекомендация к подключению.

ORGANIZATION OF WORK OF ADDRESSED LED STRIPS IN WARNING AND EVACUATION CONTROL SYSTEMS

Sushko A., Perevityy E., Sitnica A., Isaev A.

Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work is devoted to choosing the type of connection of LED matrices and connecting to MC, an addressable LED strip is used. LEDs are used in the addressable LED strip, but this light emitting diode can be controlled separately and independently from others. It is used for more intelligent control of the light flux in certain sections of the tape, turning on or off the backlight at the right time and in the right place.

Key words: addressable LED matrix, connection type, connection scheme, connection recommendation.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

Светодиодная лента – это набор связанных светодиодов, на которые может одновременно подаваться напряжение питания. Обычные ленты хорошо всем знакомы, они используются сегодня повсюду, для освещения, в быту и других отраслях, однако популярными становятся «бегущие строки», наиболее часто они встречаются на фасадах зданий, магазинов, аптек и т.д. В статье «Светодиодные системы отображения информации», были описаны характеристики и преимущества светодиодных панелей, а также был проведен анализ выбора светодиодной системы отображения информации. Продолжая тематику статьи о светодиодных системах, рассмотрим адресные светодиодные ленты, принцип их работы, их подключение.

В адресной светодиодной ленте так же используются светодиоды, но светоизлучающий диод может управляться отдельно и независимо от других.

Таким образом, адресные ленты можно использовать для более интеллектуального управления световым потоком на отдельных участках ленты, включая или выключая подсветку в нужное время и в нужном месте.

Тип подключения:

- последовательный;
- параллельный;
- последовательный с параллельным питанием;
- последовательное соединение.

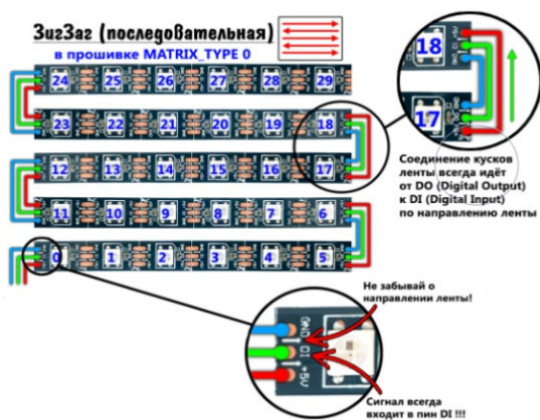


Рисунок 1 – Последовательный тип подключения

Можно последовательно соединять несколько отдельных отрезков, если итоговая длина не превышает 5 метров. Превышение недопустимо, поскольку из-за падения напряжения наблюдается неравномерность яркости свечения на конечных участках. А увеличение тока в цепи вызывает перегрев и перегорание токоведущих дорожек на печатной плате. В итоге – выход из строя всей системы.

Если планируется шлейф выше пяти метров, то используется параллельное подключение светодиодной ленты к блоку питания.

Достоинства:

- короткие провода;

- удобная пайка;
 - надежная передача сигнала.
- Недостатки:
- потеря тока по длине ленты;
 - параллельное соединение.



Рисунок 2 – параллельный тип подключения

При установке мощной и длинной ленты зачастую недостаточно одного блока электропитания. Если более мощный БП не подходит для проекта (не устраивает его громоздкость), то можно реализовать схему с 2 и более источниками питания. Их размещают либо в одном месте (к примеру в электрощите), либо непосредственно возле фрагментов ленты.

Достоинства:

- основная нагрузка по току ложиться на силовые провода, а не на ленту;
- меньше пайки.

Недостатки:

- сложность пайки к общему силовому проводу;
- возможные помехи из-за длины логического провода.

Выбираем последовательный тип подключения, одним из главных преимуществ является длина проводов подключения.

Подключение матрицы к микроконтроллеру:

- логический вывод микроконтроллера соединен с пином DIN ленты (матрицы) через резистор с номиналом 220 Ом (резистор брать диапазоне 100 Ом – 1 кОм). Нужен для защиты вывода микроконтроллера от перегрузки, т.е. ограничить ток в цепи;

– GND (земля, минус) ленты обязательно соединяется с выводом GND микроконтроллера даже при раздельном питании;

– электролитический конденсатор по питанию микроконтроллеру нужен для фильтрации резких перепадов напряжения, которые создает лента при смене цветов. Напряжение конденсатора от 6,3 V, емкость – примерно 470 мкФ, Возможно, не применять конденсатор, но если не использовать его есть риск нарушения стабильности работы.

Конденсатор по питанию ленты нужен для облегчения работы блока питания при резких изменениях яркости матрицы.

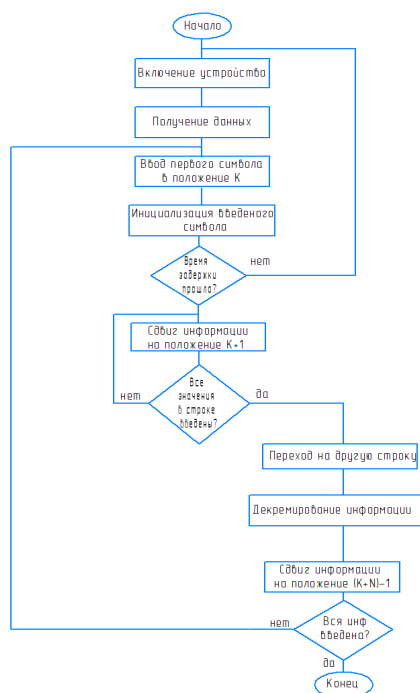


Рисунок 3 – Алгоритм реализации режима бегущей строки

Мощность и максимальный отдаваемый ток блока питания выбирается исходя из размера матрицы и режимов, в которых она будет работать.

В прошивке GuyverMatrixOS версии 1.2 и выше настраивается ограничение тока системы. Для успешной работы матрицы рекомендуется:

- разграничить светодиоды объемной решеткой;
- поверх решетки положить рассеиватель;
- затемнить «экран» матрицы.

Для реализации работы «бегущей строки», воспользуемся алгоритмом, приведенным на рис. 3.

Литература

1. Светодиодные системы отображения информации / А. С. Сушко [и др.] // Новые направления развития приборостроения : материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 20–22 апреля 2022 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 53–54.

2. WS2812 Intelligent control LED integrated light source [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://voltage.ru/datasheets/WS2812B_datasheet_EN.pdf.

УДК 621.396.96

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН СПОСОБАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБМОТКАХ

Исаев А.В., Суходолов Ю.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Работа посвящена оценке возможностей методов диагностики состояния обмоток асинхронных двигателей использующие резонансные явления в обмотках. Проведен анализ основных характеризующих параметров при проведении диагностики, рассмотрены входные и выходные (анализируемые) сигналы, способы подачи диагностического сигнала и особенности получения результирующего, определены основные достоинства и недостатки каждого из подходов исследования.

Ключевые слова: диагностика состояния обмоток, резонансные явления в обмотках, схема диагностики обмоток электрических машин.

INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING TIME PARAMETERS WITH INSTABILITY OF THE PARAMETERS OF PULSE SIGNALS

Isaev A., Suchodolov U.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The work is devoted to the assessment of the possibilities of methods for diagnosing the state of the windings of asynchronous motors using resonant phenomena in the windings. The analysis of the main characterizing parameters during the diagnostics was carried out, the input and output (analyzed) signals, the methods of supplying the diagnostic signal and the features of obtaining the resulting signal were considered, the main advantages and disadvantages of each of the research approaches were determined.

Key words: diagnostics of the state of windings, resonant phenomena in windings, diagnostic scheme for windings of electrical machines.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

В настоящее время наиболее оптимальными и чувствительными являются методы диагностики состояния обмоток электрических машин спо-

собы, использующие резонансные явления в обмотках. Необходимо отметить, что сегодня разработано большое количество схем, позволяющих

реализовать данную методику. Среди них можно выделить основные характеризующие параметры:

- тип входного диагностического сигнала;
- тип анализируемого сигнала.
- способ подачи диагностического сигнала;
- способ получения результирующего сигнала.

В качестве входного диагностического сигнала для контроля обмоток может применяться три группы: монохроматический; с дискретным спектром и со сплошным спектром. Монохроматический сигнал представляет собой гармонический сигнал заданной частоты.

Сигналы с дискретным спектром являющиеся периодическими импульсными последовательностями и со сплошным спектром имеют различную форму импульсов: прямоугольную и экспоненциальную; синусоидальную – радиоимпульсы; форму затухающих колебаний; трапецеидальную и т.д. Форма импульсов обычно выбирается для создания максимальных испытательных напряжений в обмотке. В настоящее время сигналы с дискретным спектром получили наибольшее распространение среди методов контроля обмоток.

Использование сигналов со сплошным спектром предопределяет обнаружение дефектов по форме выходного сигнала, что снижает чувствительность контроля и не позволяет автоматизировать измерительный процесс. Применение в чистом виде таких сигналов редко, т.к. в основном используют короткие импульсы с периодом повторения 20 или 10 mS , спектр которых можно считать сплошным, так как за это время происходит затухание сигнала в обмотке. Кроме этого необходимость использовать импульсный сигнал требует спектральной обработки выходного сигнала с целью выделения тех составляющих, которые наибольшим образом реагируют на возникновение виткового замыкания.

Различие видов выходных сигналов и методов их обработки затрудняют автоматизацию контроля, а достоверность большинства методов зависит от формы испытательного сигнала и стабильности его параметров. Кроме этого, известные методы контроля не дают стабильного результата, т.к. они разработаны без учета влияния на выходной анализируемый сигнал нестабильности испытательного сигнала и разброса параметров обмотки. А следовательно, при проведении измерения могут возникнуть ситуация, когда относительное изменение параметра выходного сигнала от виткового замыкания меньше, чем разброс параметров исправной обмотки в пределах допуска и изменения этого же параметра при некоррелированном отклонении параметров испытательного сигнала, что приводит к ошибке.

В качестве анализируемого измерительного сигнала в таких схемах могут выступать два основных параметра: 1 – относительное изменение амплитуды и 2 – разность фаз между исправной и

неисправной обмотками в АД. В первом случае определение состояния АД осуществляется на основе АЧХ, во втором – на основе ФЧХ исследуемого сигнала.

Таблица 1. Схемы подключения

	<p><i>Достоинство схемы:</i> высокая чувствительность на исследование по АЧХ и ФЧХ, малое влияние местоположения короткозамкнутых витков на результаты диагностики.</p> <p><i>Недостатки:</i> необходимость полной раскоммутации обмоток АД, обязательное наличие вывода средней точки</p>
	<p><i>Достоинство схемы:</i> высокая чувствительность на исследование по АЧХ и ФЧХ, малое влияние местоположения короткозамкнутых витков на результаты диагностики.</p> <p><i>Недостатки:</i> необходимость полной раскоммутации обмоток АД, обязательное наличие вывода средней точки</p>
	<p><i>Достоинство схемы:</i> высокая чувствительность на исследование по АЧХ и ФЧХ, малое влияние местоположения короткозамкнутых витков на результаты диагностики.</p> <p><i>Недостатки:</i> необходимость полной раскоммутации обмоток АД, обязательное наличие вывода средней точки</p>
	<p><i>Достоинство схемы:</i> высокая чувствительность на исследование по ФЧХ, малое влияние местоположения короткозамкнутых витков на результаты диагностики, отсутствие необходимости раскоммутации обмоток АД.</p> <p><i>Недостатки:</i> не высокая чувствительность на исследование по АЧХ, обязательное наличие вывода средней точки</p>
	<p><i>Достоинство схемы:</i> высокая чувствительность на исследование по ФЧХ, малое влияние местоположения короткозамкнутых витков на результаты диагностики, отсутствие необходимости раскоммутации обмоток АД, отсутствие необходимости наличия физического вывода средней точки обмотки АД.</p> <p><i>Недостатки:</i> не высокая чувствительность на исследование по АЧХ</p>
	<p><i>Достоинство схемы:</i> отсутствие необходимости раскоммутации обмоток АД, отсутствие необходимости наличия физического вывода средней точки обмотки АД, возможность контроля КЗ на корпус.</p> <p><i>Недостатки:</i> не высокая чувствительность на исследование по АЧХ и ФЧХ, сильное влияние местоположения короткозамкнутых витков на результаты диагностики</p>

Способы подачи диагностического сигнала и получения результирующего сигнала определяются схемой подключения измерительной установки к АД, подлежащего контролю. Среди представленных схем наиболее приминительными являются схемы, представленные в табл. 1.

Литература

1. Гольдберг, О. Д. Испытания электрических машин. Учеб для вузов по спец. «Электромеханика» / О. Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.

2. Гемке, Р. Г. Неисправности электрических машин / Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. / Р. Г. Гемке. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.

3. Способ контроля витковой изоляции обмотки якоря электрической машины : пат. РБ 16628 / Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников, А. Н. Малашин, В. Р. Вашкевич. – Оpubл. 2012.08.30.

4. Способ контроля фазных обмоток трехфазной электрической машины : пат РБ 20042 / Ю. В. Суходолов, А. В. Белоусов, Л. П. Крученюк. – Оpubл. 2016.04.30.

УДК 004.056.053

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФНФ СТАТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛИС И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИКРОСХЕМ

Кайкы М.Н., Иванюк А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Данная работа посвящена изучению применимости физически неклонировуемых функций на основе ячеек статической памяти в качестве схем идентификации цифровых устройств. В работе представлены результаты сравнения характеристик стабильности и уникальности ячеек статической памяти промышленных микросхем и ячеек, сконфигурируемых на элементной базе программируемых логических интегральных схем.

Ключевые слова: физически неклонировуемая функция, статическая память, идентификация, ПЛИС.

COMPARISON OF STATIC MEMORY PUF CHARACTERISTICS USING FPGA AND INDUSTRIAL ICs

Kaiky M., Ivaniuk A.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This work is devoted to the study of the applicability of physically uncloneable functions based on static memory cells as digital device identification schemes. The paper presents the results of comparing the characteristics of stability and uniqueness of static memory cells of industrial integrated circuits and cells configured on the element base of field programming gate arrays.

Key words: physically uncloneable function, static memory, identification, FPGA.

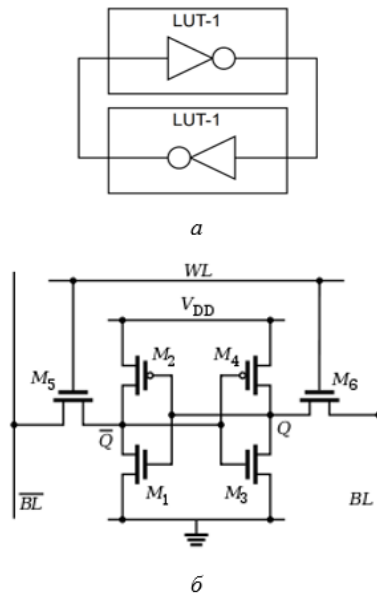
Адрес для переписки: Кайкы М.Н. e-mail kaikymykhailo@gmail.com; Иванюк А.А. e-mail ivaniuk@bsuir.by

Актуальность. Процесс производства современных интегральных схем (ИС) состоит из множества этапов, начиная с функционального проектирования, заканчивая размещением кристалла в корпус и его герметизацией [1]. На данный момент распространенными являются методы защиты цифровых устройств (ЦУ) от несанкционированного копирования, клонирования и использования, позволяющие пресекать акты промышленного шпионажа, изготовления и распространения контрафактной продукции. Одними из эффективных методов защиты ЦУ являются методы идентификации аппаратного обеспечения (Hardware Metering), позволяющие распознать устройство, определить его принадлежность владельцу прав интеллектуальной собственности и даже заблокировать работу устройства при попытке несанкционированного использования [2].

Физически неклонировуемые функции. Основную роль при построении систем идентификации играют источники энтропии. В основе источников энтропии и идентификаторов обычно лежат физически неклонировуемые функции (ФНФ), являющиеся сущностями, воплощенными в физической структуре, которые легко оценить, но, в силу неконтролируемых человеком процессов, невозможно воспроизвести, смоделировать или охарактеризовать [3, 4]. В научной литературе упоминаются различные типы ФНФ, реализуемые с использованием современных КМОП-технологий: ФНФ на основе задержек, ФНФ типа бабочка, ФНФ на статической памяти и т.д. Однако, вне зависимости от типа ФНФ, все они в результате случайных технологических вариаций при изготовлении ИС будут иметь уникальные электрофизические характеристики, извлечение (регистрация)

которых позволяет представлять их в двоичном виде для дальнейшего использования.

ФНФ на основе статической памяти. В основе исследуемой структуры ФНФ лежит ячейка статической памяти, состоящая из двух инверторов с перекрестной обратной связью и двух транзисторов, работающих в ключевом режиме для доступа к ячейке (рис. 1).



а – ячейка на ПЛИС;
б – ячейка на КМОП-транзисторах

Рисунок 1 – Ячейка статической памяти

После включения ИС, в силу физической асимметрии реализованной схемы (рис. 1), состояние ячеек статической памяти будет случайным и непредсказуемым,

Экспериментальная установка. Для исследования характеристик ФНФ на статической памяти были задействованы платы быстрого прототипирования Nexys-4, содержащие кристалл ПЛИС компании Xilinx и промышленные микросхемы статической памяти компании MicroChip 23K256. Выбранные микросхемы имеют информационный размер 256 Кбит, структура ячейки-состоит из шести КМОП-транзисторов (рис 1 б), размер транзистора – 180 нм. Была спроектирована цифровая система на ПЛИС с использованием софт-процессора MicroBlaze компании Xilinx и контроллера SPI, выполняющего роль блока-сопряжения с микросхемами статической памяти. Эксперимент состоял из многократно повторяющихся этапов включения микросхем, с извлечением всего объема данных из массива ячеек памяти. После считывания значения из ячеек данные отправлялись с использованием интерфейса UART на ПК для дальнейшего анализа.

Эксперименты с использованием эмуляции ячеек памяти. Ячейки статической памяти реализовывались на кристалле ПЛИС с применением

технологических LUT (Look Up Table)-блоков, сконфигурируемых в качестве инверторов. Всего было реализовано 16384 ячейки, доступ к которым осуществлялся с использованием того же софт-процессора MicroBlaze и системной шины AXI4-Lite. Как и в предыдущем варианте, данные, полученные с ячеек эмулирующих статическую память, отправлялись на ПК для анализа.

Анализ полученных данных. С целью достижения соизмеримости анализа характеристик были проанализированы одинаковые объемы данных (16 Кбит), которые были разделены на 8-битные и 32-битные идентификаторы. В результате анализа были получены характеристики для каждого из экспериментов (табл. 1).

Таблица 1. Результаты эксперимента

	23K256	Artix-7
16 Кбит		
Соотношение 0/1	38,28%	48,12%
Стабильность	95,24%	77,85%
8-битные идентификаторы		
Среднее удельное расстояние Хэмминга	4,81%	1,86%
Средняя стабильность	95,19%	97,82%
Среднее единообразие	66,05%	83,67%
32-битные идентификаторы		
Среднее удельное расстояние Хэмминга	3,87%	1,25%
Средняя стабильность	94,67%	93,31%
Среднее единообразие	79,17%	92,59%

При расчете удельного расстояния по Хэммингу для каждого из идентификаторов были взяты все возможные сочетания из 100 по 2, где 100 – количество проведенных экспериментов. Метрика единообразия рассчитывалась по следующей формуле:

$$U = 100 * \left(1 - 2 * \left| \frac{WH(V)}{N} - 0,5 \right| \right) \%, \quad (1)$$

где $WH(V)$ – вес бинарного вектора V по Хэммингу; N – разрядность вектора (идентификатора). Кроме этого был произведен расчет метрики стабильности ячеек статической памяти (рис 2).

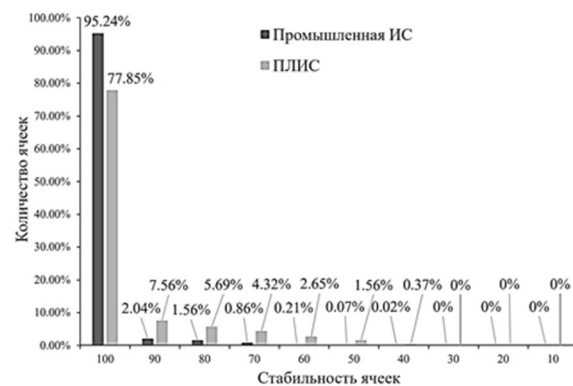


Рисунок 2 – Графики распределения числа ячеек по метрике их стабильности

Стабильность вычисляется по формуле (2)

$$S = 100\% * \frac{\sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{N-1} x_{ji} \text{ xor } x_{j(i-1)}}{N * S} \quad (2)$$

где N – количество экспериментов; S – количество ячеек; x_{ji} – значение j -той ячейки в i -том эксперименте.

В результате проведенного сравнения мы пришли к следующему выводу: реальные образцы статической памяти обладают меньшей стабильностью ячеек, чем эмуляция на ПЛИС, но при этом дают возможность получить соотношение нулей и единиц, близкое к идеальному.

Благодарности. Авторы выражают благодарность резиденту парка высоких технологий РБ СК

Hynix memory solutions Eastern Europe за предоставленное оборудование для проведения экспериментов.

Литература

1. Заливако, С. С. Обзор методов активной идентификации цифровых устройств / С. С. Заливако, А. А. Иванюк // Информатика. – 2016. – №3. – С. 38–47.
2. Tehranipoor, M. Counterfeit Integrated Circuits. Detection and Avoidance / M. Tehranipoor, U. Guin, D. Forte. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 269 p.
3. Pappu, R. Physical One-Way Functions: Ph.D. thesis / R. Pappu // MIT. – Boston, USA, 2001.
4. Physical one-way functions / R. Pappu [et al.] // Science. – 2002. – Vol. 297, № 5589. – P. 2026–2030.

УДК 531.383

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ ВОЛНЫ

Каликанов А.В., Стрельцов Д.С., Матвеев В.В., Лихошерст В.В., Погорелов М.Г.

ФГБОУ «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация: В работе представлены результаты исследования волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором на подвижном основании, работающем в режиме свободной волны, показана возможность определения углового положения.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, свободная волна, металлический резонатор, датчик угла.

WAVE SOLID STATE GYRO WITH METAL CAVITY OPERATING IN FREE WAVE MODE

Kalikanov A., Streltsov D. Matveev V. Likhosherst V. Pogorelov M.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract: As a result of the studies of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator on a movable base operating in the free wave mode, the possibility of determining the angular position was found.

Key words: wave solid-state gyroscope, free wave, metal resonator, angle sensor.

Адрес для переписки: Каликанов А.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: kalikanov.aleksei@mail.ru

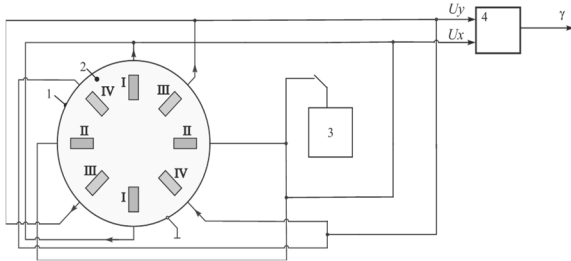
Как известно, существуют две основные схемы построения волнового твердотельного гироскопа (ВТГ): измеритель угла поворота (ВТГ-ИГ) и измеритель угловой скорости вращения (ВТГ-ДУС). В ВТГ-ИГ используется инерционное свойство стоячей волны и оценивается угол поворота основания, на котором установлен гироскоп, относительно положения волны через коэффициент пересчета (коэффициент Брайана). В ВТГ-ДУС реализуется удержание стоячей волны относительно корпуса гироскопа, а вторичная волна, возникающая при вращении основания, подавляется (компенсируется). Сила компенсации содержит информацию об угловой скорости вращения основания [1].

В настоящее время существует необходимость в создании ВТГ-ИГ среднего класса точности для применения в качестве датчика угловых

перемещений для беспилотного летательного аппарата, при этом ВТГ должен измерять не угловую скорость, а угол поворота основания. Для создания ВТГ в режиме датчика угловых перемещений необходимым условием является, чтобы стоячая волна, возбуждаемая в цилиндрической оболочке, не была бы «привязана» к основанию прибора, а существовала в резонаторе «свободно». В этом случае ВТГ можно уподобить маятнику Фуко, позволяющего фиксировать угол поворота основания.

В режиме свободной волны (рис. 1) в начальный промежуток времени с генератора синусоидальных сигналов на диаметрально противоположные пьезоэлементы I–I подается сигнал в виде синусоидального напряжения $A \sin(\omega t)$, где A – амплитуда, ω – частота подачи переменного сигнала, равная (или близкая) к собственной частоте

основной формы колебаний металлического цилиндрического резонатора. В следствие изгибных деформаций дна металлического цилиндрического резонатора возникает изгибающий момент, который вызывает эллиптические деформации на второй форме колебаний, в результате чего возбуждается стоячая волна с четырьмя областями, ориентированными вдоль пары пьезоэлементов I-I и II-II и четырьмя областями, расположенными вдоль пары пьезоэлементов III-III и IV-IV.



1 – резонатор; 2 – дно резонатора с парами пьезоэлементов; 3 – генератор; 4 – демодулятор

Рисунок 1 – ВТГ (режим свободной волны)

Через одну секунду после подачи управляющего сигнала генератор отключается и ВТГ приходит в рабочее состояние. При вращении колеблющегося металлического цилиндрического резонатора вокруг его оси симметрии, обусловленного поворотом на угол подвижного объекта, с постоянной угловой скоростью возникают Кориолисовы силы инерции, привязанные к запаздыванию стоячей волны. Полученный сигнал с первого контура и второго контура, сдвинутый по фазе на минус 90 градусов поступает в демодулятор, где осуществляется демодуляция сигналов и вычисление угла на основе соотношения

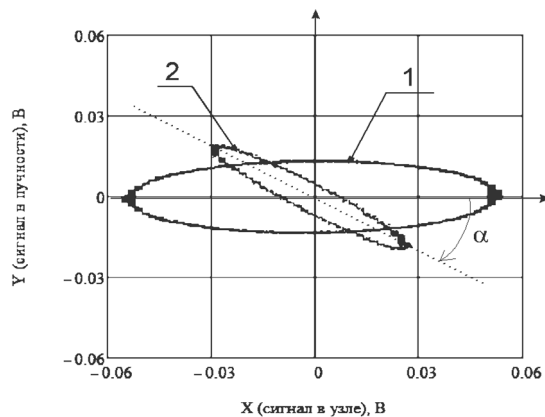
$$\alpha = \frac{1}{2K} = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (1)$$

где α – вычисляемый угол; K – коэффициент прецессии волны коэффициент Брайана); Y – сигнал в узле, X – сигнал в пучности.

На кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета были проведены исследования на экспериментальном образце ВТГ с металлическим резонатором работающем в режиме «свободной волны» с целью подтверждения возможности вычисления углового положения.

Экспериментальный образец ВТГ с металлическим цилиндрическим резонатором был закреплен на поворотной платформе аттестованного одноосного стенде ACUITAS AG MODEL TES-V_3-4_TM оснащенной климатической камерой. После чего была проведена серия экспериментов при вращении основания на фиксированные углы. На рис. 1 приведены траектории, очерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях (сигналы в узле и пучности) – так называемая фигура Лиссажу, которая

имеет форму эллипса в следствие наличия квадратной составляющей.



1 – неподвижное основание;
2 – основание повернуто на угол 50°

Рисунок 1 – Фигуры Лиссажу в координатах $X - Y$

Для вычисления текущего угла поворота необходимо найти точки соответствующие максимальной амплитуде в узле (координата X) и максимальной амплитуде в пучности (координата Y) и выполнить вычисление по формуле (1). При повороте основания на угол 50 градусов, вычислим поворот эллипса, приняв коэффициент Брайана $K = 0,7$, получим $\alpha = 49,565$ градусов. Что подтверждает возможность построения датчика перемещений на базе ВТГ с металлическим резонатором, работающим в режиме свободной волны. Но основная проблема использования ВТГ с металлическим резонатором в режиме «свободной волны» обусловлена низкой добротностью металлической оболочки, которая обычно не превышает 35000 [2]. На кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета в настоящее время ведется активная работа по реализации схмотехнического способа увеличения добротности ВТГ с металлическим резонатором для увеличения времени функционирования в режиме свободной волны.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / Распопов В. Я. [и др.]. – Под ред. В. Я. Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Lynch, D. D. Coriolis vibratory gyroscope / D. D. Lynch // Coriolis vibratory gyroscope / IEEE standard specification IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros. IEEE std.1431 annex B. 2004. P. 56–66.

УДК 539.26

ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЗС-КАМЕР
Кольчевская И.Н., Кольчевский Н.Н., Трапенюк Н.В.

*Белорусский государственный университет
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Экспериментально обнаружена чувствительность оптических ПЗС-камер к рентгеновскому излучению рентгеновской трубки с медным анодом при ускоряющих напряжениях 10–40 КэВ и токах 100–400 мкА. Показано, что изображения содержат отдельные пики, которые соответствуют отдельным фотонам рентгеновского излучения, распределение количества пиков по высоте зависит от параметров рентгеновской трубки. Предложена методика восстановления изображения, полученного в условиях экстремально низкой освещенности (в режиме малого числа фотонов, что характерно для рентгеновского диапазона).

Ключевые слова: рентгеновское излучение, ПЗС-камеры, детектор рентгеновского излучения.

X-RAY DETECTOR BASED ON CMOS CAMERA
Kolchevskay I., Kolchevsky N., Trapenok N.

*Belarusian State University
 Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Experimentally detected the sensitivity of optical CMOS cameras to X-ray radiation from an X-ray tube with a copper anode at accelerating voltages of 10–40 KeV and currents of 100–400 μ A. Shown that the images contain individual peaks, which correspond to individual X-ray photons, the distribution of the number of peaks in height depends on the parameters of the X-ray tube. Proposed method of restoration of the image obtained under conditions of extremely low illumination (in the mode of a small number of photons, which is typical for the X-ray range).

Key words: X-ray, CMOS cameras, X-ray detector.

*Адрес для переписки: Кольчевский Н.Н., Курчатова, 1, ком.62, Минск, 220045, Республика Беларусь
 e-mail: kolchevsky@gmail.com*

Прогресс в технологиях создания современных CCD и CMOS и высокая энергия отдельных фотонов рентгеновского излучения приводит к визуализации процесса формирования изображений при низких уровнях освещенности и создании детекторов рентгеновского излучения на их основе. Чувствительность обычной цифровой ПЗС-камеры к рентгеновскому излучению имеет ряд преимуществ к созданию детектора, к ним относятся дешевизна, простота в управлении и возможность дальнейшей модернизации.

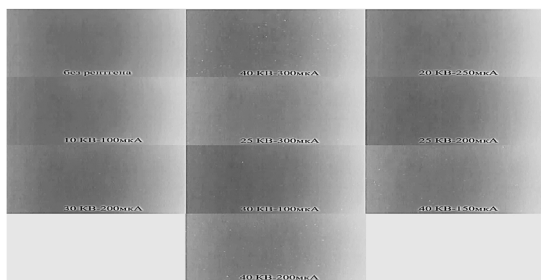


Рисунок 1 – Экспериментальные снимки, полученные ПЗС-камерой при разных режимах работы источника рентгеновского излучения

При помощи разработанного программно-аппаратного комплекса «X-ray-monitor», предназначенного для получения изображений, в заданном промежутке времени, с определенным интервалом, позволяющего использовать цифровую ПЗС-

камеру в качестве детектора, экспериментально получены снимки, при облучении матрицы рентгеновским излучением при различных режимах облучения (рис. 1).

Для полного анализа полученных снимков, была произведена обработка снимков для каждого режима облучения камеры в сравнении со снимком без рентгена, при помощи программного обеспечения (рис. 2).

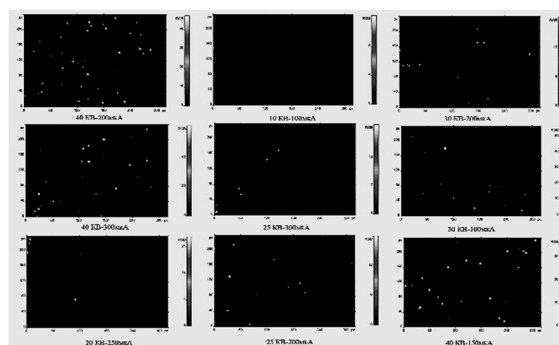


Рисунок 2 – Обработанные экспериментальные снимки для различных режимов облучения рентгеновским излучением

Произведена оценка количества пиков в зависимости от высоты пика, при разных режимах работы рентгеновского источника, построен график зависимости в программе OriginPro (рис. 3). По полученным данным можно сделать вывод, что с

ростом напряжения увеличивается количество фотонов (количество пиков), а также высота пиков увеличивается с ростом мощности.

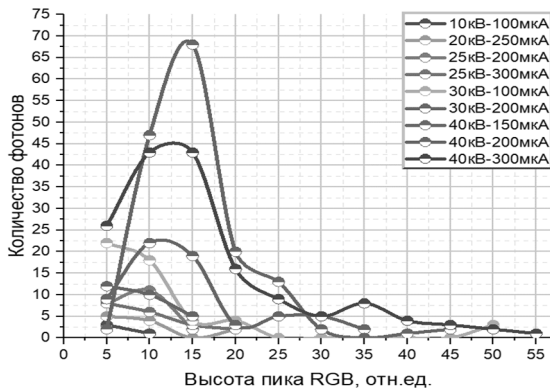


Рисунок 3 – График зависимости количества фотонов от высоты пика (для каждого режима)

Предельная чувствительность матричных приемников в рентгеновском диапазоне ограничена собственными шумами потока фотонов. Статистические свойства процессов регистрации излучения и фотонного шума удобно рассмотреть на основе полуклассической теории фоторегистрации, при этом предполагается: отсутствие пространственно-временных флуктуаций интенсивности излучения; вероятность более одного фотособытия в рассматриваемых интервалах времени и площади пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью одного фотособытия и отсутствия фотособытий. Фотособытия в двух неперекрывающихся интервалах времени независимы. Данные предположения соответствуют задаче статистики дискретных независимых событий. Рассмотрим задачу освещения матрицы, размером N на N ячеек, равномерным потоком с числом фотонов N^2 . Учитывая случайный характер заполнения матрицы фотонами, получим неравномерное распределение фотонов с числом возможных уникальных состояний P , что говорит о сложности распознавания изображений:

$$P = \frac{(2N^2-1)!}{N^2!(N^2-1)!} \quad (1)$$

где P – число состояний изображения, N^2 – количество ячеек камеры.

Вычисления по полученной формуле (1) показывают, что для $N = 2$ число состояний $P = 35$, для $N = 100$ число состояний $P = 1,1 \cdot 10^{6018}$, для $N = 1000$ число состояний $P = 2,8 \cdot 10^{602056}$. Расчеты показывают, что вероятность получить равномерное распределение ничтожно мала.

Для исследования изображений, получаемых с малым числом фотонов, применялось численное моделирование. Для моделирования задачи освещения матрицы, размером N на N ячеек, равномерным потоком, со счетным числом фотонов,

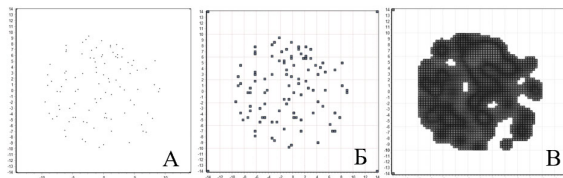
разработано программное обеспечение, которое с каждым зарегистрированным фотоном связывает Гауссову функцию:

$$F(r) = Ae^{-\frac{(r-B)^2}{2C^2}}, \quad (2)$$

где A – высота зарегистрированного пика, B – сдвиг, C – параметр, определяющий ширину Гауссова пика.

Функция Гаусса, заполняющая соседние ячейки изображения значениями в зависимости от амплитуды и ширины функции. Суммирование функций Гаусса для всех зарегистрированных фотонов создает непрерывное изображение объекта.

Показаны этапы восстановления сформированного изображения. На экране размером 20 на 20 случайным образом сгенерированы 100 точек. Каждая точка может характеризоваться как отдельный фотон. Цифровые детекторы состоят из матрицы пикселей. Попадание фотона в один из пикселей приводит к его срабатыванию. Расчеты показывают, что для матрицы 100 на 100 вероятность попадания двух фотонов в один пиксел ничтожно мала, т.е. речь идет о срабатывании отдельных пикселей цифрового детектора.



- a* – изображение 100 фотонов;
- b* – изображение активных пикселей;
- в* – результат восстановления изображения

Рисунок 4 – Результаты численного моделирования по восстановлению изображения

На рис. 4, *a* показано распределение сгенерированных фотонов. На рис. 4, *b* показаны распределение активных пикселей. Как видно из сравнения рисунков отсутствуют фотоны, попавшие в один и тот же пиксел. Визуально можно угадать, что генерация велась на диафрагме круглой формы. На рис. 4, *в* показан результат восстановления изображения, где с каждым пикселом связывалась функция Гаусса, заполняющая все ячейки матрицы детектора. При превышении суммарного значения функции Гаусса в ячейке порога, пиксел детектора считался сработавшим. Сработавший пиксел эквивалентен пикселю, в который попал фотон. Рис. 4 содержит цветовую информацию о суммарной интенсивности всех функций Гаусса отдельных пикселей. Видно, что максимальная интенсивность наблюдается в местах скопления фотонов.

Таким образом был смоделирован детектор рентгеновского излучения на основе оптических ПЗС-камер, произведены экспериментальные снимки при излучении рентгеновской трубки с

медным анодом при ускоряющих напряжениях 10–40 КэВ и токах 100–400 мкА. Предложена методика восстановления изображения, полученного в условиях экстремально низкой освещенности (в режиме малого числа фотонов, что характерно для рентгеновского диапазона).

Литература

1. Karolyn, A. MacDonald. An Introduction to X-ray Physics, Optics, and Applications / A. MacDonald Karolyn. – Princeton University Press, 2017. – 368 p.
2. Attwood. D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation / D. Attwood. – Cambridge, 1999.

УДК 621.317.799:621.382

МЕТОД ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

Лисенков Б.Н.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработан метод заряда накопительного конденсатора в измерителе динамических параметров силовых полупроводниковых приборов. Новый метод позволяет существенно снизить массу, габариты и стоимость источника напряжения заряда.

Ключевые слова: динамические параметры силовых полупроводниковых приборов, метод двойного импульса, заряд накопительного конденсатора.

STORAGE CAPACITOR CHARGING METHOD

Lisenkov B.

JSC "MNIPI"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A method has been developed for charging a storage capacitor in a dynamic parameter meter for power semiconductor devices. The new method can significantly reduce the weight, dimensions and cost of the charge voltage source.

Key words: dynamic parameters of power semiconductor devices, double pulse test, storage capacitor charge.

Адрес для переписки: Лисенков Б.Н., ул. Я. Коласа, 73, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

При измерении динамических параметров силовых полупроводниковых приборов (ПП), например, времени переключения, времени восстановления обратного сопротивления (reverse recovery) и др., формируют испытательные импульсы с пиковым током от единиц до сотен ампер путем разряда конденсатора через силовой объект тестирования.

Предварительно конденсатор заряжают через токоограничивающий резистор. Напряжение на конденсаторе приближается к напряжению источника по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = RC$, где R – сопротивление токоограничивающего резистора, а C – емкость конденсатора. Напряжение испытательных импульсов задают с погрешностью $\pm 10\%$, при неравномерности вершины до 5% [1–5].

Емкость конденсатора выбирают так, чтобы за время разряда напряжение на нем изменилось не более допустимого предела. Например, в разработанном макете измерителя динамических параметров силовых полупроводниковых приборов, который реализует измерение динамических параметров силовых ПП по методу двойного импульса (Dabble Pulse Test), емкость конденсатора составляет 1500 мкФ.

При измерении времени восстановления обратного сопротивления диода, обратное напряжение на нем должно составлять $100\text{ В} \pm 10\text{ В}$ [3]. Это позволяет определить сопротивление токоограничивающего резистора в зависимости от мощности используемого источника напряжения.

Например, при мощности источника 100 Вт и напряжении 100 В, выходной ток равен 1,0 А ($100\text{ Вт}/100\text{ В}$), сопротивление токоограничивающего резистора равно 100 Ом ($100\text{ В}/1\text{ А}$), а постоянная времени зарядной цепи $\tau = 0,15\text{ с}$ ($100\text{ Ом} \times 1500\text{ мкФ}$). Время заряда конденсатора традиционным методом (по экспоненте) с приемлемой точностью соответствует 5τ и составляет около 0,75 с.

Чтобы устранить перегрев объекта тестирования, на котором рассеивается энергия испытательного импульса, интервал времени между импульсами может быть сравним с временем замены объекта тестирования вручную. С этой точки зрения, длительность интервала между импульсами порядка секунды представляется вполне допустимой, однако мощность (100 Вт), а следовательно габариты, вес и стоимость источника напряжения, мощность которого задействована лишь в течение $1/5$ времени заряда, неоправданно высоки.

Источник напряжения для заряда накопительного конденсатора, наряду с осциллографом и генератором задающих импульсов, относится к основным узлам измерителя динамических параметров, поэтому снижение его стоимости, массы и габаритов весьма целесообразно и экономически оправдано.

Это утверждение справедливо независимо от того предполагается ли самостоятельная разработка источника постоянного напряжения или покупка готового изделия. Необходимо учесть, что, для построения измерителя динамических параметров требуется как минимум два источника – с положительным и отрицательным выходным напряжением.

Нами разработан оригинальный метод заряда накопительного конденсатора, основанный на выборе величины выходного напряжения источника, используемого для заряда, выше номинального напряжения на конденсаторе и прекращении зарядного тока после достижения на конденсаторе требуемого уровня напряжения, чтобы заряд конденсатора происходил уже на начальном, практически линейном, участке экспоненты.

Заряд конденсатора начинают по команде формирования очередного испытательного импульса и сравнивают нарастающее на конденсаторе напряжение, предварительно уменьшенное с помощью резистивного делителя, с постоянным опорным уровнем, соответствующим номинальному значению напряжения на конденсаторе с учетом делителя. После того как напряжение на конденсаторе достигнет своего номинального значения, заряд прекращают.

Напряжение заряда контролируют не на обкладках конденсатора, а непосредственно на силовом объекте тестирования, поскольку при формировании большого импульсного тока, на различных элементах измерительной цепи, в первую очередь на медных проводниках, возникает паразитное падение напряжения.

Измерение напряжения на силовом объекте тестирования в момент воздействия сильноточного испытательного импульса осуществляют с помощью осциллографа, другой канал которого используют для наблюдения формы тока через объект тестирования и измерения интересующего динамического параметра этого объекта, согласно соответствующим стандартам.

Рассмотрим преимущества нового метода на примере разработанного измерителя, в котором напряжение источника для заряда конденсатора составляет 150 В, максимальный ток источника – 0,32 А, пиковый ток до 0,41 А, токоограничивающий резистор – 400 Ом, постоянная времени зарядной цепи $\tau_1 = 0,6$ с ($400 \text{ Ом} \times 1500 \text{ мкФ}$).

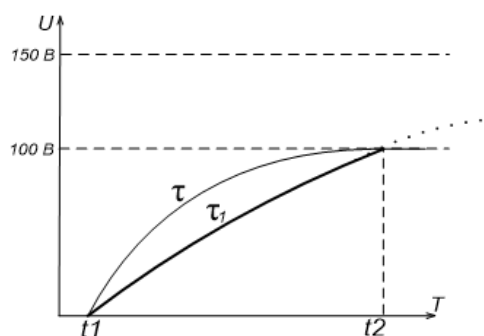
В данном случае, заряд конденсатора происходит за интервал времени приблизительно равный τ_1 , что подтверждается с помощью осциллографа,

а не за $5\tau_1$, как, при использовании традиционного метода. Заметного улучшения скорости заряда, по сравнению с рассмотренным ранее примером (100 В, 100 Вт), не достигнуто, но, благодаря снижению зарядного тока, существенно снижены габариты, вес и стоимость источника напряжения.

В разработанном измерителе источник напряжения реализован на трех включенных последовательно малогабаритных преобразователях АС-DC мощностью 15 Вт каждый с выходным напряжением 48 В (50 В) и с габаритами приблизительно соответствующими по объему 2-м спичечным коробкам.

Предложенный метод позволяет сравнительно просто регулировать напряжение заряда конденсатора двумя способами. Ступенчато – путем переключения коэффициента деления резистивного делителя и плавно – путем соответствующего изменения опорного уровня.

На рис. 1 показаны временные диаграммы заряда накопительного конденсатора традиционным методом (постоянная времени τ) и диаграмма заряда этого же конденсатора согласно разработанного метода (постоянная времени τ_1).



t_1 – начало заряда конденсатора, t_2 – окончание заряда конденсатора; τ – постоянная времени при заряде конденсатора в течение 5τ (по экспоненте); τ_1 – постоянная времени при заряде конденсатора по предложенному методу, $\tau_1 \approx 5\tau$

Рисунок 1 – Временные диаграммы заряда накопительного конденсатора согласно предложенному и традиционному методам

Представленный метод заряда позволяет существенно снизить стоимость, массу и габариты измерителя динамических параметров и обеспечивает высокую стабильность (повторяемость) установки напряжения на конденсаторе, что подтверждается результатами испытаний.

Согласно приведенным выше расчетам, для заряда такого же конденсатора с приемлемой точностью за интервал времени около 0,75 с по экспоненциальному закону потребуется в несколько раз более громоздкий и дорогостоящий источник напряжения мощностью 100 Вт. На основании этого можно заключить, что предложенный метод формирования сильноточных испытательных импульсов экономически весьма эффективен.

Литература

1. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени обратного восстановления : ГОСТ 18986.8-73. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1998.
2. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени выключения : ГОСТ 18986.5-73. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1998.

3. Приборы полупроводниковые силовые, методы измерений и испытаний : ГОСТ 24461-80. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1990.
4. Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров : ГОСТ 19095-73. – Москва: ИПК Издательство стандартов. – 1983.
5. Test methods for semiconductor devices, MIL-STD-750E [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.everyspec.com/> – Дата доступа 10.03.2021.

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА АНТЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ РАДИОКОЛЛИМАТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ Малай И.М., Титаренко А.В., Озеров М.А.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
физикотехнических и радиотехнических измерений»

г.п. Менделеево, Солнечногорск, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. Одним из этапов создания радиотехнических систем является подтверждение задаваемых при проектировании характеристик используемых антенных систем или параметров штатной работы в режиме излучения и приема сигналов. Для решения этих задач необходимо использование антенных измерительных комплексов. Примером одного из наиболее универсальных решений для испытаний сложных радиотехнических систем являются измерительные комплексы на основе радиоколлиматоров. Такие комплексы, несмотря на известные достоинства, имеют ряд функциональных и технических ограничений. В работе изложены результаты исследований особенностей радиоколлиматорных систем, оказывающих ключевое влияние на их метрологические характеристики.

Ключевые слова: антенна, измерения, радиоколлиматор.

DEVELOPMENT OF AN COMPACT RANGE FACILITY FOR RADIOELECTRONIC SYSTEMS TESTING

Malay I., Titarenko A., Ozerov M.

Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radioengineering»
Solnechnogorsk city, Moscow region, Russian Federation

Abstract. One of the stages in the development of radio electronic systems is the confirmation of the characteristics of the antenna systems used during the design. It is necessary to use antenna measuring systems to solve these problems. An example of one of the most versatile solutions for radio electronic systems testing is a compact range. The paper presents the results of studies of the features of compact range systems that have a key effect on their accuracy.

Key words: antenna, compact range, measurements.

Адрес для переписки: Титаренко А.В., г.п. Менделеево, Солнечногорск 141570, Московская область, Российская Федерация
e-mail: titarenko@vniiftri.ru

Введение. Одним из наиболее универсальных и эффективных типов антенных измерительных комплексов являются комплексы на основе радиоколлиматоров (компактные полигоны). Компактных полигонов в настоящее время насчитывается свыше сотни в мире и около десятка в Российской Федерации. Однако их теоретические и экспериментальные характеристики никем не афишируются. Единственным источником информации служат данные, предоставляемые производителями и публикуемые в научных статьях.

При проектировании радиоколлиматорного комплекса ФГУП «ВНИИФТРИ» решалась задача создания прецизионного инструмента для

антенных измерений обладающего широкими функциональными возможностями.

Задачи проектирования. Хотя известны примеры использования радиоколлиматоров на основе диэлектрических линз, наибольшее распространение получили радиоколлиматоры на основе металлических зеркал следующих видов:

- однозеркальные со скругленными краями;
- однозеркальные с зубчатыми краями;
- двухзеркальные с зубчатыми краями.

Все они отличаются только видом используемых коллиматорных зеркал. Характеристики радиоколлиматоров оцениваются по равномерности амплитудного-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля в рабочей зоне и уровню

кроссполяризации. Зеркало со скругленными краями при прочих равных позволяет получить более однородное поле в рабочей зоне, что приводит к меньшим погрешностям измерений [1]. К сожалению, его технология его изготовления сложнее, что обуславливает существенно большую стоимость в сравнении с аналогичным зеркалом с зубчатыми краями. Зеркала с зубчатыми краями проще в изготовлении, но обеспечивают несколько худшие характеристики.

Эксплуатируемые в настоящее время в России коллиматорные комплексы используют в своем составе зеркала с зубчатыми краями и характеризуются достаточно высоким уровнем точностных характеристик. Большинство из них обеспечивает размеры рабочей зоны $\varnothing 1,8\text{--}2,4$ м. Задачей проектирования было создание комплекса, претендующего на роль «эталонного».

Результаты проектирования. В качестве основы создаваемого измерительного комплекса было выбрано был выбран радиоколлиматор, имеющий зеркало со скругленными краями (рис. 1) и обеспечивающий рабочую зону $\varnothing 3$ м при габаритах вырезки 6×6 м. Зеркало имеет боковую схему облучения и фокусное расстояние 9,7 м. По результатам оптических измерений СКО отклонения профиля зеркала от заданного составило 30 мкм. Размеры специально спроектированной безэховой камеры соответствуют удвоенным габаритам зеркала. Совокупность указанных факторов обусловила хорошие параметры однородности поля в рабочей зоне.

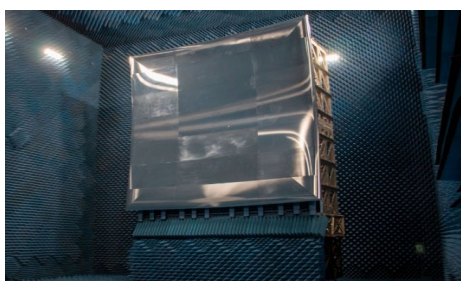
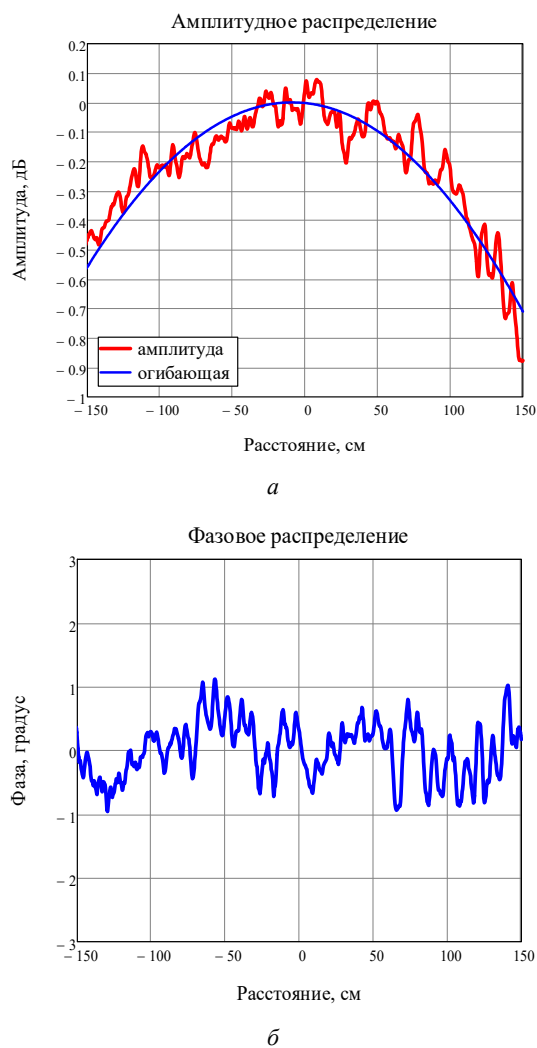


Рисунок 1 – Зеркало радиоколлиматора со скругленными краями

Результаты измерений АФР в рабочей зоне начиная с S-диапазона можно обобщить следующим образом:

- полная неравномерность амплитуды не более 1,0 дБ, амплитуда огибающей 0,6–0,8 дБ;
- амплитуда неравномерности фазы (без учета единичных отклонений) $1^\circ/10$ ГГц свыше 10 ГГц и не более 2° до 10 ГГц.
- уровень кроссполяризации не хуже минус 28 дБ.

Пример АФР представлен на рис. 2. Стоит отметить, что измерения АФР проведены с использованием в качестве зондовой антенны открытого конца волновода, что исключает возможность намеренного завышения полученных характеристик.



а – амплитудное распределение;
б – фазовое распределение

Рисунок 2 – Вертикальное сечение АФР на частоте 10 ГГц

Для оценки интегральных характеристик погрешностей измерений используется обобщенный критерий – эквивалентный уровень помех (ЭУП) [2]. Для оценки ЭУП исходя из полученных характеристик равномерности поля в рабочей зоне применяется Фурье-анализ [3]. На рис. 3 представлены результаты расчета ЭУП, полученные при моделировании на основе ранее представленных результатов. В качестве модели апертуры использовано распределение типа «косинус на пьедестале», размер пьедестала равен 0,5. Как видно, даже в створе зеркала радиоколлиматора ЭУП составляет около минус 50 дБ, что обуславливает превосходные точностные характеристики.

Радиоколлиматоры с зубчатыми краями имеют хоть и не лучшие, но сопоставимые значения неравномерности поля по амплитуде и примерно вдвое худшие по фазе. Наихудшие значения ЭУП составляют порядка минус 40 дБ. Однако, как уже было отмечено, серьезное влияние

на результаты измерений АФР оказывают направленные свойства антенны-зонда. И использование в качестве зондов широкополосных антенн с КНД порядка 9–13 дБ приводит к сглаживанию вариаций поля по сравнению с открытым концом волновода, имеющим КНД около 6–8 дБ.

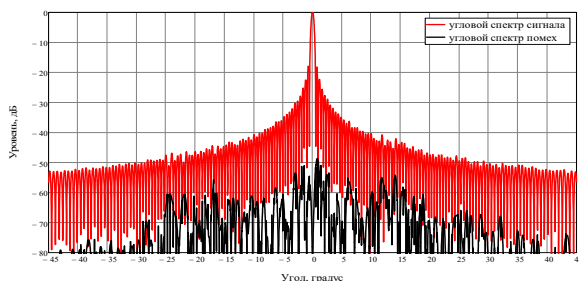


Рисунок 3 – Угловое распределение помех в вертикальное плоскости на частоте 10 ГГц

Выводы. Реализованная схема антенного измерительного комплекса на основе радиоколлиматора с зеркалом со скругленными краями обес-

печивает превосходство по величине ЭУП порядка 10 дБ над имеющимися аналогами с зубчатыми краями. Достигнутые характеристики позволяют использовать комплекс при выполнении измерений, требующих высокую точность или же в качестве эталонного компаратора при измерениях радиотехнических характеристик апертурных антенн.

Литература

1. Lee, T.-H. Performance Tradeoff Between Rolled and Serrated Edge / Teh-Hong Lee; W. D. Burnside // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – Vol. 44, № 1.
2. Озеро, М. А. Многомерная пространственная фильтрация для повышения точности измерений электродинамических характеристик излучения антенн / М. А. Озеров, А. В. Титаренко // Измерительная техника. – 2021. – № 11. – С. 46–54.
3. Wayne, D. Effects of a Non-Ideal Plane Wave on Compact Range Measurements / D. Wayne, J. Fordham, J. McKenna // Antenna Measurements Techniques Association 2014 Proceedings. – 2014.

УДК 681.586.2

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Абгарян Ж.С., Дулуб Я.В., Лихошерст В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены два способа создания первичных колебаний волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором. Проведены экспериментальные исследования и анализ достоинств и недостатков обоих способов с позиции построения датчика угловой скорости для систем ориентации или стабилизации.

Ключевые слова: резонанс, автоколебания, собственная частота, гироскоп.

ANALYSIS OF WAYS TO CREATE PRIMARY OSCILLATIONS IN A METAL RESONATOR

Abgaryan Zh., Dulub Ya., Likhosherst V.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. Two methods of creating primary oscillations of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator are considered. Experimental studies and analysis of the advantages and disadvantages of both methods have been carried out from the position of constructing an angular velocity sensor for orientation or stabilization systems.

Key words: resonance, self-oscillation, natural frequency, gyroscope.

Адрес для переписки: Лихошерст В.В., пр. Ленина, 95, Тульский государственный университет, ЛИДПИ СОиН, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: lvy_01@inbox.ru

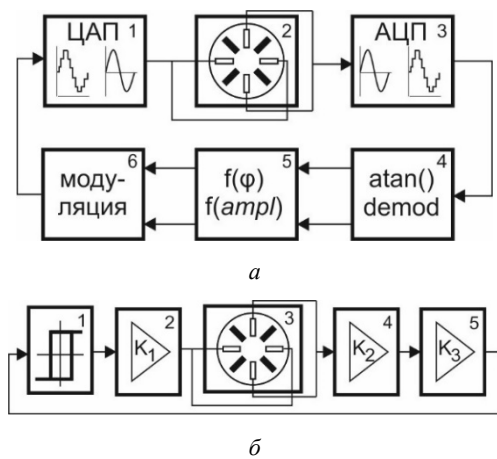
Выбор способа создания первичных колебаний является первоочередной задачей с которой сталкиваются разработчики при проектировании волнового твердотельного гироскопа (ВТГ), в частности с металлическим цилиндрическим резонатором [1]. Принцип работы гироскопов такого типа известен довольно давно [2], при этом одним из основных требований обеспечения функционирования гироскопа является создание

и поддержание колебаний на резонансной частоте. На сегодняшний день широко используются два способа: создание вынужденных колебаний на резонансной частоте и построение автоколебательного контура [1]. В упрощенном виде структурные схемы контуров приведены на рис. 1.

На рис. 1, а приведена структурная схема контура поддержания колебаний на резонансной частоте. Работа контура реализуется следующим

образом: на пьезоэлементы резонатора 2 подается сигнал с ЦАП 1 на частоте, определенной на стадии производства резонатора. АЦП 3 приводит выходной сигнал с другой пары пьезоэлементов к цифровой форме. На основе полученного сигнала вычислительным алгоритмом 4 определяются амплитуда и фаза по отношению к поданному сигналу. Вычислитель 5 вырабатывает необходимые для поддержания резонанса величины фазы, частоты и амплитуды, после чего блоком 6 формируется управляющий сигнал в цифровом виде и подается на ЦАП.

Сложность построения такого контура заключается в малой ширине резонансной зоны (порядка десятых долей герц при собственных частотах от 4500 до 8000 Гц), что предъявляет высокие требования к точности измерения/вычисления и формирования частоты, амплитуды и фазы сигнала управления.



a – вынужденные колебания на резонансной частоте;
б – автоколебания;

Рисунок 1 – Структурные схемы создания первичных колебаний

Автоколебательный контур (рис. 1, б) формирует посредством триггера Шмитта 1 прямоугольные импульсы. Амплитуда импульсов уменьшается до требуемого уровня коэффициентом K_1 усилителя 2 после чего они поступают на пьезоэлементы резонатора 3. Гармонический сигнал с другой пары пьезоэлементов резонатора поступает на предварительный усилитель 4 с коэффициентом K_2 . Усилитель 5 служит для формирования сигнала требуемой амплитуды на входе триггера Шмитта. При построении автоколебательного контура основной трудностью является малая мощность исполнительных пьезоэлементов не досточная на не резонансных частотах для деформирования основания с требуемой амплитудой отклика резонатора.

Для проведения сравнительного анализа использовался резонатор с собственной частотой порядка 7,5 кГц. Структурные схемы контуров

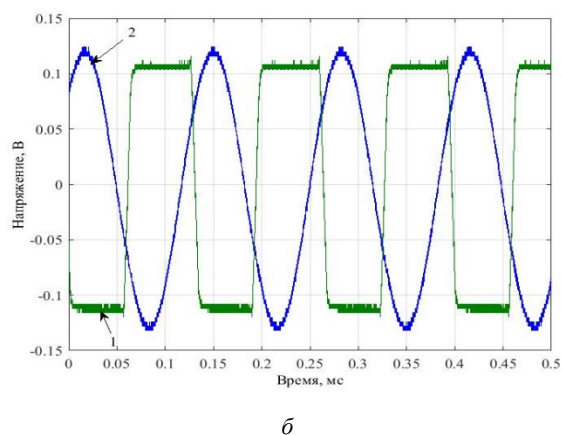
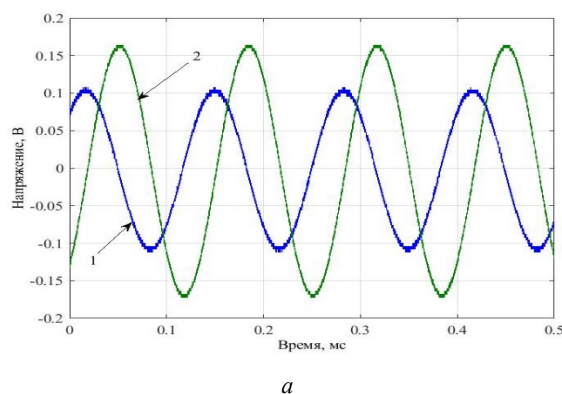
(рис. 1) были реализованы наиболее простыми способами:

– вынужденные колебания реализованы лабораторным генератором, условие резонанса – фазовое запаздывание между входными и выходными колебаниями 90° обеспечивалось путем изменения частоты генерируемого сигнала.

– автоколебательный контур построен на базе операционных усилителей. Коэффициенты усиления и пороги срабатывания триггера выбирались такими, чтобы обеспечить запуск колебаний при подаче питания на схему.

Амплитуды напряжения возбуждения были реализованы равными в двух схемах. Анализ функционирования схем создания первичных колебаний проводился по следующим параметрам: время разгона; время выбега (уменьшение выходного напряжения до уровня менее 20 мВ); амплитуда и частота в установившемся состоянии; фазовый угол между входным и выходным сигналом.

Проведены испытания в процессе которых записаны осциллограммы сигналов, приведенные на рис. 2, где 1 – задающий сигнал, 2 – сигнал, получаемый с резонатора. Величины, измеренные по осциллограммам (рис. 2) и осциллограммам разгона и выбега сведены в табл. 1.



a – вынужденные колебания на резонансной частоте;
б – автоколебания

Рисунок 2 – Осциллограммы входных и выходных сигналов

Таблица 1. Результаты измерений

Наименование	Значение	
	Вынужденные колебания	Автоколебания
Способ возбуждения		
Время разгона, с	3,5	4
Время выбега, с	3	2,5
Амплитуда раскачки, мВ	220	220
Амплитуда установившаяся, мВ	336	240
Частота колебаний, Гц	7518,45	7518,69
Фазовый угол, °	-90	-144

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

– при автоколебательном режиме резонатор работает на за резонансной частоте, что и определяет уменьшение амплитуды колебаний и увеличение фазы по сравнению с режимом вынужденных колебаний;

– время выбега и разгона в режиме автоколебаний меньше чем в режиме вынужденных колебаний, это приводит к увеличению времени готов-

ности гироскопа в целом и препятствует построению датчика угла с малым временем работы (наличие свободной волны при выбеге).

Проведенное исследование подтверждает вывод, что автоколебательный контур значительно проще и дешевле при реализации, однако простейшая его схема построения не позволяет получить характеристик соответствующих режиму резонансной настройки, т.е. требуется более тщательное исследование и доработка его структуры.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов» (FEWG-2022-0002).

Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В. Я. Распопов [и др.] ; под ред. В. Я. Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Журавлев, В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов. – М.: Наука, 1985. – 125 с.

УДК 531.383

ЗАДАЧА ОРИЕНТАЦИИ В БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Матвеев В.В., Колесникова А.Г., Стрельцов Д.С.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются алгоритмы ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Дана характеристика кинематических параметров, используемых для описания положения подвижного объекта: углов Эйлера-Крылова, направляющих косинусов, параметров Родрига-Гамильтона, компонентов вектора Эйлера. Приводятся кинематические уравнения, связывающие параметры ориентации и проекции вектора угловой скорости подвижного объекта.

Ключевые слова: кинематические параметры, алгоритм ориентации, бесплатформенная инерциальная навигационная система.

PROBLEM OF ORIENTATION IN STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

Matveev V., Kolesnikova A., Streltsov D.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. Algorithms for orientation of a strapdown inertial navigation system are considered. The characteristic of the kinematic parameters used to describe the position of a moving object is given: Euler-Krylov angles, direction cosines, Rodrigues-Hamilton parameters, components of the Euler vector. Kinematic equations are given that relate the orientation parameters and projections of the angular velocity vector of a moving object.

Key words: kinematic parameters, orientation algorithm, strapdown inertial navigation system.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

Введение. В настоящее время бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) являются наиболее перспективными

системами в тех применениях, где требуется полная автономность, т.е. отсутствие какой-либо связи с внешней средой. Кроме того, в БИНС

отсутствует гиросtabilизированная платформа, обладающая большими габаритами, массой и низкой надежностью, а инерциальные чувствительные элементы устанавливаются непосредственно на борту подвижного объекта. При этом функции гиросtabilизированной платформы выполняет вычислительное устройство, позволяющее алгоритмически пересчитывать показания акселерометров из связанной системы координат в опорную, на основе решения задачи ориентации. Прямым интегрированием получить углы поворота объекта не представляется возможным, так как проекции угловой скорости не являются голономными координатами [1]. Корректный способ определения углов отклонения подвижного объекта относительно опорной системы координат состоит в интегрировании кинематических уравнений относительно искомым параметров ориентации. В качестве параметров ориентации могут служить углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, вектор конечного поворота и др. От эффективности алгоритмов ориентации зависит точность определения координат местоположения объекта.

Обзору кинематических параметров, используемых для решения задачи ориентации, посвящен настоящий доклад.

Углы Эйлера-Крылова. Три угла: ψ – рыскание, ϑ – тангаж, γ – крен, называемые углами Эйлера-Крылова, описывают положение подвижного объекта относительно опорной системы координат $OX_gY_gZ_g$ (рис. 1). БИНС содержит инерциальный измерительный модуль на трех гироскопах с измерительными осями, направленными вдоль осей связанной с подвижным объектом системы координат $OXYZ$. Каждый гироскоп измеряет одну из трех проекций абсолютной угловой скорости объекта $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

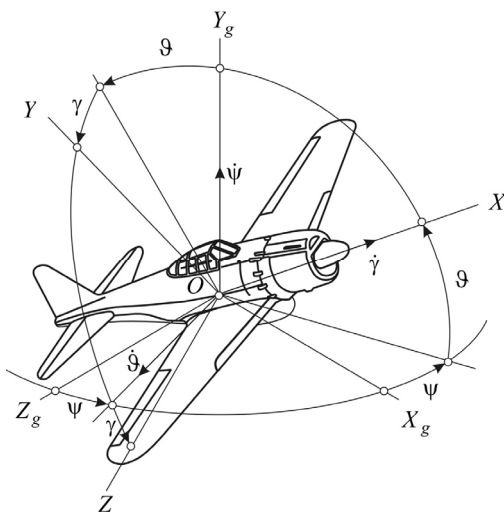


Рисунок 1 – Углы ориентации подвижного объекта

В этом случае углы ориентации могут быть найдены на основе решения трех кинематических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Недостатком кинематических уравнений в углах Эйлера-Крылова является наличие особой точки при угле тангажа значением 90° , так как данные углы по сути моделируют некоторый виртуальный карданов подвес, поэтому в англоязычной литературе такой эффект называют «*gimbal lock*» («запирание кардана»).

Направляющие косинусы. Угловое положение подвижного объекта можно задать девятью направляющими косинусами между осями двух систем координат. Алгоритм ориентации с направляющими косинусами основан на решении матричного уравнения Пуассона [2]:

$$\dot{A} = -[\omega \times]A, \quad (2)$$

где $[\omega \times]$ – кососимметрическая матрица, являющаяся матричным эквивалентом векторного произведения и составленная из проекций вектора угловой скорости подвижного объекта, A – матрица направляющих косинусов, характеризующая переход от опорной системы координат к связанной.

После численного решения уравнения (2) осуществляется переход к углам рыскания, тангажа и крена.

Особенностью уравнений (2) является их линейность и определенность для любых углов рыскания, тангажа и крена, т.е. отсутствие эффекта «*gimbal lock*». Недостатком алгоритма является девятый порядок системы (2), что ограничивает его применение.

Параметры Родрига-Гамильтона. Положение подвижного объекта можно задать 4-мя числами q_0, q_1, q_2, q_3 , называемыми параметрами Родрига-Гамильтона [3]. Часто параметры Родрига-Гамильтона рассматривают как элементы кватерниона Q – гиперкомплексного числа, в котором мнимая часть содержит три мнимые единицы. Для кватернионов определена операция умножения, которая подобна матрицам, некоммутативна, но подчиняется свойствам дистрибутивности и ассоциативности.

Кинематическое уравнение в кватернионах имеет вид

$$2\dot{Q} = Q \circ \Omega, \quad (3)$$

где Q – кватернион ориентации, Ω – кватернион, компонентами которого является показания гироскопов, « \circ » – символ произведения кватернионов.

По элементам кватерниона Q восстанавливаются углы рыскания, тангажа и крена. Кинематические уравнения (3) линейные, имеют четвертый порядок и определены для любых значений углов ориентации, что делает их наиболее часто используемых в алгоритмах БИНС.

Вектор Эйлера. Понятие вектора Эйлера связано с одноименной теоремой, согласно которой произвольное вращение твердого тела вокруг неподвижной точки можно осуществить одним поворотом вокруг соответствующим образом избранной оси вращения, проходящей через эту точку. Вектор Эйлера ϕ направлен по оси конечного поворота, а его проекции на оси связанной системы координат определяются через направляющие косинусы оси конечного поворота.

Кинематическое уравнение для вектора Эйлера приближенно имеет вид [4]

$$\dot{\phi} \approx \omega + \frac{1}{2} \phi \times \omega + \frac{1}{12} \phi \times (\phi \times \omega), \quad (4)$$

где ω – вектор угловой скорости подвижного объекта.

Использование вектора Эйлера вместо направляющих косинусов и кватернионов приводит к уменьшению объема вычислений, поскольку вы-

числяется не девять элементов матрицы направляющих косинусов и не четыре параметра Родрига-Гамильтона, а всего три проекции вектора ориентации на измерительные оси. К тому же отпадает необходимость в нормировке составляющих вектора Эйлера в отличие от направляющих косинусов и параметров Родрига-Гамильтона.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоточных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

Литература

1. Магнус, К. Гироскоп. Теория и применения / К. Магнус. – М.: Мир, 1974. – 516 с.
2. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
3. Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А. Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
4. Bortz, J. E. A New Mathematical Formulation for Strapdown Inertial Navigation / J. E. Bortz // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 1971. – Vol AES-7, No. 1. – P. 61–66.

УДК 681.5.09

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Мацук А.С., Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлена концепция применения технологий оценки рисков и управления реестром риска на проектируемых и существующих системах автоматизации направленной на повышения надежности систем автоматизации энергетического оборудования.

Ключевые слова: надежность, оценка рисков, система автоматизации, реестр рисков.

METHODS OF INCREASING THE RELIABILITY OF AUTOMATION SYSTEMS OF POWER EQUIPMENT

Matsuk A., Saukova Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The concept of applying risk assessment technologies and risk register management on designed and existing automation systems aimed at improving the reliability of automation systems of power equipment is presented.

Keywords: reliability, risk assessment, automation system, risk register.

Address for correspondence: Matsuk A., lilia karastonova st.17, Minsk 2200689, Republic of Belarus;

Saukova Y., Nezavisimosty av. 65, Minsk 220113, Republic of Belarus

e-mail: 375336759859@yandex.by; savkova@bntu.by

Системы автоматизации энергетических предприятий направлены на обеспечение эффективного выполнения рабочих процессов и их безопасности. К основным видам таких систем относятся релейная защита, противоаварийная

автоматика, автоматизированные системы производства и передачи тепловой и электрической энергии, системы контроля и учета электроэнергии и передача данных с приборов учета тепловой энергии. Несмотря на многообразие выполняе-

мых функций, данные системы состоят из однотипных простейших узлов, которые подразделяются на воспринимающие, преобразующие, исполнительные, задающие и корректирующие органы, элементы сложения и вычитания сигналов [1, 2]. Неисправности в системах автоматики сводятся к ограниченному числу элементарных событий [4]:

- обрывы цепей в кабеле, проводе, в местах присоединения и внутри аппарата или прибора;
- короткое замыкание между разными цепями одного напряжения, цепями разных полюсов в системе одного напряжения и полюсов разных систем напряжений, токоведущими частями и корпусом или па землю, сигнальными или рабочими контактами реле и аппаратом (ложные замыкания);
- нарушение функции контактов;
- неисправность электрических элементов: резисторов; конденсаторов; полупроводниковых приборов (диод, триод); катушек реле аппаратов; сигнальных ламп и арматуры; вспомогательных электродвигателей, предназначенных для управления или регулирования; измерительных приборов;
- неисправность механической части аппаратуры, установленной в рабочих помещениях, аппаратуры, смонтированной на пульте управления, аппаратуры, установленной в распределительных пультах.

В некоторых случаях при отказе элемента системы автоматики возможно изменение состояния объекта на неработоспособное, нерабочее, предельное или опасное. Таким образом, создание базы знаний опасных событий и их потенциальных причин позволит повысить надежность и снизить риски, возникающие в процессе функционирования систем автоматики.

Научно-методическое обеспечение управления рисками в системах автоматики энергетического предприятия, включающее:

- систематизацию и классификацию систем автоматики, принципов их построения, основных элементов технического и программного обеспечения и требований к ним на всех этапах жизненного цикла;
- спецификации рисков, оптимизацию выбора технологий управления рисками в пространственно-временном континууме на основе вероятностно-статистических моделей;
- определение факторов внутренней и внешней среды и уровней процессов системы;
- кодификацию опасностей с оценкой возможных последствий и ущерба;
- разработку реестра риска и компьютерной программы-анализатора, позволит повысить надежность, эффективность и результативность энергетических процессов на 15–20 %.

К основным направлениям работ по повышению надежности систем автоматики можно

отнести следующие группы мероприятий по повышению надежности при их проектировании [3]:

- системные;
- структурные (схемные);
- конструктивные;
- эксплуатационные.

К системным методам относятся организационно-экономические мероприятия по стимулированию повышения надежности и ряд технических мероприятий.

Одним из путей стимулирования повышения надежности является включение в стоимость затрат на гарантийные ремонт и обслуживание. При этом разработчик учитывает, что при повышении надежности уменьшаются затраты на гарантийный ремонт и обслуживание, т.е. прибыль становится наибольшей при определенном значении показателя надежности, превышающем максимальна допустимый уровень. В этом случае разработчики и изготовители стремятся узнать этот уровень и достигнуть его. Следовательно, стимулируются точные оценки надежности и ее повышение. Другим путем стимулирования повышения надежности является планирование расходов на весь срок службы проектируемой системы. Технические мероприятия по оформлению показателей надежности проектируемых систем необходимы при любой системе взаимоотношений заказчика и разработчика. К техническим мероприятиям относится учет внешних воздействий на проектируемые технические средства:

- рабочие (тяжелый ударно-вибрационный режим, температурный режим, агрессивная химическая среда, ядерная реакция);
- климатические (температура, влажность, примеси в воздухе);
- биологические (грибок или плесень, насекомые, грызуны).

Структурные (схемные) методы объединяют мероприятия по повышению надежности систем путем совершенствования принципов их построения. Эти методы отличаются большим разнообразием и интенсивно развиваются. К ним относятся, например, варианты построения технических систем, нечувствительных к появлению отказов, за счет введения избыточных аппаратурных и программных средств. При этом могут использоваться и аппаратные (например, резервированные) и программные (например, сравнение результатов избыточных вычислений) средства. В ряде случаев также могут применяться и аппаратно-программные средства обнаружения отказов элементов и восстановления системы.

К конструктивным методам относятся мероприятия по созданию или подбору элементов, узлов или блоков системы, созданию благоприятных режимов работы, принятию мер по облегчению ремонтов и т.д. Время устранения отказа

можно существенно уменьшить путем построения системы по блочно-узловому способу. При этом все системы разбиваются на отдельные функционально законченные блоки, которые в электронных системах соединяются между собой кабелями, а в механических – связываются кинематически. Блоки в свою очередь разбиваются на функционально законченные узлы, выполняемые в виде легкоъемных конструкций. При таком построении восстановление состоит в замене выведших из строя блоков или узлов, что значительно ускоряет процесс ввода системы в строй. Осуществление блочно-узловых конструкций тесно связано с унификацией элементов и систем, которая производится на основе отбора наиболее надежных вариантов. При этом не только повышается надежность технических систем, но и снижается их стоимость, и упрощается изготовление. В ряде случаев удастся создать очень сложные системы из элементов всего двух-трех типов [3].

На стадии проектирования технических систем необходима разработка системы эксплуатационного обеспечения. Проектирование технических систем при этом должно осуществляться в

соответствии с номенклатурой работ по техническому обслуживанию. Например, для планирования периодического регулирования определяющих параметров системы необходимо предусмотреть возможность контроля и прогнозирования значений этих параметров и т.д. Структурные (схемные) и конструктивные методы повышения надежности безусловно являются основными для обеспечения соответствующего уровня надежности разрабатываемых технических систем.

Литература

1. Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
2. Базовые элементы автоматики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info>. – Дата доступа: 20.08.2022.
3. Надежность технических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net>. – Дата доступа: 18.08.2022.
4. Дефекты основных типовых средств автоматизации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arhivinfo.ru>. – Дата доступа: 20.08.2022.

УДК 681.3

ПРОФИЛЬ ЗАЩИТЫ БОРТОВОГО ШЛЮЗА ГРАЖДАНСКОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА Медведев Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Предлагаются принципы построения защищенного комплекса управления гражданского воздушного судна, основанные на трех информационных доменах и открытой сетевой структуре.

Ключевые слова: гражданское воздушное судно, информационный домен, защищенный сервер, единая информационно-вычислительная платформа, комплекс.

SECURITY PROFILE OF A CIVIL AIRCRAFT AIRLOCK Medvedev N.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russian Federation*

Abstract. The principles of building a secure civil aircraft control complex based on three information domains and an open network structure are proposed.

Key words: civil aircraft, information domain, secure server, unified information and computing platform, complex.

*Адрес для переписки: Медведев Н.В., ул. Вторая Бауманская, 5, Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: medvedevnick54@yandex.ru*

Бортовой защищенный шлюз (БЗШ) гражданского воздушного судна (ГВС), представляет собой программно-техническое средство, реализующее функции контроля и фильтрации в соответствии с заданными правилами проходящих через него информационных потоков и используемое в целях обеспечения защиты, в том числе и криптографическими методами, информации ограниченного доступа.

БЗШ должен обеспечивать нейтрализацию следующих угроз безопасности информации (УБИ):

– несанкционированный доступ к информации, передаваемой по каналам взаимодействия бортового оборудования и наземных служб (табл. 1);

– отказ в обслуживании бортовых и наземных средств связи, навигации, наблюдения и наведения; бортовых информационно-вычислительных сетей ГВС; бортовых беспроводных и сенсорно-актуаторных сетей ГВС (табл. 1); информационно-вычислительной системы и системы управления ГВС;

– несанкционированная передача информации из информационно-вычислительной системы и

системы управления ГВС и (или) ее отдельных компонентов путем кибератаки по техническим каналам, см. табл. 1;

– несанкционированное воздействие на информационно-вычислительную систему и систему управления ГВС и (или) ее отдельные компоненты путем кибератак (см. табл. 1), целью которого является нарушение функционирования, включая преодоление или обход установленных функций безопасности.

Таблица 1. Современные методы кибератак по техническим каналам

Пассивные методы	Активные методы
Электромагнитный канал	
Анализ изменения электромагнитного излучения процессоров и других компонентов	Воздействие электромагнитным полем с возникновением отказа в произвольном месте устройства или ошибки работы
Магнитный канал	
Анализ магнитного поля физически изолированных и экранированных устройств	Воздействие переменным магнитным полем, генерирующим вихревые токи, которые могут изменять состояние ячеек памяти
Акустический канал	
Прослушивание жесткого диска, трансформаторов в преобразователях питания материнской платы и т.д.	Воздействие ультразвуком на датчик вибрации жестких дисков, оптических датчиков и т.д.
Оптический канал	
Анализ изменения интенсивности рассеянного от индикаторов света	Воздействие ионизирующего лазера на полупроводники (оптическое индуцирование сбоя)
Тепловой канал	
Анализ изменения теплового излучения компонентов вычислительной системы	Изменение температуры компонентов может привести к ошибкам вычислений и передачи данных
Электрический канал	
Анализ (визуальный, статистический) изменения энергопотребления компонентов	Изменение питания вычислительной системы может привести к ошибкам вычислений

В БЗШ не должно содержаться программ, не выполняющих (не задействованных в реализации) функций безопасности или не предназначенных для обеспечения функционирования БЗШ (сторонних программ).

В БЗШ должны быть реализованы следующие функции безопасности:

- контроль и фильтрация;
- идентификация и аутентификация;
- регистрация событий безопасности (аудит);
- обеспечение бесперебойного функционирования и восстановление;
- тестирование и контроль целостности;
- управление (администрирование).

В среде, в которой функционирует БЗШ, должны быть реализованы следующие функции безопасности среды:

- исключение каналов связи в обход правил фильтрации;
- обеспечение доверенного канала;
- обеспечение доверенного маршрута;
- физическая защита;
- инспекция состояния кибербезопасности;
- трансляция протоколов домена авионики и информационного домена;
- обеспечение безопасного функционирования;
- обеспечение взаимодействия с сертифицированными средствами защиты информации;
- обеспечение безопасной управляемой мутации.

Функции безопасности БЗШ должны обладать составом функциональных возможностей (функциональных требований безопасности), обеспечивающих реализацию этих функций.

В Профиле Защиты (ПЗ) изложены следующие виды требований безопасности, предъявляемые к БЗШ:

– функциональные требования безопасности БЗШ;

– требования доверия к безопасности БЗШ.

Функциональные требования безопасности БЗШ, изложенные в ПЗ, включают:

– требования к управлению потоками информации;

– требования к идентификации и аутентификации субъектов межсетевое взаимодействия;

– требования к регистрации событий безопасности (аудиту);

– требования к обеспечению бесперебойного функционирования БЗШ и восстановлению;

– требования к тестированию и контролю целостности ПО БЗШ;

– требования к управлению БЗШ.

Функциональные требования безопасности для БЗШ выражены на основе компонентов требований из национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013 «Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные компоненты безопасности».

Состав функциональных требований безопасности, включенных в настоящий ПЗ, обеспечивает следующие функциональные возможности БЗШ типа «Д»:

- возможность осуществлять фильтрацию сетевого трафика для отправителей информации, получателей информации (в том числе исполнительных устройств) и всех операций передачи контролируемой БЗШ информации к узлам автоматизированной системы управления и от них;

– возможность обеспечения фильтрации для всех операций перемещения через БЗШ информации к узлам автоматизированной системы управления и от них;

– возможность осуществлять фильтрацию, основанную на следующих типах атрибутов безопасности субъектов: сетевой адрес отправителя; сетевой адрес узла получателя; и информации: сетевой протокол, который используется для взаимодействия;

– возможность явно разрешать информационный поток, базируясь на устанавливаемых администратором БЗШ наборе правил фильтрации, основанном на идентифицированных атрибутах;

– возможность явно запрещать информационный поток, базируясь на устанавливаемых администратором БЗШ наборе правил фильтрации, основанном на идентификационных и аутентификационных атрибутах;

– возможность осуществлять фильтрацию, основанную на следующих типах атрибутов безопасности информации: протоколы, которые используются для взаимодействия;

– возможность осуществлять фильтрацию, основанную на следующих типах атрибутов безопасности информации: разрешенные/запрещенные команды;

– возможность осуществлять проверку использования отдельных команд, для которых администратором БЗШ установлены разрешительные или запретительные атрибуты безопасности;

– возможность запрещать информационный поток, если в нем обнаружены аномалии функционирования (нарушение структуры протокола, статистические аномалии и иные аномалии) действующих протоколов;

– возможность разрешать информационный поток, основываясь на результатах проверок;

– возможность запрещать информационный поток, основываясь на результатах проверок;

– возможность разрешать информационный поток, если значения атрибутов безопасности, установленные взаимодействующими средствами защиты информации для контролируемого сетевого трафика, указывают на отсутствие нарушений безопасности информации;

– возможность запрещать информационный поток, если значения атрибутов безопасности, установленные взаимодействующими средствами защиты информации для контролируемого сетевого трафика, указывают на наличие нарушений безопасности информации;

– возможность регистрации и учета выполнения проверок информации сетевого трафика;

– возможность читать информацию из записей аудита уполномоченным администраторам;

– возможность выбора совокупности событий, подлежащих аудиту, из совокупности событий, в отношении которых возможно осуществление аудита;

– возможность оповещения уполномоченных лиц о критичных видах событий безопасности, в том числе сигнализация о попытках нарушения правил межсетевого экранирования.

Литература

1. Информационные технологии. Сеть управления электросвязью : ГОСТ Р 53633.2-2009. – Введ. 01.12.2010. – Стандартинформ. – 11 с.

2. Обеспечение безопасности сетей электросвязи : ГОСТ Р 52448-2005. – Введ. 01.01.2007. – Стандартинформ. – 16 с.

3. Объект информатизации, факторы. Воздействие на информацию : ГОСТ 51275-2006. – Введ. 01.02.2002. – Стандартинформ. – 8 с.

4. Изделия авиационной техники. Комплексные программы обеспечения безопасности полета, надежности, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности. Общие требования : ГОСТ Р 56080-2014. – Введ. 01.01.2015. – Стандартинформ. – 26 с.

УДК 532; 614.8

НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА РЕАЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ В СИСТЕМАХ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Мисюкевич Н.С., Шабан Е.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Обоснована необходимость учета реологических свойств пенообразующих растворов в системах пожаротушения.

Ключевые слова: реологические свойства, пожар, вода, пена, расчет.

THE NEED TO CONSIDER THE REALOLOGICAL PROPERTIES OF SOLUTIONS IN FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

Misiukevich N., Shaban L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The necessity of taking into account the rheological properties of foaming solutions in fire extinguishing systems is substantiated.

Key words: rheological properties, fire, water, foam, mortar.

*Адрес для переписки: Мисюкевич Н.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: misjukevitsch@mail.ru*

Из тактики пожаротушения известно, что расход воды, раствора пенообразователя Q_n , л·с⁻¹, необходимый для достижения огнетушащего эффекта следует определять по формуле

$$Q_n = I \cdot S_o, \quad (1)$$

где I – нормативная интенсивность подачи, л·с⁻¹·м⁻²; S_o – площадь тушения, защищаемая орошителем (генератором), м².

При движении воды, раствора пенообразователя в трубопроводах систем пожаротушения возникают потери давления, как следствие расхода энергии на преодоление сил трения.

Расход огнетушащих веществ, подаваемых по трубопроводам систем пожаротушения зависит от диаметра трубопроводов и шероховатости их поверхности, влияющей на потери энергии при движении, давления в трубопроводе и вида огнетушащего вещества.

Потери давления воды на расчетных участках трубопроводов ΔP , МПа, согласно СН 2.02.03-2019 [1], определяются по формуле

$$\Delta P = \frac{Q_y^2 \cdot l_y}{100 \cdot K_T}, \quad (2)$$

где Q_y – расход огнетушащего вещества на участке; l_y – длина расчетного участка трубопровода, м; K_T – удельная гидравлическая характеристики (коэффициент проводимости) трубопровода; 100 – переводной коэффициент, учитывающий, что коэффициент проводимости (удельная гидравлическая характеристика трубопроводов) была ранее установлена и дана для расчетов, проводимых в несистемных единицах (метр водяного столба).

При расчете расхода огнетушащего вещества и продолжительности работы установок пожаротушения согласно примечанию 5 таблицы А.2 приложения А СН 2.02.03-2019 [1]: «Для автоматических установок пожаротушения, в которых используют воду с добавкой смачивателя на основе пенообразователя общего назначения, интенсивность орошения принимают в 1,5 раза меньше, чем для водяных». Аналогичное допущение сделано для расчета тушения высотного стеллажного хранения при использовании пенообразователя или воды со смачивателем (примечание 1 таблицы Б.1 приложения Б [1]).

Применение физической модели движения воды по трубопроводным системам в качестве модели для расчета движения растворов поверхностно-активных веществ требует детального анализа. Движение воды в трубопроводах с определенным сопротивлением сдвигу подчиняется ньютоновскому закону. Эти сопротивления могут быть учтены при расчете потерь давления по длине одним коэффициентом, характеризующим физические свойства трубопровода. Реальное течение растворов поверхностно-активных веществ

(воды со смачивателем, растворов пенообразователей) существенно зависит и от вида поверхностно-активного вещества, и от его концентрации в растворе. И эти изменения невозможно по существующим знаниям адекватно отразить путем дополнения существующей модели движения воды одним коэффициентом, как это описано в СН 2.02.03-2019 [1]. Недостаток применяемого [1] подхода заключается в том, что, с одной стороны, реальный расход раствора, даже при уменьшенной расчетной интенсивности, может оказаться удовлетворяющим тактическим соображениям (1) и будет выше необходимого, что кажется положительным. Однако, это приведет к более быстрому расходу огнетушащего вещества и ограничению времени тушения менее требуемого, что никак нельзя считать положительным. С другой стороны, реальный расход раствора может оказаться недостаточным, что не может обеспечить минимально необходимую интенсивность тушения. То есть в любом случае возникает неопределенность по интенсивности подачи и требуемому количеству огнетушащих веществ для тушения, которые должны храниться в резервуарах на нормативное время пожаротушения.

Уменьшение потерь давления по длине при подаче растворов поверхностно-активных веществ, в 2,25 раза, в сравнении с подачей воды вне зависимости от вида и концентрации растворов не является физически верным и может привести к неэффективности применения систем пожаротушения. Корректный расчет должен учитывать гидравлические потери давления по длине с учетом вида поверхностно-активного вещества и его концентрации в растворе. Это определяется реологическими свойствами неньютоновских жидкостей, к которым относятся составы для пенного пожаротушения.

Потери давления раствора пенообразователя на расчетных участках трубопроводов ΔP_{no} , МПа, можно определить по формуле

$$\Delta P_{no} = N_O \cdot k_p \frac{Q_{no}^b \cdot l_y}{100 \cdot r \cdot g \cdot d^a}, \quad (3)$$

где N_O – критерий неньютоновского поведения раствора пенообразователя; k_p – степень консистенции раствора; Q_{no} – расчетный расход раствора пенообразователя на участке, м³·с⁻¹; r – плотность, кг·м⁻³; g – ускорение свободного падения, м·с⁻²; d – диаметр трубопровода, м; a и b – коэффициенты.

Значения коэффициентов a , b , степени консистенции раствора k_p и критерия неньютоновского поведения N_O для рабочих растворов различных пенообразователей, необходимо определять путем проведения испытаний. Они существенно зависят от вида поверхностно-активного вещества и являются индивидуальными для каждого пенообразователя.

Успех применения автоматических установок пенного пожаротушения зависит от подачи по трубопроводам к месту тушения растворов пенообразователей с необходимым расходом и созданием не менее минимально необходимого давления в диктующей точке для обеспечения требуемой огнетушащей интенсивности подачи пены в течение нормативно обусловленного времени. При этом на узлах управления давление не должно превышать 1 МПа, исходя из применения для повышения давления в сети центробежных насосов.

Осознание необходимости учета реологических свойств растворов пенообразователей, применяемых в системах пожаротушения позволило сформулировать задачи дальнейшего исследования:

– определить реологические свойства растворов пенообразователей для автоматических установок пожаротушения;

– провести проверочный расчет потерь давления в трубопроводных системах различной конфигурации и диаметров для воды и водных растворов пенообразователей;

– на основе полученных результатов расчетов выработать предложения по изменению методики расчета трубопроводной части установок пенного пожаротушения.

Литература

1. Строительные нормы Республики Беларусь. Пожарная автоматика зданий и сооружений: СН 2.02.03-2019. – Введ. 16.08.2020. – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 100 с.

УДК 628.74

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАДИИ ПОЛНОГО ОХВАТА ПОМЕЩЕНИЯ ПЛАМЕНЕМ

Невдах В.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. С помощью программы FDS выполнено моделирование пожаров в помещении с естественной вентиляцией. Получено, что параметры реакций горения материалов, находящихся в помещении, и условия вентиляции определяют динамику пожара в нем и длительность стадии полного охвата.

Ключевые слова: Компьютерное моделирование, пожар в помещении, стадия полного охвата, естественная вентиляция.

COMPUTER SIMULATION OF THE COMPARTMENT FIRE FLASHOVER

Nevdakh V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. FDS was used to simulate fires in compartments with natural ventilation. It was found that the parameters of the combustion reactions of the materials from which the pieces of furniture are made, which are in the enclosures, determine the fire dynamics and the stage of flashover duration.

Key words: computer simulation, compartment fire, flashover, natural ventilation.

*Адрес для переписки: Невдах В.В., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nevdakh@bntu.by*

Мировая статистика пожаров доказывает, что пожары в ограждениях являются наиболее опасными для жизни людей. Пожар в помещении может развиваться различными путями, зависящими главным образом от геометрии помещения и его вентиляции, от типа горючих материалов, их количества, площади и ориентации их поверхностей [1]. Знание динамики развития пожаров в ограждениях требуется как разработчикам систем противопожарной безопасности различных объектов, так и профессиональным пожарным при выполнении своей работы для сохранения жизни людей. При развитии пожара в ограждениях могут происходить различные явления. Считается, что после возгорания и в течение начальной стадии роста пожар является контролируемым горючим материалом,

так как в помещении достаточно кислорода для горения большей части пиролизирующегося топлива и рост пожара целиком зависит от характеристик горючих материалов и геометрии. При этом пожар может достичь стадии полного охвата помещения пламенем. Затем пожар переходит в стадию развития пожара, в течение которой скорость тепловыделения определяется количеством кислорода, который входит в помещение через открытые проемы, и поэтому пожар становится контролируемым вентиляцией, так как в помещении недостаточно кислорода для горения части пиролизирующегося топлива. По мере выгорания топлива пожар переходит в стадию затухания и возвращается в режим контролируемым горючим материалом [2]. Очевидно, что речь о спасении людей при пожаре

в ограждениях может идти только на его начальном этапе до достижения стадии полного охвата, когда в помещении происходит резкое изменение ситуации. В современной литературе можно найти несколько вариантов определений стадии полного охвата, в которых приводятся разные признаки стадии [1–3]. Эти признаки обусловлены различными механизмами, связанными со свойствами горючих материалов, их расположением и ориентацией, геометрией помещения и условиями в верхнем слое воздуха.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование стадии полного охвата пожара в помещении, содержавшем предметы мебели из разных горючих материалов. Исследовалось влияние параметров реакции горения материалов и условий естественной вентиляции на время наступления и длительность стадии полного охвата помещения пламенем.

Моделирование выполнялось с использованием программы FDS (Fire Dynamics Simulator) [4]. С помощью графического интерфейса PyroSim была создана модель помещения – жилой комнаты с размерами $4.5 \times 5 \times 3$ м, в котором находятся диван, кресло, ковер на полу, столик, шкаф, тумба, сделанные из различных горючих материалов (рис. 1). Естественная вентиляция помещения осуществлялась через одинаковые проемы размерами 4.2×2.2 м в стенах. Пожар инициировался источником с тепловыделением 10 кВт и размерами 0.1×0.1 м, помещаемым на сидение дивана. Горение материалов моделировалось реакциями, аналогичными реакции горения полиуретана. Моделировались первые 1500 секунд пожаров.

На рис. 2 представлена динамика тепловыделения при пожарах в помещении с различными условиями естественной вентиляции.

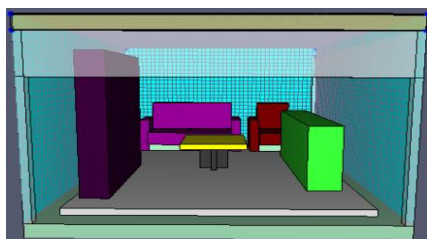


Рисунок 1 – Модель помещения

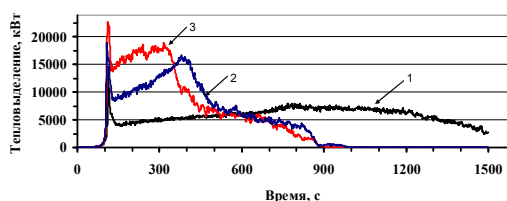


Рисунок 2 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре в помещении с открытым проемом в одной стене (1), в двух противоположных стенах (2), во всех четырех стенах (3)

Видно, что все пожары быстрые, тепловыделение 1000 кВт и стадия полного охвата достигаются за время ~ 100 секунд. Увеличение количества открытых проемов практически не влияет на время и длительность стадии полного охвата, продолжительность которой менее 10 с, но приводит к росту тепловыделения на следующей стадии развитого пожара (рис. 3).

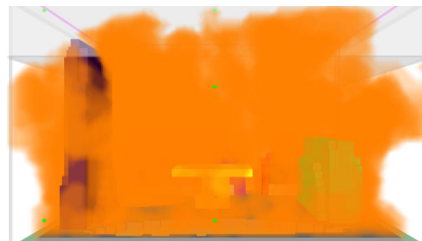


Рисунок 3 – Вид помещения на стадии его полного охвата пламенем

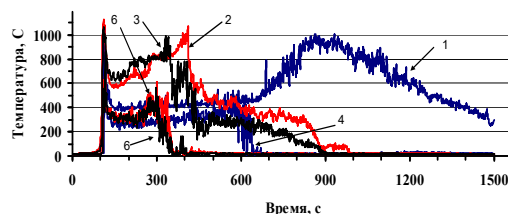


Рисунок 4 – Зависимости температуры воздуха от времени в центре помещения на высоте 1,7 м (1–3) и 0,3 м (4–6) при пожаре в помещении с открытым проемом в одной стене (1, 4), в двух противоположных стенах (2, 5), во всех четырех стенах (3, 6)

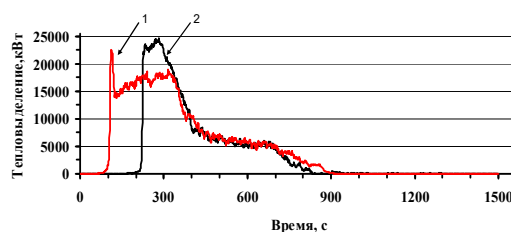


Рисунок 5 – Зависимости тепловыделения от времени при пожаре с теплотой сгорания материала дивана и ковра $4.5E4$ (1) и $1E4$ кДж/кг (2)

При таких пожарах в нижней зоне помещения – ниже высоты среднего роста человека 1,7 м – наблюдаются большие градиенты температуры воздуха, о чем свидетельствуют зависимости, представленные на рис. 4. Динамика пожара в помещении при одинаковых условиях вентиляции сильно зависит от параметров реакций находящихся в нем горючих материалов. Рис. 5 иллюстрирует изменение характера развития пожара в помещении с открытыми проемами во всех четырех стенах с быстрого (кривая 1) до среднего (кривая 2) при уменьшении теплоты сгорания материала, из которого сделаны диван и ковер. Видно, что переходные процессы к стадии полного

охвата имеют примерно одинаковые длительности у обоих пожаров, но длительность стадии полного охвата заметно больше у пожара со средней скоростью нарастания. Это связано с различиями в газодинамике пожаров, обусловленными разными величинами тепловыделения, что приводит к разному соотношению областей, в которых происходит пламенное горение и пиролиз горючих материалов.

В работе показано, что условия вентиляции и параметры реакций горения определяют время наступления и длительность стадии полного охвата помещения пламенем.

Литература

1. Karlsson, B. Enclosure fire dynamics. / B. Karlsson, J.G. Quintiere. – CRC Press LLC, 2000. – 317 p.
2. Drysdale, D. An introduction to fire dynamics / D. Drysdale. – Third edition. – Wiley, 2011. – 551 p.
3. Gorbett, G. The Current Knowledge & Training Regarding Backdraft, Flashover, and Other Rapid Fire Progression Phenomena, World Safety Conference / G. Gorbett, R. Hopkins. – Boston, Massachusetts, 2007.
4. McGrattan, K. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2009. – 94 p.

УДК 629.7.066.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

Савёлов П.И., Яцына Ю.Ф., Щавлев А.А.

*Республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведены компьютерные исследования распределения тепловых полей при функционировании герметичного электронного устройства в условиях набегающего потока. Определены направление и величина скорости охлаждающих воздушных потоков для данного конструктивного исполнения. Разработан граф распределения рассеиваемой тепловой энергии. Установлено, что при данных конструктивных решениях не обеспечивается необходимая величина рассеивания теплоты при скорости набегающего потока 20 м/с и температуры окружающей среды 40 °С. Определена целесообразность выработки конструктивных решений, обеспечивающих нормальные условия эксплуатации электронного устройства.

Ключевые слова: тепловые поля, компьютерные исследования, рассеивание теплоты.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF COOLING OF A HERMETIC ELECTRONIC DEVICE UNDER THE CONDITIONS OF A FLOW

Savelov P., Yatsyna Y., Shchavlev A.

*Republican Unitary Enterprise “Scientific-and-Production Centre of multifunctional unmanned systems” National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Computer studies of the distribution of thermal fields during the operation of a sealed electronic device under free flow conditions have been carried out. The direction and magnitude of the speed of cooling air flows for this design are determined. A graph of the distribution of dissipated thermal energy has been developed. It has been established that these design solutions do not provide the required amount of heat dissipation at an incoming flow velocity of 20 m/s and an ambient temperature of 40 °C. The expediency of developing constructive solutions that provide normal operating conditions for an electronic device is determined.

Key words: thermal fields, computer research, heat dissipation.

*Адрес для переписки: Савёлов П.И. 220141, Минск, ул. Купревича, 10/7
e-mail: i@savelov-1.ru*

Для безотказной работы электронной аппаратуры в процессе функционирования необходимо, чтобы выполнялись условия ее нормального теплового режима, чтобы при любых внешних воздействиях окружающей среды внутри прибора должны создаваться температурные поля, которые не превышают предельно допустимые температуры работы электронных компонентов [1]. Определение тепловых полей особенно целесообразно проводить на ранних этапах проектирования электронной аппаратуры, т.к. принятие неправильных

технических решений не позволит конструктивно обеспечить оптимальные условия работы. Численный расчет величины тепловых полей при функционировании электронной аппаратуры не всегда возможен, т.к. невозможно определить основные начальные условия для корректного расчета [2]. Решение данной задачи возможно при помощи компьютерного моделирования на основе твердотельных моделей разрабатываемых устройств.

Целью данной работы является компьютерное моделирование тепловых полей, формирующихся

при функционировании целевой нагрузки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при крейсерской скорости 20 м/с.

Основными критериями оптимизации, определяющими эффективность разрабатываемого конструктивного решения, являются:

- снижение температуры тепловыделяющих элементов до оптимальных значений;
- улучшение массогабаритных параметров разрабатываемой конструкции;
- обеспечение требуемой величины теплообмена набегающим воздушным потоком.

При помощи САПР SolidWorks разработана твердотельная модель целевой нагрузки входящей в состав беспилотного авиационного комплекса (БАК) «Бусел М50».

Данный тип бортовой аппаратуры рассчитан на длительную работу. Тепловой режим таких устройств определяется следующими факторами:

- притоком тепловой энергии от работающих элементов;
- притоком тепловой энергии аэродинамического нагрева, поступающей через стенки устройства;
- рассеиванием тепловой энергии в окружающую среду стенками защитного корпуса.

Для проведения исследований были приняты следующие упрощения:

- поверхность теплонагруженных электронных компонентов является изотермической и не должна превышать 90 °С;
- тепловые процессы, протекающие в устройстве, являются установившимися во времени;
- коэффициенты теплообмена определены при температуре, возникающей при полной рассеиваемой мощности. Соблюдение этого условия обязательно при определении температуры поверхности защитного корпуса на основе принципа суперпозиции.

На рис. 1 представлены результаты моделирования распределения скоростей ламинарного набегающего воздушного потока при крейсерской скорости БПЛА 20 м/с.

Установлено, что скорость набегающий потока на передней стенке защитного корпуса снижается до 10–13 м/с, а скорость огибающего потока составляет 18–24 м/с.

Эффективность рассеивания тепла при данной скорости теплового потока нами моделировалась при температуре окружающей среды + 40 °С, что соответствует климатическому исполнению прибора УХЛ 1.

На рис. 2 приведены распределения тепловых потоков внутри герметичного корпуса целевой нагрузки при расположении теплонагруженного элемента на ее тыльной поверхности. Установлено, что температура не теплонагруженных электронных компонентов в результате конвекции может достигать 80 °С.

Данная температура является неприемлемой для функционирования бортовой аппаратуры.

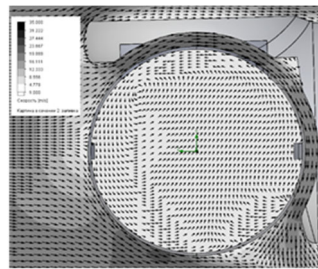
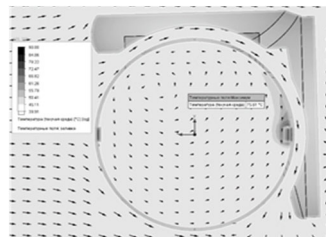


Рисунок 1 – Градиент распределения скорости набегающего потока



1 – теплонагруженный элемент, 2 – защитный герметичный корпус

Рисунок 2 – Распределение тепловых потоков

На рис. 3 представлен граф рассеивания тепловой энергии в заданных условиях.

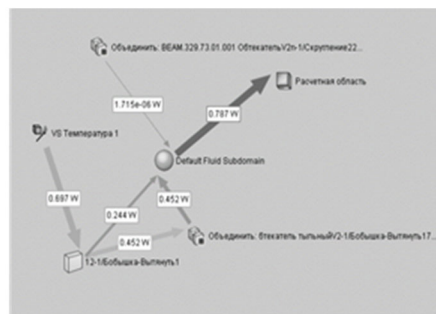


Рисунок 3 – Граф рассеивания тепловой энергии

Установлено, что суммарная тепловая мощность, рассеиваемая данной конструкцией защитного корпуса составляет 1,5 Вт. В соответствии с технической документацией теплонагруженного элемента, для его оптимального режима работы необходимо обеспечить рассеивание тепловой мощности не менее 3,5 Вт.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что для обеспечения оптимального теплового режима эксплуатации целевой нагрузки БПЛА необходимы дополнительные конструктивные решения, обеспечивающие рассеивание избыточного тепла тепловыделяющих элементов.

Литература

1. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена: [пер. с англ.] / Д. Ши. – М.: Мир, 1988. – 242 с.
2. Палий, А.В. Численное исследование эффективности поверхности теплоотвода с теплонагруженным источником в условиях теплопереноса воздуха / А.В. Палий, Н.Н. Чернов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 184–197.

УДК 620.19:57.086

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Пантелеев К.В.¹, Микитевич В.А.¹, Цедик Л.В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт порошковой металлургии»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрено использование метода сканирующего зонда Кельвина для характеристики процессов адсорбции препаратов для биологических исследований на подложке с наноструктурированной поверхностью. Измерения пространственного распределения работы выхода электрона с поверхности до нанесения биологического препарата позволяют характеризовать однородность распределения адгезионных свойств подложки. Аналогичные измерения после нанесения препарата характеризуют исключительно сам препарат.

Ключевые слова: работа выхода электрона, сканирующий зонд Кельвина, поверхность, адгезия.

CHARACTERISATION OF SUBSTRATES FOR BIOLOGICAL RESEARCH USING ELECTRON WORK FUNCTION MEASUREMENTS

Tyavlovsky A.¹, Zharin A.¹, Pantsialeu K.¹, Mikitsevich U.¹, Tsedzik L.²

¹Belarusian National Technical University

²SSI "Powder Metallurgy Institute"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Scanning Kelvin probe technique was applied to the characterization of the processes of preparations for biological research adsorption on a substrate with a nanostructured surface. Measurements of the spatial distribution of the electron work function before applying the biological preparation were used to characterize the uniformity of the distribution of the adhesive properties of the substrate. Similar measurements after biological preparation application relate only to the preparation itself.

Key words: Electron Work Function, Scanning Kelvin Probe, Surface, Adhesion.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

При выращивании клеточных культур для биологических исследований достигаемый результат в значительной степени определяется адгезией клеточной культуры к поверхности используемой для ее выращивания подложки. Выбор материала подложки ограничен требованиями биологической нейтральности, при этом адгезионная способность поверхности зависит не только от ее химического состава, но и от микрогеометрии и микроструктуры (соотношения аморфной и кристаллической фазы, кристаллографической ориентации кристаллитов).

Проведенные ранее исследования показали наличие выраженной взаимосвязи между адгезией клеточной культуры к поверхности алумоборосиликатных стекол и относительными значениями работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности, измеряемыми по методу сканирующего зонда Кельвина [1]. Данный метод обеспечивает полностью бесконтактные исследования с возможностью построения карты распределения РВЭ по поверхности.

В рассматриваемом случае РВЭ определяется как разность энергии электрона на бесконечном удалении от поверхности E_0 и уровнем Ферми поверхности E_F :

$$\phi = E_0 - E_F. \quad (1)$$

При измерениях по методу сканирующего зонда Кельвина вместо величины E_0 выступает уровень Ферми поверхности чувствительного элемента электрометрического зонда E_{F0} . Вследствие этого такие измерения являются не абсолютными, а относительными.

Согласно модели электростатических сил, РВЭ в первом приближении (без учета влияния двойного электрического слоя на поверхности) определяется видом атомов, составляющих поверхность, и их взаимным расположением в поверхностном слое. В соответствии с этой моделью РВЭ, как и сила адгезии, увеличивается с увеличением плотности упаковки атомов на поверхности, что подтверждают приводимые в научной литературе результаты математического моделирования [2]. Экспериментально установлено, что для поверхностей кристаллов меди с различной кристаллографической ориентацией, отличающихся только плотностью упаковки атомов, но не их видом, различие РВЭ может достигать 590 мэВ [3]. Характеризующая адгезию сила межатомного взаимодействия, измерявшаяся в том же исследовании при помощи атомно-силового микроскопа, изменяется при этом в 1,23 раза и находится в обратной зависимости от РВЭ [3], причем приращение силы адгезии соотносится с изменением РВЭ практически линейно.

С учетом этих данных были выполнены экспериментальные исследования адгезионной способности подложек для выращивания клеточных культур, изготовленных из наноструктурированного капролоктона. Исследования выполнялись по методу сканирующего зонда Кельвина с использованием макетного образца установки сканирующей зондовой электрометрии. Развитая структура поверхности, как предполагалось, должна была значительно улучшить адгезионную способность капролоктона, однако исключала измерение силы адгезии прямыми методами.

Выполнение исследований в режиме сканирования позволило достичь качественно нового результата, а именно не только оценить адгезионную способность нового материала по параметру РВЭ, но и определить однородность ее распределения по поверхности подложки, что оказывает существенное влияние на рост клеточной культуры [1].

Измерения выполнялись на участке подложки размерами 50×50 мм с пространственным разрешением (шагом сканирования) 0,5 мм.

На рис. 1 представлена визуализированная карта распределения значений контактной разности потенциалов (КРП) $U_{CPD} = E_F - E_{F0}$. Учитывая, что, как следует из (1), величина U_{CPD} имеет противоположный по отношению к РВЭ знак, более высокие значения на карте соответствуют меньшим значениям РВЭ и, соответственно, большей адгезионной способности.

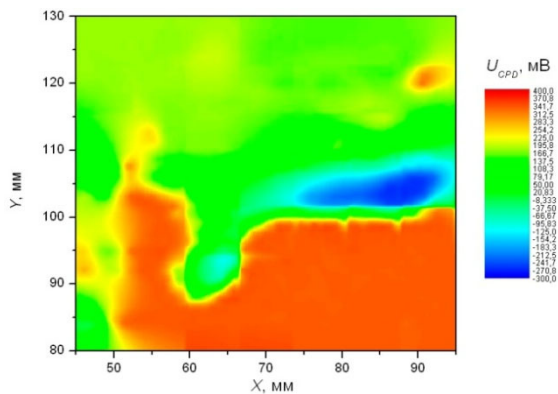


Рисунок 1 – Визуализация распределения РВЭ поверхности наноструктурированного капролоктона

Исследуемый образец демонстрирует высокую неоднородность электрофизических свойств поверхности и ее адгезионной способности. При этом минимальные значения U_{CPD} на приведенной карте соответствуют или незначительно превышают таковые для неструктурированного капролоктона, тогда как на существенной части поверхности наблюдается повышение значений КРП на 200 мВ и более, что говорит о значительном улучшении адгезионных свойств на этих участках.

Далее на тот же участок поверхности было нанесено 0,05 мл изотонического раствора NaCl 9 мг/л и выполнены повторные исследования пространственного распределения РВЭ до и после высыхания раствора. Результат исследований для свеженанесенного раствора представлен на рис. 2.

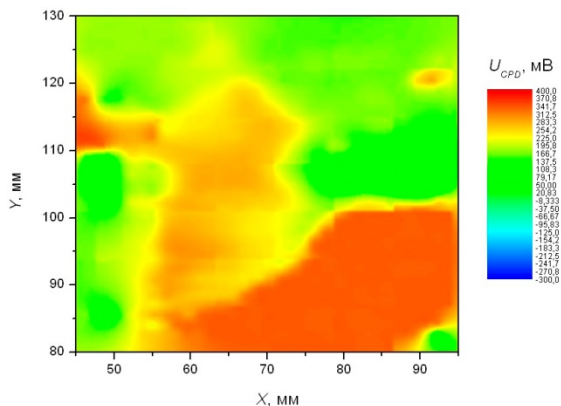


Рисунок 2 – Принцип действия волоконно-оптического датчика приближения

Можно видеть, что величина РВЭ в месте нанесения раствора не зависит от начальной РВЭ подложки: измеренные значения одинаковы как для участков с большей, так и с меньшей адгезией. После высыхания раствора значения РВЭ и картина их распределения практически не изменились. Данный результат объясняется исключительно высокой поверхностной чувствительностью метода сканирующего зонда Кельвина, измерительный сигнал которого формируется только несколькими поверхностными атомарными слоями в пределах Дебаевской длины экранирования. Таким образом, метод сканирующего зонда Кельвина позволяет отдельно исследовать адгезионную способность подложки (субстрата) перед нанесением клеточной культуры и электрофизические свойства нанесенного препарата без необходимости учета искажений, вносимых электрофизическими свойствами субстрата.

Литература

1. Выбор базовой подложки для изучения взаимодействия в системе клетка-поверхность методом измерения контактной разности потенциалов / А. К. Тявловский [и др.] // Материалы VIII Московского международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития» 17-20 марта 2015. – М.: ЗАО «ЭКСПО-биохим-технологии», РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – С. 232–234.
2. Haas, G. A. Work function and secondary emission studies of various Cu crystal faces / G. A. Haas, R. E. Thomas // Journal of Applied Physics. –1977. – Vol. 48. – P. 86.
3. Li, D. Y. Electron work function: A parameter sensitive to the adhesion behavior of crystallographic surfaces / D. Y. Li, W. Li // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 79, № 26. – P. 4337.

УДК 539.21 , 535.317.61-34, 548.732

ПОЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ Субач А.А.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью данной работы являлось получение изображений в рентгеновских лучах и построение 3D изображения на основе стереопары. Рентгеновское 3D изображение позволяет получить информации о внутренней структуре объекта без его разрушения. Для получения стереопары использовался метод с поворотом исследуемого объекта на заданный угол.

Ключевые слова: рентгеновские лучи, 3D изображения, стереография.

OBTAINING X-RAY 3-D IMAGES OF OBJECTS Subach A.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The purpose of this work was to obtain images in x-rays and build 3D images based on a stereopair. X-ray 3D image allows you to get information about the internal structure of the object without destroying it. To obtain a stereo pair was used a method with the rotation of the sturdy object to a definite angle.

Key words: X-rays, 3D images, stereography.

Адрес для переписки: Субач А.А., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: lexasubach@gmail.com

Стереофотография в последние годы становится востребованным методом в науке, в прикладных областях – электронике и медицине. С помощью сканирующей микроскопии, оптической микроскопии и др. можно получить двумерное изображение объектов, которые в ряде случаев не позволяют определить рельеф объектов. В этом случае становится целесообразным использование стереоскопии для получения для получения 3D изображений. На стереоскопических рентгеновских 3D изображениях видны используемые объекты как прозрачные трехмерные объекты с пространственной глубиной.

Объемное изображение значительно упрощает оценку внутренней структуры исследуемого объекта [1]:

- дефекты становятся более заметны или вовсе становятся заметны только в 3D;
- трехмерные изображения сложных структур значительно легче понять, чем обычные рентгеновские изображения;
- становятся очевидными форма, расположение внутренних компонентов, расположение внутренних дефектов и т.д.

Обычно для получения стереофотографического 3D рентгеновского изображения используют 2 камеры или перемещают камеру. На рис. 1 и 2 показаны рентгеновские 3D снимки [1].

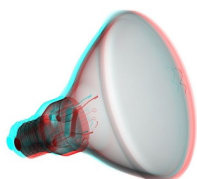


Рисунок 1 – 3D-изображение лампочки в рентгеновских лучах

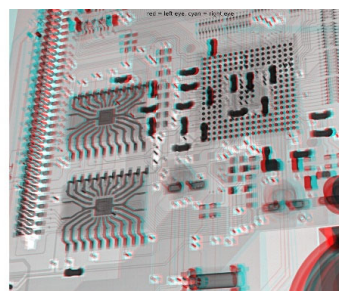


Рисунок 2 – 3D изображение платы в рентгеновских лучах

Для просмотра данных изображений необходимы 3D очки или 3D мониторы. На современных 3D мониторах качество изображения и ощущения глубины намного выше чем в 3D очках.

Зачастую использование второй рентгеновской камеры или перемещение объекта и камеры является дорогим и неудобным. Для получения стерео изображения этой ситуации объект можно поворачивать на заданный угол как показано на рис. 3.



Рисунок 3 – Схема получение снимков с поворотом объекта

Для получения стереопары в рентгеновских лучах использовался следующие методы:

- со смещением камеры на расстояние стерео базиса;
- со смещением объекта на расстояние стерео базиса;
- с поворотом объекта на заданный угол.

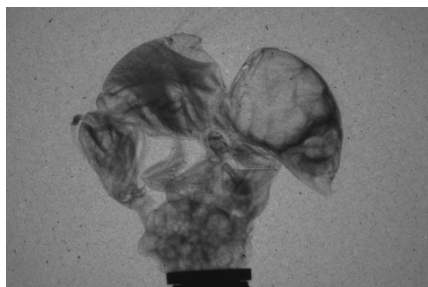


Рисунок 4 – Изображение пчелы в рентгеновских лучах

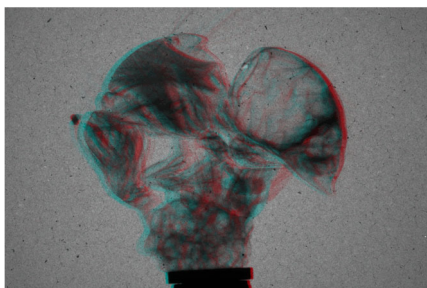


Рисунок 5 – Анаглиф пчелы в красных и голубых тонах

Расстояние от источника до объекта составляло 500 mm, от объекта до камеры 5 mm. Напряжение питания 32 кВ, сила тока 4 mA, выдержка 60 с. Для получения 3D изображения использовалось программное обеспечение StereoPhoto maker. С помощью встроенной функции «color anaglyph» были построены анаглифы в красных и голубых тонах. На рис. 4 показано изображение пчелы в рентгеновских лучах, а на рисунке 5-стерео изображение пчелы. Для получения стереопары пчела поворачивалась на угол 3°.

Полученные результаты аналогичны результатам при перемещении камеры или объекта.

3D изображения в рентгеновских лучах позволяют получить данные о внутренней структуре объектов, которые не видны при обычном рентгеновском исследовании, что значительно помогает в нахождении дефектов.

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. X-ray inspection in 3-D [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://www.ntbxbay.eu/3d_x-ray_stereoscopy.

УДК 621.317

ТЕХНОЛОГИЯ УЧЕТА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ»

Дедович Н.Н., Кучинский П.В., Романов А.Ф., Ходасевич А.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описан принцип построения и структура подсистемы учета энергоносителей (тепло, газ, вода) в системе «Умный дом» на основе ультразвуковых смарт-приборов учета с беспроводной передачей данных на удаленный сервер. Представлен вариант построения такой системы с использованием серийных счетчиков, управляющих и интерфейсных модулей.

Ключевые слова: смарт-приборы, энергоносители, система учета, передача данных.

ENERGY METERING TECHNOLOGY IN THE "SMART HOUSE" SYSTEM

Dedovich N., Kuchynski P., Romanov A., Khodasevich A.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The principle of construction and structure of the subsystem for accounting for energy carriers (heat, gas, water) in the "Smart Home" system based on ultrasonic smart meters with wireless data transmission to a remote server is described. A variant of building such a system using serial counters, control and interface modules is presented.

Key words: smart devices, energy carriers, metering system, data transmission.

Адрес для переписки: Романов А.Ф., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ramanau@bsu.by

Важнейшей составной частью системы «Умный дом» является подсистема, обеспечивающая учет и передачу данных о потреблении энергоносителей – электроэнергии, воды, тепла, газа.

Высокая точность, надежность и стабильность ультразвуковых измерителей расхода, а также нечувствительность процесса измерения к качеству измеряемой среды обусловили их активное

внедрение как в промышленности, так и в жилищно-коммунальной сфере.

Ультразвуковые счетчики воды и газа, основанные, по сути, на использовании электронных устройств и вычислительной техники, которые имеют встроенные каналы передачи данных (смарт-счетчики) позволяют легко интегрироваться в различные системы сбора данных с передачей информации как по проводным, так и беспроводным каналам передачи. Перспективные технические и программные решения по беспроводной передаче данных на сервер системы могут быть представлены, в основном, несколькими реализациями:

- смарт-счетчик имеет GSM модем и передает показания через стандартную сотовую сеть;
- смарт-счетчик имеет радиомодем LoRa (433 или 868 МГц) и передает показания через специализированную «мини-соту» по радиointерфейсу LoRaWAN;
- смарт-счетчик имеет модуль Wi-Fi и передает показания через стандартный роутер.

Хранение переданной информации производится на выделенных площадках (серверах), а доступ для пользователей может осуществляться через личный кабинет с различных устройств, подключенных к сети Интернет (ПК, планшет, смартфон).

Подсистема учета энергоносителей системы «Умный дом» состоит из трех основных функциональных частей (рис. 1):

- ультразвуковые смарт-приборы;
- сетевой хаб;
- сетевой сервер.

Для организации внутренней сети передачи данных выбрана технология LoRa, которая позволяет передавать информацию на большие расстояния, при этом имеет наилучшие характеристики по потреблению энергии.

Встроенные в систему смарт-приборы должны иметь интерфейс, позволяющий обеспечить подключение различных адаптеров для передачи данных. Так, например, измерение расхода газа осуществляется ультразвуковым счетчиком газа РБГ У G6 (рис. 2), который разработан в НИИ-ПФП им. А.Н.Севченко и серийно выпускается в РБ. Счетчик обеспечивает измерение расхода газа до 10 м³/ч. Счетчик содержит микроконтроллер с портом SPI и имеет интерфейс UART, что позволяет подключать различные адаптеры для передачи данных и управления.

Сетевой хаб является центральным узлом для управления и считывания информации с смарт-приборов и передачи результатов на сетевой сервер. Так как используется беспроводная технология LoRa™, которая позволяет передавать информацию на большие расстояния, то один сетевой

хаб способен обслуживать не только смарт-приборы одного потребителя, но и смарт-приборы, расположенные в радиусе до 15 км. Таким образом, в системе «умный дом» с беспроводной технологией LoRa™ достаточно установить один сетевой хаб для сбора информации в многоквартирном доме или от нескольких потребителей, например, в коттеджном поселке.

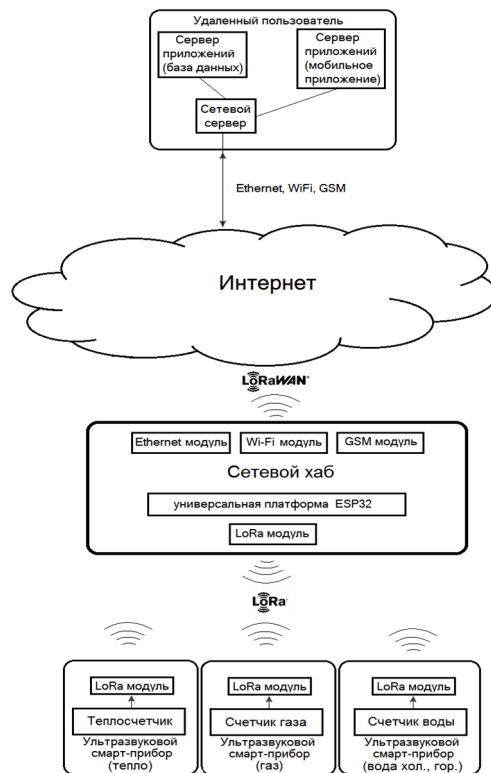


Рисунок 1 – Структурная схема подсистемы учета



Рисунок 2 – Ультразвуковой счетчик газа РБГ У G6

Сетевой хаб строится на основе стандартной аппаратной системы модульных компонентов размером 5×5 см M5Stack [1], которая специально проектировалась, как наборов инструментов и решений для разработки IoT (Internet of Things).

Модульность платформы позволяет собирать устройства с гибкой конфигурацией. Кроме того, платформа M5Stack содержит большое количество элементов для решения различных задач и позволяет реализовать все модули в составе сетевого хаба. Платформа M5Stack поддерживается электронной платформой с открытым исходным кодом Arduino [2]. Это позволяет разрабатывать и

поддерживать ПО для сетевого хаба без дополнительных затрат, так как среда для разработки и библиотеки доступны в сети Интернет.

Сетевой хаб может включать следующие модули (рис. 3):

- базовый модуль на чипе ESP32;
- Wi-Fi модуль;
- LoRa модуль;
- Ethernet модуль;
- GSM модуль;
- источники питания.

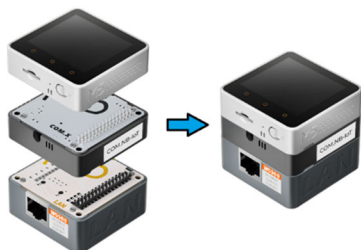


Рисунок 3 – Модульные компоненты сетевого хаба

Базовый модуль на чипе ESP32 – это экономичный контроллер IoT [3]. Он использует набор микросхем Espressif ESP32, оснащенный двумя 32-разрядными микропроцессорами Xtensa® LX6 с основной частотой до 240 МГц. Имеет встроенную флэш-память объемом 16 МБ, встроенный 2,0-дюймовый пол-ноцветный дисплей HD IPS, 3 настраиваемых кнопки, динамик, слот для карт TFcard и другие периферийные устройства. Внут-

ренний интерфейс предоставляет различные интерфейсные ресурсы (ADC/DAC/I2C/UART/SPI и т. д.) и 15 контактов ввода-вывода. Модуль имеет встроенную литиевую батарею с чипом управления питанием.

Сетевой сервер является транспортным узлом, занимаясь управлением и обслуживанием сети LoRaWAN. Он позволяет обеспечить обмен данными между сервером приложений и сетевым хабом. Сетевой сервер подключается к серверу приложений по стандартному IP соединению. Сервер приложений представляет собой программную платформу, предназначенную для эффективного выполнения процедур, на которых построены приложения.

Сетевой сервер способен обрабатывать данные от нескольких сетевых хабов и обмениваться информацией с другими серверами, обеспечивая масштабируемость и неограниченность системы.

Литература

1. Stack & Play [Electronic resource]. – Mode of access: <https://m5stack.com>. – Date of access: 10.06.2022.
2. What Is Arduino? [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.arduino.cc>. – Date of access: 10.06.2022.
3. ESP32-Basic-Core-IoT-Development-KIT-V2-6 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://shop.m5stack.com/collections/m5-controllers/products/esp32-basic-core-iot-development-kit-v2-6>. – Date of access: 10.06.2022

УДК 535.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Чжан Ю.¹, Савкова Е.Н.¹, Счастливая Н.И.², Ницетски Л.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Государственное научное учреждение «Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложена модель цифрового изображения на макро-, микро- и информационном уровнях. Дано описание анкеты-опросника для исследований психофизиологических воздействий цифровых изображений. Приведены основные результаты исследования, используемые для формирования биологических референтных интервалов при разработке благоприятной визуальной среды.

Ключевые слова: цифровое изображение, психофизиологическое воздействие, анкета.

RESEARCH OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL DIGITAL IMAGES IMPACTS

Zhang Y.¹, Saukova Y.¹, Shastnaya N.², Nitsetski L.¹

¹Belarusian National Technical University

²State Scientific Institution «Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A digital image model at the macro, micro and information levels is propose. A description of the questionnaire for the study of the psychophysiological effects of digital images is given. The main results of the study used for the formation of biological reference intervals in the development of a favorable visual environment are given.

Keywords: digital image, psychophysiological impact, questionnaire.

Address for correspondence: Saukova Y., Nezavisimosty av. 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: zhang_yun1991@foxmail.com

Повсеместное распространение цифровых изображений, воспроизводимых на экранах телевизоров, компьютеров, планшетов, и смартфонов, стимулирует исследования их воздействий на организм человека. На макроуровне цифровое изображение есть неточечный первичный излучатель, представляющий потенциальную опасность в части нежелательных визуальных эффектов, например, «вспышек», областей дискомфорта яркости и др., показатели которых нормируются ГОСТ 31210-2003, ГОСТ Р 50948-2001, ГОСТ Р 51671-2015, ГОСТ Р 52870-2007, ГОСТ Р 52872-2019. На микроуровне цифровое изображение - дискретно-непрерывный объект с упорядоченной структурой конечного числа элементов, каждому из которых независимым образом заданы цвет, интенсивность и другие характеристики; согласно ГОСТ Р 52872-2019 это «контент, доводимый до пользователя через его органы чувств с помощью пользовательского приложения, часто не требующий соответствия стандарту». На информационном уровне цифровое изображение представляет собой контент, несущий смысловую и психоэмоциональную нагрузку, описываемый через ансамбль состояний в пространстве случайных событий семействами ортогональных матриц и неориентированными графами через массивы данных и вещественные функции $imgI(x,y)$ [1]:

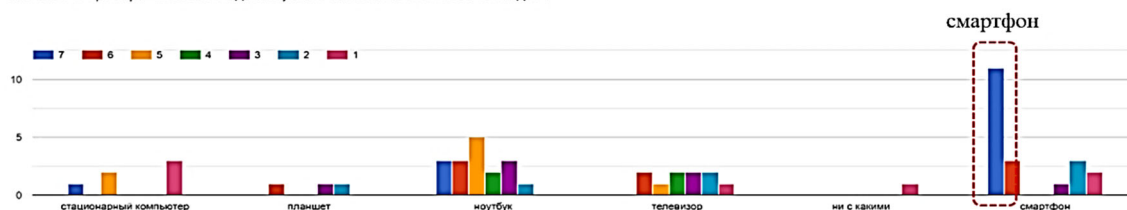
$$img = I(x,y) = \begin{bmatrix} I(0,0) & \dots & I(0,W-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I(H-1,0) & \dots & I(H-1,W-1) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где W и H – ширина и высота изображения.

В октябре 2021 года авторами была составлена анкета-опросник на русском, английском и китайском языках для исследований психофизиологических восприятий цифровых изображений. Цель исследования – формирование биологических референтных интервалов, используемых в дальнейшем для проектирования благоприятной световой среды. Анкета размещена на облаке

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd8R5J5JsTak-KbYOBJA53pz3IHBIfpbQUz_sTJYLJZT_pVfA/viewform и включает область регистрации с указанием возраста, пола, географического региона, профессии, которые использованы как факторы биологических референтных интервалов. Анкета содержит 35 вопросов, например, «С какими приборами Вы взаимодействуете в большей степени в течение дня?», «Какой контент Вы предпочитаете просматривать на смартфоне в течение ограниченного времени (например, когда едете в транспорте или ожидаете своей очереди в банке)?», «Как часто у Вас бывают проблемы с бессонницей?», «Какой контент Вы предпочитаете использовать в течение свободного времени, находясь дома?», «Сколько времени Вы обычно проводите, взаимодействуя с телевизором, находясь дома?», «Как часто Вы просыпаетесь ночью без видимых причин и имеете трудности с засыпанием?», «Делаете ли Вы нормируемые перерывы при взаимодействии с компьютером?», «В какой световой среде Вы работаете за компьютером?», «Бывают ли у Вас жалобы на ухудшение здоровья?», «Как часто Вы отмечаете онемение и боли в кисти руки, боли в спине, сухость в глазах, головные боли; пренебрежение личной гигиеной, употребление пищи около компьютера?», «Вызывает ли у Вас работа с компьютером раздражение глаз (зуд, жжение, чувство песка под веками)?», «Имеется ли у Вас нарушение зрения (близорукость, дальнозоркость, астигматизм)?», «Как Вы предпочитаете общаться с близкими людьми или друзьями?», «Как часто существует актуализация или угроза потери дружеских и/или семейных отношений, успехов в учебе в связи с частой работой за компьютером (пребыванием в сети)?», «Как часто Вы пренебрегаете семейными, общественными обязанностями и учебой из-за частой работы за компьютером (пребывания в сети)?», «Вы ощущаете потребность вернуться за компьютер для улучшения настроения или ухода от жизненных проблем?» и др.

2. С какими приборами Вы взаимодействуете в большей степени в течение дня ?



3. С какими приборами Вы взаимодействуете сразу же, как только просыпаетесь ?

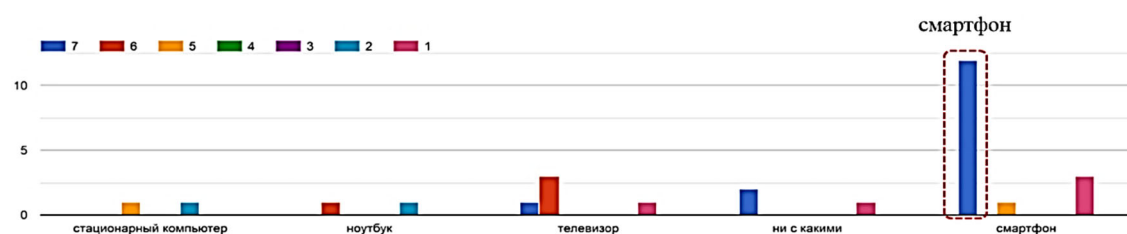


Рисунок 1 – Диаграммы опроса

Был проведен опрос более 167 респондентов. По результатам исследования были построены диаграммы (некоторые примеры которых приведены на рис. 1), позволившие сделать следующие выводы:

– смартфоны являются наиболее используемым электронным устройством в любое время суток; затем ноутбуки, а затем телевизоры;

– компьютеры используются в жизни людей в основном во время работы или учебы деятельности, в повседневной же жизни – планшеты и ноутбуки, телевизор больше не является необходимостью, и люди в основном пожилого возраста смотрят телевизор, в том числе используя его как «фон»;

– люди предпочитают динамический контент статическому, но при возможной зрительной и психологической усталости форма цифровых изображений оказывает меньшее влияние, а содержание – большее;

– люди предпочитают взаимодействовать с цифровыми изображениями больше при ярком освещении, чем при тусклом (как это предписано нормативными документами, например, [2]);

– большая часть общения с родными и близкими предпочитает очное, обычное и частое использование компьютера может стать причиной нерегулярной работы и/или отдыха, но в настоящее время не вызовет социальных проблем.

Литература

1. Штанчаев, Х. Б. Математическая модель представления изображения в системах распознавания образов / Х. Б. Штанчаев // Мир науки. Научный интернет-журнал. – 2015. – Вып. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mir-nauki.com>. – Дата доступа: 02.09.2022.

2. Recommendation ITU-R BT.2035 (07/2013) A reference viewing environment for evaluation of HDTV program material or completed programmes BT Series Broadcasting service (television).

УДК 620.178

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТПЕЧАТКА ПРИ УДАРНОМ ВНЕДРЕНИИ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Крень А.П., Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Мацулевич О.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Показано, что профиль восстановленного и невосстановленного отпечатка при индентировании зависит от скорости нагружения и сочетания механических и физических характеристик материала: предела текучести, модуля упругости, коэффициента деформационного упрочнения. Установлено, что для ударного вдавливания в отличие от статического форма отпечатка в состоянии полной пластичности в нагруженном и разгруженном состоянии не совпадает. При этом динамическое вдавливание при коэффициенте деформационного упрочнения более 0,15 характеризуется отсутствием «навала» поверхности вокруг деформированного металла. Это позволяет использовать разработанные ранее алгоритмы для определения механических характеристик металлов с достаточной точностью.

Ключевые слова: индентирование, металл, удар, отпечаток.

STUDYING OF THE OF IMPRINT FORMATION PROCESS DURING IMPACT INTRUSION OF A SPHERICAL INDENTER INTO ELASTIC-PLASTIC MATERIAL

Kren A., Pratasenia T., Lantsman G., Matsulevich O.

*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. It is shown that the profile of the recovered and unrecovered impressions during indentation depends on the loading rate and the combination of the mechanical and physical characteristics of the material: yield strength, elastic modulus, and strain hardening exponent. It has been established that for impact indentation, in contrast to static one, the shape of the impression in a full plasticity state for loaded and unloaded state does not coincide. At the same time, dynamic indentation for materials with a strain hardening exponent of more than 0.15 is characterized by the absence of a “pile-up” of the surface around the strained metal. This allows using previously developed algorithms to determine the mechanical characteristics of metals with sufficient accuracy.

Keywords: indentation, metal, impact, impression.

*Адрес для переписки: Крень А.П., ул. Академическая, 16, Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 7623300@gmail.com*

Достоверность измерения механических характеристик методами индентирования и возможность применения разработанных для этих целей алгоритмов [1, 2] во многом определяется

точностью регистрации параметров формирующегося пластического отпечатка: его диаметром, глубиной, величиной возвышения («навала», «pile-up») или прогиба («впадины», «sink-in»)

контура поверхности в области действия контактных напряжений. При использовании традиционных методов испытаний индентированием, оценка характеристик материала, как правило, ограничивается измерением его твердости (например, по Бринеллю НВ или по Мейеру НМ), для чего регистрируется только диаметр проекции пластического отпечатка $d_c = 2a_c$. При этом d_c в большинстве случаев принимается равным $2a$ (рис. 1).

В тоже время известно, что при индентировании материалов d_c может быть как больше, так и меньше d в зависимости от формирующегося профиля деформированной поверхности (рис. 1). Как показывают работы [1, 2] пренебрежение даже этим небольшим отличием может привести к существенной погрешности в измерении твердости, а также предела прочности σ_b , предела текучести σ_t модуля упругости E .

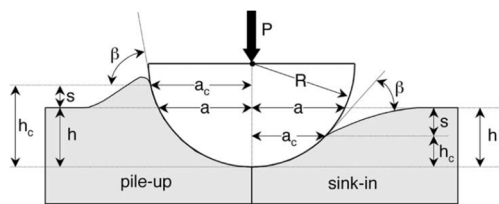


Рисунок 1 – Профиль поверхности образца при индентировании

Разработанные в настоящее время алгоритмы, как правило, используются только для случая «sink-in». Поэтому важно установить границы их применимости исходя из различных сочетаний механических свойств металлов, которые и определяют процесс формообразования отпечатка. Цель настоящей работы – изучение отличий в форме и размерах образующегося пластического отпечатка при ударном и статическом внедрении сферического индентора, а также оценка факторов, влияющих на процесс формообразования и измеряемые значения характеристик материала.

Непосредственное измерение формы отпечатка представляет собой сложную задачу [3], особенно для динамического индентирования, для которого максимальные размеры отпечатка не превышают десятков микрометров. В связи с этим, было проведено моделирование ударного вдавливания жесткого индентора в упругопластическое полупространство, обладающее различным сочетанием предела прочности σ , коэффициента деформационного упрочнения n , предела текучести σ_t и модуля упругости E .

При моделировании диаметр индентора составил 2,5 мм, масса 5 г, предупредная скорость варьировалась в диапазоне 0,5–6 м/с.

С целью проверки адекватности разработанной конечно-элементной модели и задаваемых граничных условий было проведено сравнение получаемых результатов с известными работами при статическом внедрении индентора. На рис. 2

показаны данные расчетов параметра s/h , которые качественно и количественно совпадают с приведенными в [4] сведениями.

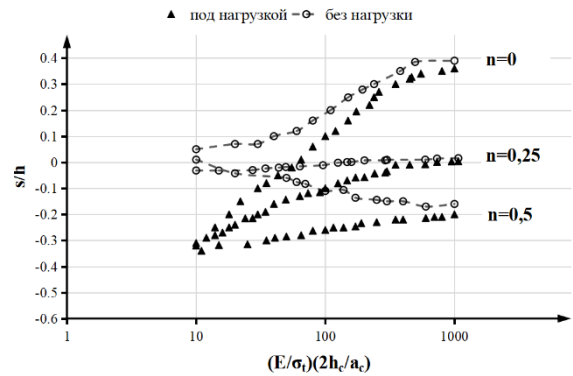


Рисунок 2 – Зависимость параметра s/h от $(E/\sigma_t)(2h_c/a_c)$ для упругопластических материалов с соотношением E/σ_t в пределах 200 – 2000 и n равным 0; 0,25 и 0,5 при статическом внедрении индентора

Для динамического внедрения картина изменения профиля отпечатка значительно усложняется. Как видно из рис. 3 существует более сложная связь между s/h и свойствами материала.

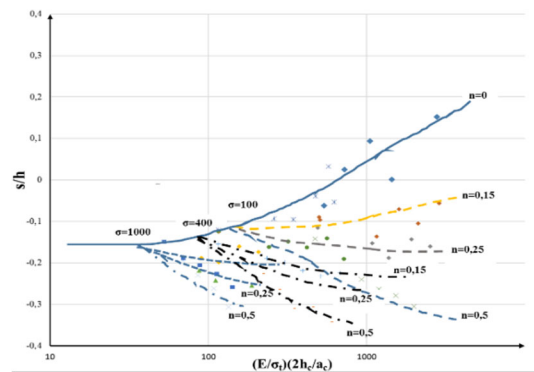


Рисунок 3 – Зависимость параметра s/h от $(E/\sigma_t)(2h_c/a_c)$, полученная при максимальной нагрузке материала при динамическом индентировании

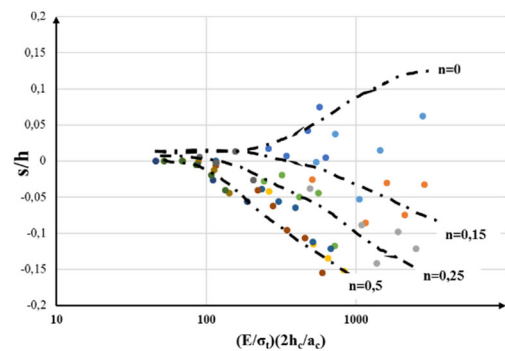


Рисунок 4 – Изменение параметра s/h при полной нагрузке материала

Для нагруженного индентором материала профиль поверхности будет определяться не только величиной $(E/\sigma_t)(2h_c/a_c)$, которая показывает насколько развитой является пластическая деформация, но и сочетанием значений σ_t и n .

В тоже время при разгрузке (рис. 4) характер зависимости схож с показанным на рис. 2. Здесь четко прослеживается влияние n , а предел текучести явным образом не оказывает воздействия на ход кривых.

При этом из рис. 4 четко заметно, что для динамического внедрения более характерно формирование отпечатка с прогибом поверхности. Навал образуется только для материалов, которые не испытывают упрочнения ($n = 0$). Поэтому разработанные ранее алгоритмы могут применяться для динамического индентирования с достаточной достоверностью.

Полученные результаты являются предварительными и требуют уточнения путем создания более совершенных моделей и проведения натуральных экспериментов. Они могут быть использованы при разработке оборудования для диагностики технического состояния металлов различных промышленных конструкций.

УДК 621.396.96

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕССА

Комиссарчик А.В., Тыдыкова О.В., Сушко А.А., Климов М.А., Исаев А.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В связи со спросом на модернизацию промышленного оборудования старого образца на аналоговом управлении, была разработана печатная плата управления для пресса однокривошипного простого действия КГ 2134 на базе микроконтроллера и проведено моделирование ее работы.

Ключевые слова: пресс однокривошипный, плата печатная, Altium Designer, микроконтроллер, алгоритм работы.

SIMULATION OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF THE PRESS

Komisarchyk A., Tydykova O., Sushko A., Klimov M., Isaev A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Due to the demand for modernization of old-style industrial equipment with analog control, a printed circuit board for a single crank simple action press KG 2134 based on a microcontroller was developed and its operation was simulated.

Key words: Single crank press, printed circuit board, Altium Designer, microcontroller, operation algorithm.

*Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com*

В нынешнее время повсеместной цифровизации и цифрового метода обработки информации, промышленное оборудование произведенное на аналоговом принципе управления не отвечает современным требованиям и возможностям оборудования на цифровых интегральных схемах, хоть и его механическая часть способна выполнять и, даже, конкурировать с современными станками.

Промышленное оборудование образца 21 века обладает следующими возможностями: проверка на наличие человека в рабочей зоне оборудования и, соответственно, остановка до момента его удаления, автоматическая подача в рабочую зону

Литература

1. VanLandingham, M. R. Review of instrumented indentation Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology / M. R. VanLandingham. – 2003. Vol. 108, iss. 4. – P. 249–265.

2. Kren, A. P. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation / A. P. Kren, V. A. Rudnitskii // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – № 4, vol. 12. – P. 28–34.

3. Исследование точности определения диаметра отпечатка при динамическом индентировании на основании оптических измерений / А. П. Крень // Оптические методы исследования потоков: Труды XVI Международной научно-технической конференции, 28 июня–02 июля 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. – 260 с. [Электронное издание]. – С. 156–162.

4. Taljat, B. Development of pile-up during spherical indentation of elastic-plastic solids / B. Taljat, G. M. Pharr, // International Journal of Solids and Structures. – 2004. – Vol. 41, iss. 14. P. 3891–3904.

заготовки, подсчет количества рабочих циклов, ведение журнала и многое другое.

Пресс однокривошипный простого действия КГ2134 предназначен для операций холодной штамповки: нарубки, пробивки, гибки неглубокой вытяжки, обрезки и другие виды работ. Кривошипный пресс – машина с кривошипно-шатунным механизмом.

Рабочей частью пресса является штамп, неподвижную часть которого крепят к столу, подвижную – к ползуну пресса. Ползун перемещается кривошипно-шатунным механизмом. За один оборот кривошипа шатун совершает полный ход,

во время которого при движении ползуна вперед происходит штамповка [1].



Рисунок 1 – Пресс однокривошипный простого действия КГ2134

Для модернизации пресса однокривошипного простого действия КГ2134 необходимо было релейную схему управления заменить на современную и актуальную цифровую на основе микроконтроллера.

Данную модернизацию можно выполнить используя уже существующие промышленные контроллеры, таких фирм как Ogion или Defender или разработка собственного под заданные параметры и режимы. На данный момент существуют современные средства разработки систем, позволяющие разработать такие схемы самостоятельно, поэтому было принято решение выполнить разработку своими силами.

Для модернизации пресса однокривошипного простого действия КГ2134 была разработана схема с индикацией работы устройства, с системами позиционирования, с системами управления входами, с системой управления выходами

На основе разработанных схем, используя средства разработки Altium Designer, была разработана печатная плата и смоделирована ее работа.

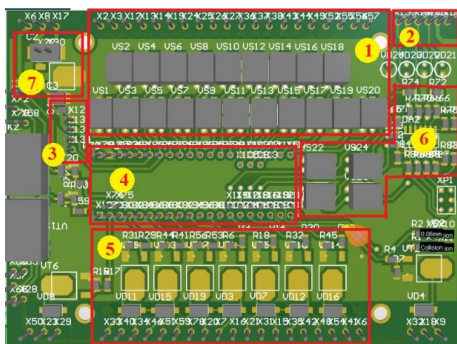


Рисунок 2 – Общий вид платы управления. Вид сверху

На рис. 2 можно выделить следующие зоны:
– зона кнопок и концевиков состоит из оптически развязанных входов реализованных в виде

гальванической развязки на базе оптопары PC817. Зона необходима для подключения элементов управления прессом однокривошипным;

– зона индикации аварийного состояния. Зона необходима для подключения внешней индикации для мониторинга состояния пресса во время аварийной ситуации;

– зона подключения индикации. Зона необходима для подключения дисплея для отображения состояния станка во время работы и для программирования режимов его работы. Из дисплеев доступных на рынке был выбран дисплей типа LCD модели 1602A;

– зона микроконтроллера – место для установки микроконтроллера. В качестве микроконтроллера использовалась отладочная плата на основе микроконтроллера STM32;

– зона управления релейными выходами. Зона необходима для управления клапанами гидравлической и пневматической системы, что реализуется гальванической развязкой на оптопарах PC817;

– зона управления энкодеров. Зона необходима для определения текущего положения заготовки на прессе, для этого была реализована гальваническая развязка на базе оптопары PC817;

– зона системы питания. Зона необходима для организации питания системы управления пресса, для этого реализована схема согласования напряжения питания источника и питания микроконтроллера, стабилизатором напряжения была выбрана модель L78M05ABDT-TR.

На рис. 3 представлен алгоритм работы устройства.

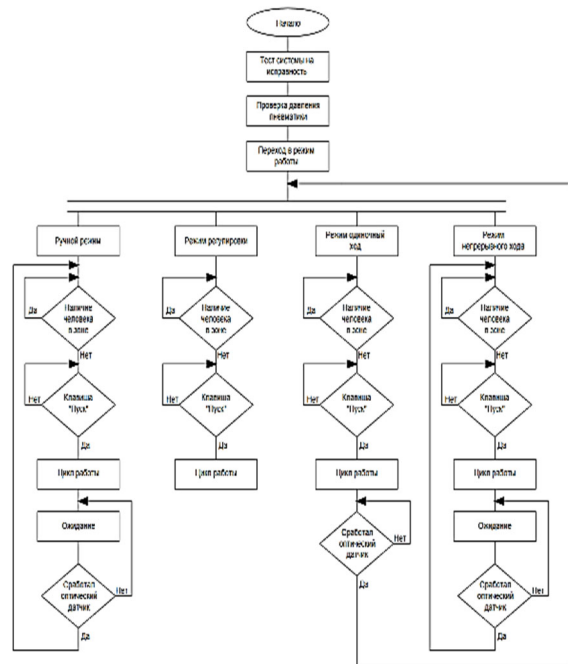


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы устройства

Система управления перед началом проводит проверку на свою исправность, а также проверяет давление в пневматических системах прессы.

В алгоритме работы представлены 4 режима работы прессы: ручной режим, режим регулировки, режим режим одиночного хода, режим непрерывного хода – которые были реализованы благодаря разработанной системе управления.

Так же была реализована проверка наличия человека в рабочей зоне как перед началом работы прессы, так и во время его работы.

Литература

1. Пресс однокривошипный открытый простого действия модели КГ2134. Руководство по эксплуатации КГ2134 – 85 с.

УДК 621.382.2:53.072

СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Создана методика конструирования полупроводниковых измерительных преобразователей в монолитном и гибридно-пленочном варианте, которая позволяет синтезировать оптимальную конструкцию полупроводниковых измерительных преобразователей.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, топология, полупроводниковая структура, пленочные элементы, триодные компоненты.

SYNTHESIS OF THE DESIGN OF SEMICONDUCTOR MEASURING CONVERTERS Sychyk V., Gluhmanchuk V., Ulasiuk M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A technique for designing semiconductor measuring transducers in a monolithic and hybrid-film version has been created, which makes it possible to synthesize the optimal design of semiconductor measuring transducers.

Key words: measuring transducer, topology, semiconductor structure, film elements, triode components.

*Адрес для переписки: Сычик В.А., пр. Рокоссовского, 49-18, 220095 Минск, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

При разработке конструкции полупроводниковых измерительных преобразователей (ПИП) наиболее важной стадией этого процесса является трансформация их электрической схемы в топологическую. Главное требование при разработке топологии ПИП – максимальная плотность упаковки элементов при минимальном количестве пересечений межэлементных соединений.

Разработка топологии полупроводниковых измерительных преобразователей включает ряд этапов [1]:

- получение исходных данных;
- расчет геометрических размеров активных и пассивных элементов; разработка эскиза топологии;
- разработка предварительных вариантов топологии и выбор окончательного варианта.

Конструктивно ПИП реализуется на полупроводниковых и диэлектрических подложках монолитной или гибридно-пленочной структурами. Поэтому топология пленочных ПИП отличается от топологии монолитных преобразователей.

Разработка топологической структуры гибридно-пленочных ПИП выполняется в четыре этапа:

- определение минимальных размеров платы, выбор компонентов и типа размера корпуса;
- разработка коммутационной схемы соединенных элементов на подложке;
- расчет геометрических размеров и выбор формы пленочных элементов;
- разработка окончательного варианта топологии.

На первом этапе проводится анализ электрической схемы для выделения пленочных и дискретных (навесных) элементов.

Затем выбираем оптимальное значение ρ_s резистивной пленки с учетом того, что все резисторы будут изготовлены из одного материала.

В качестве критерия оптимальности принимаем минимально необходимую площадь под пленочные элементы ИП, которую займут все резисторы схем и которой соответствует значение оптимума:

$$\rho_{\text{Сопт}} = (1 - \gamma_{\text{кф}})(\sum R_i / \sum R_i^{-1})^{1/2} = \sigma_h / \sigma_i((\sum R_i / \sigma_r^2 \text{ доп}) / (\sum (R_i \sigma_r \text{ доп})^{-1}))^{1/2}, \quad (1)$$

где R_i – номинальное значение сопротивления i -го резистора; n – число резисторов в схеме; ρ_s – поверхностное сопротивление; $\gamma_{\text{кф}}$ – погрешность коэффициента формы.

Выбранное значение $\rho_{\text{Сопт}}$ должно удовлетворять условию $\gamma_{\rho_s} < \gamma_r$.

При этом составляющие полной погрешности должны находиться в пределах: $\gamma_{\text{кф}} = (0,1-0,5)\gamma_R$, $\gamma_{\rho_s} = (0,5-0,9)\gamma_R$. Если отношение $R_{\text{max}} / R_{\text{min}}$ в схеме ИП превышает 50, то целесообразно изготавливать резисторы из двух материалов, $\rho_{\text{Сопт}}$ каждого из которых определяется по формуле (1).

Выбираем удельную емкость диэлектрической пленки для конденсаторов по наименьшему значению.

Оцениваем по анализу электрической схемы суммарное число контактных площадок m , их геометрические размеры находим из формул. Общая площадь под контактные площадки

$$S_k = \sum_1^m S_i, \quad (2)$$

где S_i – площадь i -й площадки; m – число площадок.

Общая площадь под пленочные конденсаторы

$$S_c = \sum_1^m C_i / C_0, \quad (3)$$

где C_i – емкость i -го конденсатора; n – число конденсаторов; C_0 – удельная емкость ТПК.

Пленочные резисторы в структуре ИП разбиваем на две группы:

$$S_{R(\Delta)} = K_{\Phi}(\Delta l / K_{\Phi} \gamma_{\text{кф}} + \Delta b / \gamma_{\text{кф}})^2, \quad (4)$$

а площадь резистора в зависимости от мощности его рассеяния

$$S_{R(P)} = P_i / P_0, \quad (5)$$

где P_i и P_0 – номинальная и допустимая удельная мощность рассеяния резистора; $K_{\Phi} = R_i / \rho_s$ – коэффициент формы; $\Delta l, \Delta b$ – абсолютные погрешности геометрических размеров резистора.

Полная площадь, занимаемая резисторами в структуре ПИП:

$$S_{\Sigma R} = \sum_1^{n_1} SR(\Delta) + \sum_1^{n_2} SR(P), \quad (6)$$

здесь n_1 – число прецизионных резисторов; n_2 – число мощных резисторов.

Определению площади под навесные элементы ПИП предшествует их выбор, осуществляемый на основе требуемых значений электрических параметров и условий эксплуатации и способа их монтажа. Общим требованиям к навесным компонентам ПИП являются минимальные габариты и единый способ монтажа.

Площадь основания для размещения технологической структуры ПИП определяется, исходя из того что полезная площадь подложки несколько меньше ее полной площади. Поэтому вводится коэффициент использования платы $K_S = 0,4 - 0,6$ (значение уточняется сложностью схемы и способом изготовления). С учетом K_S и площади S_{dk} , занимаемой навесными компонентами, площадь основания ПИП определяется из выражения

$$S = (S_{\Sigma R} + S_c + S_k + S_{dk}) / K_S. \quad (7)$$

По данным расчета с помощью выражения (7) выбирается основание требуемых размеров согласно табл. 1.

Таблица 1. Типоразмер оснований ПИП

№ типоразмера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ширина, мм	96	60	48	30	24	20	16	12	10	10	5	5	8	16	18
Длина, мм	120	96	60	48	30	24	20	16	16	12	6	15	8	60	20

Расчет по формулам (1)–(5) позволяет ориентировочно также определить конструктивные признаки для корпуса ПИП, по которым выбирается типоразмер корпуса из числа нормализованных.

На втором этапе проектирования производится разработка коммутационной схемы соединений, которая включает в себя преобразование исходной электрической схемы в схематический план размещения элементов и соединений между ними на подложке ПИП.

Разработка топологии ПИП завершается проектированием конфигурации защитного слоя и выбором для него материала.

По созданной топологии составляется морфология ПИП, то есть разрабатывается конфигурация каждого слоя топологической структуры ПИП, формирование которого осуществляется из одного материала за один технологический цикл. Затем разрабатывается конструкция гибридно-

пленочного ПИП с одновременным формированием требований к технологии сборки и монтажа компонентов и микросборки в корпус.

Сформулируем основные принципы при разработке и проектировании высокоэффективных миниатюрных полупроводниковых ИП, которые сводятся к следующему.

1. Вариант электрической схемы ПИП необходимо синтезировать в интегральном исполнении, учитывая при этом паразитные взаимодействия между элементами, работу схемы в заданном температурном диапазоне.

2. Следует избегать применения резисторов и конденсаторов в схеме ПИП, имеющих высокие номинальные значения сопротивлений и емкости и малые допуски на их абсолютные значения.

3. Число внешних выводов в схеме не должно превышать число выводов в корпусе. Между активными элементами схемы ПИП и разрабаты-

ваемой полупроводниковой структурой должно быть обеспечено точное соответствие геометрических форм и технологии изготовления.

4. Триодные компоненты ПИП, коллекторы которых непосредственно присоединены к источнику питания, целесообразно размещать в одно-изолированной области вместе с резисторами. Остальные триодные элементы должны быть размещены в отдельных изолированных областях, площади которых следует сводить к минимуму.

5. В зависимости от комплекса требований, предъявляемых к конденсаторам, их следует формировать либо на р-п переходах, содержащихся в структуре ПИП, либо на окисле SiO_2 , используя его в качестве диэлектрика.

6. При выполнении трассировки необходимо учитывать следующее:

– соединения, по которым будет протекать повышенный ток, необходимо выполнять в виде сравнительно широких полосок;

– все межэлементные соединения, кроме ввода источника питания, могут быть произвольными и

определяться удобством их расположения на поверхности подложки;

– для уменьшения паразитной емкости между контактными выступами в подложке под каждый из них следует предусмотреть формирование изолирующей области.

Итак, строгое соблюдение изложенных принципов проектирования полупроводниковых ИП позволяет решить важную техническую задачу разработки высококачественных миниатюрных ПИП излучений как в монолитном, так и гибридно-пленочном исполнении.

Литература

1. Чахмахсазян, Е. А. Математическое моделирование и макро моделирование биполярных элементов электрических схем / Е. А. Чахмахсазян, Г. П. Мозговой, В. Д. Силин. – М.: Радио и связь, 1995.

2. Сычик, В. А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур / В. А. Сычик. – Мн.: Вышэйшая школа, 1991.

УДК 621.382.031

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработано устройство контроля реологических свойств жидкостей, включающее преобразователь вязкости, цифровой измерительный блок и блок электропитания. Вискозиметр характеризуется широким диапазоном измерения вязкости жидкостей (от 1,0 до 10^4 мН/м²·с⁻¹) и высокой чувствительностью – 0,5 мН/ м²·с⁻¹.

Ключевые слова: устройство контроля, вискозиметр, вязкость жидкостей, поверочные масла, погрешность измерения.

DEVICE FOR CONTROL OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF LIQUIDS

Sychyk V., Ulasiuk M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A device for monitoring the rheological properties of liquids has been developed, including a viscosity converter, a digital measuring unit and a power supply unit. The viscometer is characterized by a wide range of measuring the viscosity of liquids (from 1,0 to 10^4 mN/m²·s⁻¹) and high sensitivity – 0,5 mN/m²·s⁻¹.

Key words: control device, viscometer, viscosity of liquids, calibration oils, measurement error.

*Адрес для переписки: Сычик В.А., пр-т Рокоссовского, 49-18, Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Для эффективного контроля реологических свойств жидкостей, например смол, лаков, красок, жидких компаундов разработан специальный измерительный прибор – вискозиметр [1–3], принцип работы которого основан на ротационном методе контроля вязкости жидкостей, то есть на зависимости скорости вращения механического преобразователя от вязкости жидкости.

Синтезированный прибор контроля вязкости жидкостей (ПКВЖ) конструктивно включает три

базовых блока: преобразователь вязкости, цифровой измерительный блок и блок питания. Он характеризуется следующими техническими данными:

1. Пределы измерения вязкости:

– в диапазоне I – 1,0– 10^2 мН/м²·с⁻¹;

– в диапазоне II – 10^2 – 10^3 мН/м²·с⁻¹;

– в диапазоне III – 10^3 – 10^4 мН/м²·с⁻¹.

2. Чувствительность не хуже 0,5 мН/м²·с⁻¹ в диапазоне 1,0– 10^2 мН/м²·с⁻¹ и 1 мН/м²·с⁻¹ в диапазоне 10^2 – 10^4 мН/м²·с⁻¹.

3. Суммарная приведенная погрешность $\gamma_n \leq \pm 10\%$. При изменении температуры окружающей среды от 10–40 °С дополнительная погрешность составляет 0,05 % К.

4. Длительность непрерывной работы в режиме циклического измерения при сохранении электрических параметров – не менее 8 часов.

5. Время выхода на режим после включения прибора – не более 1 мин.

6. Потребляемая мощность от сети переменного тока – не выше 30 ВА.

При осуществлении поверки ПКВЖ следует производить операции и применять средства поверки, указанные в табл. 1.

Поверка ПКВЖ осуществляется при соблюдении следующих условий:

- температура окружающей среды – 293 ± 5К;
- относительная влажность воздуха – 65 ± 15 %;
- атмосферное давление – 120 ± 4 кПа;
- напряжение питающей сети – 220 ± 5В, частота 50 ± 0,5 Гц;
- содержание гармоник – не более 5 %;
- отсутствие воздействия прямых солнечных лучей.

При проведении внешнего осмотра проверяется: отсутствие механических повреждений, влияющих на точность показания прибора; наличие и прочность крепления органов управления и коммутации; четкость фиксации их положений, плавность вращения ручек, наличие сетевых плавких вставок; чистота гнезд, разъемов и клемм, состояние кабелей; отсутствие слабозакрепленных элементов; состояние лакокрасочных покрытий и четкость маркировок.

Для сравнения соответствия диапазонов шкалы ПКВЖ используются поверочные масла с динамической вязкостью соответственно: 1 мн·с/м², 5 мн·с/м², 10 мн·с/м², 50 мн·с/м², 10² мн·с/м², 5·10² мн·с/м², 10³ мн·с/м², 10⁴ мн·с/м². В диапазоне I (переключатель режима работы в режиме 1) последовательно рабочая емкость заполняется поверочным маслом 1 мн·с/м²; 5 мн·с/м² и 10 мн·с/м²; определяются показания прибора и сверяются с табличными и графическими данными на поверяемый прибор. Аналогично осуществляется проверка точности измерений на других диапазонах.

Таблица 1. Внешний осмотр. Определение метро-логических параметров

№ п/п	Наименование операций, производимых при поверке	Поверяемые отметки	Допустимые значения погрешности или предельные значения определяемых параметров	Средства поверки	
				Образцовые	Вспомогательные
1	Погрешность установки напряжения питания электродвигателя 12В 36В 72В	12В 36В 72В	1 % 1 % 1 %	В7-2	–
2	Определение соответствия диапазонов шкалы приборов I II III	1–10 ² мн·с/м ² 10 ² –10 ³ мн·с/м ² 10 ³ –10 ⁴ мн·с/м ²	10 % 10 % 10 %	В3-4	–
3	Погрешность результатов измерений. Положение переключателя диапазонов I II III	γ_n	≤10 % ≤10 % ≤10 %	В3-4	–

Погрешности результатов измерения определяются необходимыми расчетами после прямых измерений величины вязкости аттестованных масел, динамическая вязкость которых считается абсолютной и постоянной величиной при заданных значениях температуры и влажности окружающей среды. Величина абсолютной погрешности прибора Δ , определяемая из выражения $\Delta = \gamma_n A / 100$ %, где A – верхний предел измерения по диапазону, не должна превышать в диапазоне I – $\Delta_1 \leq 10$ мн·с/м², в диапазоне II – $\Delta_2 \leq 10^2$ мн·с/м², в диапазоне III – $\Delta_3 \leq 10^3$ мн·с/м².

Синтезированный и разработанный авторами прибор контроля вязкости жидкостей внедрен на

ряде промышленных предприятий, где используется как одно из звеньев системы контроля качества изделий ЭА в процессе их производства.

Литература

1. Вискозиметр : авт. свид. СССР № 142737 / Сычик В. А., Скачко К. Г., Лавринович П. А.
2. Сычик В. А. Вискозиметрия жидких электроизоляционных материалов / В. А. Сычик, П. А. Лавринович // Научные и прикладные проблемы энергетики. – 1986. – Вып.13. – С.65–68.
3. Разработка конструкции и изготовление прибора контроля вязкости резистивных паст / Сычик В. А. [и др.] // Заключительный отчет № 01.830072100. – Минск, 1985. – 50 с.

УДК 681.3

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОНОННЫХ ПОТОКОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Мальцев А.Г., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано воздействие фоновых потоков на полупроводниковые приборные структуры. Отмечено, что эффекты, обусловленные воздействием излучаемых электроаппаратурой фононов на полупроводниковые приборные структуры преобразователей, практически не изменяют их электрофизические свойства.

Ключевые слова: полупроводниковые приборные структуры, фоновые потоки, преобразователь оптических излучений, фоновый-фононный взаимодействие, одноатомные полупроводники.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PHONON FLOWS ON SEMICONDUCTOR DEVICE STRUCTURES

Malcev A., Sychyk V., Ulasiuk M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The effect of phonon fluxes on semiconductor device structures has been studied. It is noted that the effects caused by the action of phonons emitted by electrical equipment on semiconductor device structures of converters practically do not change their electrophysical properties.

Key words: semiconductor device structures, phonon flows, optical radiation converter, phonon-phonon interaction, monatomic semiconductors.

Адрес для переписки: Сычик В.А. пр. Рокоссовского, 49-18, Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Фоновые потоки являются носителями информации о тепловых излучениях нагретых изделий, об их температурных режимах [1–4].

Изделия электроаппаратуры, например холодильные аппараты, в процессе контроля их качества на стадии выпуска являются источниками излучения электромагнитных полей широкого диапазона частот. Интервал частот 10^{12} – 10^{13} Гц ($\lambda = 1$ – 10^2 мкм) относится к инфракрасному излучению, которое характеризуется энергией излучения W фононов, представляющих кванты энергии нормальных колебаний решетки и обладающих энергией $W_q = \hbar\omega$ и квазиимпульсам $P = \hbar K_v$, где ω – частота колебания фононов, $K_v = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны тепловых колебаний.

Лучистый поток фононов от поверхности действующей электроаппаратуры плотностью $I_v = \frac{d\Phi}{ds} = \epsilon_T \sigma T^4$ [3], где Φ – фононный поток излучения; S – площадь излучения; ϵ_T – коэффициент теплового излучения; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²К⁴) – постоянная Больцмана; T – температура, воздействуя на пленочную либо многослойную полупроводниковые структуры, частично отражается (ρ), поглощается структурой (α) и проходит через нее (r), где ρ , α , r зависят от направления падающего и проходящего излучения, спектрального состава, температуры тела, его структуры и в случае полупрозрачных тел коэффициент поглощения составляет 0,4–0,8.

В результате поглощения объемом полупроводниковой структуры преобразователя оптических излучений (ПОИ) фононов происходит их взаимодействие со свободными носителями заряда и тепловыми колебаниями решетки полупроводника.

При фоновом-фононном взаимодействии, характерном взаимодействием двух фононов (излучения и решетки) с энергиями $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ могут образовываться фононы повышенной энергии $\hbar\omega_3 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$, однако предельная энергия энергоемких фононов не должна быть выше максимально возможной $\hbar\omega_m$ для указанной энергетической области инфракрасного спектра, которая, как указано в [4], на два–три порядка ниже энергии фотонов видимой области.

Установлено, что электрон-фононное взаимодействие сопровождается испусканием или поглощением в каждом акте взаимодействия только лишь одного фонона при выполнении условия, что квазиимпульс электрона изменяется на величину $\pm\hbar K_v$, где $K_v = \omega/v$ – волновое число фонона. Поэтому даже при поглощении свободными носителями полупроводника энергоемких фононов в процессе их взаимодействия, например валентными электронами, не происходит их межзонный переход, либо перемещение на свободные состояния энергетических уровней в запрещенной зоне кристалла, а только лишь возможны не прямые переходы в пределах одной зоны.

Однако для слабелегированных широкозонных полупроводников с квазиуровнями Ферми $\varphi_p \leq 0,1$ эВ, а также узкозонных полупроводников с $E_g \leq 0,2$ эВ, например InSb, в определенных условиях возможно появление избыточных носителей заряда в объеме полупроводниковой структуры при воздействии ИК-излучений ближнего диапазона с $\lambda \leq 10$ мкм.

В структурах ПОИ на нейтральных одноатомных полупроводниках с ковалентной связью, где имеют место акустические колебания решетки, поглощение полупроводниковой структурой излучаемых электроаппаратурой фононов приводит к генерации экситонов - локализации в одном узле решетки электрона и дырки с энергией $W_3 = \hbar^2 K^2 / 2M$, где $M = m_n + m_p$; K - волновое число электрона; m_n , m_p - эффективная масса электрона, дырки.

В ионных полупроводниковых структурах ПОИ, где действуют оптические колебания решетки, кроме появления экситонов возможна генерация поляронов - квазиэлектронов, движущихся в окружении поляризованной среды.

Однако, указанные эффекты, обусловленные воздействием излучаемых электроаппаратурой фононов на приборные структуры ПОИ, практи-

чески не изменяют их электропроводность, коэффициент инжекции, переноса заряда в гомо- и гетеропереходах, не улучшают передаточную функцию приборной структуры. Поэтому такие фоновые излучения, как показали результаты анализа, недостаточно эффективны для использования их как источники информации при контроле критерияльных параметров качества электроизделий, например холодильной аппаратуры в процессе ее производства.

Литература

1. Vendier, O. Высокоэффективные тонкопленочные МДМ-фотоприемники на основе GaAs / O. Vendier, N. Yoverst, R. Leavissst // Electron lett. - 1996. - Vol. 32, № 4. - P. 394-395.
2. Fujiwar, M. Разработка фотопроводника Ge - Ga на дальнюю ИК-область, имеющую продольную конфигурацию / M. Fujiwar // Appl. Phys. Lett. - 2000. - Vol. 77, № 19. - P. 3099-3101.
3. Гурта, Ф. Инфракрасные датчики температуры / Ф. Гурта, Д. Микула // Каучук и резина. - 2005. - № 4. - С. 29-33.
4. Детекторы дальнего ИК-диапазона на основе многослойных p^+ - i гомоперехода в GaAs / A. G. Perera [at, al.] // J. Appl. Phys. - 1997. - Vol. 81, № 7. - P. 3316-3319.

УДК 519.687

СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Уласюк Н.Н., Сычик В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлена конструкция программно-аппаратного комплекса, включающая аппаратный блок, видеомонитор, манипулятор графической информации и проводятся базовые конструктивные требования, обеспечивающие эффективную работу аппаратно-программного комплекса в условиях его интенсивной эксплуатации.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, конструкция комплекса, аппаратный блок, видеомонитор, манипулятор графической информации.

SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX

Ulasiuk M., Sychyk V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The design of the hardware-software complex is presented, including a hardware unit, a video monitor, a manipulator of graphic information, and the basic design requirements are carried out to ensure the efficient operation of the hardware-software complex in conditions of its intensive operation.

Key words: software and hardware complex, complex design, hardware unit, video monitor, graphic information manipulator.

*Адрес для переписки: Сычик В.А., пр. Рокоссовского, 49-18, Минск 220095, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Конструкция программно-аппаратного комплекса (ПАК) выбирается исходя из того, что при проведении испытаний вредоносных программ конкретный набор технических средств должен

обеспечить условия воспроизведения всех необходимых внешних воздействий на программные средства в процессе проведения испытаний. При этом несанкционированный доступ к данным и

заражение файлов компьютерными вирусами должны быть существенно затруднены.

Конструкция ПАК обеспечивает удобство эксплуатации, легкость подключения к сетевым интерфейсам локальной сети.

Для ремонта несменных составных частей предусматривается возможность доступа к монтажу несменных частей, органам управления, индикации.

Конструкция ПАК должна обеспечить размещение функциональных модулей, учитывая их конструктивную совместимость, ремонтпригодность, безопасность, простоту и удобство работы, технического обслуживания и ремонта.

Жесткость и прочность несущих конструкций, применяемые методы защиты, материалы и покрытия должны обеспечить стойкость ПАК к воздействию внешних механических и климатических факторов, свойственных условиям эксплуатации, транспортирования и хранения комплексов.

В результате анализа конструкции промышленных компьютеров, изготавливаемых рядом зарубежных фирм, рекомендуются следующие конструктивные меры:

1) закрепление плат функциональных модулей, выполненных в виде плат расширения, осуществлять по четырехточечной или близкой к ней системе и надежными крепежными соединениями. Это связано с необходимостью увеличения частоты собственных колебаний плат. В соответствии с ОСТом 4 ГО. 010.009. Печатные платы с электрорадиоэлементами, применяемые в неамортизированной аппаратуре, не должны иметь резонансных частот в диапазоне до 60 Гц [1]. Следовательно, что частота собственных колебаний таких плат должна быть выше 60 Гц. Частота собственных колебаний в значительной степени зависит от размеров платы и способа ее крепления. В зависимости от этих факторов частота собственных колебаний одной и той же платы может изменяться в несколько раз.

В каталоге фирмы OCTAGON SYSTEMS показаны две системы крепления плат: двухточечная, традиционная – для коммерческих компьютеров, и четырех точечная, применяемая в промышленных компьютерах и предусматривающая фиксацию модуля в установочной позиции со всех четырех сторон: снизу – в соединителе магистрали, сверху – с помощью специальных крепежных планок и с оставшихся двух сторон – с помощью направляющих каркаса.

Конструктивное построение ПАК можно осуществить по традиционным схемам компоновки коммерческих персональных компьютеров в корпусах типа TOWER [3, 4].

Комплекс рассчитан на непрерывную круглосуточную работу. Выбор способа охлаждения выполняется с помощью графиков, характеризующих области целесообразного применения различных

способов охлаждения для длительного режима работы при нормальном атмосферном давлении. Расчет производится для наиболее критичного к обеспечению теплового режима ПАК [2].

Определяется условная величина поверхности теплообмена S_n :

$$S_n = 2[L_1 \times L_2 + (L_1 + L_2) \times L_3], \quad (1)$$

где L_1, L_2, L_3 – соответственно ширина, глубина и высота аппарата, заданные в техническом задании, м; K_3 – коэффициент заполнения объема аппаратуры (принимается значение 0,5).

Приняв значения L_1, L_2, L_3 соответственно 0,5; 0,35; 0,15, получим значение $S_n = 0,477 \text{ м}^2$.

За основной показатель, определяющий области целесообразного применения способа охлаждения, принимается величина плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена:

$$q = P / S_n = 200 / 0,477 = 418,850 \text{ Вт/м}^2. \quad (2)$$

Вторым показателем может служить минимально допустимый перегрев функциональных модулей и электрорадиоэлементов. $\Delta T_{\text{max}} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Возможно как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение. Проверив по различным графикам возможность применения того или иного способа охлаждения [2], находим, что нормальный тепловой режим ПАК с вероятностью 0,6 может быть обеспечен при принудительном воздушном охлаждении с удельным расходом воздуха 260 кг/ч·кВт. Отсюда вытекает, что при рассеиваемой мощности 200 Вт и плотности воздуха 1,2 кг/м³ необходим расход воздуха $\approx 40 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Вероятностная оценка, принятая в методике расчета, показывает необходимость обеспечения нормального теплового режима. При вероятностной оценке $0,8 > p \geq 0,3$ можно выбрать способ охлаждения, рекомендованный расчетом. Однако при конструировании аппаратуры обеспечению нормального теплового режима следует уделить тем больше внимания, чем меньше вероятность. При вероятности $p = 0,6$, принятой в расчете, необходимо уделить внимание отводу теплоты от локальных источников его выделения (блока электропитания, микропроцессора) в соответствии с их эксплуатационными документами.

Аппаратный блок представляет собой процессорный модуль, предназначенный для управления вводом-выводом, хранения и обработки информации, поступающей из периферийных устройств.

Видеомонитор предназначен для отображения вводимой и выводимой информации в двух режимах – текстовом и графическом. Работу видеомонитора поддерживает адаптер видеомонитора, установленный на системной плате. Связь адаптера видеомонитора с видеомонитором осуществляется по интерфейсному кабелю.

Клавиатура предназначена для ввода информации в аппаратный блок от пользователя.

Обмен информацией аппаратного блока с клавиатурой производится в последовательном коде по интерфейсному кабелю, с помощью которого клавиатура присоединяется к системной плате. Со стороны системной платы в клавиатуру передаются команды процессора, управляющие работой клавиатуры, а со стороны клавиатуры поступают ответные команды клавиатуры и коды сканирования, которые генерируются при нажатии/отпуске клавиши.

Манипулятор графической информации («мышь») обеспечивает передвижение на экран видеомонитора специального указателя (маркера), дополняющего, а часто и заменяющего курсор. Импульсные сигналы, сопровождающие перемещение манипулятора графической информации в двух ортогональных направлениях по горизонтальной поверхности, передаются на системную плату в контроллер интерфейса «мыши», в котором эти сигналы преобразуются в код, управляющий перемещением маркера на экране видеомонитора. Сигналы, которые генерируются при нажатии клавиши, кодируются контроллером последовательного интерфейса и передаются в процессор.

Высокоскоростной коммутатор выполняет развязку портов.

На лицевой панели аппаратного блока обычно располагаются:

- выключатель питания;
- кнопка сброса;
- индикатор электропитания;
- индикатор обращения к накопителю на HDD;

- индикатор обращения к накопителю на FDD;
- лицевая панель устройства чтения/записи на CD;

- лицевая панель 3,5 дюйм IDE.

На задней панели аппаратного блока находятся:

- выключатель блока питания;
- сетевой разъем блока питания;
- разъем для подключения клавиатуры;
- разъем для подключения манипулятора графической информации;
- разъем для подключения видеомонитора;
- разъем для подключения периферийных устройств;
- разъем для подключения к сети Enternet.

Сформированный в соответствии с указанными конструктивными требованиями ПАК будет полностью соответствовать заданным техническим и физическим параметрам.

Литература

1. Справочник по модульному конструированию РЭА. Л.: Судостроение, 1993. – 232 с.
2. Раткин, Л. А. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА / Л. А. Раткин, Ю. Е. Спокойный. – М.: Советское радио, 1990. – 217 с.
3. Соловьев, С. С. Проектирование функциональных узлов цифровых систем на программируемых логических устройствах / С. С. Соловьев. – Мн.: Бест-принт, 1996. – 252 с.
4. Соловьев, В. В. Синтез программных автоматов на программируемых матрицах логики / В. В. Соловьев // Вести НАН Б. Сер. физ.-техн. Наук. – 1994. – № 1. – С. 68–72.

УДК 621.38

АДАПТИВНЫЙ ПРИВОД ОКНА И ЖАЛЮЗИ ДЛЯ «УМНОЙ АУДИТОРИИ» Микитевич В.А., Свистун А.И., Воробей Р.И., Тьяловский К.Л., Пантелеев К.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В рамках учебной аудитории по проекту «умный класс» разработаны системы автоматического управления жалюзи и открывания окна. Приведены основные принципы управления электроприводами.

Ключевые слова: умный класс, адаптивный электропривод.

LEARNING AUDIENCE FOR THE EXPERIMENTAL PROJECT "SMART CLASS" Mikitsevich U., Svistun A., Vorobey R., Tyavlovsky K., Pantsialeveu K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. As part of the classroom for the "smart classroom" project, automatic control systems for blinds and window opening were developed. The basic principles of control of electric drives are given.

Key words: smart class, smart electric drive.

*Адрес для переписки: Микитевич В.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mikitevichva@bntu.by*

Введение. Влияние количества углекислого газа в воздухе оказывает большое влияние на качество трудовой деятельности. Так, например при

концентрации углекислого газа (600–1000) ppm, у людей появляются жалобы на качество воздуха; выше 1000 ppm – общий дискомфорт, слабость,

головная боль, концентрация внимания падает на треть, растет число ошибок в работе. При концентрации выше 2000 ppm сильно возрастает количество ошибок, 70 % сотрудников не могут сосредоточиться на работе [1]. Поэтому важно своевременное проветривание помещения. Применение современных датчиков концентрации углекислого газа позволило реализовать систему автоматического проветривания учебной аудитории.

Интенсивность освещения также оказывает большое влияние на организм человека и его активность [2]. При этом важно наличие естественного освещения. Однако при избытке естественного освещения или при наличии косых солнечных лучей во время восхода или захода солнца необходимо ограничивать естественное освещение с целью исключения негативного воздействия на зрительную систему человека. Одним из способов управления естественным освещением является применение автоматизированных жалюзи.

Так как окна и жалюзи находятся в одном месте, то принято решения выполнить разработку единой системы управления окном и жалюзи.

Подсистема управления приводом жалюзи.

Реализована путем модернизации ручных приводов жалюзи установкой электрического привода с редуктором. На рис. 1 справа изображен исходный механизм, слева – электропривод. Такая универсальная конструкция позволяет быстро и с минимальными затратами модернизировать существующие жалюзи. При необходимости, так же быстро можно вернуть ручной привод. Для определения положения жалюзи (при включении и во время работы) на вал привода жалюзи установлен многооборотный резистивный датчик угла (рис. 2). Управление приводами жалюзи и приводами окна осуществляется одним микроконтроллером.

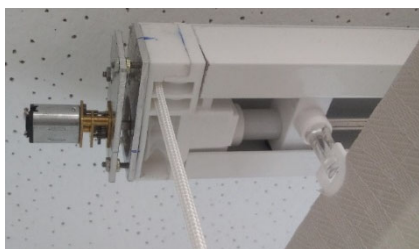


Рисунок 1 – Модернизированный привод жалюзи



Рисунок 2 – Резистивный датчик угла поворота

Предусмотрены следующие режимы работы жалюзи:

- открытое положение;

- закрытое вправо положение;
- закрытое влево положение;
- автоматический режим.

Возможность закрывать жалюзи вправо и влево реализована по причине касательных солнечных лучей во время восхода и захода, что приводит к прохождению солнечных лучей в щели между ламелями. Для их устранения необходимо повернуть ламели перпендикулярно солнечным лучам. Поэтому в первой половине дня жалюзи должны закрываться влево, а второй – вправо.

В автоматическом режиме реализован контроль освещенности за окном. При превышении порога освещенности закрываются жалюзи, а при понижении – открываются. Для предотвращения частого открывания/закрывания жалюзи предусмотрен гистерезис.

Система приводов открывания окна. Реализована на основе цепного электропривода. Такой электропривод позволяет открывать окно не только в режиме проветривания, но и в сторону. Это преимущество очень важно, т.к. не требует демонтажа электропривода в случае необходимости полностью открыть окно. Второе преимущество такого электропривода – не требуется питание для удержания окна в одном из положений (в том числе закрытом).

Для определения открытого положения окна установлен концевой выключатель (рис. 3). Для отключения электропривода в случае перегрузки предусмотрено автоматическое отключение при превышении максимального тока.



1 – микроконтроллерный блок управления; 2 – цепной электропривод; 3 – концевой выключатель

Рисунок 3 – Система приводов открывания окна

В процессе разработки микроконтроллерного управления электроприводом были реализованы следующие режимы открывания окна:

- микропроветривание;
- проветривание 30 %;
- проветривание 50 %;
- проветривание 100 %;
- автоматический.

В автоматическом режиме предусмотрено автоматическое открывание окна при увеличении концентрации углекислого газа в аудитории (программно установлен порог открывания 1000 ppm).

Закрывание окна осуществляется при уменьшении концентрации ниже 600 ppm. Такие пороги установлены исходя из наилучшей продуктивности деятельности находящихся в аудитории человек.

Управление электроприводами окна и жалюзи реализовано на основе микроконтроллера STM32F103 и двух H-мостов L298 и ТВ6612 (рис. 4). Первый H-мост используется для управления приводом окна и позволяет работать при напряжениях до 46В и токах до 4А. Второй H-мост предназначен для управления приводом жалюзи.



Рисунок 4 – Система управления приводами открывания окна и жалюзи

В качестве радиопередатчика использован модуль NRF24L01, который позволяет работать в двух направлениях (прием и передача), обеспечивает подтверждение принятых данных.

Адаптивный привод окна и жалюзи реализован в учебной аудитории, выполненной по экспериментальному проекту «Умный класс», на приборостроительном факультете Белорусского национального технического университета.

Литература

1. Микитевич Адаптивный светильник для «умной» аудитории / Ю. Д. Сороко [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.). – Минск: БНТУ, 2022. – С. 46–47.

2. Адаптивное освещение в «умной» аудитории / Ю. Д. Сороко [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.). – Минск: БНТУ, 2022. – С. 47–48.

УДК 620.179.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕНАПОЛНЕННОГО ПОЛИАМИДА

Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Кутепов А.Ю.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. По результатам исследований установлено, что увеличение температуры печати по FDM-технологии способствует увеличению динамической твердости и модуля упругости на 23 % и 11 % соответственно. Однако чрезмерное нагревание филамента приводит к искажению геометрии изделий и возникновению внутренних напряжений и неоднородности свойств материала. Отклонение скорости печати от стандартного значения в меньшую сторону (до 55 мм/с) способствует увеличению упругих и прочностных свойств материала, а увеличение скорости печати до 85 мм/с позволяет повысить его однородность в объеме образца. Доказано, что наибольшими значениями физико-механических характеристик обладают образцы, полученные при толщине слоя печати 0,1 мм.

Ключевые слова: твердость, модуль упругости, предел прочности, FDM-технология, индентирование.

STUDY OF THE EFFECT OF FDM PRINTING PARAMETERS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CARBON-FILLED POLYAMIDE

Pratasenia T., Lantsman G., Kutsepau A.

*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. According to the results of the research, it was found that an increase in the temperature of printing using FDM technology contributes to an increase in dynamic hardness and elastic modulus by 23 % and 11 %, respectively. However, excessive heating of the filament leads to a distortion of the geometry of the products and the emergence of internal stresses and inhomogeneity of the material properties. The deviation of the printing speed from the standard value to a lower side (up to 55 mm/s) contributes to an increase in the elastic and strength properties of the material, and an increase in the printing speed to 85 mm/s makes it possible to increase its uniformity in the sample volume. It has been proven that the samples obtained with a printing layer thickness of 0.1 mm have the highest values of physical and mechanical characteristics.

Key words: hardness, modulus of elasticity, tensile strength, FDM technology, indentation.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

Существующие методы контроля качества изделий аддитивного производства в основном базируются на оценке физико-механических характеристик материала в ходе стандартных разрушающих испытаний [1, 2]. При этом, как правило, стандартные контрольные образцы изготавливают по тем же режимам и технологиям 3D-печати, что и основное изделие. Однако нельзя гарантировать, что упругие и прочностные характеристики специально выращенного образца будут соответствовать свойствам материала готовой продукции. Особенно это критично для аддитивных технологий послойного наплавления, например, FDM-технологии, особенностью которой является анизотропия свойств получаемого материала, являющаяся не только следствием различной ориентации слоев печати, но и вариативности таких параметров как скорость подачи и температура наносимого материала, толщина слоя печати и т. д. Все эти факторы так или иначе сказываются на процессах формирования межслоевой связи материала, зарождению внутренних напряжений в детали и, как следствие, возникновению неоднородности физико-механических характеристик в объеме материала. При этом даже если пренебречь материальными и временными затратами и рассмотреть возможность изготовления стандартного образца из экземпляра готового изделия, то полученные таким образом результаты разрушающих испытаний позволят установить некое среднее значение свойств конкретного объема материала. Единственным решением данной проблемы является развитие неразрушающих методов оценки свойств изделий аддитивного производства, обеспечивающих достаточную локальность контроля и возможность получения данных о распределении свойств материала в пределах всего объема изделия. Кроме того применимостью такого метода определяется его чувствительностью к изменению параметров FDM-печати, т.е. способности регистрировать изменение упругих и прочностных характеристик в зависимости от скорости, температуры подачи материала и толщины его слоя. С этой целью нами предложено использовать метод динамического индентирования, который уже себя хорошо зарекомендовал при контроле полимерных изделий аддитивного производства, однако для комплексной оценки его чувствительности к изменению нескольких параметров 3D-печати потребовалось проведение дополнительных исследований.

С этой целью из угленаполненного полиамида Nylforce Carbon (FiberForce, Италия) диаметром 2,85 мм нами было изготовлено 35 образцов (7 партий по 5 образцов) с различными параметрами печати: скорость печати v (55; 70 и 85 мм/с), толщина слоя h (0,1; 0,2 и 0,3 мм) и температура печати T (240; 255 и 270 °С).

Все образцы предварительно были испытаны на растяжение согласно [1] на универсальной испытательной машине MTS Criterion 43 с непрерывной скоростью нагружения 10 мм/мин.

Результаты контроля позволили установить, что основной вклад в отклик материала на растягивающую нагрузку вносят силы межслоевой сцепления исследуемого полимера. Поэтому с ростом температуры печати растет и связь между нитями расплава, что приводит к увеличению предела прочности и модуля упругости аддитивного полимерного материала. В результате эксперимента установлено, что при увеличении температуры печати от 240 до 255 °С предел прочности при растяжении увеличивается в среднем на 9 %, а модуль упругости, измеренный в ходе стандартных испытаний, на 60 %. Однако повышение температуры печати до 270 °С приводит к искажению геометрии изделия из исследуемого угленаполненного полиамида и возникновению внутренних напряжений, приводящих к неоднородности свойств материал. В свою очередь увеличение скорости печати позволяет нивелировать пористость материала за счет снижения времени наложения последовательных слоев и, соответственно, сокращения времени остывания предыдущего и последующего слоя, что напротив уменьшает внутренние деформации и напряжения в образце. Поэтому образцы, изготовленные со скоростью печати 85 мм/с обладают более однородными свойствами. Уменьшение же толщины слоя до 0,1 мм ведет к росту прочностных и упругих характеристик материала, что является следствием увеличения числа слоев материала в изделии и, соответственно, увеличению площадей межслоевой связи. Экспериментально установлено, что уменьшение толщины слоя печати от 0,3 до 0,1 мм приводит к увеличению прочности при растяжении примерно на 15 %, а модуля упругости на 39 %. Однако несмотря на то, что печать изделий с большей толщиной слоя (0,3 мм) позволяет получить материал с более низкими значениями физико-механических характеристик, полученные изделия характеризуются большей стабильностью свойств.

С целью исследования свойств полимерных изделий аддитивного производства МДИ, нагружение образцов проводилось твердосплавным индентором сферической формы диаметром 5 мм, массой 6,8 г с предударной скоростью 2 и 3 м/с. Такие параметры нагружения позволили получить стабильный информационный сигнал и обеспечивали достаточный объем деформации слоистого полимерного материала для интегральной оценки его свойств. При этом в случае нагружения образцов с предударной скоростью 2 м/с максимальное внедрение составило порядка 170 мкм, что превосходит минимальную толщину слоя $h = 0,1$ мм отдельных образцов и позволяет полу-

чить оценку свойств в объеме материала, а не поверхностного слоя. Аналогичным образом внедрение бойка со скоростью 3 м/с обеспечивает максимальное проникновение индентора на глубину порядка 250–300 мкм, что соизмеримо с максимальной толщиной слоя исследуемых образцов. По результатам индентирования показано, что увеличение температуры печати за счет улучшения межслоевого сцепления способствует увеличению динамической твердости и модуля упругости на 23 % и 11 % соответственно. Вместе с тем чрезмерное нагревание филамента (до 270 °С) приводит к искажению геометрии изделий аддитивного производства и возникновению внутренних напряжений и неоднородности физико-механических характеристик в пределах одного образца. Также установлено, что отклонение скорости печати от стандартного значения (70 мм/с) как в меньшую (55 мм/с), так и в большую сторону (85 мм/с) способствует увеличению упругих и прочностных свойств исследуемого полимерного материала. При этом увеличение скорости печати до 85 мм/с позволяет снизить коэффициент вариации результатов контроля динамического модуля упругости и твердости примерно в

1,5 и 3 раза соответственно. Доказано, что наибольшими значениями модуля упругости, предела прочности и динамической твердости обладают образцы, полученные по FDM-технологии с толщиной слоя печати 0,1 мм, что объясняется наличием большей площади межслоевой связи, размер и качество которой является определяющим фактором в формировании свойств исследуемого полимерного материала.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № Т22М-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза».

Литература

1. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1 Общие принципы: ГОСТ 34370-2017. – Введ. 01.10.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – 26 с.
2. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб: ГОСТ 4648-201 – Введ. 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – 25 с.

УДК 543.7, 347.771

ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАТЕНТНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Белов Д.А., Белов Ю.В.

*Институт аналитического приборостроения Российской академии наук
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. В работе представлен подход к анализу рынка приборов для высокопроизводительного секвенирования нуклеиновых кислот. Как качественный показатель развития рынка, демонстрирующий основные инновационные направления, рассматриваются патентные документы, зарегистрированные американской компанией Illumina в Российской Федерации. Определены наиболее перспективные технические решения и тенденции развития технологий высокопроизводительного секвенирования.

Ключевые слова: высокопроизводительное секвенирование, патентные исследования.

A STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF THE NEW GENERATION SEQUENCING MARKET IN RUSSIA BASED ON THE PATENT DOCUMENTS ANALYSIS

Belov D., Belov Yu.

*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences
St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The paper presents an approach to the market analysis of high-throughput DNA sequencers. Patent documents registered by the American company Illumina in the Russian Federation are considered as a qualitative indicator of market development, demonstrating the main innovative directions. The most promising technical solutions and trends in the development of high-throughput sequencing technologies have been identified.

Key words: next generation sequencing, patent research.

*Адрес для переписки: Белов Д.А., Санкт-Петербург 190103, а/я 207, Российская Федерация
e-mail: belov.da@list.ru*

Годовой объем мирового рынка секвенирования нуклеиновых кислот (НК) – метода, позволяющего определять нуклеотидную последователь-

ность для получения формального описания первичной структуры молекул НК, в 2021 году превысил 10 млрд долл. США [1]. Более половины

объема приходится на рынок высокопроизводительных методов секвенирования, решающих актуальные научные и прикладные задачи, в том числе, в области медицинской диагностики.

Развитие рынка биотехнологий порождает все более совершенные технологии и новые генетические анализаторы, год за годом демонстрирующие лучшие технические характеристики и высокие экономические показатели [2].

Анализ патентных документов традиционно используется в качестве одного из важнейших подходов к оценке уровня технологического развития [3]. Лишь малая часть международных заявок регистрируется в России иностранными заявителями, исключением является американская компания Illumina – бесспорный лидер мирового рынка полногеномного секвенирования (около 65 % рынка) с высокой степенью инновационной активности и технологической зрелости. Активная регистрация патентов компании в России может быть связана с началом разработки, а затем и успешным созданием первого российского высокопроизводительного секвенатора Нанофор-СПС в Институте аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН).

Успех компании Illumina можно объяснить активным маркетингом, а также высоким качеством и простотой использования выпускаемой продукции. В компании работает почти 10 тыс. сотрудников, а выручка компании за 2021 год составила около 4,7 млрд долл. США [4].

По состоянию на 18 января 2022 года компания Illumina являлась владельцем или имела эксклюзивные лицензии на 1019 патентов на изобретение США и 789 находящихся на рассмотрении патентных заявок США, включая 43 одобренные заявки [5].

На основе анализа более 70 патентов на изобретения, зарегистрированных в России компанией Illumina, сформированы следующие выводы относительно тенденций развития высокопроизводительного секвенирования.

Ряд патентов направлен на защиту технических решений, реализованных в оптической системе, гидравлической системе, проточной ячейке и узле ее фиксации, реагентной базе, системах пробоподготовки и системах обработки результатов анализа. Значительное количество технических решений относится к микроскопии структурированного освещения (SIM-технологиям), применяемой в оптических системах новейших приборов, выпускаемых компанией Illumina.

Зарегистрированные патенты и заявки определяют высокий уровень технических решений, используемых в приборах. Расходы компании Illumina на исследования и разработки в 2017, 2018 и 2019 годах составили 546 млн долл. США, 623 млн долл. США и 647 млн долл. США соответственно.

Некоторые решения пока не используются в приборах компании: оптическая система, имеющая световоды, применение магниточувствительных датчиков и магнитных меток. Регистрация подобных патентов говорит о высокой вероятности применения и развития описанных технических решений в будущем.

Ряд патентов относится к перспективным технологиям секвенирования НК с применением нанопор и полимеразы или с помощью одностенных нанотрубок, к которым прикрепляется полимеразы. Это говорит о стремлении компании Illumina занять нишу одномолекулярного секвенирования – направления, стремительно развивающегося в последние годы. На это указывает и заблокированная антимонопольными службами в 2020 году попытка приобрести лидера рынка одномолекулярного секвенирования – компанию Pacific Biosciences.

Компания Illumina – компания с высокой степенью инновационной активности и технологической зрелости, которая ведет агрессивную маркетинговую и патентную политику. Активная оптимизация ее патентного портфеля направлена на блокирование конкурентов: компаний Ion Torrent (США) и Oxford Nanopore (Великобритания). Это подтверждается ранее инициированными компанией судебными исками к компаниям Qiagen (Германия) и BGI (Китай) на наиболее ликвидных рынках на основании патентных нарушений.

Регистрация технических решений в виде патентов Российской Федерации говорит о стремлении компании Illumina блокирования отечественного рынка от конкурирующих, в том числе, российских компаний.

Заключение. До недавнего времени иностранные компании не регистрировали патенты на изобретение и полезную модель на территории Российской Федерации, однако заметна тенденция последних лет по защите результатов интеллектуальной деятельности (РИД) в России компанией Illumina.

Выполненный анализ патентов выявил направленное блокирование отечественного рынка компанией Illumina и очевидную необходимость инвестирования в технологические инновации и поиска новых решений и выгодных возможностей лицензирования для успешного развития отечественных разработок на рынке высокопроизводительного секвенирования, характеризующегося высокой степенью конкуренции и скоростью бизнес-процессов.

На основе вышеизложенного можно предложить три варианта действий при создании новых платформ высокопроизводительного секвенирования в РФ:

– приобретение лицензий на технологии или продукты;

– создание собственных конкурентоспособных технологий на основе известных методов секвенирования;

– разработка принципиально новых подходов к секвенированию, предпочтительно, обеспечивающих детектирование одиночных молекул НК.

Предпочтительными являются два последних варианта. Анализ опыта китайских компаний показал [6], что для удовлетворения собственных нужд страны целесообразно производство приборов для секвенирования на основе известных методов, однако для выхода на мировой рынок необходимо создание новых прорывных и оригинальных технологий.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках государственного задания № 075-00761-22-00 Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5316694/>

next-generation-sequencing-ngs-market-by. – Дата доступа: 18.09.2022.

2. Бородинов, А. Г. Поколения методов секвенирования ДНК (обзор) / А. Г. Бородинов, В. В. Манойлов, И. В. Заруцкий [и др.] // Научное приборостроение. – 2020. – Т. 30. – № 4. – С. 3–20.

3. Schmoch U., Rammer C., Legler H. // National Systems of Innovation in Comparison: Structure and Performance Indicators for Knowledge Societies, Dordrecht: Springer. – 2006. – 314 p.

4. Illumina [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owler.com/company/illumina>. – Дата доступа: 18.09.2022.

5. Illumina [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.annreports.com/illumina/illumina-ar-2021.pdf>. – Дата доступа: 18.09.2022.

6. Афоничева, П. К. Опыт создания высокопроизводительного секвенатора в Китае / П. К. Афоничева, Д. А. Белов, Ю. В. Белов, А. А. Евстапов // VII международная конференция молодых ученых: биофизиков, биотехнологов, молекулярных биологов и вирусологов: в рамках площадки открытых коммуникаций OpenBio-2020, 2020. – С. 5–6.

УДК 621

ОБЪЕКТИВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

Горячева В.А.

ФГБОУ «Тульский государственный университет»

Тула, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается примерная методика расчета объектива с переменным фокусным расстоянием. При этом этап синтеза автоматизирован, что упрощает расчет объектива с переменным фокусным расстоянием.

Ключевые слова: методика расчета, объектив с переменным фокусным расстоянием, телевизионная система, структурно-габаритный синтез.

ZOOM LENS

Goryacheva V.

Tula State University

Tula, Russian Federation

Abstract. This article provides the suggested method of the zoom lens design. Besides, the synthetic stage is programmed, that is simplified the zoom lens design.

Keywords: design method, zoom lens, television system, structure-overall synthesis.

Адрес для переписки: Горячева В.А., пр. Ленина, 92, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: irina-goryacheva31@rambler.ru

Введение. Оптические системы широко применяются в различных сферах деятельности человека. При этом часто требуется иметь большое поле зрения для обзора широкой части просматриваемой территории, как например в камерах видеонаблюдения, и достаточное увеличение для распознавания наблюдаемых предметов, находящихся на больших расстояниях. Телевизионная система с объективом переменного фокусного расстояния способна выполнить все перечисленные выше требования. Но существует сложность

расчета таких систем, заключающаяся в сохранении высокого качества изображения во всем диапазоне изменения фокусных расстояний и освещенности.

Как правило, оптическая часть телевизионных систем проходит этапы проектирования, которые свойственны любым другим оптическим системам – синтез, анализ и оптимизация. Однако в настоящее время разработка объектива с переменным фокусным расстоянием является актуальной научной и практической задачей, поскольку нет

единых методов проектирования таких оптических систем – проектирование данных систем преимущественно основывается либо на поиске и выборе соответствующего аналога, либо на синтезе структурно-габаритной системы с использованием собственных разработанных методов, заимствование которых невозможно или связано с трудностями по ряду причин [1–3].

В некоторых работах отмечается, что именно этап синтеза исходной оптической системы является определяющим при проектировании оптических систем, в частности объектива с переменным фокусным расстоянием. Таким образом, проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием можно успешно выполнить, найдя ее наиболее рациональную исходную схему.

Метод решения задачи. В работе [4] был предложен метод вариации параметров (МВП) для расчета объектива с переменным фокусным расстоянием на этапе синтеза. При этом синтез такого объектива был основан на гауссовой (параксиальной) оптике. Исходя из этого, имея в распоряжении автоматизированный синтез объектива с переменным фокусным расстоянием, можно составить примерную методику проектирования объектива с переменным фокусным расстоянием, представленный на рис. 1.

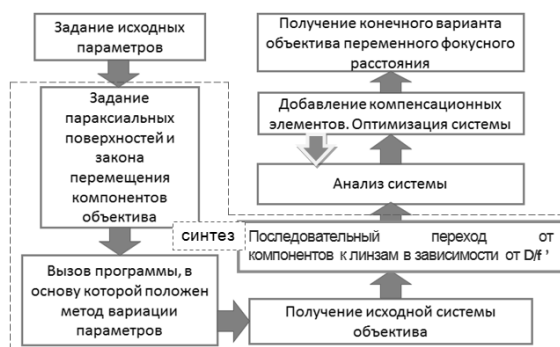


Рисунок 1 – Схема предлагаемой методики расчета объектива с переменным фокусным расстоянием

На основе МВП составлен макрос в программе расчета оптических систем, который позволяет рассчитать трех и четырех компонентный объектив переменного фокусного расстояния, компоненты которого представлены параксиальными линзами, при этом число подвижных компонентов при фиксированной длине системы для трехкомпонентного объектива может быть от 1 до 2-х, для четырехкомпонентного объектива – от 2-х до 3-х. Также в предложенном методе учитывается возможность задания минимальных габаритов, учитывая величину относительного отверстия D/f' каждого компонента системы.

Результаты. Так как полученный макрос позволяет автоматизировать этап синтеза объектива переменного фокусного расстояния, методика расчета такого объектива имеет следующий вид:

в программе расчета оптических систем добавляются четыре параксиальные линзы и составляется специальная табл. заданий, куда вводятся исходные данные; вызывается подпрограмма (в основу которой положен МВП), по завершении работы которой получаем исходную систему объектива, представленную параксиальными линзами. Далее каждая параксиальная линза заменяется на стандартную с учетом ее относительного отверстия – при относительном отверстии компонента $D/f' < 0,7$, он заменяется одной линзой или склейкой, при относительном отверстии компонента $D/f' > 1$, оптимальной заменой служат три одиночных линзы.

После завершения этапа синтеза последовательно проводится этап анализа – добавляются коррекционные элементы, также осуществляется переход от моделей стекол, заданных показателем преломления, к реальным математическим моделям стекол. После каждого этапа анализа проводится оптимизация, в итоге находится требуемая конфигурация оптической системы объектива с переменным фокусным расстоянием.

Таким образом был рассчитан четырехкомпонентный объектив с 20-ти кратным перепадом увеличения, имеющий следующие оптические характеристики: перепад фокусных расстояний $f' = 15\text{--}300$ мм, относительное отверстие $D/f' = 1:4$, диапазон длин волн $\lambda = 0,600\text{--}0,850$ мкм, поле зрения $2\omega = 2,0^\circ\text{--}36^\circ 30'$. Общая длина системы не превышает 220 мм, диаметр первой линзы менее 90 мм, рис. 2.

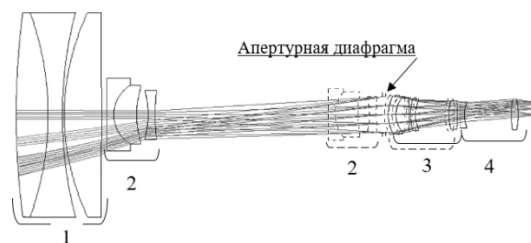


Рисунок 2 – Двадцатикратный объектив с переменным фокусным расстоянием, имеющий два подвижных компонента

Система состоит из четырех компонентов, первый, третий и четвертый положительные, второй – отрицательный. Второй и третий компоненты являются подвижными. В системе имеется 12 оптических деталей, не считая светофильтра. Система содержит две асферические линзы. Апертурная диафрагма регулируемая.

На рис. 3 и рис. 4 приведены графики частотно-контрастных характеристик (функции передачи модуляции), показывающие сохранение хорошего качества изображения во всем диапазоне перепада фокусного расстояния, при этом краевые поля заданы с запасом.

Таким образом, рассчитанный по предлагаемой методике объектив удовлетворяет требуемым

характеристикам телевизионной системы, имеющей малый размер пикселя.

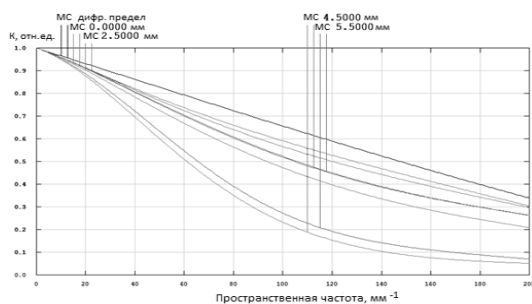


Рисунок 3 – График частотно-контрастной характеристики для исходной конфигурации системы

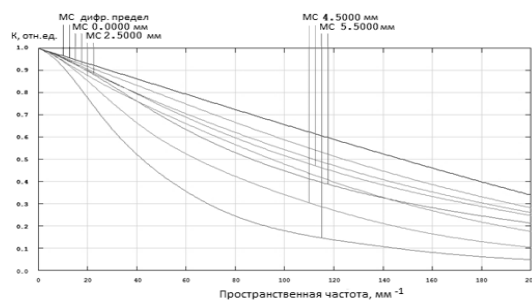


Рисунок 4 – График частотно-контрастной характеристики для конечной конфигурации системы

Заключение. В настоящей работе предложена методика расчета оптической системы объектива с переменным фокусным расстоянием на основе автоматизированного структурно-габаритного синтеза системы. Предлагаемая методика позволяет рассчитать трех- и четырехкомпонентную оптические системы объективов с переменным

фокусным расстоянием, с учетом количества подвижных компонентов при фиксированной длине системы и уменьшении габаритов. В результате разработки оптической схемы объектива по предложенной методике получен 20-ти кратный объектив переменного фокусного расстояния, удовлетворяющий требованиям телевизионной системы с малым размером пикселя, что показывает пригодность и работоспособность предлагаемой методики расчета оптической системы с объективом переменного фокусного расстояния.

Таким образом, предлагаемая методика облегчает работу расчетчика, обеспечивая автоматизированное нахождение исходной системы на этапе структурно-габаритного синтеза, что определяет возможность нахождения оптической системы с требуемыми параметрами.

Литература

1. Куртман, С. А. Методика автоматизированного синтеза панкратических объективов в тонких компонентах / С. А. Куртман, В. Г. Поспехов // Прикладная оптика : Сб. трудов IX междунар. конф. Санкт-Петербург. – 2010. – Т. 1, ч. 1. – С. 80–84.
2. Автоматизированный габаритный расчет варио-объективов / И. И. Пахомов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Приборостроение. – 2010.
3. Бездидько, С. Н. Структурно-габаритный синтез исходных схем оптических систем / С. Н. Бездидько, А. Ф. Ширанков // Оптический журнал. – 2019. – Т. 86, № 9. – С. 17–24.
4. Горячева, В. А. Расчет оптических сил компонентов панкратического объектива в Zemax / В. А. Горячева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 6. – С. 143 – 146.

УДК 628.977

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СВОТОТЕХНИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ В БИОДИНАМИЧЕСКИХ СВЕТИЛЬНИКАХ

Клявдо М.А., Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлена техническая реализация биодинамического освещения в зависимости от его функционального назначения.

Ключевые слова: биодинамические светильники, освещение, блок управления.

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF LIGHTING SCENARIOS IN BIODYNAMIC LIGHTS

Klyavdo M., Saukova Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The technical implementation of biodynamic lighting depending on its functional purpose is presented.

Keywords: biodynamic lights, lighting, controller.

*Адрес для переписки: Klyavdo M., Lilia karastonova st.17, Minsk 2200689, Republic of Belarus;
Saukova Y., Nezavisimosty av. 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: marinaklyavdo@mail.ru; savkova@bntu.by*

Биодинамические светильники – это программируемые осветительные приборы, функционирующие в течение рабочего дня в разных режимах. С помощью биодинамической системы освещения можно создать множество сценариев, в которых уровень и цвет света меняются в соответствии с тем, что мы называем «человеческим ритмом».

В биодинамических светильниках имеются две группы светодиодов – с низкой цветовой температурой (1800–2400 К) и с высокой (6500–8000 К). Каждая из групп независимо диммируется, потом излучения от светодиодов смешиваются оптической системой светильника. Регулируя световой поток по каждой из групп светодиодов, можно в итоге регулировать цветовую температуру свечения [3].

В простейшем случае настройка осуществляется в ручном режиме при помощи рукояток или кнопок. Одна группа органов управления отвечает за освещенность, другая – за цветность светового потока. Также современные светильники с переменной цветовой температурой могут управляться с мобильных устройств, поддерживающих Bluetooth 4.0 и выше.

Регулирование в автоматическом режиме осуществляется при помощи блока управления и может осуществляться по нескольким схемам.

Весьма распространенным вариантом является привязка изменения параметров освещения к географическому времени и дате. Контроллер снабжается встроенным GPS-датчиком, либо же информа-

ция о местоположении вводится в него пользователем. Освещенность и цветовая температура меняются по определенному алгоритму, зависящему от времени восхода и захода солнца на данную дату, вычисляемым по географическому положению. При этом параметры освещения не копируют то, что есть на улице, поскольку в общем случае рабочий день не совпадает с продолжительностью светового дня. Утром цветовая температура биодинамического освещения выше, чем на улице, чтобы взбодриться. А вечером солнце может уже зайти, но светильник продолжит давать свет с цветовой температурой около 2700 К.

Алгоритм также может быть привязан к рабочему графику. Утром биодинамический светильник формирует максимально холодный по цветовому ощущению человека световой поток – до 6500 К и уровень освещенности 1500–2000 лк. В середине дня, ближе к обеденному перерыву, световой поток становится более теплым, расслабляющим – 4000–5000 К и уровень освещенности 500–700 лк. Затем светильник снова формирует холодный световой поток и ближе к вечеру, ко времени завершения рабочего дня, офис вновь заливают теплый спокойный свет – около 3000 К и уровень освещенности 300–400 лк. Такого рода светильники могут облегчить труд на производствах, где люди работают в две или три смены и, соответственно, естественные биологические ритмы сотрудников отличаются от режима работы предприятия.

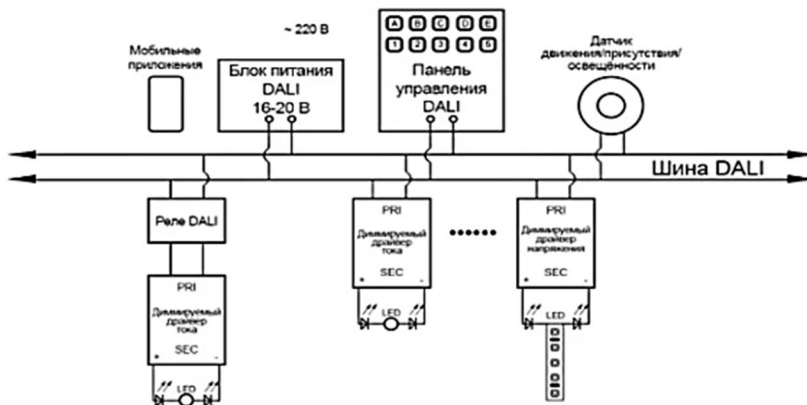


Рисунок 1 – Типовая схема управления освещением с применением протокола DALI

Наконец, наиболее сложные алгоритмы при определении цветовой температуры и освещенности ориентируются на погоду (путем получения информации с датчиков или же просто данных с метеостанций через интернет), количество людей в данный момент в помещении и даже предпочтения сотрудников офиса.

Простейшие блоки управления биодинамического освещения, такие как Health SunLync, представляют собой контроллеры с проприетарным программным обеспечением. Более сложные системы управления, например, блок управления

офисного торшера EsyLux Prana, представляют собой компьютеры, работающие под управлением специальной версии с операционной системой Linux. На них можно установить программное обеспечение, способное реализовать любые алгоритмы биодинамического освещения [3].

Недостатком перечисленных систем управления считается их ориентация на определенное осветительное оборудование.

Достаточно универсальным можно считать контроллер биодинамического света с интерфейсом DALI, встраиваемый в систему офисного освеще-

ния. Такая система управления совместима с самыми разными светильниками. Использование в осветительных системах мастер-контроля DALI-TIMER-DIN позволят обеспечить управление в соответствии с алгоритмом, включающим шестнадцать временных точек. С его помощью отдельно взятому промежутку времени задают индивидуальное значение светового потока. Даже если случится сбой в поступлении энергии, отсчет времени продолжается с сохранением настроек. Это возможно благодаря наличию внутри системы запасного источника питания [2]. Один из вариантов типовой схемы управления освещением с применением протокола DALI показан на рис. 1 [3].

Биодинамический светильник позволяет реализовывать дополнительную функцию – обеззараживать рабочее помещение. Для этого в него встраивается бактерицидная лампа. Она автоматически включается, когда в помещении нет людей.

Бактерицидная (ультрафиолетовая) лампа имеет колбу из *увиолевого* стекла с повышенной пропускной способностью ультрафиолета с длинами волн 200–300 нм. Такое УФ-излучение называют «мяг-

ким». Оно обладает обеззараживающими свойствами (нейтрализует бактерии, вирусы, плесень, дрожжи и т.д.) и минимизирует образование озона и вредное воздействие на глаза и кожу человека.

Таким образом, биодинамическое освещение является наиболее перспективным типом освещения, однако имеет ряд проблем, таких как:

- 1) сложность реализации проекта в зависимости от типа помещения и его назначения
- 2) отсутствие типовых решений требует значительных затрат, в сравнении с традиционным освещением.

Литература

1. Установка биодинамического освещения для современного дома [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://right-level.ru/>. – Дата доступа: 10.09.2022.
2. Система управления освещением DALI на примере продукции IEK GROUP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dzen.ru>. – Дата доступа: 10.09.2022.
3. Биодинамическое освещение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elec.ru>. – Дата доступа: 18.09.2022.

УДК 531.383

СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ВОЛНОВЫМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМ ГИРОСКОПОМ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ

Матвеев В.В., Хомячкова А.Н., Кирсанов М.Д.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Приводятся описание системы ориентации малого космического аппарата (МКА). Система ориентации содержит датчик ориентации на небесное светило, волновой твердотельный гироскоп в качестве датчика угловой скорости, микроконтроллер и двигатель-маховик в качестве исполнительного органа. Дана конструктивная схема волнового твердотельного гироскопа. Приводится описание алгоритмов функционирования системы ориентации МКА.

Ключевые слова: малый космический аппарат, волновой твердотельный гироскоп, система ориентирования.

ORIENTATION SYSTEM OF A SMALL SPACE VEHICLE WITH A WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE IN THE CONTROL LOOP

Matveev V., Khomyachkova A., Kirsanov M.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. A description of the attitude control system of a small spacecraft (SSC) is given. The orientation system contains an orientation sensor to a celestial body, a wave solid-state gyroscope as an angular velocity sensor, a microcontroller and a flywheel motor as an executive body. A constructive scheme of a wave solid-state gyroscope is given. A description of the algorithms for the operation of the SSC attitude control system is given.

Key words: small spacecraft, wave solid-state gyroscope, orientation system.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

Введение. Сегодня малые космические аппараты с массой до 1000 кг позволяют решать разнообразные задачи: мониторинг атмосферы Земли и радиации в околоземном пространстве, навигации и связи, сбора и передачи данных и др. Для реализации функциональных задач МКА необходима

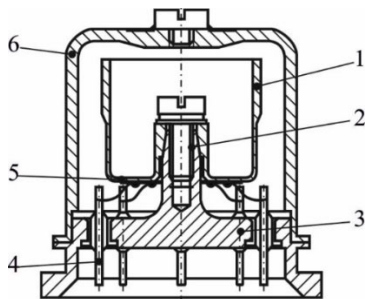
определенная ориентация корпуса МКА в космическом пространстве относительно Земли, Солнца или других ориентиров. Решение данной задачи обеспечивается системой ориентации МКА, которая реализуется с помощью датчиков, вычислительного устройства и исполнительных органов.

К функциям системы ориентации, как правило, также относится и задача стабилизации, т.е. удержание МКА в заданном положении.

В работе приводится описание системы ориентации МКА с волновым твердотельным гироскопом в контуре управления угловым положением.

Волновой твердотельный гироскоп.

В волновом твердотельном гироскопе (ВТГ) используется свойство инерции стоячей волны, возбуждаемой в полусферической или цилиндрической оболочке. Типовая конструкция волнового твердотельного гироскопа (рис. 1) имеет металлический резонатор 1 устанавливается на основание 3 при помощи винта 2 [1]. Четыре пары пьезоэлементов 5 наклеиваются на дно резонатора равномерно через 45° . Пьезоэлементы при помощи токоподводчиков подключаются к гермовыводам 4. Резонатор закрывается кожухом 6 и вакуумируется.



1 – резонатор; 2 – винт; 3 – основание; 4 – гермовывод;
5 – пьезоэлементы; 6 – кожух

Рисунок 1 – ВТГ с металлическим резонатором

Первые две пары пьезоэлементов служат для возбуждения стоячей и контроля резонансного режима, две другие – для съема информации об угловой скорости МКА и реализации компенсационной обратной связи.

Преимуществом ВТГ по сравнению с классическими гироскопами является простота конструкции, высокая точность и отсутствие подвижных частей, что позволяет создавать приборы длительного ресурса работы.

Макетный образец МКА. На рис. 2 приведен макетный образец малого космического аппарата с волновым твердотельным гироскопом в контуре управления, реализующий один из трех каналов системы ориентации. Одним из режимов функционирования МКА является стабилизация его корпуса в космическом пространстве [2]. При выводе на орбиту МКА может совершать беспорядочные вращения, которые должны быть устранены системой ориентации

ВТГ измеряет угловую скорость МКА и определяет направление вращения. Сигнал ВТГ подается в контроллер, который управляет двигате-

лем-маховиком. Вращение маховика обеспечивается двигателем постоянного тока, а величина его угловой скорости определяется скважностью широтно-импульсной модуляции управляющего сигнала. В основе систем ориентации с помощью двигателей-маховиков лежит свойство сохранения момента импульса, заключающееся в том, что при придании двигателю-маховику на борту угловой скорости в одном направлении, МКА получает угловую скорость в другом направлении, что может быть описано уравнением:

$$J_{\text{МКА}}\omega_{\text{МКА}} = -J_{\text{М}}\omega_{\text{М}}, \quad (1)$$

где $J_{\text{МКА}}$, $J_{\text{М}}$ – моменты инерции МКА и маховика соответственно; $\omega_{\text{МКА}}$, $\omega_{\text{М}}$ – угловые скорости соответственно МКА и маховика.



1 – волновой твердотельный гироскоп;
2 – двигатель маховик

Рисунок 2 – Макет малого космического аппарата с одноосной системой ориентации

В соответствии с уравнением (1) для решения задачи стабилизации МКА необходимо вращать маховик в ту же сторону, куда вращается корпус МКА.

На рис. 3 приведена экспериментальная кривая гашения угловой скорости МКА при начальной закрутке равной $67^\circ/\text{с}$.

Другим режимом функционирования системы ориентации является ориентированием на небесное светило [3, 4]. В этом случае управление двигателем-маховиком осуществляется по углу и угловой скорости, что позволяет реализовать пропорционально-дифференцирующий закон управления

$$U = k_{\alpha}\alpha + k_{\omega}\omega, \quad (2)$$

где k_{α} , k_{ω} – коэффициенты пропорциональности по углу и угловой скорости соответственно. Сигнал об угле отклонения от небесного светила формирует датчик Солнца (на рис. 2 не показан).

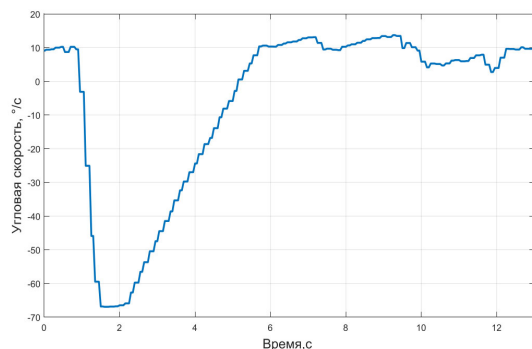


Рисунок 3 – Процесс стабилизации угловой скорости МКА при начальной закрутке 67 °/с

Заключение. Дано описание системы ориентации малого космического аппарата с волновым твердотельным гироскопом в контуре управления и двигателем-маховиком в качестве органа управления. Иллюстрируется процесс гашения угловой скорости МКА при его начальной закрутке.

УДК 531.385

ДИНАМИКА КАНАЛА ВЫСОТЫ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Малютин Д.М.¹, Адякин Ю.Н.²

¹ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

²ПАО «НПО «Стрела» Тула, Российская Федерация

Аннотация. В работе приведены математическая модель канала высоты опорно-поворотного устройства, закон изменения сигнала задатчика, структура построения усилительно-преобразующего тракта и результаты исследования динамики этого канала.

Ключевые слова: следящая система, двигатель, редуктор, опорно-поворотное устройство.

DYNAMICS OF THE CHANNEL OF HEIGHT ROTARY DEVICE

Malyutin D.¹, Adjakin J.²

¹Tula state university

²PJSC «SPA «Strela»

Tula, Russian Federation

The summary. In work the mathematical model of the channel of height of the rotary device, the law of change of a signal, structure of construction path and results of research of dynamics changes of this channel are resulted.

Keywords: watching system, the engine, a reducer, the rotary device.

Адрес для переписки: Малютин Д.М., пр. Ленина 92, Тула 300002, Российская Федерация
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Опорно-поворотные устройства (ОПУ) предназначены для дистанционного изменения направления оптической оси телевизионной системы с изменяемой скоростью по командам оператора в двух плоскостях (вертикальной и горизонтальной), а также управления углом обзора и фокусировкой видеокамеры [1–4]. Также ОПУ широко применяются в радиолокации для дистанционного управления положением антенн радиолокационных станций (РЛС). Если азимутальный канал ОПУ может быть реализован по классической схеме следящей системы [4], то при работе

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором: монография / В. Я. Распопов [и др.] : под ред. В. Я. Распопова. – Тула: ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Летные испытания алгоритмов управления ориентацией микроспутника «Чибис-М» / Д. С. Иванов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2012. – № 58. – 32 с.
3. Федосеев, В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – 248 с.
4. Ивандиков, Я. М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов / Я. М. Ивандиков. – М. Машиностроение, 1979. – 208 с.

вертикального канала имеются особенности, обусловленные тем, что центр масс нагрузки находится выше оси вращения. В системе присутствует верхняя маятниковость. Целью работы является разработка математической модели вертикального канала ОПУ, разработка закона изменения сигнала задатчика и структуры построения усилительно-преобразующего тракта, обеспечивающих высокую точность перемещения и скорость управления нагрузки.

Математическую модель канала высоты ОПУ представим в виде:

$$\begin{cases} \Delta U = U_\beta - U_{oc} \\ U_\beta = K_1 \cdot \beta \\ U_{oc} = \varphi_e \cdot K_{oc} \cdot W_\phi(p) \\ U = W_{kc}(p) \cdot K_{yнт} \cdot \Delta U \\ L_\alpha \cdot \dot{i}_\alpha + i_\alpha \cdot R_\alpha + i C_e \cdot \dot{\varphi}_e = U \\ J_e \cdot \ddot{\varphi}_e = C_m \cdot i_\alpha i - b \cdot \dot{\varphi}_e - M_{mp} + \\ + mgl \sin \varphi_e, \end{cases} \quad (1)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; U – напряжение на управляющей обмотке исполнительного двигателя; ΔU – напряжение сигнала ошибки; U_β – напряжение с выхода задающего устройства канала высоты; U_{oc} – напряжение с выхода устройства обратной связи; L_α – индуктивность якорной цепи; C_m – коэффициент пропорциональности между током якоря и вращающим моментом; R_α – сопротивление обмотки якоря; C_e – коэффициент пропорциональности между скоростью вращения и обратной э.д.с.; J_e – суммарный момент инерции на валу исполнительного двигателя канала высоты; $W_{kc}(p)$ – передаточная функция корректирующего устройства прямой цепи; $W_\phi(p)$ – передаточная функция корректирующего устройства цепи обратной связи; β – сигнал с выхода задающего устройства (ЗУ) канала высоты; φ_e – угол поворота нагрузки по каналу высоты (угол места); $\dot{\varphi}_e$ – угловая скорость нагрузки по каналу высоты; K_1 – коэффициент передачи задатчика; K_{oc} – коэффициент передачи усилительно-преобразующего тракта цепи обратной связи; b_e – коэффициент вязкого трения в опорах подвеса; $K_{yнт}$ – коэффициент передачи усилительно-преобразующего тракта в прямой цепи; M_{mp} – момент сил сухого трения; $M_{mp\alpha}$ – амплитуда момента сил сухого трения по оси канала высоты; i – коэффициент передачи редуктора по каналу высоты; m – масса нагрузки, g – ускорение силы тяжести; l – расстояние от центра масс нагрузки до оси вращения канала высоты.

Структурная схема канала высоты ОПУ представлена на рис. 1.

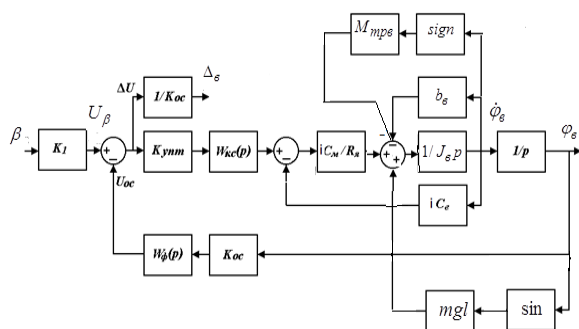


Рисунок 1 – Структурная схема канала высоты ОПУ:
 Δ_e – погрешность отработки заданного углового положения нагрузки по углу места

Динамические характеристики ОПУ по каналу высоты. Исследование динамики канала высоты ОПУ проведем при следующих численных значениях параметров структурной схемы: $\dot{i} = 85$, $M_{mp\alpha} = 1$ Нм, $J_e = 1,2$ кгм², $m = 11$ кг, $l = 0,26$ м, $b_e = 0,001$ Нмс.

Параметры исполнительного двигателя: $R_\alpha = 18$ Ом, $c_m = 0,107$ Нм/А, $c_e = 0,26$ Вс/рад; $i c_m / R_\alpha = 0,505$; $i c_e = 21,9$; $U = 35$ В.

Методом ЛАФЧХ определены численные значения параметров усилительно-преобразующего тракта, обеспечивающие устойчивый режим работы системы и требуемые динамические характеристики. В прямой цепи системы предлагается использовать корректирующее устройство с передаточной функцией $W_{kc}(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{p(T_3 p + 1)}$, а в цепи обратной связи корректирующее устройство с передаточной функцией $W_\phi(p) = 1$. Такая комбинация корректирующих устройств позволяет обеспечить устойчивость системы, а так же астатизм первого порядка передаточной функции, являющейся отношением угла поворота ОПУ по оси высоты к сигналу задатчика. При $K_{yнт} = 800$, $T_1 = 0,4$ с, $T_2 = 0,1$ с, $T_3 = 0,01$ с, $K_{oc} = 10$ в системе на частоте среза 82,5 рад/с обеспечен запас по фазе 47 град. Полоса пропускания ЛАЧХ замкнутой системы по передаточной функции, являющейся отношением угла поворота нагрузки по каналу высоты к сигналу задатчика, составляет 136 рад/с. В установившемся режиме погрешность отработки сигнала задатчика равна нулю. Разработана имитационная модель замкнутой системы по каналу высоты. В имитационной модели дополнительно учтены нелинейности, обусловленные ограничением по моменту исполнительного двигателя и действием момента сил сухого трения. Кроме того, конструкция ОПУ выполнена таким образом, что при нулевом значении угла места центр масс нагрузки оказывается смещенным на угол $-0,13$ рад относительно вертикали. Это конструктивное решение позволяет уменьшить момент от верхней маятниковости устройства во всем диапазоне углов поворота. В имитационной модели замкнутой системы дополнительно учтен к.п.д. волнового редуктора. Разработанная имитационная модель путем решения сложной нелинейной системы дифференциальных уравнений позволяет визуализировать форму сигнала задатчика, рассчитать процесс программного разворота нагрузки на заданный угол, рассчитать процесс изменения угловой скорости разворота нагрузки на заданный угол, рассчитать процесс изменения углового ускорения разворота нагрузки на заданный угол, рассчитать процесс изменения напряжения управления на исполнительном двигателе, рассчитать процесс изменения тока управления на исполнительном двигателе, рассчитать потребляемую мощность, рассчитать процесс изменения момента, создаваемого

исполнительным двигателем, рассчитать погрешность отработки сигнала задатчика.

При функционировании ОПУ закон изменения сигнала задатчика существенно влияет на динамические характеристики системы. Расчеты показывают, что задание требуемого угла поворота в виде ступенчатого воздействия, что казалось бы, обеспечивает максимальное быстродействие системы приводит к нарушению устойчивости нелинейной системы. Оптимальным является задание требуемого угла поворота в виде линейно нарастающего значения до требуемого значения угла поворота.

Заданный закон управления обеспечивает поворот нагрузки по каналу высоты от начального значения угла $-0,09$ рад к углу $0,4$ рад и далее от угла $0,4$ рад к углу $-0,05$ рад (рис. 2) с перерегулированием не превышающем $2,5\%$. Крутизна нарастания и спада сигнала задатчика составляет $0,3$ рад/с. Увеличение крутизны сигнала задатчика приводит к уменьшению времени переходного процесса, однако при этом возрастает перерегулирование в процессе поворота антенны на заданный угол. Поворот антенны по каналу высоты происходит с угловой скоростью, график которой приведен на рис. 3. Из графика (рис. 3.) следует, что в начальный момент времени угловая скорость поворота достигает значения $0,48$ рад/с и, затем в процессе поворота, поддерживается постоянное значение угловой скорости $0,3$ рад/с. График погрешности отработки сигнала задатчика представлен на рис. 4. К моменту времени $2,5$ с погрешность не превышает $0,03$ град, а в установившемся режиме отсутствует. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что в процессе работы обеспечивается длительный режим работы двигателя без перегрева. Система двигатель – волновой редуктор развивает момент, достигающий значения 17 Нм. Это значение находится в пределах линейной зоны характеристики системы двигатель-редуктор. Потребляемая мощность в моменте достигает 68 Вт.

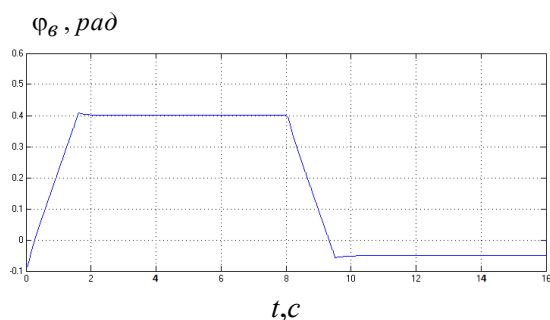


Рисунок 2 – Угол поворота нагрузки по каналу высоты (угол места)

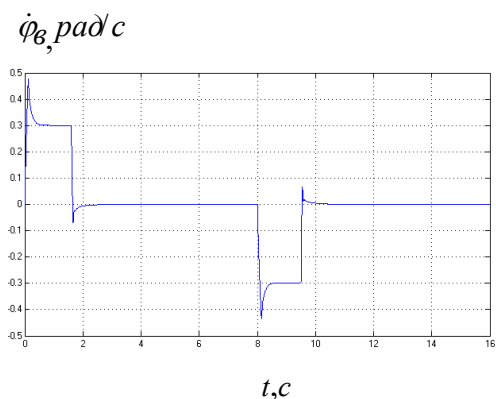


Рисунок 3 – Угловая скорость поворота нагрузки по каналу высоты

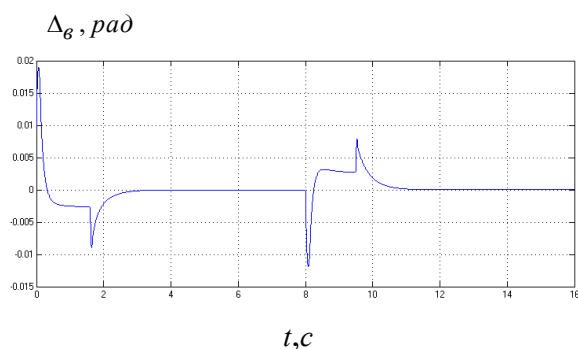


Рисунок 4 – Погрешность отработки сигнала задатчика

Заключение. Реализация предложенных в работе закона изменения сигнала задатчика и структуры построения усилительно-преобразующего тракта ОПУ позволяют обеспечить высокие скорости и точностные характеристики перемещения нагрузки на заданный угол.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Тульской области в сфере науки и техники. Договор ДС/143 от 26 июля 2022 г.

Литература

1. Поворотное устройство для камеры наружного наблюдения : пат. РФ № 2345501 / А. Ю. Мостовой. – Оpubл. 2006.
2. Распопов, В. Я. Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления / В. Я. Распопов, Д. М. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 372–386.
3. РЛС «Фара-ВР» – качественный скачок в развитии радиолокационной техники // Национальная оборона (электронный журнал). – 2021. – № 8.
4. Малютин, Д. М. Исследование динамики системы стабилизации оптической оси / Д. М. Малютин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2003. – Т. 46, № 9. – С. 49–53.

УДК 681.2.082:531.45

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ НА СТАЛИ С АКРИЛОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Ризноокая Н.Н., Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Касьмин В.Ю., Красневский Д.Ю.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены измерения моментов трения качения стальных шариков по стальной поверхности и по поверхности из стали с акриловым покрытием. Полученные результаты показали существенные отличия формы кривых моментов трения качения для разных пар трения.

Ключевые слова: трение качения, сталь с акриловым покрытием, момент трения качения, предварительное смещение.

ROLLING FRICTION ON ACRYLIC COATED STEEL

Riznookaya N., Pantišalev K., Mikitevich V., Kasmin V., Krasnevskiy D.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The rolling friction moments of pairs steel-steel and steel- steel with an acrylic coating were measured. The results showed significant differences in the shape of the rolling friction moments curves for different friction pairs.

Key words: rolling friction, steel with an acrylic coating, rolling moment, pre-displacement.

Адрес для переписки: Н.Н. Ризноокая, пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Одной из величин, характеризующих физико-механические свойства поверхности материалов является коэффициент трения качения. Данный коэффициент носит интегральный характер и в режиме предварительных смещений мало информативен. Ранее авторами были разработаны оригинальные средства и методики измерения моментов трения качения шариков на плоской поверхности в условиях, когда смещение шариков существенно меньше диаметра пятна контакта [1, 2]. Принцип действия устройства основан на измерениях амплитуд свободных затухающих колебаний маятника, опирающегося шариком на плоскую поверхность.

Целью данного исследования являлось исследование моментов трения пар трения с разными показателями твердости.

Момент сил сопротивления качению. В соответствии с [2], было высказано предположение, что момент сил сопротивления качению можно представить, как результирующее воздействие двух моментов: $M_{fr}(\varphi)$ – «диссипативного» связанного с силами адгезии при разрыве и внутреннем трении в материале и $M_{el}(\varphi)$ – адгезионного, при котором силы адгезии «не рвутся».

$$M(\varphi) = M_{fr} + M_{el}(\varphi) \approx$$

$$\approx \left[-mgR(c + b\varphi^p) \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right) \right] +$$

$$+ \left[2\gamma a^2 R |\varphi|^{n+1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{R}{a} \varphi \right) \cdot \operatorname{sign}(\varphi) \right] \quad (1)$$

где φ – угол отклонения маятника от положения равновесия, m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; R – радиус шарика; c, b, p – параметры аппроксимации, определяемые из экс-

периментальной зависимости амплитуды от времени, a – радиус пятна контакта; γ, n – параметры аппроксимации, определяемые из экспериментальной зависимости периода от амплитуды, причем параметр γ характеризует давление сил адгезии, действующее между поверхностью шарика и исследуемой поверхностью [3].

Используя эти уравнения в качестве уравнений регрессии для аппроксимации соответствующих зависимостей, полученных на эксперименте, можно определить численное значение параметров аппроксимации.

Зависимость $M_{el}(\varphi)$ позволяет построить скелетную кривую и зависимость $M_{fr}(\varphi)$ – построить петлю гистерезиса вокруг скелетной кривой.

Результаты измерений и расчетов. В экспериментах использовался маятник массой 0,4 кг, в котором в качестве опоры использовался шарик радиусом $R = 6,05$ мм, выполненный из стали ШХ15 ($Ra = 63$ нм, $E_{st} = 2,11 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\nu_{st} \approx 0,28$).

Исследовались 2 образца. Первый образец представляет собой плоскую полированную пластину из стали 08ПС. Физико-механические свойства стали 08ПС указаны в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства стали 08ПС

HB	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$G \cdot 10^{-5}$, МПа
98	365	175	2,03	0,74

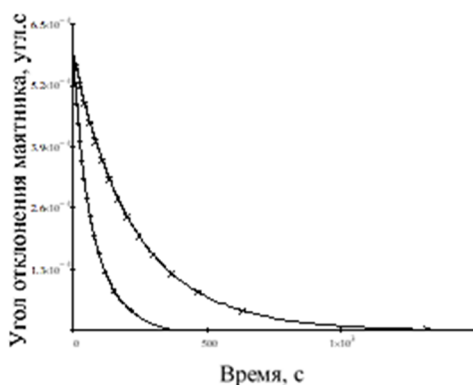
Второй образец представлял собой плоскую полированную пластину из стали 08ПС покрытую акриловым лаком КУ-9010. Состав: модифицированная акриловая смола, функциональные добавки, бутиловый спирт, метилацетат, ксилол, пропан, бутан, диметилловый эфир.

Физико-механические свойства акрилового лака указаны в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства акрилового лака

Твердость пленки по маятниковому прибору М-3, по ГОСТ 5233-89, усл. ед., не менее	0,3
Прочность покрытия при прямом ударе на приборе У-1, ГОСТ 4765-73, см, не менее	40

На каждом из представленных образцов проводили по 3 измерения в трех точках. Зависимости амплитуды колебаний маятника от угла отклонения маятника для пары сталь-сталь с акриловым покрытием, представлена на рис. 1.



xxx – для пары сталь – сталь;
+++ – для пары сталь – сталь с акриловым покрытием

Рисунок 1 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от угла отклонения маятника (усредненное значение по 3 точкам)

В табл. 3 представлены результаты измерений.

Таблица 3. Результаты измерений

Параметр трения качения	Пара сталь – сталь	Пара сталь – сталь с акриловым покрытием
$c, 10^{-9}$	9	136
p	0,012	0,176
b	1,071	1,247
$T_0, с$	3,39	2,20
$\gamma, 10^6 Н/м^2$	58,2	15,6
n	0,3126	0,3021
Радиус пятна контакта (расчетный), мкм	53	155
Коэффициент трения качения, 10^{-6}	1,06	3,45
Поверхностная плотность сил адгезии на отрыв, $10^{-3} Дж/м^2$	37,2	68,4
$M_{fr}(10 \text{ угл. с}), нН·м$	6,11	21,44
$M_{el}(10 \text{ угл. с}), нН·м$	5,26	17,72
$M(10 \text{ угл. с}), нН·м$	11,37	39,16

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимости моментов сил сопротивления качения от угла

отклонения маятника в пределах одного цикла качения с амплитудой 10 угл. с, построенные по формуле (1).

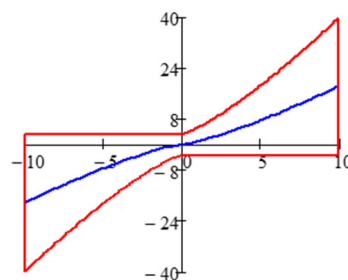


Рисунок 2 – График зависимости момента сопротивления качения (в единицах нН·м) от угла отклонения маятника (в единицах угл. с) для пары сталь – сталь с акриловым покрытием

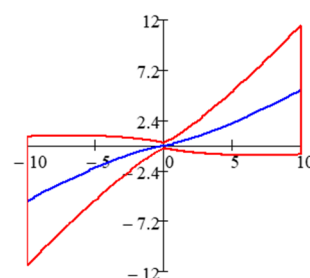


Рисунок 3 – График зависимости момента сопротивления качения (в единицах нН·м) от угла отклонения маятника (в единицах угл. с) для пары сталь – сталь

Заключение. Представленные результаты подтверждают универсальность маятникового метода. Однако приведенные числовые значения для коэффициентов аппроксимации, определяемые для акрилового покрытия являются весьма приблизительными, так как при расчете следует учитывать модули Юнга и сдвига материалов, а стандартные сведения для акрилового лака отсутствуют. Наиболее информативными в данном случае являются поверхностная плотность сил адгезии на отрыв и параметр γ характеризует давление сил адгезии, действующее между поверхностью шарика и исследуемой поверхностью.

Литература

1. Джилавдари, И. З. Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта / И. З. Джилавдари, С. Мекид, Н. Н. Ризноокая // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, №. 4. – С. 308–321.
2. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2013. – Vol. 227, №. 6. – P. 618–628.
3. Popov, V. L. Contact mechanics and friction: Physical Principles and Applications / V.L. Popov. – Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 2017. – P. 231–253.

УДК 621.38

ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Пантелеев К.В., Воробей Р.И., Тьявловский А.К., Гусев О.К., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены методики экспериментальных исследований изменения зарядового состояния поверхности полимерных композиционных материалов под действием внешних факторов (оптического излучения) с использованием зарядочувствительного зонда в режиме сканирования поверхности.
Ключевые слова: поверхность, заряд, контактная разность потенциалов, зарядочувствительный зонд.

CHANGES IN THE SURFACE CHARGE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS UNDER THE ACTION OF EXTERNAL FACTORS

Pantsialeu K., Vorobey R., Tyavlovsky A., Gusev O., Zharin A.

Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper considers the methods of experimental studies of changes in the charge state of the surface of polymer composite materials under the influence of external factors. Charge sensitive probe in surface scanning mode is used for research.

Key words: surface, charge, contact potential difference, charge sensitive probe.

Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: k.pantsialeu@bntu.by

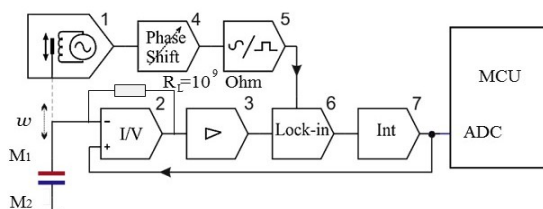
Введение. Наличие в объеме и на поверхности твердого диэлектрика (в т.ч. диэлектрических и проводящих полимерных композиционных материалов (ПКМ)) электростатического потенциала и, следовательно, электрического поля, оказывает существенное влияние на его механические, оптические, электрические параметры, а также на кинетику физико-химических процессов, имеющих место при воздействии на материал внешних факторов (температура, оптическое излучение, механические напряжения и др.) [1, 2]. В этой связи, в настоящее время, особое внимание уделяется разработке новых методов, средств и методик исследования зарядового состояния поверхности диэлектрических материалов, в т.ч. для оценки их эксплуатационных свойств [2].

В работе рассмотрены методики экспериментальных исследований изменения зарядового состояния поверхности ПКМ под действием внешних факторов (оптического излучения) с использованием зарядочувствительного зонда в режиме сканирования поверхности.

Приборы и методы экспериментальных исследований. В качестве средств измерений использован зарядочувствительный зонд (зонд Кельвина). Зарядочувствительный зонд представляет собой бесконтактное неразрушающее устройство (измеритель контактной разности потенциалов по методу Кельвина–Зисмана [3]) с размерами чувствительного элемента порядка 0,1–5 мм², обеспечивающее измерение работы выхода электрона поверхности металлов и сплавов [4], а также собственного или приобретенного

в результате внешнего воздействия электростатического потенциала полупроводников [5] и диэлектрических материалов [6, 7].

В методе Кельвина–Зисмана поверхности эталонного и измеряемого образцов соединены между собой внешней электрической связью и формируют плоскопараллельный конденсатор (рис. 1). Из-за различия РВЭ поверхности материалов пластины конденсатора имеют заряд пропорциональный контактной разности потенциалов между пластинами конденсатора. Под действием электромеханического модулятора эталонный образец вибрирует в перпендикулярной плоскости к контролируемой поверхности, тем самым поверхности образуют динамический конденсатор [3]. Метод применим и для регистрации поверхностного электростатического потенциала (заряда) диэлектрика.



- 1 – электромеханический вибратор;
2 – преобразователь ток-напряжение;
3 – инструментальный усилитель; 4 – фазосдвигатель;
5 – формирователь сигнала; 6 – фазовый детектор;
7 – интегратор; MCU – микропроцессорное устройство; ADC

Рисунок 1 – Структурная схема зарядочувствительного зонда на основе динамического конденсатора [3]

Исследования изменений зарядового состояния поверхности материалов под действием внешних факторов (оптического излучения) выполнены с использованием сканирующей модификации зарядочувствительного зонда [4], оснащенной источниками оптического излучения видимого (400–900 нм) и ультрафиолетового (240–400 нм) диапазонов.

Отработка методик и обсуждение результатов. На рис. 2 приведены результаты исследования фоточувствительности образца ПКМ на основе полиэтилена высокого давления, наполненного углеродными нанотрубками (4 мас.%) и наночастицами алюминия (2 мас.%). Измерения выполняли до и после кратковременного воздействия белым светом в каждой точке сканирования поверхности. В результате обнаружен существенный (до 20 мВ) отклик электростатического потенциала поверхности в отдельных точках исследуемой поверхности.

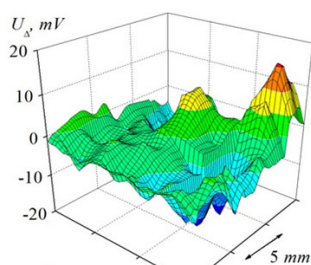


Рисунок 2 – Карта распределения фоточувствительности образца ПКМ на основе ПЭВД (94 мас.%), наполненного углеродными нанотрубками (4 мас.%) и наночастицами алюминия (2 мас.%)

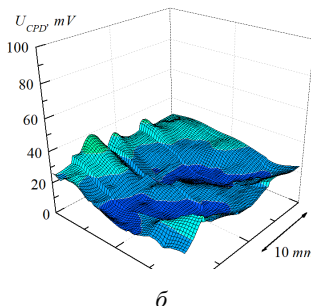
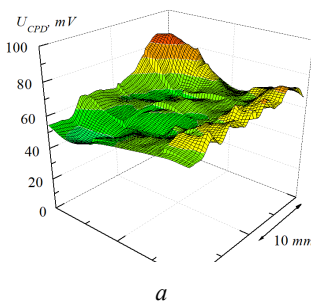


Рисунок 3 – Карты распределения поверхностного электростатического потенциала образца полиамида ПА-6 до (а) и после (б) воздействия излучением ультрафиолетового диапазона

Результаты исследования отклика поверхностного электростатического потенциала ПКМ на воздействие оптическим излучением ультрафиолетового диапазона также показали существенное перераспределение поверхностного потенциала. Результаты данных исследований приведены на рис. 3, а и б, соответственно до и после воздействия.

Исследования параметров распределения поверхностного электростатического потенциала были проведены как на матричных, так и на полимерных композиционных материалах. Анализ результатов показал, что относительные значения поверхностного электростатического потенциала и однородность его распределения существенно зависят как от компонентного состава, так и от концентрации наполнителей. Следует отметить, что количественная характеристика электрофизических свойств, а также их корреляционные связи с другими, например, функциональными свойствами полимерных и композиционных материалов может быть получены только при использовании дополнительных методов исследования поверхности.

Литература

1. The mosaic of Surface Charge in Contact Electrification / Н. Т. Baytekin [et al.] // Science. – 2011. – V. 333. – P. 308–312.
2. Thiago, A. L. Burgo. Chemical Electrostatics. New Ideas on Electrostatic Charging: Mechanisms and Consequences / Thiago A. L. Burgo. – Springer, 2017. – 237 p.
3. Пантелеев, К. В. Методы и средства измерения контактной разности потенциалов на основе анализа компенсационной зависимости зонда Кельвина : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / К. В. Пантелеев; БНТУ. – Минск, 2016. – 23 с.
4. Растровая сканирующая фотостимулированная электрометрия для контроля прецизионных поверхностей / Р.И. Воробей [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 10. – С. 66–73.
5. Influence of rapid thermal treatment of initial silicon wafers on the electrophysical properties of silicon dioxide obtained by pyrogenous oxidation / V.A. Pilipenko [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2019. – Vol. 23, iss. 3. – P. 283–290.
6. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. Informatics / K. Pantišaleyeu [et al.] // Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. – 2020. – № 10, vol. 4. – P. 57–60.
7. Пантелеев, К. В. Методы сканирующей зондовой электрометрии в исследовании свойств диэлектрических материалов / Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Жарин А.Л. // Перспективные материалы и технологии: монография / Алдошин С. М. [и др.] ; под ред. В. В. Рубаника. – Минск : Изд. центр БГУ, 2021. – С. 125–139.

УДК 621. 382

ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Сопряков В.И., Рубин Д.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассчитана зависимость поляризационного потенциала нейтрального центра от расстояния во внешнем электрическом поле. Изучены зависимости энергии активации и сечения захвата электронов А-центра в кремнии от напряженности электрического поля. Объяснены зависимости параметров глубоких уровней в кремнии от электрического поля на основе модели поляризационного потенциала. Учитывалось понижение потенциального барьера центров, а также зависимость сечения захвата, как координаты максимума потенциала в электрическом поле.

Ключевые слова: поляризационный потенциал, глубокие центры, энергия активации, сечение захвата, напряженность электрического поля.

DEPENDENCIES OF THE PARAMETERS OF DEEP CENTERS IN SILICON ON THE ELECTRIC FIELD STRENGTH

Soprykov V., Rubin D.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The dependence of the polarization potential of the neutral center on the distance in the external electric field is calculated in this work. The dependencies of the activation energy and capture cross section of electrons of the A-center in silicon on the electric field strength have been explored. The dependencies of the parameters of deep levels in silicon on the electric field are explained on the basis of the polarization potential model. The decrease in the potential barrier of the centers was taken into account, as well as the dependence of the capture cross section, as the coordinate of the potential maximum in the electric field.

Key words: polarization potential, deep centers, activation energy, capture cross section, electric field strength.

Адрес для переписки: Сопряков В.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vitaivs@mail.ru

Наличие примесей и дефектов, образующих в запрещенной зоне полупроводника глубокие энергетические уровни, может приводить ко многим полезным эффектам в материалах и приборах. К ним относятся повышение быстродействия приборов, управление удельным сопротивлением, фотопроводимость, влияние на спектр излучения светодиодов, расширение динамического диапазона мощности излучения у фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей с многозарядными примесями.

Значительный прогресс в изучении глубоких центров (ГЦ) внесла релаксационная спектроскопия, использующая емкость р-п-перехода или другой структуры с потенциальным барьером в качестве дозиметра концентрации ГЦ.

Следует учитывать, однако, что энергия активации ГЦ и сечение захвата носителей заряда, определяемые этим методом, зависят от распределения напряженности электрического поля по координате в области пространственного заряда р-п-перехода, что приводит к сложной мультиэкспоненциальной кривой релаксации емкости. Последнее обстоятельство затрудняет интерпретацию экспериментальных данных, однако оно позволяет изучать электрополевые зависимости

параметров ГЦ, используя обратное смещение р-п-перехода. Воздействие электрического поля, таким образом, может быть использовано для модуляции параметров ГЦ, а также для определения их природы.

Для объяснения полевых зависимостей скоростей термической эмиссии носителей заряда из глубоких уровней необходимы данные о поведении потенциала ГЦ в электрическом поле.

Эффект Френкеля заключается в понижении кулоновского потенциального барьера ГЦ приложенным электрическим полем. Понижение потенциального барьера ($\Delta\phi$) и координата максимума потенциала (x_0) даются формулами

$$\Delta\phi = \left(\frac{ze\varepsilon}{\pi\varepsilon_0\varepsilon}\right)^{1/2}, \quad x_0 = \left(\frac{ze}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon\varepsilon}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где ze – заряд центра, ε – напряженность электрического поля.

В полупроводниковых материалах, однако, ГЦ могут обладать поляризационным потенциалом.

Рассмотрим эффект понижения потенциального барьера нейтрального центра во внешнем электрическом поле в дипольном приближении. Упругий дипольный момент нейтрального центра

$$p = \epsilon_0 \alpha \epsilon_{\text{лок}}, \quad (2)$$

где α – поляризуемость центра, $\epsilon_{\text{лок}}$ – локальное поле. Предположим, что локальное поле для неполярных кубических кристаллов определяется добавкой Лоренца к макроскопическому полю в окрестности центра, зависящей только от поляризации атомов основной решетки и не зависящей от свойств примесного центра:

$$\epsilon_{\text{лок}} = \frac{\epsilon+2}{3} \epsilon_M. \quad (3)$$

Пусть прямая, соединяющая точечный заряд с центром, совпадает с направлением внешнего поля, а расстояние между центром и точечным зарядом много больше размеров диполя. Тогда напряженность макроскопического поля

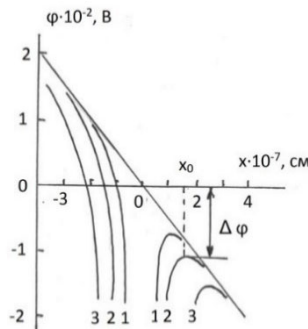
$$\epsilon_M = \epsilon_0 - \epsilon_e, \quad (4)$$

где ϵ_0 – напряженность поля точечного заряда.

Вычисляя дипольный момент (2) и напряженность электрического поля диполя с учетом (3) и (4), найдем зависимость потенциала центра во внешнем поле от расстояния (рис. 1, область $x > 0$)

$$\phi(x) = -\epsilon_0 x - \frac{\alpha G}{x^4} + \frac{\alpha H \epsilon_0}{x^2}, \quad (5)$$

где $G = \frac{\epsilon+2}{3} \cdot \frac{\epsilon_0 e}{2(4\pi\epsilon_0\epsilon)^2}$, $H = \frac{\epsilon+2}{3} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon}$.



Значения α : 1 – $1 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3$; 2 – $1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3$; 3 – $1 \cdot 10^{-19} \text{ см}^3$

Рисунок 1 – Зависимость поляризационного потенциала нейтрального центра от расстояния во внешнем электрическом поле ($\epsilon = 11,7$; $\epsilon_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ В/см}$)

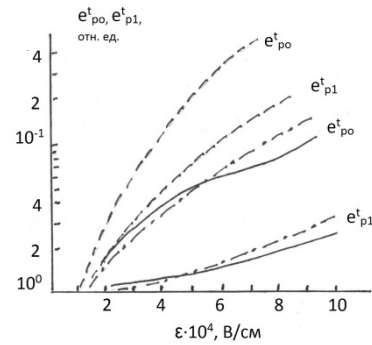
Второе слагаемое в (5) представляет потенциал центра, поляризованного точечным зарядом, а третье учитывает вклад поляризации центра во внешнем электрическом поле.

Как видно из (5), в области $x > 0$ потенциал имеет максимум, понижение которого увеличивается с ростом поляризуемости (см. рис. 1). Если пренебречь третьим слагаемым в (5), то величины $\Delta\phi$ и x_0 могут быть выражены аналитически.

$$x_0 = (4xG/\epsilon)^{0,2} \quad (7)$$

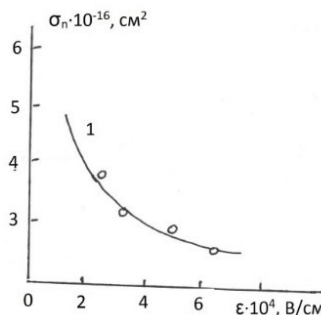
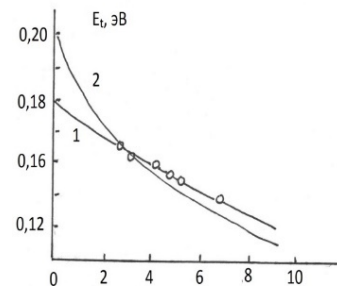
$$\Delta\phi = -1,25(4xG)^{0,2} \epsilon^{0,8}. \quad (8)$$

В резком р-п-переходе напряженность электрического поля изменяется по линейному закону, а потенциал – по квадратичному. Однако в окрестности центра напряженность электрического поля можно положить постоянной, а зависимость потенциала от расстояния линейной, так что результаты расчета x_0 и $\Delta\phi$ могут быть использованы для анализа опытных данных.



Сплошные линии – эксперимент (данные Германа и Саа); штриховые линии – расчет с учетом $\Delta\phi$, штрих-пунктирные – расчет настоящей работы с учетом $\Delta\phi$ и x_0

Рисунок 2 – Зависимость скоростей термической эмиссии дырок из нейтрального (e_{p0}^t , $T = 104 \text{ К}$) и однократно заряженного (e_{p1}^t , $T = 232 \text{ К}$) центра Zn в Si от напряженности электрического поля



1 – поляризационный потенциал; 2 – кулоновский потенциал

Рисунок 3 – Экспериментальные и расчетные зависимости энергии активации и сечения захвата электронов для А – центра в Si ($T = 77 \text{ К}$) от напряженности электрического поля

В настоящей работе изучались радиационные дефекты в резких р⁺-п-переходах на базе кремния

n-типа с концентрацией $5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Исследование проводилось методом изотермической релаксации емкости. Измерялось время релаксации заполнения ГЦ (τ), обратное скорости термической эмиссии электронов.

Для объяснения зависимостей $\tau(\epsilon)$ учитывалось не только понижение потенциального барьера центра $\Delta\phi$ в электрическом поле, но и зависимость $x_0(\epsilon)$ для кулоновского (1) и поляризационного потенциала (7). Сечение захвата центра оценивалось, как геометрическое (x_0), величина которого уменьшается коэффициентом, отражающим сложность процесса обмена энергией носителя заряда с

решеткой. Такой подход позволил объяснить полевые зависимости скоростей термической эмиссии носителей из кулоновских центров (рис. 2).

Электростатические зависимости энергии активации, сечения захвата электрона, а также времени релаксации заполнения А-центра в облученном кремнии были объяснены на основе модели поляризационного потенциала с учетом $\Delta\phi(\epsilon)$ и $x_0(\epsilon)$ при $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3). Экстраполированное значение энергии активации центра в нулевом электрическом поле составило 0,18 эВ, что согласуется с литературными данными.

УДК 004.056

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Глинская Е.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В наш век данных данные являются наиболее небезопасным и легкодоступным товаром. В такой ситуации искусственный интеллект может оказать огромную помощь индустрии кибербезопасности, тем более что многие киберпреступники уже используют эту технологию. Рассмотрены методы искусственного интеллекта, которые могут оказать большую помощь в области обнаружения злоумышленников в сфере кибербезопасности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение, кибербезопасность, фишинг.

MACHINE LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INFORMATION SECURITY

Glinskaya E.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russian Federation*

Abstract. In this age of data, data is the most insecure and easily accessible commodity. In such a situation, artificial intelligence can be of great help to the cybersecurity industry, especially since many cybercriminals are already using this technology. The methods of artificial intelligence are considered, which can be of great help in the field of detecting intruders in the field of cybersecurity.

Key words: artificial intelligence, machine learning, deep learning, cybersecurity, phishing.

*Адрес для переписки: Глинская Е.В., ул. Вторая Бауманская, 5, Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: Glinskaya@bmstu.ru*

В настоящее время много говорят о машинном обучении (МО) и искусственном интеллекте (ИИ). За последние несколько лет эти технологии привлекли внимание специалистов по безопасности, и некоторые из них считают, что ИИ готов трансформировать информационную безопасность.

Искусственный интеллект – это наука о попытках воспроизвести разумное поведение, подобное человеческому. Есть несколько способов добиться этого – машинное обучение – один из них. Например, тип системы искусственного интеллекта, не связанный с машинным обучением,

представляет собой экспертную систему, в которой навыки и процесс принятия решений эксперта фиксируются с помощью ряда правил и эвристик.

Машинное обучение – это особый тип ИИ. Система МО анализирует большой набор данных, классифицирует данные и определяет, какие данные относятся к какой категории. Например, машинное обучение можно использовать для анализа данных о поведении сети и классификации их как нормальных или аномальных.

Учитывая эти определения, все системы машинного обучения также являются системами ИИ. Однако не все системы ИИ используют ма-

шинное обучение. Текущая тенденция заключается в том, что используются лишь немногие из методов искусственного интеллекта. В ситуации, когда единственными системами ИИ являются те, которые используют машинное обучение, эти два термина будут синонимами.

Есть две основные ветви машинного обучения: контролируемое и неконтролируемое. Контролируемое машинное обучение включает в себя сопоставление входных переменных с выходными переменными, чтобы делать точные прогнозы об анализируемых данных. Что касается обнаружения угроз, алгоритм машинного обучения может использовать известное подозрительное поведение и присвоение категории «злонамеренных действий» в качестве основы для разработки классификатора угроз. Затем он может использовать этот классификатор для анализа новых образцов.

В неконтролируемом машинном обучении, второй ветви машинного обучения, система пытается сгруппировать группы данных вместе на основе характеристик данных. В этом случае результатом является идентификация групп похожих элементов, что позволяет аналитику, например, обрабатывать большое количество похожих образцов на основе одного решения (например, возможно все электронные письма имеют одинаковые вложения, и они являются вредоносными).

Существует так называемое глубокое обучение, особый тип машинного обучения, который использует нейронные сети вместо статистического анализа для анализа данных. Глубокое обучение особенно хорошо подходит для поиска классификаций в больших объемах данных. Но недостатком глубокого обучения является его ограниченная объяснительная способность в отношении того, почему что-то принадлежит к определенной группе, например, почему исполняемый файл опасен, с точки зрения информационной безопасности.

Машинное обучение сталкивается с одной из проблем информационной безопасности: пытаясь получить наборы данных, отражающие злонамеренное поведение, необходимо предотвратить угрозу. Это и есть обучение, то есть данные, которые намеренно пытаются избежать классификации, особенно когда это что-то злонамеренное, которое пытается не восприниматься как таковое.

Авторы вредоносных программ узнают, какие алгоритмы ищут, и настраивают свои образцы или пытаются переобучить модель до тех пор, пока не будет дана неправильная классификация, чтобы злоумышленники могли избежать обнаружения и заразить больше пользователей. При этом злоумышленники используют то, чему научились алгоритмы, против специалистов по безопасности, а затем и пользователей.

Чтобы учесть эту «враждебную» настройку, специалистам по безопасности необходимо разработать методы машинного обучения, которые ищут выбросы и ложные флаги. Они должны быть особенно осторожны в отношении процесса, который они используют для получения и характеристики данных. В противном случае результаты могут быть непредсказуемыми.

Например, возьмем упаковку исполняемого файла. Многие вредоносные программы используют упаковку, чтобы выглядеть по-новому и избежать обнаружения антивирусными программами, в то время как безопасный код редко использует упаковку (например, в случаях, когда авторы хотят защитить свою интеллектуальную собственность, как это происходит в видеоиграх). Если применяется машинное обучение к программам без предварительной распаковки, алгоритм должен знать, что упаковка «плохая», и алгоритм должен отметить это.

Таким образом методы искусственного интеллекта могут оказать большую помощь в области обнаружения злоумышленников в сфере кибербезопасности. Они могут помочь в обнаружении и защите от любых злоумышленников в системе, используя существующие представления о моделях действий злоумышленников. Например, злоумышленники в системе могут вести себя неестественно, например отправлять и получать большие объемы данных или внезапно менять шаблоны связи. Эти признаки злоумышленников в системе очень сложно уловить специалистам по кибербезопасности, особенно в крупных компаниях, где много сетевого трафика. Здесь системы обнаружения злоумышленников на базе искусственного интеллекта можно использовать для мониторинга сети на предмет любых нежелательных злоумышленников.

Также, внезапные изменения в поведении существующих пользователей могут быть признаком кибератаки в сети. Это может произойти, если злоумышленник украл учетные данные для входа в систему законного пользователя, а затем незаконно вошел в сеть, используя эти учетные данные. Но эти поведенческие изменения чрезвычайно трудно идентифицировать, особенно в большой сети. В такой ситуации искусственный интеллект может использоваться для обнаружения и блокировки скомпрометированных учетных записей пользователей, которые демонстрируют подозрительные изменения в поведении. ИИ может сделать это, создав поведенческий профиль всех пользователей, который включает их шаблоны входа и выхода, шаблоны передачи данных и т. д. Затем анализ поведения пользователей в этих профилях может помочь определить, когда пользователь ведет себя не так, как его обычный

поведенческий профиль, который может использоваться для предупреждения группы кибербезопасности о том, что что-то не так.

Искусственный интеллект также может быть чрезвычайно полезен для предотвращения фишинговых атак на пользователей в определенной сети. Фишинговые атаки чрезвычайно распространены во многих компаниях, где сотрудникам рассылаются мошеннические электронные письма с целью получения конфиденциальной информации их компании, такой как пароли компании, их банковские данные и данные кредитной карты и т. д. Могут использоваться методы искусственного интеллекта, такие как обработка естественного языка. Отслеживать электронные письма сотрудников в их корпоративных учетных записях и проверять, нет ли чего-либо подозрительного, например шаблонов и фраз, которые могут указывать на то, что электронная почта является попыткой фишинга.

Применение и внедрение ИИ в последние годы увеличилось в геометрической прогрессии, исследователи, лаборатории и технологические

компании имеют бесчисленное множество применений ИИ во всех сферах жизни, запланированных на будущее.

ИИ способствует прогрессу во всех технологических областях, обеспечивает значительный прогресс в области кибербезопасности, поддерживает средства управления информационной безопасностью в продвинутом и интеллектуальном мире.

Литература

1. Гольдберг, Й. Нейросетевые методы в обработке естественного языка : руководство / Й. Гольдберг; перевод с английского А. А. Слинкина. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 282 с.
2. Бенджамин, Бенгфорт. Прикладной анализ текстовых данных на Python. Машинное обучение и создание приложений обработки естественного языка / Бенджамин Бенгфорт, Ребекка Билбро, Тони Охеда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=365298>.
3. Ганегедара, Т. Обработка естественного языка с TensorFlow : руководство / Т. Ганегедара ; перевод с английского В. С. Яценкова. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 382 с.

УДК 539.1.074.3

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гончаренко И.А., Ильющонок А.В., Рябцев В.Н.

*Университет гражданской защиты МЧС Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведен анализ воздействия ионизирующего излучения на волноводные микрокольцевые резонаторы и оценка возможности их использования в качестве датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения. Показано, что с точки зрения чувствительности перспективными являются датчики на основе микрокольцевых резонаторов на базе кремниевых волноводов, покрытых фторполимером.

Ключевые слова: оптический волновод, ионизирующее излучение, доза излучения, микрокольцевой резонатор, щелевой волновод.

APPLICATION OF OPTICAL WAVEGUIDE RING RESONATORS FOR MEASUREMENT OF ABSORBED DOSE OF IONIZING RADIATION

Goncharenko I., Il'yushonok A., Reabtsev V.

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The effect of ionizing radiation on waveguide microring resonators are analysed. The possibility of its application as sensor of absorbed dose of ionizing radiation is estimated. It's shown that the sensors comprising microring resonators on the base of silicon waveguides coated with fluoropolymer are the most prospective due to the higher sensitivity.

Key words: optical waveguide, ionizing radiation, radiation dose, microring resonator, slot waveguide.

*Адрес для переписки: Рябцев В.Н., ул. Машиностроителей, 25, Минск 220118, Республика Беларусь
e-mail: v.reabtsev@ucp.by*

В технических устройствах, функционирующих в условиях жесткого излучения, например, на спутниках или в ядерных реакторах, применяются датчики различных физических величин на основе волноводных резонансных структур (резонаторы Фабри-Перо, микрокольцевые резона-

торы) [1]. Воздействие ионизирующего излучения вызывает деградацию материала волновода из-за образования дефектов и эффекта ионизации [2, 3]. Дефекты приводят к изменению оптических свойств материала в результате возникновения полос поглощения и центров окраски [4–6].

С другой стороны, изменение показателя преломления и геометрической длины резонатора под воздействием ионизирующего излучения вызывает смещение резонансной длины волны или полос интерференционной картины, что позволяет использовать такие структуры для измерения доз ионизирующего излучения с большой точностью.

В данной работе проведен анализ воздействия ионизирующего излучения на волноводные микрокольцевые резонаторы и оценка возможности их использования в качестве датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения.

В работе [7] исследовано влияние поверхностной пассивации на изменение функции пропускания микрокольцевого резонатора на основе кремниевых полосковых волноводов под воздействием гамма-излучения. Воздействие гамма-излучения на резонатор на непассивированном волноводе приводит к сдвигу резонансной длины волны на 0,4 нм в область меньших длин волн, что примерно в шесть раз превышает полуширину резонансного пика, что обусловлено ускорением роста природных окислов. При этом величина функции пропускания уменьшается более чем на 10 дБ. Изменения величины функции пропускания частично связаны с вариациями коэффициента связи подводящего и кольцевого волноводов. Для кольцевых резонаторов на основе волноводов из пассивированных материалов изменений функции пропускания под воздействием ионизирующего излучения не наблюдалось.

В работе [8] экспериментально исследовано влияние больших доз (до 150 кГр) гамма-излучения на оптические волноводы из аморфного кремния ($a\text{-Si}$), образующие кольцевой резонатор. Для резонатора на основе волновода с покрытием из двуоксида кремния сдвига резонансной длины волны под воздействием ионизирующего излучения не наблюдалось, что указывает на отсутствие значительных изменений эффективного показателя преломления моды кольцевого волновода. Таким образом, после облучения гамма-излучением общей дозой 150 кГр в волноводах на основе аморфного кремния с покрытием SiO_2 показатель преломления, потери на распространение и потери на рассеяние не изменяются.

После облучения кольцевого резонатора на основе волновода с покрытием из фторполимера наблюдается сдвиг его резонансной длины волны порядка 21 пм (3,4 ГГц) в область коротких длин волн, что соответствует изменению эффективного показателя преломления моды волновода примерно на $-4,8 \cdot 10^{-5}$. На основе сравнения с результатами, полученными для волноводов с покрытием из SiO_2 , можно утверждать, что этот резонансный сдвиг происходит только из-за изменений показателя преломления полимера, покрывающего волновод, поскольку остальные материалы волновода (аморфный кремний и SiO_2) остаются неизменными после облучения.

В работе [9] исследовано влияние гамма-излучения на волноводы, изготовленные из аморфного кремния ($a\text{-Si}$) и нитрида кремния (SiN_x). Микрокольцевые резонаторы на основе волноводов из этих материалов облучались ионизирующим излучением, и изменение показателя преломления определялось по изменению характеристик резонатора. Для определения непосредственного влияния гамма-излучения на показатель преломления волноводов устройства облучались в инертной среде (аргон).

Коэффициент экстинкции и добротность резонатора после облучения гамма-излучением практически не меняются, что указывает на минимальное увеличение оптических потерь. Увеличение дозы ионизирующего излучения с шагом 20 кГр вплоть до дозы 100 кГр проводилось для того, чтобы оценить влияние поверхностного окисления на сдвиг резонансной длины волны. Пропускание резонатора оценивалось до и после каждого сеанса облучения.

Показатели преломления как $a\text{-Si}$, так и SiN_x при облучении их в аргоновой среде монотонно возрастают при увеличении дозы ионизирующего излучения. При этом зависимость показателя преломления для обоих материалов от суммарной дозы ионизирующего излучения примерно линейная. Поскольку возможность наведенной ионизирующим излучением кристаллизации исключена, увеличение показателя преломления наиболее вероятно вызвано уплотнением или сжатием аморфной атомной структуры [10]. Эффективный показатель преломления мод волноводов увеличивается примерно на $4 \cdot 10^{-3}$ для аморфного кремния и $5 \cdot 10^{-4}$ для нитрида кремния под воздействием ионизирующего излучения дозой 100 кГр.

Для сравнения проведено облучение волноводов в воздушной среде. При облучении материалов в воздухе увеличение показателя преломления замедляется и для $a\text{-Si}$ достигает примерно постоянного значения при дозах свыше 60 кГр. Показатель преломления волноводов на основе SiN_x слегка уменьшается после начальной дозы 20 кГр. Поскольку двуокись кремния имеет более низкий показатель преломления ($n_{\text{SiO}_2} = 1,45$), чем $a\text{-Si}$ ($n_{a\text{-Si}} = 3,6$) и SiN_x ($n_{\text{SiN}_x} = 2,1$), этот эффект связан с поверхностным окислением, которое препятствует увеличению показателя преломления, вызванного уплотнением аморфной структуры.

Таким образом, ионизирующее излучение увеличивает показатель преломления материала волновода в составе микрокольцевого резонатора. Это приводит к смещению резонансной длины волны резонатора пропорционально поглощенной дозе. Наибольшее смещение достигается в резонаторах на основе кремниевых волноводов с покрытием из фторполимера или облучаемых в инертной среде, чтобы исключить поверхностное окисление материалов. Подобные устройства

могут быть использованы в качестве блоков детектирования волноводных оптических дозиметров с высокой чувствительностью.

Наиболее перспективными с точки зрения достижения высокой чувствительности являются оптические датчики поглощенной дозы ионизирующего излучения на базе кольцевых волноводных резонаторов с полимерным покрытием. При этом для увеличения чувствительности в кольцевых резонаторах можно использовать волноводы с горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными полимером, показатель преломления которого изменяется под воздействием ионизирующего излучения.

Литература

1. Van Lint, V. A. J. The physics of radiation damage in particle detectors / V. A. J. Van Lint // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1987. – Vol. 253, № 3. – P. 453–459.
2. Johnston, A. H. Radiation effects in optoelectronic device / A. H. Johnston // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Vol. 60, № 3. – P. 2054–2073.
3. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G. P. Summers [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Vol. 40, № 6. – P. 1372–1379.
4. West, R. H. Effects related to dose deposition profiles in integrated optics structures / R. H. West, S. Dowling // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – Vol. 43, № 3. – P. 1044–1049.
5. Girard, S. 14-MeV neutron, gamma-ray, and pulsed X-ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers / S. Girard, J. Baggio, J. Bisutti // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Vol. 53, № 6. – P. 3750–3757.
6. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors / F. Berghmans [et al.] // Optical Waveguide Sensing and Imaging. 1 ed. – Netherlands: Springer, 2008. – P. 127–165.
7. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators / S. Bhandaru [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. – 2015. – Vol. 62, № 1. – P. 323–328.
8. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, № 13. – P. 3053–3056.
9. Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices / Q. Du [et al.] // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42, № 3. – P. 587–590.
10. Piao, F. The mechanism of radiation-induced compaction in vitreous silica / F. Piao, W.G. Oldham, E.E. Haller // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – Vol. 276, № 1–3. – P. 61–71.

УДК 621.391.63;535.361

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ МЕЖЭЛЕМЕНТНОГО КОНТРАСТА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ДЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен новый метод повышения лазерно-локационного распознавания объектов с квазинулевым оптическим контрастом поверхности. Получены зависимости разрешающей способности распознавания по глубине рельефа поверхности объектов с квазинулевым оптическим контрастом. Показаны преимущества метода по сравнению с методами распознавания по оптическому контрасту.

Ключевые слова: обнаружение, распознавание объектов с квазинулевым оптическим контрастом.

METHOD OF INCREASING THE INTERELEMENT CONTRAST OF THE SURFACE OF OBJECTS WITH QUASI-ZERO OPTICAL CONTRAST FOR THEIR EFFECTIVE LASER-LOCATION RECOGNITION

Ivanov V., Ivanov N.

*Institute for nuclear problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A new method of increasing laser-location recognition of objects with quasi-zero optical surface contrast is considered. The dependences of the recognition resolution on the depth of the surface relief of objects with quasi-zero optical contrast are obtained. The advantages of the method in comparison with optical contrast recognition methods are shown.

Key words: detection, recognition of objects with quasi-zero optical contrast.

*Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Бобруйская, 11, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Обнаружение и распознавание объектов локационными лазерными системами видения (ЛЛСВ) резко ухудшается с уменьшением оптического контраста объекта k_0 [1, 2] и становится невозможным при

$$k_0 < k_N, \quad (1)$$

где $k_N = 0,02$ – пороговый контраст визуального зрения (контраст на экране видеорегистратора или на входе ЛЛСВ) [2]

Нормированный межэлементный (дифференциальный) оптический контраст поверхности объекта k_0 можно представить уравнением

$$k_0 = \frac{K_1 - K_2}{K_2}, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент отражения одного элемента поверхности объекта; K_2 – коэффициент отражения некоторого другого элемента поверхности, по отношению к которому осуществляется распознавание (детализация) объекта.

Отраженное поле импульсного лазерного излучения $E(S) = \sum_k E_k(S)$ в плоскости изображения ЛЛСВ представляет собой совокупность k элементарных волн (парциальных пучков), отраженных от k точек поверхности S , каждый из которых характеризуется интенсивностью E_k и временем запаздывания прихода τ_k парциальных пучков сигнала на многоэлементный фотодетектор ЛСВ

$$\tau_k = 2\xi_k/C, \quad (3)$$

где ξ_k – глубина рельефа поверхности в k -той точке относительно точки поверхности, наиболее близкой к ЛЛСВ (точка $\xi = 0$).

На основе уравнений (2), (7)–(9) и принимая во внимание, что $k_0 = \frac{K_1 - K_2}{K_2}$, а $\frac{K_1}{K_2} = k_0 + 1$, уравнение межэлементного результирующего контраста получено в виде

$$k_1 = \frac{\Delta B}{B_{k2}} = k_0 + \frac{\Delta\tau_k(k_0+1)}{\tau_p - \tau_{k2}} = k_0 + \frac{\Delta\xi_k(k_0+1)}{0,5\tau_p C - \xi_{k2}}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что контраст $k_1 > k_0$ и увеличивается, как с увеличением ширины интервала $\Delta\xi_k = (\xi_{k2} - \xi_{k1})$, так и с увеличением координаты его расположения по глубине $\xi_k = \xi_{k2}$, т. е. при постоянной величине $\Delta\xi_k$ контраст k_1 возрастает пропорционально значению $\xi_k = \xi_{k2}$. Из уравнения (4) имеем:

$$\Delta\xi_k = \frac{(k_1 - k_0)(0,5\tau_p C - \xi_k)}{1 + k_0}. \quad (5)$$

Интервал $\Delta\xi_k$ в (5) характеризует минимальный интервал глубин рельефа поверхности объекта с квазиуловым оптическим контрастом k_0 , на котором еще возможно раздельное наблюдение двух соседних элементов поверхности с контрастом $k_1 > k_0$, т. е. определяет разрешающую способность детализации наблюдения поверхности объекта по глубине рельефа. Для обеспечения необходимого межэлементного контраста равного пороговому значению k_N разрешающая способность $\Delta\xi_k$ по глубине рельефа ξ_k определяется из (5) при $k_1 = k_N$, т. е.

$$\Delta\xi_k = \frac{(k_N - k_0)(0,5\tau_p C - \xi_k)}{1 + k_0}. \quad (6)$$

Значение $\Delta\xi_k$ при $k_0 = 0$ определяется из уравнения (6) в виде:

$$\Delta\xi_k = k_N(0,5\tau_p C - \xi_k). \quad (7)$$

При регистрации задней части поля для некоторых двух элементов поверхности объекта ΔS_{k1} и ΔS_{k2} , расположенных на глубинах ξ_{k1} и ξ_{k2}

($\xi_{k2} > \xi_{k1}$) с коэффициентами отражения K_1 и K_2 соответственно, на основании уравнения для определения аналогичных параметров получены в виде:

$$B_{k1} = P_1 K_1 F_p \tau_{k2}; \quad (8)$$

$$B_{k2} = P_1 K_2 F_p \tau_{k1}; \quad (9)$$

$$\Delta B = B_{k1} - B_{k2} = P_1 F_p [\tau_2(K_1 - K_2) + K_2 \Delta\tau_k]. \quad (10)$$

Уравнение результирующего контраста имеет вид:

$$k_2 = \frac{\Delta B}{B_{k2}} = \frac{k_0 \xi_{k2} + \Delta\xi_k}{\xi_{k2} - \Delta\xi_k}. \quad (11)$$

Уравнение разрешающей способности по глубине рельефа получено из (11):

$$\Delta\xi_k = \frac{\xi_{k2}(k_2 - k_0)}{1 + k_2}, \quad (12)$$

которое при $k_2 = k_N$:

$$\Delta\xi_k = \frac{\xi_{k2}(k_N - k_0)}{1 + k_N}, \quad (13)$$

а при $k_0 = 0$:

$$\Delta\xi_k = \frac{\xi_{k2} k_N}{1 + k_N}. \quad (14)$$

На рис. 1 приведены графики зависимостей разрешающей способности $\Delta\xi_k$ по глубине рельефа ξ_k : а) для передней части отраженного поля (уравнение (6)); б) для задней части поля (уравнение 19) при $k_0 < k_N = 0,02$, $\tau_p = 20$ нс, C – скорость света.

Длительность излучаемого импульса

$$\tau_p > 2\xi_{k\max}/C, \quad (15)$$

где $\xi_{k\max}$ – максимальная глубина рельефа поверхности объекта

Двумерные распределения энергии отраженного светового поля $B(S)$ получают путем накопления интенсивности отраженного поля $E(S, t)$ в пространственно – временных строках с длительностью, равной длительности лазерных импульсов $\tau_{s1} = \tau_{s2} = \tau_p$, на интервале $(t_1, t_1 + \tau_p)$, который включает передний фронт отраженного поля, или на интервале $(t_1 + \tau_p, t_1 + 2\tau_p)$ – включающего задний фронт поля. В первом случае

$$B_1(S) = |E_k(S)|^2 (\tau_p - \tau_k), \quad (16)$$

где t_1 – момент начала прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 .

Во втором случае:

$$B_2(S) = |E_k(S)|^2 \tau_k. \quad (17)$$

При регистрации передней части поля для некоторых двух элементов поверхности объекта ΔS_{k1} и ΔS_{k2} , расположенных на глубинах ξ_{k1} и ξ_{k2} ($\xi_{k2} > \xi_{k1}$) с коэффициентами отражения K_1 и K_2 соответственно, имеем:

$$B_{k1} = P_1 K_1 F_p (\tau_p - \tau_{k1}); \quad (18)$$

$$B_{k2} = P_1 K_2 F_p (\tau_p - \tau_{k2}); \quad (19)$$

$$\Delta B = B_{k1} - B_{k2} = P_1 F_p [\tau_p (K_1 - K_2) - \tau_{k2} (K_1 - K_2) + K_1 \Delta \tau_k], \quad (20)$$

где $\Delta \tau_k = \tau_{k2} - \tau_{k1}$; $\tau_{k1} = \tau_{k2} - \Delta \tau_k$.

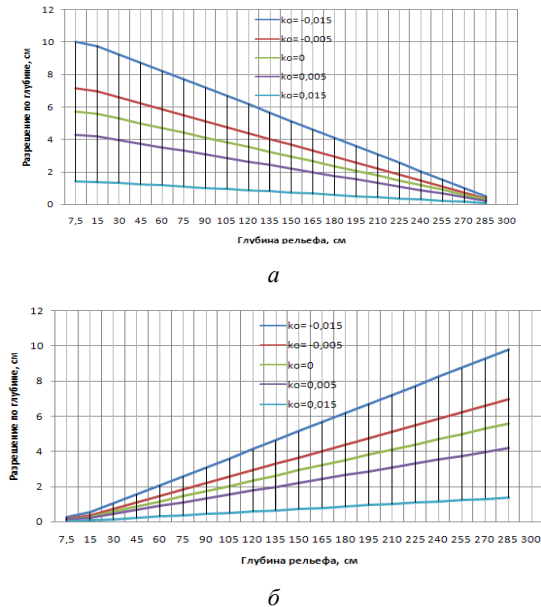


Рисунок 1 – Зависимости разрешающей способности $\Delta \xi_k$: по глубине рельефа поверхности ξ_k

Согласно графикам, для обеспечения более высокой разрешающей способности $\Delta \xi_k$ на переднем плане объекта $\xi_k \approx 0 \div \tau_p C/4$ оценку разрешающей способности целесообразно получать по

сигналам с задним фронтом, а разрешающую способность на заднем плане объекта для $\xi_k \approx \tau_p C/4 \div \tau_p C/2$ – по сигналам с передним фронтом. Из графиков следует, что при $\tau_p = 20$ нс и вариации k_0 в пределах $k_0 = 0 \pm 0,015$ и $k_N = 0,02$ разрешающая способность в диапазоне глубины рельефа поверхности объекта $\xi_k \approx 0 \div 3$ м не хуже $\Delta \xi_k \leq 6 \mp 4$ см. При уменьшении длительности лазерного импульса τ_p разрешающая способность также улучшается (т. е. $\Delta \xi_k$ уменьшается с уменьшением длительности). Так при $\tau_p = 10$ нс разрешающая способность в диапазоне $\xi_k \approx 0 \div 1,5$ м не более $\Delta \xi_k \leq 2,8 \mp 1,7$ см.

Следует отметить, что достигаемая при этом более высокая разрешающая способность переднего плана рельефа поверхности объектов $\Delta \xi_k$ (по задней части сигнала, рис. 1, б), которая, например, для $k_0 = 0 \pm 0,015 < k_N$ в диапазоне $\xi_k \approx 0 \div 0,75$ м не превосходит величины $\Delta \xi_k \leq 1,47 \mp 1,1$ см, позволяет обнаруживать и различать существенно более мелкие детали переднего плана различных замаскированных малогабаритных объектов с нулевым и квазинулевым контрастом: вооруженных и невооруженных людей, боеприпасы, малогабаритную робототехнику и др. с более высоким разрешением $\Delta \xi_k$.

Литература

1. Карасик, В. Е. Локационные лазерные системы видения / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013. – 478 с.
2. Зега, Э. П. Перенос изображений в рассеивающей среде / Э. П. Зега, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Минск: Наука и техника. – 1985. – 327 с.

УДК 621.373.826

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО СПЕКЛ-АНАЛИЗА МИКРОВИБРАЦИЙ И СМЕЩЕНИЙ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение чувствительности лазерного спекл-анализа для дистанционной диагностики микровибраций и смещений поверхностей объектов на основе анализа флуктуаций интегральной интенсивности лазерных спекл-полей.

Ключевые слова: лазерная диагностика микровибраций и перемещений по спекл-полям.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF LASER SPECKLE ANALYSIS OF MICROVIBRATIONS AND DISPLACEMENTS

Ivanov V., Ivanov N.

Institute for nuclear problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Theoretical and experimental studies aimed at increasing the sensitivity of laser speckle analysis for remote diagnostics of micro-vibrations and displacements of object surfaces based on the analysis of fluctuations in the integral intensity of laser speckle fields have been carried out.

Key words: laser diagnostics of micro-vibrations and movements in speckle fields.

Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Бобруйская, 11, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com

Актуальность бесконтактной (дистанционной) вибродиагностики во многих случаях обусловлена необходимостью проведения измерений при высоких температурах и радиации, высоком уровне акустических помех, необходимостью исключения нагрузки диагностируемых виброповерхностей весом контактных датчиков и др. Для решения данной задачи в настоящее время широко применяются лазерные методы. Причем для диагностики как радиальной, так и тангенциальной вибраций (смещений) предпочтительнее использовать методы лазерной спекл-интерферометрии [1, 2] или методы прямого фотодетектирования и оценки интегральной интенсивности спекл-полей, попадающих в зону освещенности поверхности лазерным излучением [3].

На рис. 1 приведен внешний вид разработанного лазерного спекл-анализатора микровибраций и смещений.



Рисунок 1 – Внешний вид спекл-анализатора микровибраций и смещений

Принцип действия прибора основан на прямом колебаний f в точке $\vec{r}_1 = 0$.

Проведенный теоретический и экспериментальный анализ показал, что по мере увеличения амплитуды виброколебаний компоненты гармоник спектра с $m \neq 0$ сначала возрастают до некоторого максимального значения, а затем начинают монотонно уменьшаться, при этом компоненты более низкого порядка остаются всегда больше компоненты более высокого порядка. Когда амплитуда колебаний поверхности достаточно мала $\gamma \leq 1$ в спектре кроме постоянной составляющей присутствует лишь одна компонента с частотой равной частоте акустических колебаний ω . С возрастанием амплитуды колебания в спектре принимаемого сигнала появляются гармоники основной частоты все более высокого порядка, а разброс амплитуд гармоник различных порядков уменьшается, хотя форма спектра сохраняет монотонный спадающий характер. Если $\gamma \lesssim 1$, то смещение спекл-структуры поля оказывается меньше характерного размера спеклов, поэтому интенсивность в данной точке модулируется пропорционально угловым колебаниям поверхности, а глубина модуляции зависит от градиента спекл-поля в точке наблюдения и амплитуды колебаний.

Если в случае точечного детектора относительная мощность компоненты спектра G_m не зависит от расфокусировки оптической системы, то в случае конечных размеров апертуры детектора эта зависимость появляется. Когда система сфокусирована точно на поверхность объекта, т. е. $\Psi_1 = 0$, величины G_m в случае конечных размеров фотодетектора отличаются от соответствующих величин для точечного детектора только коэффициентом $1/(\alpha^2 + 1)$. Параметр α^2 можно интерпретировать как среднее число спеклов, укладываемых в площадь апертуры фотодетектора.

Для оценки потенциальной чувствительности нами получено уравнение отношения сигнал/шум:

$$\delta_1 = \frac{2e \eta_0^2 G_{от} \pi^2 d^4 E_0^4 q^2 \ell_1^2 A_0^2}{\epsilon_\phi \epsilon_\phi V n \ell_2^4 \left[\frac{e \eta_0 G_{от}}{\epsilon_\phi} \pi d^2 E_0^2 \frac{q^2}{\ell_2^2} + jT \right] \left(1 + \frac{d^2 q^2 k^2}{2 \ell_2^2} \right)}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона; η_0 – квантовый выход фотодетектора; $G_{от}$ – коэффициент отражения поверхности объекта; d – радиус апертуры фотодетектора; E_0 – освещенность на поверхности объекта; A_0 – амплитуда вибраций; ϵ_ϕ – энергия кванта излучения; Vn – полоса частот сигнала, обусловленная частотой вибраций; q – радиус апертуры приемной оптической системы; k – волновое число; jT – темновой ток фотодетектора; ℓ_1 – расстояние от поверхности объекта до ОС; ℓ_2 – расстояние от ОС до плоскости изображения ОС, в которой установлен фотодетектор.

Основные параметры, определяющие чувствительность анализа микровибраций.

Параметр расфокусировки оптической системы (ОС) прибора:

$$\Psi_1 = \frac{\kappa q^2}{2} \left(\frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_2} - \frac{1}{F_\lambda} \right), \quad (1)$$

где $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число; q – радиус приемной апертуры; F_λ – фокусное расстояние объектива (линзы) ОС; ℓ_1 – расстояние от поверхности объекта до приемной ОС; ℓ_2 – расстояние от ОС до плоскости изображения в которой установлен фотодетектор.

Параметр линейного разрешения ОС:

$$\rho_0 = \frac{\ell_1 \sqrt{2(1 + \Psi_1)}}{\kappa q}, \quad (2)$$

имеет смысл линейного разрешения ОС, т. е. величина ρ_0 равна минимальному расстоянию между двумя точками в предметной плоскости, при котором они еще разрешаются оптической системой. Параметр Ψ_1 – характеризует расфокусировку системы. При точно сфокусированной системе $\Psi_1 = 0$.

Характерный радиус спекла:

$$r_s = 0,32 \frac{l \lambda}{q}. \quad (3)$$

Параметр α характеризует среднее число спеклов, укладываемых в апертуру фотодетектора, т. е. увеличение апертуры фотодетектора влечет увеличение параметра α .

Амплитуда вибраций:

$$\gamma = 2\kappa_{\rho} A_0, \quad (4)$$

где $A_0 = |(\nabla f(0))|$ – амплитуда угловых колебаний вектора нормали к поверхности в точке наблюдения; $\nabla f(0)$ – градиент функции.

Из формулы (5) следует, что отношение сигнал/шум является монотонно возрастающей функцией радиуса апертуры фотодетектора d и достигает максимума, когда величина d равна радиусу изображения освещенного участка поверхности объекта. С другой стороны, δ_I растет с увеличением освещенности E_0^2 на поверхности объекта, которая при фиксированной мощности лазерного излучения обратно пропорциональна площади освещенного участка. Следовательно, для увеличения δ_I следует стремиться как можно лучше сфокусировать лазерный пучок на поверхности объекта. В случае равенства размеров изображения светового пятна на поверхности и размеров апертуры фотодетектора справедливо следующее соотношение между излучаемой мощностью лазерного излучения P_L и освещенностью на поверхности E_0 :

$$P_L = \pi d^2 E_0 \frac{\ell_1^2}{\ell_2^2}, \quad (6)$$

В результате, максимально возможное отношение сигнал/шум определяется величиной

$$\delta_I = \frac{e \eta_0^2 G_{от} P_L q^2 A_0^2}{\varepsilon_{\phi} \varepsilon_{\phi}^2 B_n \ell_1^2 \left[\frac{e \eta_0 G_{от} P_L q^2}{\varepsilon_{\phi}} + j m \right]}. \quad (7)$$

УДК 621.38

УЧЕБНАЯ АУДИТОРИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ПРОЕКТУ «УМНЫЙ КЛАСС»
Микитевич В.А., Свистун А.И., Исаев А.В., Воробей Р.И., Тьявловский К.Л., Тьявловский А.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Учебная аудитория по проекту «Умный класс» предназначена для проведения лекционных занятий, семинаров, конференций. Разработаны основные составляющие: адаптивное освещение, система контроля микроклимата и концентрации углекислого газа, рабочий стол преподавателя.

Ключевые слова: умный класс, адаптивное освещение, адаптивный электропривод.

LEARNING AUDIENCE FOR THE EXPERIMENTAL PROJECT "SMART CLASS"

Mikitsevich U., Svistun A., Isaev A., Vorobey R., Tyavlovsky K., Tyavlovsky A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The classroom for the "Smart Class" project is intended for lectures, seminars, conferences. The main components have been developed: adaptive lighting, a microclimate and carbon dioxide concentration control system, and a teacher's desktop.

Key words: smart class, smart lighting, smart electric drive.

Адрес для переписки: Микитевич В.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mikitevichva@bntu.by

Назначение аудитории. Учебная аудитория предназначена для проведения лекционных и практических учебных занятий с использованием

Если расстояние ℓ_1 не слишком велико, то постоянная составляющая сигнала существенно больше j_T . В этом случае формула (7) упрощается:

$$\delta_I = \frac{\eta_0 G_{от} P_L A_0^2}{\varepsilon_{\phi} B_n}, \quad (8)$$

и отношение сигнал/шум не зависит от расстояния до объекта, а определяется только параметрами поверхности объекта и приемно – детектирующей системы. Для надежной регистрации виброколебаний отношение сигнал/шум должно быть не менее 3. В случае применения фотодетектора с квантовой эффективностью $\eta_0 = 0,5$, мощности лазерного излучения $P_L = 30$ мВт ($\lambda = 0,694$ нм.), $G_{от} = 0,3$ и $B_n = 10^3$ Гц; из формулы (8) имеем, что $A_{0 \min} = 3,6 \cdot 10^{-7}$ рад. Полученные расчетные и экспериментальные оценки указывают на высокую чувствительность метода, что позволяет дистанционно фиксировать вибрации и смещения поверхности объектов на уровне 350–400 нм.

Литература

1. Франсон, М. Оптика спеклов / М. Франсон. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
2. Джоунс, Р. Голографическая спекл – интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 327 с.
3. Пресняков, Ю. П. Использование спекл – эффекта для анализа колебаний шероховатой поверхности / Ю. П. Пресняков, В. П. Щепинов // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67, № 8. – С. 71–75.

Основные цели:

- создание экспериментальной площадки для внедрения перспективных научных и инженерных разработок студентов и преподавателей факультета;
- создание аудитории с благоприятными комфортными условиями, соответствующими санитарным нормам;
- формирование единой образовательной среды для повышения качества образования и мотивации обучающихся, направленные на вовлечение их в научную деятельность;
- отображение учебных материалов, результатов научных исследований и моделирования в формате 3D при проведении учебных занятий;
- отображение трехмерных наглядных пособий с применением документ-камеры;
- отображение наглядных пособий микрометровых размеров с применением микроскопа.

Основные задачи. Задачи направлены на разработку и реализацию следующих систем:

- система контроля и управления доступом;
- система управления искусственным и естественным освещением;
- система управления микроклиматом, включающая кондиционер, датчики контроля температуры, влажности, концентрации углекислого газа, подсистему приводов открывания окон;
- интегрированная система управления умной аудиторией;
- рабочий стол преподавателя, оснащенный компьютером, документ-камерой, микроскопом.

Система контроля и управления доступом. Реализован доступ в аудиторию с помощью RFID-карты или по отпечатку пальца. Замок работает в режиме открыт-закрыт. Таким образом, преподаватель открывает аудиторию перед началом занятия и закрывает в конце. Во время занятий дверь остается открытой.

Система управления искусственным освещением. Реализована при модернизации светодиодных светильников путем добавления светодиодной RGB ленты, датчиков освещенности, управляющего микроконтроллера и модуля беспроводной связи. Такие изменения позволили регулировать яркость каждого светильника отдельно с целью обеспечения равномерной освещенности рабочих мест во всей аудитории независимо от наличия естественного освещения; регулировать температуру цвета света [1, 2]. Для управления всеми светильниками в автоматическом и ручном режимах предусмотрен модуль беспроводной связи (рис. 1).

Подсистема управления приводом жалюзи. Реализована путем модернизации ручных приводов жалюзи установкой электрического привода с редуктором. Предусмотрены автоматические и ручные режимы работы.

В автоматическом режиме реализовано открывание/закрывание жалюзи в зависимости от освещенности за окном.

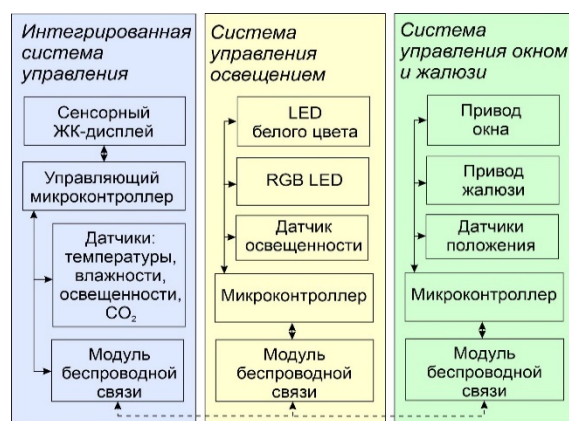


Рисунок 1 – Структурная схема рабочего стола и системы отображения информации

Система приводов открывания окна. Реализована на основе цепного электропривода. Управление реализовано на основе микроконтроллера STM32F103 и двух H-мостов.

Алгоритмически реализованы многоступенчатые режимы проветривания и автоматическое открывание окна при превышении концентрации углекислого газа в помещении.

Интегрированная система управления умной аудиторией. Реализована на основе микроконтроллера STM32F103. Используются следующие датчики:

- датчик CO₂ – SCD30;
- датчики освещенности – фоторезистор MLG4458;
- датчик влажности - HR202;
- датчики температуры – термисторы сопротивлением 10 кОм.

В качестве радиопередатчика использован модуль NRF24L01. Основные преимущества такого радиопередатчика: работа в двух направлениях, подтверждение получения данных, высокая скорость передачи (до 1,5 Мбит/с), работа на частоте 2,4 ГГц, отличный от Wi-Fi протокол обмена; поддержка 128 каналов связи и 64 битных адресов устройств.

Еще одним важным преимуществом таких модулей является относительная защищенность от несанкционированного доступа к системе управления аудиторией. Второй уровень защиты реализован с помощью уникального программно реализованного протокола обмена.

В качестве сенсорного дисплея использован человеко-машинный интерфейс (HMI) DMG80480C070_04WTC производства DWIN Technology (Китай) который состоит из цветного жидкокристаллического дисплея диагональю 7 дюймов; емкостного сенсора; управляющего микроконтроллера и памяти (16 Мбайт). Такой HMI позволяет хранить в памяти и воспроизводить на дисплее изображения, обрабатывать результаты касания сенсора и осуществлять обмен данными с микроконтроллером STM32 через UART.

Графический интерфейс разработан самостоятельно и прошит в памяти НМІ (рис. 2).

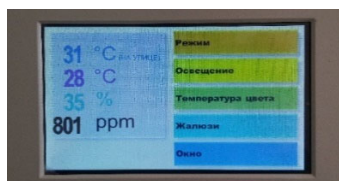


Рисунок 2 – Дисплей управления «Умной аудиторией»

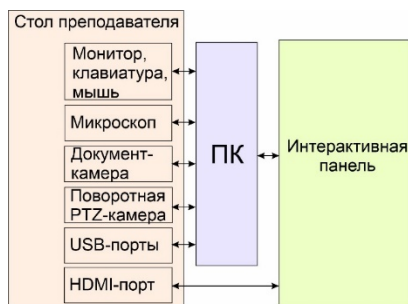


Рисунок 3 – Структурная схема рабочего стола и системы отображения информации

Рабочий стол преподавателя оснащен монитором на подвижном кронштейне, клавиатурой, мышкой, микроскопом с цифровым интерфейсом, документ-камерой (разработана самостоятельно), поворотной PTZ-камерой (для проведения онлайн

конференций), выдвижной панелью с розетками, USB и HDMI портами (рис. 3).

Дополнительный HDMI порт позволяет преподавателю использовать свой ноутбук для проведения занятий.

Для качественного отображения учебных материалов, результатов научных исследований и моделирования в формате 3D использована интерактивная панель.

Учебная аудитория по экспериментальному проекту «Умный класс» реализована на приборостроительном факультете Белорусского национального технического университета.

Литература

1. Адаптивный светильник для «умной» аудитории // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.) / Ю. Д. Сороко [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 46–47.

2. Адаптивное освещение в «умной» аудитории // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.) / Сороко, Ю.Д. [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 47–48.

УДК 681.2.08

КОМПЛЕКСНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС ТЕРМОПАР

Мороз А.С., Тьявловский А.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данном докладе рассмотрены причины изменения и возможности компенсации дрейфа термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) термопары типа ТХА (тип К) при долговременных измерениях температуры. Компенсация изменения термо-ЭДС обеспечивается за счет обработки нормирующим преобразователем сигналов термопары большей выборки и сравнения результатов измерения при применении двух и более датчиков, но с разным сечением измерительных проводников и разными типами термопар.

Ключевые слова: термопара, преобразователь, датчик.

COMPLEX COMPENSATION OF CHANGES IN THE THERMAL EMF OF THERMOCOUPLES

Moroz A., Tyavlovsky A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This report, the reasons for the change and the possibility of compensation for the drift of the thermoelectromotive force (thermo-EMF) of a thermocouple of type TNA (type K) during long-term temperature measurements are considered. Compensation of changes in the thermo-EMF is provided by processing a larger sample of thermocouple signals by a normalizing converter and comparing the measurement results when using two or more sensors, but with different cross-sections of measuring conductors and different types of thermocouples.

Key words: thermocouple, converter, sensor.

Адрес для переписки: Мороз А.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: artur.moroz.97@mail.ru

Термопара хромель-алюмель ТХА (тип К) – самая распространенная в промышленности. В термопарах ТХА наблюдаются два вида нестабильности термоЭДС: необратимая нестабильность постепенно накапливающаяся со временем

(длительная, кумулятивная), и обратимая нестабильность (циклическая, кратковременная) [1].

Необратимая нестабильность термопары типа ТХА в основном подвержена взаимодействием с окружающей средой. Особенно заметно

изменение термоЭДС при работе термопар ТХА при температурах, начиная с $\sim 600^\circ\text{C}$ в течении ~ 1000 ч.

Стабильность в окислительных средах. При эксплуатации термопары типа ТХА на воздухе и в других окислительных средах (особенно с высоким содержанием кислорода) наблюдается необратимое возрастание ее термо-ЭДС. Только в некоторых случаях при 500°C наблюдается отсутствие дрейфа термо-ЭДС. Величина дрейфа термо-ЭДС растет с увеличением температуры и времени эксплуатации, график изменения представлены на рис. 1 [1].

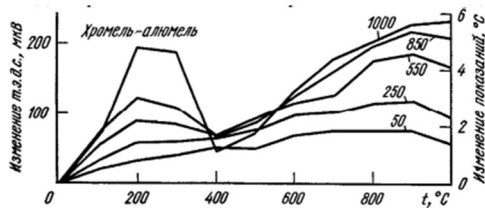


Рисунок 1 – Изменение градуировочной характеристики термопары хромель-алюмель (ТХА) и ее термоэлектродов в результате нагрева на воздухе при 1000°C (диаметр электродов 3,2 мм).

Исходная градуировка ось абсцисс.

Цифры у кривых – время, ч. [1]

Обратимая нестабильность термопары типа ТХА в основном обусловлена протеканием в хромеле превращений по типу ближнего упорядочения в интервале температур $250\text{--}550^\circ\text{C}$. В результате этих превращений термопары типа ТХА после нагревания до $250\text{--}550^\circ\text{C}$ увеличивают термоЭДС. Этот рост термоЭДС исчезает после прохождения верхнего предела упорядочения хромеля ($\sim 550^\circ\text{C}$). Такое обратимое изменение термоЭДС всегда имеет место, если температура горячего спая выше 250°C , и наблюдается даже тогда, когда она превосходит верхний температурный предел упорядочения ($\sim 550^\circ\text{C}$), так как на дрейф термоЭДС оказывает влияние участок термопары $250\text{--}550^\circ\text{C}$ [1].

Величина обратимого дрейфа зависит от предыдущей истории термоэлектродов, температур градуировки, скорости охлаждения, а также от градиента температурного поля в котором находится термопара. Обратимый дрейф очень трудно отличить от необратимой нестабильности термоЭДС. При использовании классических методов измерения и нормализации значений термоЭДС, практически невозможно исключить обратимый дрейф (влияние порядка $3\text{--}5^\circ\text{C}$ на конечный результат измерений).

Подобные исследования изменения термоЭДС неоднократно отмечались в различных исследованиях, например [2].

Методы компенсации изменения термоЭДС. Обратимые нестабильности термоЭДС термопар возможно компенсировать применением

микроконтроллерного нормирующего преобразователя температуры (НПТ) с возможностью длительного хранения результатов измерения и часами реального времени ведущие журнал измерений. Используя полученные данные в автоматическом режиме возможна последующая математическая обработка результатов измерений и мгновенное внесение компенсирующих коэффициентов обратимую нестабильность термопары. Также повышение точности компенсации обеспечит построение соответствующего полинома для нормализации значений термоЭДС (обычно для нормализации значений используется аппроксимация табличных значений, что негативно влияет на точность измерений).

Практические советы по измерительной части НПТ можно получить в [3].

Совместное применение нескольких термопар с переменной коммутацией на один измерительный вход НПТ для исключения погрешности самого измерительного и нормирующего тракта. При установке нескольких термопар с различным сечением проводников будет разное время изменения градуированной характеристики с возможно введение специальных алгоритмов усреднения показаний датчиков для достижения меньшей погрешности измерения температуры, а также введения статистики измерений позволит опираться на доверенное значение погрешности.

При помещении нескольких измерительных спаев термопар в условия одинаковой температуры возможна их калибровка в 0 относительно друг друга программным методом. Этим методом также можно на некоторое время добиться точности на уровне эталонных измерителей температуры в случае калибровки на нескольких реперных точках температуры.

При необходимости многоточечного мониторинга процесса, протекающего при высоких температурах (более 800°C), можно использовать относительно дешевые термопарами типа ТХА, а повышение точности компенсации необратимого дрейфа термоЭДС обеспечить совместны применении термопары платиновой группы ТПП (Тип S), которая позволит отслеживать и компенсировать долговременный дрейф группы термопар, что сильно удешевит систему без потери точности измерения.

Применение продвинутых нормирующих преобразователей температуры (НПТ) для измерения термоЭДС термопар с использованием программных методов компенсации дрейфа позволяет исключить значительные погрешности измерения температуры (в полном диапазоне температур термопары типа ТХА до $\sim 15^\circ\text{C}$ в первые 1000 часов работы) и обеспечивать компенсацию от обратимых изменений температуры (в среднем до

~3–5°C) ведением журнала измерений в реальном времени.

Совместное применение нескольких термопар, с разным временем изменения градуированной характеристики дрейфа термоЭДС при одинаковой измерительной температуре позволяет сопоставлять результат измерений и внести поправочный коэффициент дрейфа термоЭДС при нормировании сигналов термопар. Это позволяет добиться повышения надежности измерительной системы и увеличивает достоверную выборку результатов измерений.

Литература

1. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар. Справочник / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М., Металлургия, 1983. – 360 с.
2. Hysteresis Effects and Strain-Induced Homogeneity Effects in Base Metal Thermocouples / Iñigo González de Arrieta [et al.] // Int J Thermophys. – 2015. – Vol. 36. – P. 467–481.
3. Keysight Technologies Практические советы по измерению температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etk-komplekt.ru>. – Дата доступа: 25.10.2022.

УДК 620.179.14/15

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. При изготовлении аддитивных материалов, как правило, возникает значительная неоднородность свойств по поверхности. Степень неоднородности зависит от методов и режимов получения 3D-материалов, характеристик лазера и металлических порошков, последующих обработок и др. факторов. Цель работы – магнитошумовым методом выявить и оценить степень неоднородности свойств по длине образцов стали 09Г2С, полученных методом селективного лазерного сплавления с разными последующими режимами термообработок, и с помощью литья. Установлено, что трехмерные отожженные, нормализованные, а также литые образцы по степени неоднородности значительно отличаются между собой, причем, нормализация резко снижает остаточные напряжения и приводит к снижению степени неоднородности. Результаты показали возможность оценки и контроля степени неоднородности аддитивных материалов магнитошумовым методом.

Ключевые слова: степень неоднородности, аддитивные технологии и материалы, магнитошумовой метод, физические и механические свойства, стальные образцы.

ASSESSMENT OF STATE HETEROGENEITY OF ADDITIVE MATERIAL SAMPLES BY MAGNETIC NOISE METHOD

Busko V.

*Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In the manufacture of additive materials, as a rule, there is a significant heterogeneity of properties in surface and depth. The degree of heterogeneity depends on the methods and modes of obtaining 3D materials, the characteristics of the laser and metal powders, subsequent treatments, and other factors. The purpose of the work is to detect and evaluate the degree of heterogeneity of FMS by the length of 09G2S steel samples obtained by selective laser fusion method under different thermal treatments and by casting. It was found that three-dimensional annealed, normalized, as well as cast samples differ significantly in the degree of heterogeneity among themselves, moreover, normalization sharply reduces residual stresses and leads to a decrease in heterogeneity. The results showed the possibility of evaluating and controlling the degree of heterogeneity of additive materials by the magnetic noise method.

Key words: degree of heterogeneity, additive technologies and materials, magnetic noise method, physical and mechanical properties, steel samples.

*Адрес для переписки: Бусько В.Н., ул. Академическая, 16, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Благодаря применению инновационных аддитивных технологий (АТ) в последнее время происходит резкий рост объемов производства 3D-изделий/деталей и интенсивное внедрение их в различные отрасли промышленности (особенно, в

машиностроении, авиакосмической отрасли и ракетостроении, строительстве, медицине) [1].

В трехмерных изделиях ввиду отличного от традиционных способов их получения (литье, ковка, штамповка, фрезерование и др.), более

ярко проявляются неоднородность свойств, шероховатость, анизотропия, остаточные напряжения, текстура, дефектность, препятствующих повышению физико-механических свойств (ФМС) [1, 2]. Влияющим на качество и ФМС изделий фактором является неоднородность свойств по поверхности изделия, которая считается не менее важным, чем технологическая анизотропия [3].

Возникающая в процессе производства АТ-изделий неоднородность состояния, влияющая на ФМС изделия, обусловлена различием размеров, строением, ориентациями и химическим составом фаз и зерен, напряжениями, обработкой и другими факторами. Поэтому при изготовлении АТ-изделий необходим их мониторинг или неразрушающий контроль (НК) с применением различных физических методов. Проблема уменьшения степени неоднородности АТ-изделий может быть решена путем проведения специальных термических обработок, режимы и виды которых необходимо подбирать экспериментальным путем с учетом конкретной марки используемой порошковой стали и ее характеристик, т. к. их влияние может оказать решающее значение на ФМС, особенно, на прочностные [4]. Эффективными методами контроля качества и ФМС АТ-изделий являются ультразвуковые, вихретоковые, рентгеновские, капиллярные и магнитные [5]. К ним относится магнитошумовой метод, основанный на магнитном эффекте Баркгаузена (МЭБ), параметры которого благодаря связи с доменной структурой ферромагнетика чувствительны к любым изменениям структурных и других составляющих.

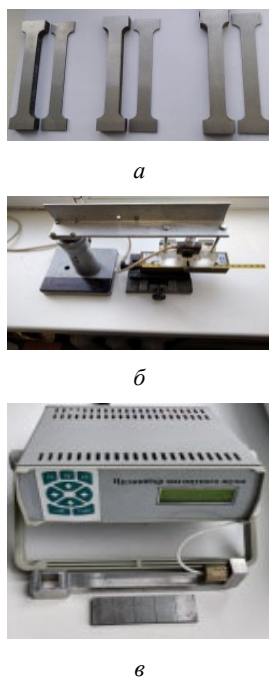


Рисунок 1 – Образцы для исследования неоднородности состояния поверхности (а), схема измерения МШ с устройством для сканирования ПБ1 по образцу (б), анализатор МШ (в)

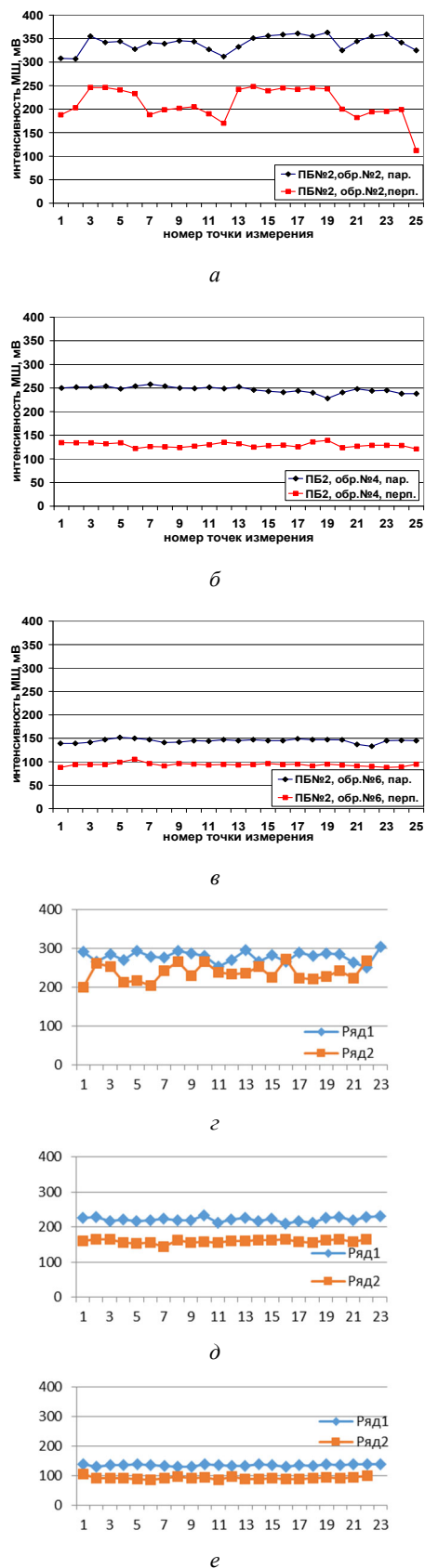


Рисунок 2 – Распределение уровня МШ по длине отожженного (а, г), нормализованного (б, д) и литого (в, е) образцов толщиной 2 мм при ортогональных положениях ПБ2: (а-в) – 1-я партия; (г-е) – 2-я (ПБ1)

Степень неоднородности изучалась на образцах, полученных методом селективного лазерного сплавления/спекания (СЛС) и литьем толщиной 2 и 10 мм (6 образцов) и толщиной 2 мм (3 образца). Размеры и формы образцов соответствовали ГОСТ для проведения в последующем усталостных испытаний. Длина образцов – 150 мм, ширина 15 мм в средней части и 30 мм в галтельной (образцы предоставлены ИФМ РАН им. Н.М. Михеева), которые были разделены на 2 партии: первая – 4 образца толщиной 2 и 10 мм, полученные методом СЛС и 2 образца с помощью литья; вторая партия (получена резкой образца толщиной 10 мм до 2 мм) – 2 образца получены методом СЛС и 1 образец – литьем. Исходный компонент – порошок малоуглеродистой стали 09Г2С с размером фракций 10–45 мкм. Режимы термообработок образцов приведены в [2], технические характеристики 3D-принтера в [4]. После изготовления трехмерных образцов одна их часть подвергалась рекристаллизационному низкотемпературному отжигу, вторая нормализации с охлаждением на воздухе. Обе поверхности подвергались механической обработке (шлифовке) вдоль оси абразивным камнем с малой подачей и водяным охлаждением (шероховатость составляла 5–8 мкм). Для примера на рис. 1, *а* показаны образцы 1-й партии, рис. 1, *б* – схема измерения магнитного шума (МШ) с устройством для сканирования преобразователем Баркгаузена (ПБ) по образцу, рис. 1, *в* – магнитошумовой анализатор типа ИМШ [2].

На рис. 2, *а–в* показаны зависимости уровня МШ от номера точки измерения при сканировании с шагом 5 мм по длине рабочей части образцов 1-й партии на одной из поверхностей в исходных (до циклирования) состояниях, полученные с помощью ПБ2 при его ортогональных положениях, на рис. 2, *г–е* – 2-й партии (ПБ1). Для обоих ПБ видна значительная разница уровня МШ и неоднородности между образцами, отличающимися между собой режимами термической обработки и свидетельствующая о микроструктурных отличиях, разнице остаточных напряжений, технологической анизотропии и дефектности. Ход зависимостей отражает и характеризует степень неоднородности свойств по длине образцов.

Наибольшая степень неоднородности по данным МШ наблюдается у отожженного образца (рис. 2 *а, г*). Нормализация (рис. 2 *б, д*) приводит к резкому снижению остаточных напряжений и, соответственно, степени неоднородности, которая приближается к литому образцу (рис. 2 *в, е*). Видно «сглаживание» распределения уровня МШ по длине образца, что является ожидаемым и закономерным. Значения дисперсии D , являющейся мерой разброса текущих данных от среднего значения и используемая как критерий неоднородности свойств по длине образца, это подтверждает.

Также видно, что степень неоднородности по длине 3D и литых образцов значительно отличается между собой, что обусловлено не только фазово-структурными отличиями, вносящими основной вклад в сигнал, но и напряжениями, анизотропией, наличием дефектов и постобработкой. Ее оценка и контроль в трехмерных изделиях необходимы при отработке методов получения, видов и режимов термической и поверхностной обработок для достижения высоких ФМС. Оцениваемое с помощью МЭБ распределение неоднородности свойств может быть использовано не только при отработке технологического процесса, но и контроле качества при производстве АТ-изделий.

Литература

1. Стратегия развития аддитивных технологий // Аддитивные технологии, 2021. – № 4. – С. 10–11.
2. Особенности циклической усталостной прочности образцов, полученных селективным лазерным спеканием из стали 09Г2С / В. Н. Бусько [и др.] // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2020. – № 4. – С. 16–25.
3. Sames, W. J. Heat treatment of electron beam melted (EBM) Ti-6Al-4V: microstructure to mechanical property correlations / W. J. Sames, S. Raghavan, // Rapid Prototyping Journal. – 2018. – Vol. 24, № 4/ – P. 774–783.
4. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления / А. П. Ничипурук [и др.] // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – С. 1719–1724.
5. Алешин, Н. П. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества деталей непосредственно в процессе аддитивного производства / Н. П. Алешин // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 64–71.

УДК 681.2

СИНУСОИДАЛЬНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТО-ЭДС

Микитевич В.А., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. При измерении поверхностной фото-ЭДС важно значение оказывает форма модуляции светового излучения. При использовании прямоугольной модуляции усложняется обработка выходного сигнала и появляется погрешность измерения. Синусоидальная модуляция позволяет упростить обработку выходного сигнала.

Ключевые слова: поверхностная фото-ЭДС, модуляция светового излучения.

SINUSOIDAL MODULATION OF LIGHT RADIATION WHEN MEASURING THE SURFACE PHOTOVOLTAGE

Mikitsevich U., Zharin A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. When measuring surface photovoltage, the form of modulation of light radiation is important. When using rectangular modulation, the processing of the output signal becomes more complicated and a measurement error appears. Sinusoidal modulation allows you to simplify the processing of the output signal.

Key words: surface photovoltage, light modulation.

Адрес для переписки: Микитевич В.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mikitevichva@bntu.by

Для измерения поверхностной фото-ЭДС бесконтактным методом требуется модуляция светового излучения. В зависимости от формы модулируемого светового излучения зависит форма выходного сигнала. Обычно величина сигнала очень мала и сравнима с уровнем шумов, что требует фильтрации и усиления [1].

В случае применения модуляции светового излучения прямоугольной формы изменение концентрации неравновесных носителей заряда (ННЗ) будет выполняться в соответствии со выражениями (1) и (2):

$$\frac{\Delta n}{\Delta n_{ст}} \sim 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta n_{ст}} \sim e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

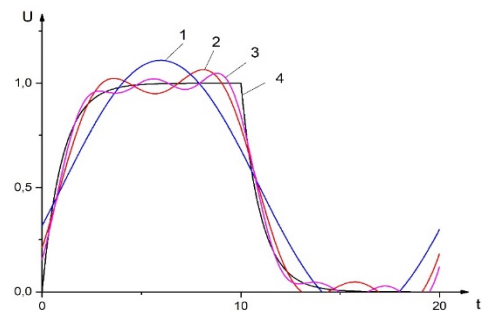
где Δn – концентрация неравновесных носителей заряда; $\Delta n_{ст}$ – концентрация неравновесных носителей заряда в стационарном режиме; τ – время жизни неравновесных носителей заряда.

Если выполнять измерения поверхностной фото-ЭДС при воздействии прямоугольными импульсами, то сигнал в измерительной цепи будет иметь экспоненциальную форму. В процессе фильтрации сигнала будет происходить искажение формы выходного сигнала, что приводит к погрешности измерения. Моделирование выходного сигнала при использовании фильтров с разной постоянной времени приведено на рис. 1.

Модуляции светового излучения, которое будет изменяться по синусоидальному закону определяется следующим выражением:

$$I = I_{амп.} \cdot (1 - \cos(\omega \cdot t)), \quad (3)$$

где $I_{амп.}$ – амплитудное значение интенсивности светового излучения; ω – циклическая частота, определяется выражением.



1, 2, 3 – моделирование сигнала после фильтрации;
4 – исходный идеальный сигнал

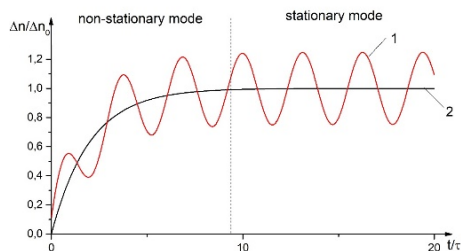
Рисунок 1 – Измерительный сигнал после фильтрации

Тогда изменение концентрации носителей заряда также будет происходить по синусоидальному закону в соответствии со следующим выражением:

$$\Delta n = \beta \cdot k \cdot I_{амп.} \cdot \tau \left(1 - \frac{2 + (\tau \cdot \omega)^2}{1 + (\tau \cdot \omega)^2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \frac{\beta \cdot k \cdot I_{амп.} \cdot \tau}{1 + (\tau \omega)^2} (\tau \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + \cos(\omega t)). \quad (4)$$

На рис. 2 представлена временная зависимость изменения концентрации ННЗ при воздействии светового излучения синусоидальной формы. Первое слагаемое выражения (4) описывает изменение среднего значения концентрации ННЗ (рис. 2 кривая 1). Второе слагаемое выражения (4) описывает изменение концентрации ННЗ в установившемся режиме.

Откликом на синусоидальное изменение концентрации ННЗ будет синусоидальный сигнал. Любое изменение формы сигнала свидетельствует о нестационарном режиме работы. Такой сигнал значительно проще усилить, фильтровать от помех. Построение усилителей сигналов синусоидальной формы значительно проще построения широкополосных усилителей.



1 – кривая изменения концентрации ННЗ;
2 – усредненное значение кривой изменения концентрации ННЗ

Рисунок 2 – Временная зависимость изменения концентрации ННЗ при воздействии светового излучения синусоидальной формы

При измерении поверхностной фото-ЭДС бесконтактным методом очень важно получение максимальной амплитуды выходного сигнала. Поэтому важно увеличение амплитуды переменной составляющей выражения (3). К постоянной составляющей бесконтактные методы измерения нечувствительны. Однако можно попасть в область насыщения (кривая 3 рис. 4). В результате произойдет искажение кривой 1 (рис. 3). Время релаксации ННЗ после насыщения обычно несколько больше, что приводит к увеличению времени переходных процессов.

Второй способ увеличения амплитуды выходного сигнала заключается в том, чтобы уменьшить постоянную составляющую концентрации ННЗ. При этом переменная концентрация ННЗ будет находиться в диапазоне между равновесной и границей насыщения полупроводника. Это возможно при уменьшении постоянной составляющей светового излучения. На рис. 4 представлено несколько вариантов изменения светового излучения. Кривые 1, 2 и 3 соответствует следующему выражению:

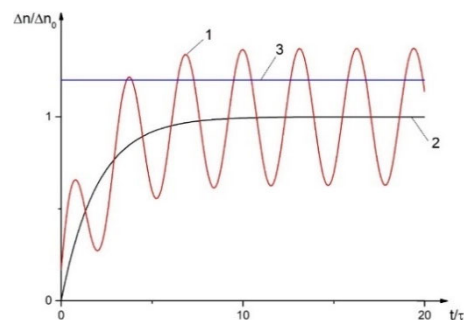
$$I = S + I_{амп} \cdot (1 - \cos(\omega \cdot t)), \quad (5)$$

где S – постоянное смещение.

Смещение может принимать следующие значения: $S > 0$ (рис. 5 кривая 1); $S = 0$ (рис. 5 кривая 2); $S < 0$ (рис. 6 кривая 3).

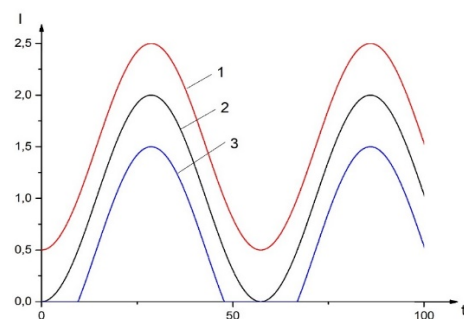
При $S > 0$ возникает постоянная засветка исследуемого образца. Это может привести к выходу в зону насыщения полупроводника (рис. 4).

При $S < 0$ в соответствии с выражением (5) I в некоторые моменты времени будет принимать отрицательное значение. Однако световой поток не может быть меньше нуля. Поэтому отрицательное смещение приведет к искажению формы светового излучения, а следовательно, и выходного сигнала.



1 – расчетная кривая изменения концентрации ННЗ;
2 – среднее значение кривой изменения концентрации ННЗ; 3 – кривая насыщения полупроводника

Рисунок 3 – Временная зависимость изменения концентрации ННЗ при воздействии светового излучения синусоидальной формы



1, 2, 3 – кривые с разными значениями постоянного смещения

Рисунок 4 – Кривая интенсивности светового излучения

При $S = 0$ световое излучение находится в диапазоне от нуля до $I_{амп}$. Это позволяет исключить постоянную засветку и уменьшить постоянную составляющую в выходном сигнале.

Литература

1. Растровая сканирующая фотостимулированная электрометрия для контроля прецизионных поверхностей / Р. И. Воробей [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – №. 10. – С. 66–73.

УДК 654.197.6

ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛОВ 1 PPS И ЧАСТОТЫ 10 МГц ДЛЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Гарелик Д.Г.¹, Жерносеков Р.А.²

¹ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции "БЕЛЛИС»

²Междугородний узел электросвязей №5, ф-л «Междугородная связь» РУП «Белтелеком»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Система GPS считалась одним из стандартов точных сигналов, которые получили распространение в системах цифрового телевидения. Однако, на практике это оказалось не совсем верно, так как при загрузке очередного обновления был задет клиентский сектор системы, что привело к сбою нормальной работы 2-го и 3-го мультиплекса на территории Республики Беларусь. Во избежание подобных случаев предлагается вариант локального формирования опорных сигналов без привязки к спутникам GPS.

Ключевые слова: GPS, NTP, 1 PPS, цифровое телевидение, генератор.

1 PPS AND 10 MHz SIGNAL FORMER FOR DIGITAL TELEVISION TRANSMITTERS

Harelik D.¹, Zhernosekov R.²

¹BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products, JSC

²«BELTELECOM», RUE
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The GPS system was considered one of the standards for accurate signals that have become widespread in digital television systems. However, in practice this turned out to be not entirely true, since when loading the next update, the client sector of the system was affected, which led to the failure of the normal operation of the 2nd and 3rd multiplex on the territory of the Republic of Belarus. To avoid such cases, a variant of local formation of reference signals without reference to GPS satellites is proposed.

Key words: GPS, NTP, 1 PPS, digital television, generator.

Адрес для переписки: Гарелик Д.Г., пр. Независимости, 43, кв. 6, Минск, 220005, Республика Беларусь

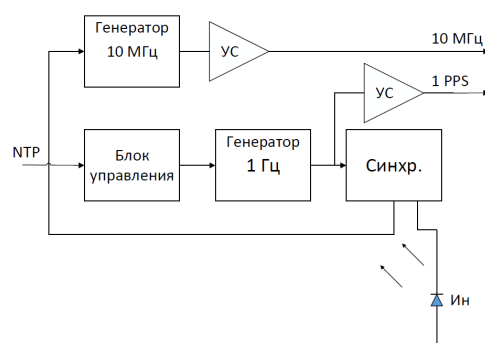
e-mail: gorelik_d@bellis.by;

Жерносеков Р.А., ул. Чкалова, д.32, корп. 4, кв. 27, Витебск, 210032, Республика Беларусь

e-mail: ewbtt@yandex.by

Введение. До недавнего времени система GPS считалась одним из стандартов точных сигналов, которые получили распространение в системах цифрового телевидения. Система навигации GPS не является отечественной разработкой, в следствии чего правообладатели данной системы могут изменять алгоритмы передаваемых сигналов, загружать обновления, обслуживать систему без уведомления конечных пользователей. Конкурирующие системы спутниковой навигации (Glonass, Galileo, BeiDou) в следствие определенных причин не получили такого широкого распространения, как система GPS. В большинстве случаев используемое оборудование, в настоящее время, имеет жесткую привязку к системе GPS, в частности, цифровое телевидение DVB-T2 использует сигналы 1 PPS, полученные в результате приемов сигналов GPS. Несколько лет тому назад произошел глобальный сбой систем цифрового телевидения и системы SFN (Single Frequency Network), который нарушил работу 2 и 3 мультиплексов в Республике Беларусь. Во избежание подобных случаев предлагается вариант локального формирования опорных сигналов без привязки к группировке спутников GPS. В свете последних событий происходящих в мире, вопрос снятия зависимости от системы GPS, становится особенно актуальным.

Структурная схема формирователя сигнала 1 PPS и частоты 10 МГц. Для получения высокостабильного сигнала 10 МГц предполагается взять за основу термокомпенсированный генератор на 10 МГц. Формирование сигнала 1 PPS (частоты 1 Гц) происходит с помощью генератора прямоугольной формы сигнала. Работа генератора прямоугольной формы синхронизируется с помощью протокола NTP (Network Time Protocol). Общая синхронизация работы обоих генераторов 10 МГц и 1 Гц (1 PPS) осуществляется с помощью блока синхронизатора.



NTP – сетевой протокол времени; УС – усилитель;
Ин – индикатор работы синхронизатора

Рисунок 1 – Блок-схема устройства

Принцип работы формирователя сигнала 1 PPS и частоты 10 МГц. При подаче напряжения питания на схему, начинает работать термокомпенсированный генератор частотой 10 МГц. Через буферный усилитель сигнал необходимого уровня (порядка 1,36 В) подается на вход тактируемого устройства, а именно на возбуждатель передатчика DVB-T2. Одновременно с генератором 10 МГц начинает работать схема генератора 1 Гц. Управление данным генератором осуществляется с помощью блока управления реализованного на базе платы контроллера Arduino. Тактирование контроллера Arduino осуществляется с помощью протокола NTP, для предотвращения влияния дестабилизирующих факторов, которые могут вызвать сбой нормальной работы устройства. Часть выходного сигнала генератора 1 Гц подается через буферный усилитель на тактируемое устройство, а вторая часть подается на синхронизатор, который управляет работой генератора 10 МГц [1].

Для получения качественных параметров генератора 10 МГц, генератор синхронизируется с помощью синхронизатора. С помощью встроенного фазового дискриминатора в синхронизаторе, можно точно настроить вручную получив минимальный фазовый дрейф. Таким образом, можно добиться минимальной фазовой ошибки. В результате на выходе синхронизатора можно увидеть сигнал, который позволяет с высокой точностью контролировать работу генератора 10 МГц. Все настройки устройства необходимо производить после полного прогрева устройства, во избежание влияния температурных факторов на работу устройства. Использование однопетлевого фазового детектора позволяет синхронизировать работу генератора 10 МГц. Таким образом, удается получить дрейф опорного генератора в пределах 1^{-10} Гц менее чем за 15 минут, включая время прогрева генератора [2].

ЦФАПЧ (цифровая фазовая автоподстройка частоты) – система автоматической подстройки фазы управляемого генератора. ЦФАПЧ сравнивает фазы входного и опорного сигнала и выводит сигнал ошибки, соответствующий разности между двумя фазами. Сигнал ошибки проходит через фильтр низких частот и используется в качестве управляющего для генератора, управляемого напряжением (ГУН), обеспечивающего отрицательную обратную связь. Если выходная частота отклоняется от опорной, то сигнал ошибки

увеличивается, воздействуя на ГУН в сторону уменьшения ошибки. В состоянии равновесия выходной сигнал фиксируется на частоте опорного. ЦФАПЧ используемая в данной схеме, менее чувствительна к шумам напряжения (по сравнению с аналоговой). ЦФАПЧ может быть не пригодной для работы на высоких частотах, или управления высокочастотными опорными сигналами, но в предлагаемом устройстве сравнение происходит на низкой частоте 1 МГц, это достигается за счет установки делителей частоты на входе синхронизатора, а потому недостатки работы системы ЦФАПЧ, в предлагаемом устройстве сведены к минимуму [3].

Компоненты ЦФАПЧ, входящие в состав синхронизатора, подобраны таким образом что позволяют обеспечивать хорошее демпферирование, но при этом имеют чувствительность настройки 0,066 Гц на вольт. Чувствительность настройки ФАПЧ, близкая к данному значению, будет работать оптимально, в диапазоне от $1 \cdot 10^{-7}$ до 3×10^{-8} В. Таким образом, используя предлагаемое устройства можно обеспечить получение синхронных и высокостабильных сигналов 10 МГц и 1 PPS, которые широко используются в цифровом телевидении [4].

Заключение. Основным недостатком широко применяемого способа получения сигнала 1 PPS является жесткая привязка к сигналам GPS. Предлагаемый способ формирования сигнала позволяет при небольших затратах и с использованием распространенной элементной базы отечественного производства получить опорные сигналы 10 МГц и 1 PPS для систем цифрового телевидения. Предлагаемый вариант следует рассматривать в качестве резервной схемы, в случае возможного сбоя в работе системы GPS. Таким образом, будет повышена потенциальная стабильность вещания цифрового телевидения.

Литература

1. GPS-заблокированный стандарт частоты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://techlib.com/electronics/GPSstandard.htm>.
2. DVB-TV2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ppt-online.org/697478>.
3. Система фазовой автоподстройки частоты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9299526/page:2>.
4. Дэвис, Д. Карманный справочник радиоинженера / Д. Дэвис., Д. Карр. – Москва. Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – С. 110.

УДК 621.383

КОМБИНИРОВАННЫЙ ОПТИКО-МАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Жуковский П.В.², Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет
Люблин, Польша

Аннотация. Применение полупроводников с глубокой многозарядной примесью позволяют создавать приборные структуры, которые могут быть использованы для построения преобразователей, чувствительных к магнитному полю и оптическому излучению. Комбинированный оптико-магнитный преобразователь характеризуется свойствами функционального множителя индукции магнитного поля и интенсивности оптического излучения.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь; магниторекомбинационный преобразователь; полупроводник; многозарядная примесь; управление характеристикой чувствительности.

THE MAGNETIC COMBINED OPTICS CONVERTER

Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Svistun A.¹, Żukowski P.², Tyavlovsky A.¹, Tyavlovsky K.¹, Shadurskaya L.¹

¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²Politechnika Lubelska
Lublin, Poland

Abstract. With deep multicharge impurity instrument structures which can be used for creation of the converters sensitive to a magnetic field and optical radiation allow to create use of semiconductors. The magnetic converter combined optics is characterized by properties of the functional multiplier of induction of a magnetic field and intensity of optical radiation.

Key words: photo-electric converter; magnetorecombinational converter; semiconductor; multicharging impurity; control of the sensitivity characteristic.

Адрес для переписки: Тявловский К.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

В ряде случаев требуется одновременное преобразование в одной точке пространства нескольких разнородных физических величин. Одним из путей решения этой задачи является применение одноэлементных функциональных датчиков [1] для проведения многопараметрических измерений. Оптический и магнитный способы измерений широко используются как основа при построении измерительных преобразователей в методах неразрушающего контроля материалов и изделий.

Для одновременного преобразования характеристик оптического излучения и магнитного поля предлагается использовать магниторекомбинационный преобразователь, принцип работы которого представлен на рис. 1. Традиционно противоположные грани приборной структуры с разными скоростями рекомбинации формируются в процессе изготовления при различной обработке поверхности [2]. Такой способ имеет ряд ограничений, а полученная структура не способна изменять свои преобразовательные характеристики. Однако известны структуры, в которых изменение скорости рекомбинации производится в объеме полупроводника под действием оптического излучения [3, 4]. В таких структурах, основанных на полупроводни-

ках с глубокой примесью, формирующей несколько энергетических уровней в различных зарядовых состояниях, скорость рекомбинации под действием освещения может изменяться в объеме полупроводника на несколько десятичных порядков [3]. Если на основе предложенных структур [4] изготовить магниторекомбинационный преобразователь, то освещение одной из одинаковых граней структуры (рис. 1) приведет к изменению вблизи нее скорости рекомбинации и появлению чувствительности к магнитному полю. Относительное изменение проводимости вдоль оси x вызвано изменением средней по сечению структуры концентрации носителей заряда пропорционально величине индукции магнитного поля, и обращается в нуль при равенстве скоростей поверхностной рекомбинации на противоположных гранях структуры.

При отсутствии освещения одной грани или равномерном освещении всей структуры, когда обе грани S_0 и S_d находятся в одинаковых условиях, чувствительность к магнитному полю отсутствует. В качестве базовой приборной структуры комбинированного оптико-магнитного преобразователя может использоваться магниторекомбинационный

транзистор (рис. 2). Чувствительность к магнитному полю иллюстрируется отклонением потока носителей заряда на угол β и уменьшением тока через транзистор [2] при освещении одной из граней структуры и изменении скорости рекомбинации в объеме полупроводника с многозарядной примесью [3, 5]. Отметим, что в традиционной структуре с использованием изменения скорости поверхностной рекомбинации [2] процесс ее изменения сопровождается появлением потенциального барьера в приповерхностной области [6], что препятствует движению к этой грани носителей заряда и снижает коэффициент чувствительности к магнитному полю. В предлагаемой структуре с изменением скорости рекомбинации в объемной области полупроводника с глубокой многозарядной примесью барьер на поверхности не образуется и такая структура будет иметь существенно больший коэффициент преобразования величины магнитной индукции. Это снимает ограничения [1] на применение в магниторекомбинационных транзисторах такого материала, как кремния.

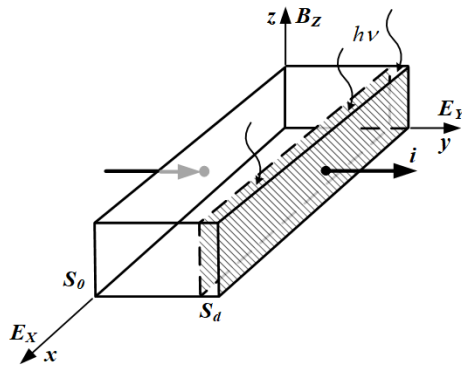


Рисунок 1 – Гальваномагниторекомбинационный эффект в полупроводнике с разными скоростями рекомбинации на боковых гранях в скрещенных электрическом и магнитных полях

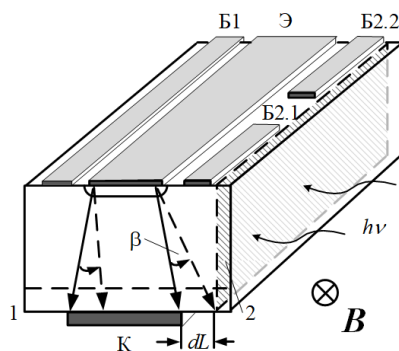


Рисунок 2 – Оптико магниторекомбинационный транзистор

Использование отдельных выводов базы Б1 и Б2 позволяет использовать саму базу как фоторезистор для разделения измерительного сигнала и определения параметров только оптического излучения при одновременном воздействии двух

физических параметров, магнитного поля и оптического излучения, в односигнальной модели многопараметрических измерений [1].

Применение полупроводников с глубокими многозарядными примесями в качестве базы в конструкции магниторекомбинационного транзистора позволяет реализовать чувствительность преобразователя к магнитному полю и оптическому излучению в одном объеме чувствительного элемента.

Комбинированный оптико магнитный преобразователь характеризуется свойствами функционального множителя индукции магнитного поля и интенсивности оптического излучения.

При отсутствии оптического излучения или равных интенсивностях оптического излучения на обоих гранях преобразователя чувствительность к магнитному полю отсутствует и преобразователь приобретает свойства оптического компаратора.

Коэффициенты чувствительности преобразовательных характеристик параметров магнитного поля и оптического излучения определяются геометрическими размерами структуры, типом материала базы, типом и концентрацией глубокой многозарядной примеси [5].

Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует широкий набор примесей, образующих многозарядные центры [5], энергетические уровни которых и сечения захвата позволяют формировать комбинированные оптико магниторекомбинационные преобразователи с широким диапазоном заранее заданных свойств.

Выбор конструкции преобразователя, материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать оптико магнитные преобразователи для заданного спектрального диапазона оптического излучения.

Литература

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / под общ. ред. О.К. Гусева – Минск: Изд-во БНТУ, 2010. – 582 с.
2. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин / под общ. ред. О.А. Агеева, В.В. Петрова. – 2-е изд. – М.: Изд-во Юрайт, 2018. – 158 с.
3. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – № 8. – P. 81–85.
4. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.
5. Никитина, А. Г. Бистабильные амфотерные центры в полупроводнике / А. Г. Никитина, В. В. Зуев. // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, вып. 2. – С. 141–146.
6. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электротометрии / Пилипенко В. А. [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 344–356.

УДК 628.74

ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Антошин А.А.¹, Галузо В.Е.², Пинаев А.И.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен подход к проектированию компенсирующей подачи воздуха в системах противодымной вентиляции многоэтажных зданий

Ключевые слова: противодымная вентиляция, компенсирующая подача воздуха, проектирование.

SMOKE VENTILATION OF MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDINGS

Antoshin A.¹, Haluzo V.², Pinaev A.²

¹Belarusian State Technical University

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An approach to the design of compensating air supply in smoke ventilation systems of multi-storey buildings is proposed.

Key words: smoke ventilation, compensating air supply, design.

Адрес для переписки: Галузо В.Е., ул. П. Бровки, 6, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: valga51@yandex.ru

Согласно [1] в многоэтажных зданиях высотой 30 м и более следует предусматривать:

– удаление из коридоров продуктов горения при пожаре системами вытяжной противодымной вентиляции (ПДВ),

– подачу наружного воздуха при пожаре системами приточной ПДВ в шахты лифтов.

Для возмещения объемов удаляемых продуктов горения из коридоров, защищаемых вытяжной ПДВ, должны быть предусмотрены системы приточной ПДВ с естественным или искусственным побуждением. Компенсирующую подачу наружного воздуха (КПВ) посредством приточной ПДВ следует предусматривать отдельными системами.

В том случае, если в коридорах многоэтажных зданий отсутствуют оконные проемы в наружных строительных конструкциях, КПВ осуществляется с помощью вертикальных шахт, выгораживаемых параллельно шахтам вытяжной ПДВ. Забор наружного воздуха в шахтах КПВ осуществляется в их верхней части. На этих шахтах устанавливаются клапаны избыточного давления или противопожарные клапаны, открывающиеся при сработке автоматики ПДВ. В [1] оговаривается местоположение дымоприемных устройств (клапанов) и шахт систем вытяжной ПДВ, но к расположению в пространстве коридора шахт и клапанов КПВ требования не предъявляются. Поэтому, очевидно, с точки зрения снижения стоимости строительно-монтажных работ обычно шахты вытяжной ПДВ и КПВ примыкают к друг другу. Но при таком расположении шахт при открытии на них клапанов невозможно дымоудаление во всем коридоре системой вытяжной ПДВ. Поэтому, с целью обеспечения

дымоудаления в коридоре при закрытых дверях выхода на незадымляемые лестничные клетки, предлагается размещать клапаны вытяжной ПДВ и КПВ на максимальном расстоянии друг от друга по длине коридора.

Аэродинамические испытания систем ПДВ проводятся в соответствии с [2] при нормальных температурных условиях. В то же время в [1], определяющем требования по проектированию систем ПДВ, указывается, что при удалении из коридора дыма следует принимать его средний удельный вес 6 Н/м^3 , при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$. При расчете аэродинамических характеристик вытяжной ПДВ учитывается естественная тяга (перепад давления) по сети, обусловленная разностью температур в коридоре этажа пожара ($300 \text{ }^\circ\text{C}$) и наружным воздухом, которая способствует «вытяжке». Но эта же тяга в шахте КПВ будет снижать приток воздуха, что невозможно учесть при испытаниях. Приточная КПВ при может оказаться не эффективной. А это означает, что при пожаре перепады давления на закрытых дверях эвакуации могут превышать измеренные при испытаниях. Очевидно, необходимо исключить влияние естественной «обратной тяги» по шахте КПВ при пожаре.

Предлагается осуществлять подачу воздуха в шахту КПВ через воздухоприемное отверстие, располагаемое на первом посадочном этаже здания куда при сработке системы пожарной сигнализации опускаются кабины лифтов. При этом в шахты лифтов подается наружный воздух. При проектировании приточной ПДВ в шахты лифтов в соответствии с нормативными документами двери шахт лифтов, а также все двери по ходу от

лифтов до выхода наружу открыты. Это означает, что на первый посадочный этаж поступает наружный воздух, который предлагается подавать в нижнюю часть шахты КПВ через открывающийся при пожаре клапан ПДВ, монтируемый под потолком. В этом случае естественная тяга будет способствовать притоку наружного воздуха по шахте КПВ.

Этому техническому решению может способствовать и то обстоятельство, в соответствии с [3] при установке пожарных лифтов в группе с другими лифтами лифтовый холл на основном посадочном этаже допускается не выгораживать.

А это означает, что воздух беспрепятственно попадает на первый посадочный этаж здания.

Литература

1. Строительные нормы Республики Беларусь. Противодымная защита зданий и сооружений при пожаре. Системы вентиляции : СН 2.02.7-2020. – МАиС РБ. – Утв. 12.11.2020.
2. Противодымная защита зданий и сооружений. Методы прямо-сдаточных и периодических испытаний : НПБ 23-2010. – МЧС РБ. – Утв. 01.07.2020.
3. *. Нормы пожарной безопасности Республики Беларусь. Лифты пожарные. Общие технические требования : НПБ 14-2004. – МЧС РБ. – Введ. 01.01.2005.

УДК 004.032.26

СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ГАРАНТИЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Хапкин Д.Л., Фефилов С.В., Козырь А.В.

*Тульский государственный университет
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. В работе рассматривается синтез гарантированно устойчивого нейрорегулятора для следящих систем с оптимизацией по времени переходного процесса. Предлагаемый подход основан на одновременном формировании регулятора и функции Ляпунова в виде нейронных сетей. Рассмотрено применение целочисленного линейного программирования для поиска функции Ляпунова. Предлагается использовать комплексный критерий оптимизации, позволяющий обеспечивать устойчивость и настраивать нейросетевой регулятор с учетом качества переходного процесса.

Ключевые слова: нейронные сети, системы управления, функция Ляпунова, устойчивость, нейросетевой регулятор.

SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK REGULATORS WITH GUARANTEE OF STABILITY AND QUALITY OF THE TRANSITION PROCESS

Khapkin D., Feofilov S., Kozyr A.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. In this article we consider the synthesis of a guaranteed stable neuroregulator for tracking systems with transient time optimization. The proposed approach is based on the simultaneous formation of regulator and Lyapunov function in the form of neural networks. The application of integer linear programming to find the Lyapunov function is considered. It is offered to use complex criterion of optimization, allowing to provide stability and to adjust the neural network regulator taking into account quality of transition process.

Key words: neural networks, control systems, Lyapunov function, stability, neural network controller.

Адрес для переписки: Хапкин Д.Л., e-mail: dima-hapkin@ya.ru

Введение. В настоящее время активно развиваются методы применения нейронных сетей в задачах управления. Большим недостатком современных нейросетевых регуляторов является отсутствие теоретически обоснованной методики синтеза, гарантирующей устойчивость замкнутой системы по Ляпунову. В данной работе предлагается подход к исследованию устойчивости систем управления с нейросетевым регулятором, в котором задача поиска функции Ляпунова для замкнутой системы сводится к обучению дополнительной нейронной сети на данных, полученных в результате решения задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП) [1, 2].

Структура системы управления. В работе рассматривается замкнутая дискретная система управления (рис. 1).

Для обучения используется метод обратного пропускания ошибки через прямой нейроэмулятор $\phi_{dyn}(x_t, u_t)$, поэтому на первом этапе обучается имитатор объекта управления [3, 4], основанный на нейронной сети, который описывается следующим образом:

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t) = \phi_{dyn}(x_t, u_t) - \phi_{dyn}(x^*, u^*) + x^*, \quad (1)$$

где x_t – вектор состояния объекта управления в момент времени t , u_t – значение управляющего сигнала в момент t , x^* – точка равновесия системы, u^* – значение управления в данной точке.

Нейросетевой регулятор описывается следующим образом:

$$u_t = r(x_t) = \phi_r(x_t) - \phi_r(x^*) + u^*, \quad (2)$$

где ϕ_r – нейронная сеть в основе регулятора.

Условия устойчивости по Ляпунову:

$$V(x[t]) > 0 \quad \forall x[t] \in S, x[t] \neq x^*; \quad (3)$$

$$V(x[t+1]) - V(x[t]) < 0 \quad \forall x[t] \in S, x[t] \neq x^*; \quad (4)$$

$$V(x^*) = 0; \quad (5)$$

где $V(t)$ – функция Ляпунова, x_t – состояние объекта управления в момент времени t , S – область начальных условий, в которой система устойчива.

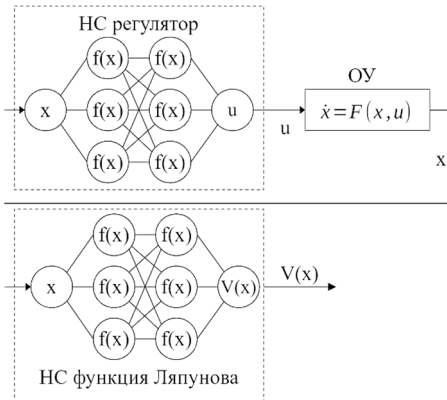


Рисунок 1 – Нейросетевая замкнутая система управления

Функция Ляпунова представляется с помощью нейронной сети ϕ_V как

$$V(x_t) = \phi_V(x_t) - \phi_V(x^*). \quad (6)$$

ЦЛП для нейронных сетей. В работе все нейронные сети являются сетями прямого распространения с функцией активации leakyReLU [5]:

$$\sigma(y) = \max(y, cy), \quad (7)$$

где c – значение коэффициента отрицательной части.

Также данную функцию можно описать в виде системы неравенств:

$$\begin{aligned} z &\geq y; \quad z \geq cy; \quad \omega \leq cy - (c-1)y_{up}\beta; \\ \omega &\leq cy - (c-1)y_{up}(\beta-1); \quad \beta \in \{0,1\}; \quad z \in R; \end{aligned} \quad (8)$$

где z – выход leakyReLU, β – бинарная переменная, y – значение входа leakyReLU, y_{up} и y_{lo} – ограничения на входную переменную.

Таким образом можно представить всю нейронную сеть в виде системы алгебраических равенств и неравенств, описывая каждый нейрон с учетом (8) для использования в решениях задачи ЦЛП.

В процессе обучения нейрорегулятора и нейросетевой функции Ляпунова минимизируются точки, нарушающие условия (3) и (4):

$$\eta_1 = \max(V(x[t])); \quad (9)$$

$$\eta_2 = \max(V(x[t+1]) - (\varepsilon - 1)V(x[t])). \quad (10)$$

Поиск таких точек сводится к задаче ЦЛП.

Также, для контроля времени регулирования t_r из каждой найденной точки выполняется процесс моделирования системы на время, превышающее t_r . Каждая точка фазового пространства, полученные после времени t_r , сравнивается с x^* для получения ошибки стабилизации, которые минимизируются:

$$\eta_3 = x[i] - x^*, \quad (11)$$

где $x[i]$ – состояние в дискретный шаг i от начала моделирования, i – номера дискретного шага моделирования.

Минимизируя η_1, η_2, η_3 обучаются нейрорегулятор и нейросетевая функции Ляпунова в результате чего полученная замкнутая система будет гарантированно устойчивой в локальной области с подтверждающей функцией Ляпунова и с требуемым временем регулирования.

Пример. Рассмотрим пример синтеза нейросетевого стабилизирующего регулятора для перевернутого маятника. Динамика системы представлена в следующем виде:

$$x_1' = x_2; \quad x_2' = (u - mgl \cdot \sin(x_1) - dx_2) / (m \cdot l^2), \quad (12)$$

где m – масса маятника; l – длина маятника, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; d – коэффициент демпфирования; x_1 – угловое положение маятника; x_2 – угловая скорость маятника; u – управляющее воздействие.

Задачей является синтез регулятора, который должен удерживать маятник в вертикальном положении, а время переходного процесса должно составлять 1 сек. На рис. 2 показана работа обученного нейрорегулятора.

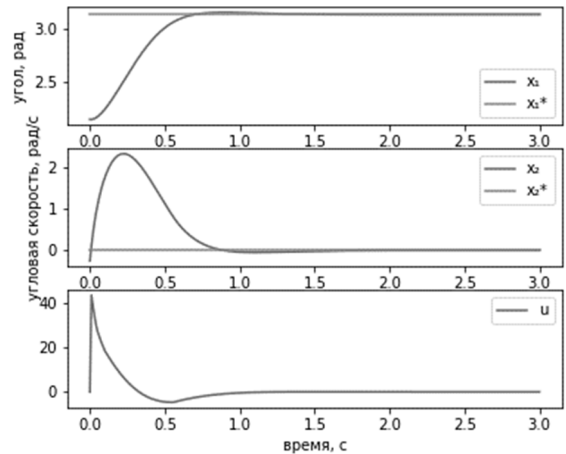


Рисунок 2 – График моделирования обученной системы

Заключение. В работе показано, что решение задач оптимизации в системах с нейронной сетью можно свести к задаче ЦЛП. Далее этот подход распространяется на синтез нейросетевой функции Ляпунова для замкнутой системы управления с нейрорегулятором, что позволяет гарантировать устойчивость системы. На примере стабилизации

неустойчивого динамического объекта типа перевернутый маятник синтезирована устойчивая нейросетевая система управления с оптимизацией переходного процесса.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

Литература

1. Strong mixed-integer programming formulations for trained neural networks / Ross Anderson [et al.] // *Mathematical Programming*. – 2020. – P. 1–37.

2. A unified view of piecewise linear neural network verification / Rudy Bunel [et al.] // *In Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2018.

3. Feofilov, S. V. Synthesis of neural network controllers for objects with non-linearity of the constraint type / S. V. Feofilov, D. L. Khapkin // *Journal of Physics: Conference Series*. 11. Сер. "XI International Scientific and Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges, RIASIC 2020. – 2021. – P. 12–14.

4. Чернодуб, А. Н. Обзор методов нейроруавления / А. Н. Чернодуб, Д. А. Дзюба // *Проблемы программирования*. – 2011. – Вып. 2. – P. 79–94.

5. Goodfellow, I. *Deep Learning* / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MA: MIT Press, 2016.

УДК 621.3.07

ТРЕХФАЗНЫЙ ТЕСТЕР ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Ворсин Н.Н., Маркевич К.М.

*Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлен цифровой измерительный комплект, предназначенный для организации лабораторного практикума по электротехнике. По способам включения в цепь и проведению измерений прибор аналогичен стандартным электротехническим комплектам, однако имеет существенно меньшие массогабаритные параметры, стоимость и обеспечивает лучшую разрешающую способность, свойственную цифровым приборам и дополнительные возможности измерений.

Ключевые слова: измерительный комплект, токовый трансформатор, микроконтроллер.

THREE-PHASE TESTER FOR TRAINING LABORATORIES OF ELECTRICAL ENGINEERING

Vorsin N., Markevich K.

*Brest State Technical University
Brest, Republic of Belarus*

Abstract. A digital measuring set is presented, designed for organizing a laboratory workshop in electrical engineering. In terms of the methods of inclusion in the circuit and measurements, the device is similar to standard electrical kits, however, it has significantly lower weight and size parameters, cost and provides better resolution inherent in digital instruments and additional measurement capabilities.

Keywords: measuring set, current transformer, microcontroller.

*Адрес для переписки: Ворсин Н.Н., ул. Гоголя, 80, кв. 7, Брест 224016, Республика Беларусь
e-mail: vorsin@hotmail.com*

Организация лабораторного практикума по электротехнике требует большого количества измерительных приборов. В случае использования отдельных приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров) [1] электрические цепи оказываются весьма громоздкими, а их сборка и отладка занимает очень много учебного времени, что далеко не всегда является положительным фактором. Для его преодоления довольно часто обращаются в противоположную крайность - все исключают из лабораторных работ сборку цепей и возможность видеть исследуемое устройство путем использования "лабораторных стендов". Изучаемое устройство или цепь является частью стенда или подключается к нему очень простым способом, а функция учащихся сводится к манипулированию ручками управле-

ния стенда и списыванию показаний его приборов. Очевидно, что дидактическая эффективность такого подхода не высока.

Еще одним способом обеспечения практикума измерительной аппаратурой является использование стандартных измерительных комплектов К50, К505, К540 и т.п. [2], которые почти полностью обеспечивают необходимые измерения, вырабатывают навыки обращения с реальной аппаратурой, оставляют достаточное место для сборки цепей и не «прячут» от учащихся изучаемые устройства. Измерения в трехфазных цепях обеспечивает штатное использование прибора, а для однофазных цепей измерительный комплект представляет собой три почти независимых однофазных измерителя, покрывающих потребности измерений для многих лабораторных работ.

Недостатками этого подхода является громоздкость и избыточность стандартных комплектов, высокая стоимость и несоответствие аналоговых комплектов современной, преимущественно цифровой, измерительной технике.

В качестве альтернативы стандартным комплектам специально для организации учебного практикума разработан цифровой трехфазный измерительный комплект с клеммами нулевого провода (по аналогии с К505). В отличие от прототипов данный прибор позволяет измерять как действующее значение переменного, так и постоянного и пульсирующего тока нулевого провода. Для измерений переменных линейных токов используются токовые трансформаторы, а измерение тока нулевого провода осуществляется с помощью шунта 0,05 Ом. Результаты измерений – действующие значения напряжения, тока и активной мощности в выбранной фазе или нулевом проводе отображаются на ЖК дисплее. Хорошая разрешающая способность цифрового индикатора и ограниченный в учебных лабораториях диапазон возможных значений измеряемых величин (250 В, 5 А, 500 Вт) позволили отказаться от переключателей пределов измерений. Единственным органом управления является кнопка выбора измеряемой фазы. Обозначение выбранной фазы также, как и порядок чередования фаз отображаются на дисплее.

Питание прибора может осуществляться от любого источника с действующим значением напряжения 40–240 В. Вилка питания может быть включена в обычную розетку 220 В или между генераторными клеммами самого прибора, если напряжение лабораторного источника находится в указанных пределах. Размеры прибора 100×125×200 мм, масса 0,8 кг.

Функционирование прибора основано на вычислении действующих значений напряжений и токов, а также активной мощности по отсчетам их мгновенных значений. Взятие отсчетов осуществляются с периодом 120 мкс. Постоянная времени накопления результатов составляет около 0,5 с (осреднение по 4096 отсчетам). В режимах измерений фазных величин происходит цифровая отфильтровка постоянных составляющих напряжений и токов с характеристическим временем 0,5 с, поэтому для стабилизации показаний после включения прибора или изменении постоянных составляющих требуется 2–3 с, что незаметно в практике измерений. В режиме измерения тока нулевого провода подавление постоянной составляющей отключается. В этом режиме измеряются действующие значения напряжения между клеммами А и 0, тока между клеммами 0 и 0' и активной мощности, проходящей в нагрузку, подключенную между клеммами А' и 0', причем ток может быть постоянным, переменным или пульсирующим.

Описанный измерительный алгоритм реализован на основе микроконтроллера PIC24F04KA201.

Весьма существенной является возможность цифровой калибровки тестера по приборам высокого класса точности. Калибровка является заключительной операцией изготовления прибора, но ее можно повторять в процессе эксплуатации. В ходе калибровки определяется ряд констант, которые записываются в программную память микроконтроллера и используются им в дальнейшем для вычислений результатов измерений. Такой прием позволяет исключить из прибора органы аналоговых регулировок и отказаться от прецизионных аналоговых элементов, что существенно удешевляет прибор при неплохих его метрологических параметрах.

Структура измерительного комплекта показана на рис. 1. В нем выделены три функциональных узла: модуль питания, модуль трансформаторов тока, электронный модуль.

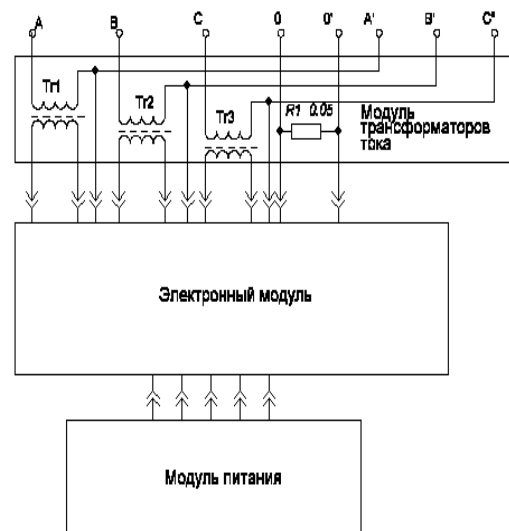


Рисунок 1 – Структура измерительного комплекта

Первичные катушки токовых трансформаторов соединяют между собой одноименные генераторные и нагрузочные клеммы. Напряжения вторичных катушек, которые пропорциональны производным по времени от линейных токов, далее интегрируются в электронном модуле, формируя пропорциональные токам напряжения.

Как видно из структурной схемы, по способам включения в измеряемую цепь, учебный комплект не отличается от стандартных и может заменять их без изменений методических параметров лабораторных работ. Некоторые дополнительные возможности появляются вследствие лучшей разрешающей способности цифровых измерителей: точнее определяется режим резонанса, коэффициент мощности в соответствующих лабораторных работах, улучшается совпадение измеренных ве-

личин с расчетными. Дополнительные возможности также вытекают из способности измерять ток нулевого провода и проводить измерения на постоянном и пульсирующем токе, что важно при изучении нелинейных цепей и устройств. Индикация результатов измерений на дисплее содержит обозначение размерностей, что весьма важно для учебных целей.

Литература

1. Общая электротехника: методические указания к лабораторному практикуму / В. А. Толмачев [и др.] – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 71 с.
2. Комплект измерительный К505. Техническое описание. ООО «Приборостроительная компания «Высоковольтные технологии». – г. Волгоград. – 2018.

УДК 621.382

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ОКИСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А.Л.¹, Петлицкий А.Н.², Пилипенко В.А.², Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Гусев О.К.¹, Воробей Р.И.¹, Пантелеев К.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрено применение установки фотостимулированной сканирующей зондовой электрометрии для выявления дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковой пластины после операции туннельного окисления, выполненной в различных технологических режимах. Измерения в двух режимах (измерения контактной разности потенциалов и визуализации длины диффузии неравновесных носителей заряда) являются взаимодополняющими, позволяя выявлять различные виды дефектов на одной и той же поверхности.

Ключевые слова: зондовая электрометрия, полупроводниковая пластина, окисел, дефект.

CHARACTERISATION OF TUNNELING OXIDATION TECHNOLOGICAL PROCESS USING SCANNING PROBE ELECTROMETRY TECHNIQUE

Zharin A.¹, Petlitsky A.², Pilipenko V.², Tyavlovsky A.¹, Tyavlovsky K.¹, Gusev O.¹, Vorobey R.¹, Pantišaleyeu K.¹

¹Belarusian National Technical University
²JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A photostimulated scanning probe electrometry device was applied for detecting defects in ion-doped and diffusion layers of a semiconductor wafer after the operation of tunnel oxidation performed in various technological modes. Two modes of measurement (contact potential difference measurements and visualisation of diffusion length of nonequilibrium charge carriers) are shown to be complementary allowing to detect different types of defects on the same wafer.

Key words: probe electrometry, semiconductor wafer, oxide, defect.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Характеризация дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковых пластин требует исключительно высокой поверхностной чувствительности метода контроля, что связано с малой толщиной (как правило, менее 1 мкм) таких слоев. Особый интерес представляет выполнение такой характеристики на различных стадиях технологического процесса для пластин с уже сформированными приборными структурами, что позволяет выполнить оценку качества и определить пути совершенствования самого технологического процесса. Используемый метод контроля должен обеспечивать визуализацию пространственного распределения электрофизических

параметров поверхности для анализа степени выраженности дефектов и их возможного источника. Методика измерений предпочтительно должна быть бесконтактной, обеспечивая возможность возвращения контролируемых пластин в технологический процесс.

Для решения этой задачи в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ был разработан комплекс методов и средств неразрушающей бесконтактной характеристики полупроводниковых пластин диаметром до 200 мм на основе методов зондовой электрометрии, основные элементы которого к настоящему времени внедрены на ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания

холдинга «ИНТЕГРАЛ» [1]. В качестве базового метода измерений используется метод сканирующего зонда Кельвина, отличающийся высокой поверхностной чувствительностью, поскольку формирование измерительного сигнала происходит в пределах Дебаевской длины экранирования, существенно меньшей типичной толщины ионно-легированных и диффузионных слоев. В то же время, для диэлектриков Дебаевская длина экранирования существенно больше типичной толщины окисла, выращиваемого на полупроводниковых пластинах в технологическом процессе окисления их поверхности, что позволяет использовать метод для контроля дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев, формирующихся в процессе окисления.

В частности, с использованием входящей в состав комплекса измерительной установки фотостимулированной сканирующей зондовой электрометрии СКАН-2015 были выполнены исследования процессов получения туннельного окисла на поверхности полупроводниковой пластины различными технологическими методами. Объектом являлись пластины-спутники Дюна 1990 диаметром 200 мм, на которых до проведения операции окисления были сформированы приборные структуры (рис. 1).

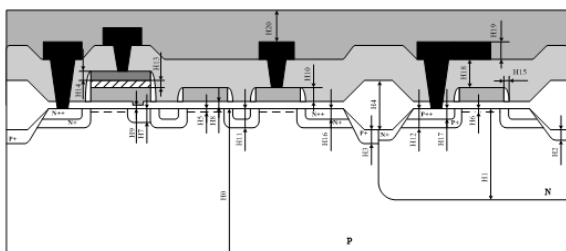


Рисунок 1 – Сформированные на пластине-спутнике приборные структуры

Формирование окисла осуществлялось в трех различных технологических режимах:

- 1) пирогенным окислением при температуре 800 °С;
- 2) туннельным окислением (сухим) при температуре 900 °С;
- 3) туннельным окислением на установке БТО при температуре 900 °С с выполнением 7 циклов окисления.

Во всех случаях для анализа дефектов поверхности, формируемых в результате операции окисления, исследования с помощью установки СКАН-2015 были выполнены в 2 режимах:

- 1) режим измерения контактной разности потенциалов (КРП), позволяющий визуализировать картину пространственного распределения относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) поверхности полупроводника;
- 2) режим фотостимулированной сканирующей электрометрии с визуализацией простран-

ственного распределения длины диффузии неравновесных носителей заряда (ННЗ) в поверхностном слое.

Результаты визуализации дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев пластины-спутников в указанных режимах приведены на рис. 2–4.

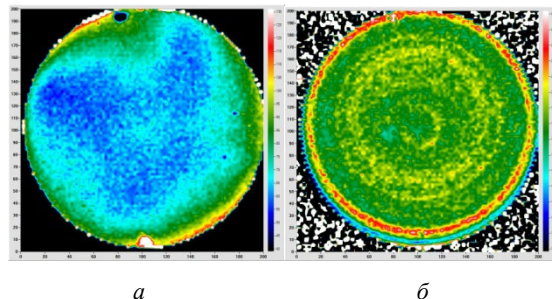


Рисунок 2 – Распределение КРП (а) и длины диффузии ННЗ (б) пластины-спутника Дюна 1990 после пирогенного окисления при 800 °С

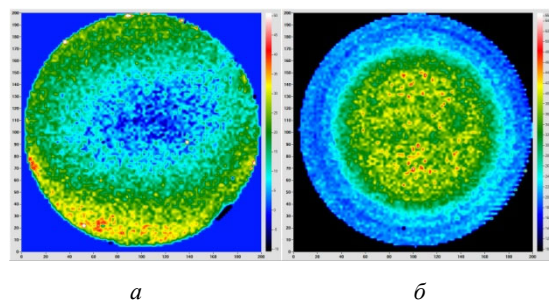


Рисунок 3 – Распределение КРП (а) и длины диффузии ННЗ (б) пластины-спутника Дюна 1990 после сухого туннельного окисления при 900 °С

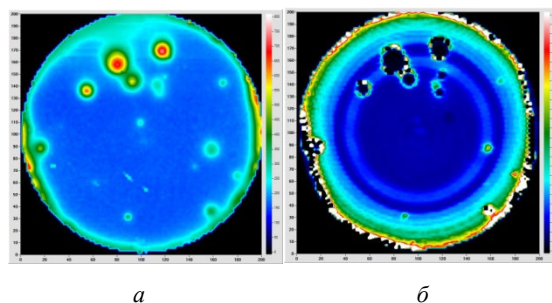


Рисунок 4 – Распределение КРП (а) и длины диффузии ННЗ (б) пластины-спутника Дюна 1990 после 7 циклов окисления на установке БТО при 800 °С

Можно видеть, что каждый из перечисленных технологических процессов дает свою характерную картину распределения дефектов. Обращает на себя внимание различие визуализированных карт распределения дефектов, полученных в режиме измерения КРП и длины диффузии ННЗ. Это объясняется тем, что РВЭ поверхности и, соответственно, прямо связанная с ней КРП, является комплексным параметром, отражающим в первую очередь неоднородности кристалличе-

ской структуры и химического состава поверхности, в частности, дислокации кристаллической решетки. Наличие дислокаций может приводить к уменьшению времени жизни ННЗ, регистрируемому в режиме фотостимулированной электрометрии. В то же время, такое уменьшение может являться и следствием, формирования ловушечных уровней, не связанных с явно выраженными дислокациями или другими структурными дефектами. Таким образом, измерения в обоих режимах (КРП и визуализации длины диффузии ННЗ) яв-

ляются взаимодополняющими, позволяя выявлять различные виды дефектов на одной и той же поверхности.

Литература

1. Зондовые зарядочувствительные методы в технологическом контроле производства больших интегральных схем / К. Л. Тявловский [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2020. – С. 129–132.

УДК 681.5

СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ЗОНОЙ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Козырь А.В., Феofilов С.В.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Лаборатория цифровых систем управления сложными динамическими объектами
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. Автономные электрогидравлические приводы находят широкое применение в промышленных приложениях, таких как мобильные манипуляторы, роботизированный экзоскелет, аэрокосмические приложения. Такие системы имеют ряд существенных преимуществ по отношению к электроприводу, высокое соотношение развиваемого усилия к весу привода, компактные размеры автономного привода обеспечиваются интегрированной компоновкой всех элементов электрогидравлической системы. Однако управление такими системами значительно усложняется наличием существенных нелинейностей в объекте управления, таких как мертвая зона, что затрудняет реализацию системы управления классическими регуляторами. В этой работе проектируется регулятор с компенсационным нейросетевым управлением для объектов с зоной нечувствительности. С помощью метода Ляпунова доказывается устойчивость замкнутой системы. Приводятся результаты численного моделирования для демонстрации эффективности предложенных подходов.

Ключевые слова: автономный электрогидравлический привод, зона нечувствительности, нейросетевой регулятор, компенсация нелинейности, синтез системы управления.

SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK CONTROL OF AN AUTONOMOUS ELECTRO-HYDRAULIC SYSTEMS WITH A DEAD-ZONE

Kozyr A., Feofilov S.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. Autonomous electro-hydraulic drives are widely used in industrial applications, such as mobile manipulators, robotic exoskeletons, aerospace applications. Such systems have a number of significant advantages in relation to the electric drive, the high ratio of the developed force to the weight of the drive, the compact size of the autonomous drive is provided by the integrated layout of all elements of the electrohydraulic drive. However, the management of such systems is significantly complicated by the presence of significant nonlinearities in the control object, such as a dead zone, which makes it difficult to implement a control system with classical regulators. In this work, a controller with compensatory neural network control is designed for objects with a dead zone. Using the Lyapunov method, the stability of a closed system is proved. The results of numerical modelling are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approaches.

Key words: Autonomous electro-hydraulic actuator, dead zone, neural network controller, non-linearity compensation, control system synthesis.

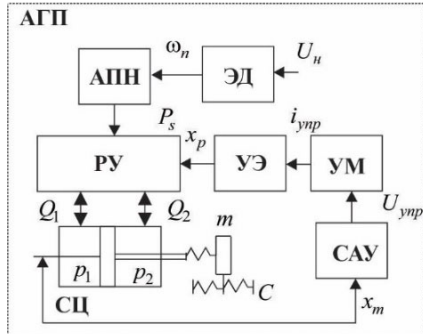
*Адрес для переписки: Козырь А.В., пр. Ленина, 92, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: Kozyr_A_V@mail.ru*

Электрогидравлические приводы используются в различных отраслях промышленности и часто являются наиболее подходящим вариантом

для систем, где требуется развивать большие усилия с высоким быстродействием. Важным преимуществом гидравлического привода является спо-

способность поддерживать грузоподъемность, которая в случае применения электропривода ограничена. В настоящее время большую популярность приобретают автономная конструкция гидропривода, когда в системе интегрированы все электрогидравлические компоненты, такие как электродвигатель, аксиально-поршневой насос, электромагнит, золотниковый распределитель [1]. Структурная схема приведена на рис. 1.

Достоинство таких устройств обусловлено тем, что такой привод имеет малые габариты при сравнительно высоком развиваемом усилии, что является важным качеством в малогабаритных летательных аппаратах. Однако проектирование системы управления таким приводом связано с целым рядом специфических трудностей, таких как нестационарность параметров объекта управления в случае изменения температуры в широком диапазоне значений, нелинейность математического описания привода: зона нечувствительности, трение, ограничение скорости перемещения выходных звеньев, жесткие механические ограничители, высокий порядок математической модели привода. Указанные нелинейности могут приводить к возникновению предельных циклов в замкнутом контуре системы управления [2]. Растущее число работ, посвященных подходам к управлению такими приводами, на основе современных методов управления [3–5], свидетельствует о большом интересе инженерного сообщества к таким системам.



АГП – автономный гидравлический привод;
 АПН – аксиально-поршневой насос;
 ЭД – электродвигатель; РУ – распределительное устройство; УЭ – управляющий электромагнит;
 УМ – усилитель мощности; САУ – система автоматического управления; U_n – напряжение питания двигателя; ω_n – угловая скорость двигателя; $Q_{1,2}$ – массовый расход; $p_{1,2}$ – давление в полостях силового цилиндра; x_m – перемещение штока цилиндра; $U_{упр}$ – управляющий сигнал

Рисунок 1 – Автономный гидравлический привод

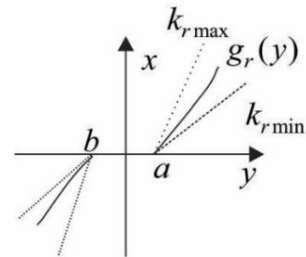
В настоящей работе предлагается компенсационный нейросетевой регулятор для автономных электрогидравлических систем с неопределенными параметрами нелинейного звена типа мерт-

вая зона. Принятый подход не требует ни предварительного знания параметров мертвой зоны, ни построения обратной функции.

В основе предлагаемого подхода лежит непрерывный регулятор, работающий в скользящем режиме, контроллер обеспечивает робастность системы к неточностям параметров системы, а нейронная сеть с радиальной базисной функцией (RBF) встроена в пограничный слой, чтобы уменьшить эффект мертвой зоны. Свойства ограниченности и сходимости замкнутой системы аналитически доказаны с использованием теории устойчивости по Ляпунову.

Общая структурная схема исследуемого привода приведена на рис. 1. В работе построена упрощенная нелинейная математическая модель объекта управления в виде $\dot{x}(t) = F(x, U_{упр})$, распределительное устройство содержит нелинейность типа зона нечувствительности, параметры которого точно не известны, но ограничены. Общий вид нелинейности представлен на рис. 2.

Задача управления состоит в том, чтобы гарантировать, что даже при наличии параметрических неопределенностей, немоделируемой динамики и зоны нечувствительности, вектор траектории движения системы x будет следовать желаемой траектории x_0 .



$g(y)$ – предполагаем, что является непрерывной функцией

Рисунок 2 – Нелинейность распределительного устройства

При разработке управление делается допущение, что известен весь вектор состояния системы x . Управление будет организован в виде непрерывного скользящего режима [5]. Для того чтобы обеспечить сходимость фазовых траекторий к поверхности переключения, возмущения, вызванные неопределенной статической функцией (рис. 2) будем оценивать непосредственно с помощью нейросети.

Таким образом, в работе рассматривается проблема управления электрогидравлическим приводом. С помощью известного подхода был разработан регулятор, работающий в скользящем режиме. Такой регулятор был дополнен нейронной сетью, которая может аппроксимировать нелинейность зоны нечувствительности и скомпенсировать ее влияние.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

Литература

1. Арзуманов, Ю. Л., Основы проектирования систем пневмо- и гидроавтоматики: монография / Ю. Л. Арзуманов, Е. М. Халатов, В. И. Чекмазов. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 495 с.
2. Lima, G. S. Sliding mode control with gaussian process regression for underwater robots / G. S. Lima,

S. Trimpe, W. M. Bessa // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2020. – Vol. 99, № 3. – P. 487–498.

3. A biologically inspired framework for the intelligent control of mechatronic systems and its application to a micro diving agent / W. M. Bessa [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – P. 1–16.

4. Козыр, А. В. Синтез цифровой системы управления автономным электрогидравлическим приводом / А. В. Козыр, А. В. Бутрин // Известия ТулГУ. – 2021. – № 11. – С. 33–40.

5. Макаров, Н. Н. Применение цифрового скользящего режима в следящем приводе / Н. Н. Макаров, С. А. Руднев, Е. В. Плыкина // Известия ТулГУ. – 2020. – № 11. – С. 262–268.

УДК 621.383

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ОПТИКО МАГНИТНЫМ ДАТЧИКОМ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена конструкция комбинированного оптикомагнитного датчика магниторекомбинационного транзистора. Использование в базе транзистора полупроводникового материала с глубокой многозарядной примесью позволяет сформировать датчик с чувствительностью к магнитному полю и оптическому излучению. Применение метода широтно-импульсной модуляции для управления скоростью рекомбинации в объеме полупроводника позволяет реализовать управление преобразовательной характеристики чувствительности к магнитному полю в широком диапазоне. Комбинированный датчик может использоваться при построении функциональных измерительных преобразователей систем оптической диагностики.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, магниторекомбинационный преобразователь, полупроводник, многозарядная примесь, управление характеристикой чувствительности, широтно-импульсная модуляция.

THE MEASURING TRANSDUCER OF SYSTEMS OF OPTICAL DIAGNOSTICS WITH MAGNETIC COMBINED OPTICS CONVERTER

Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The design magnetic combined optics converter is offered. Use in base of the transistor semiconductor with penetrating multiply charged impurity allows to generate the gauge with sensitivity to a magnetic field and optical radiance. Application of a method of pulse-width modulation for a recombination speed control in semiconductor volume allows to realise control of the converting characteristic of sensitivity to a magnetic field in a wide range. Combined sensor it can be used at construction of functional measuring transducers of systems of optical diagnostics.

Key words: measuring transducer, magnetorecombinational converter, semiconductor, multicharging impurity, control of the sensitivity characteristic, pulse-width modulation.

*Адрес для переписки: Тявловский К.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Устройства неразрушающего контроля часто используют оптические и магнитные методы измерений, позволяющие дистанционно определять параметры материалов и изделий [1, 2]. Некоторые комбинированные преобразователи [3] позволяют одновременно и в одном физическом объеме определять параметры магнитного поля и оптического излучения.

Структура магниторекомбинационного транзистора, управляемого оптическим излучением, и

выполняющим функциональное преобразование умножения величины магнитного поля и интенсивности оптического излучения [3] приведена на рис. 1. Разделенные выводы области базы позволяют использовать ее как фоторезистор для независимого, от влияния магнитного поля, измерения интенсивности оптического излучения. Управление чувствительностью к магнитному полю под действием оптического излучения происходит благодаря использованию в качестве

базы полупроводника с глубокой многозарядной примесью, например Si(Ni), Si(Fe) и др.

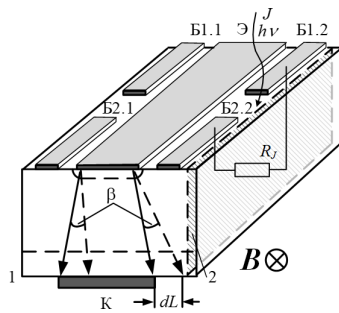


Рисунок 1 – Структура оптико магнитного датчика

В фотоэлектрических преобразователях на основе таких полупроводников [4, 5] управление скоростью рекомбинации в объеме полупроводника связано с зависимостью времени жизни носителей заряда от интенсивности освещения (рис. 2) при перезарядке примесных центров, имеющих несколько зарядовых состояний. Такие структуры чувствительны к изменениям интенсивности оптического излучения в широком динамическом диапазоне [4]. Однако внутри некоторой области значений интенсивности оптического излучения P_L , P_H существует нелинейная зависимость времени жизни носителей заряда от мощности оптического излучения.

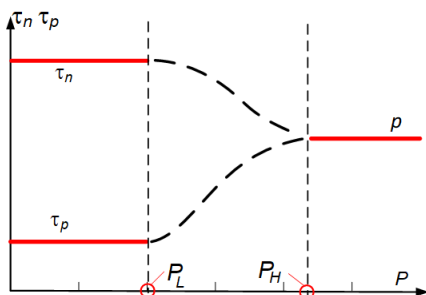


Рисунок 2 – Зависимость времени жизни носителей заряда от интенсивности освещения в полупроводнике с многозарядной примесью

Для реализации линейной функции управления чувствительностью магнитной преобразовательной характеристики предлагается использовать управление заселенностью энергетических уровней многозарядной примеси методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для этого (рис. 3) используется дополнительный канал оптического управления. Управляющий светодиод переключается между двумя уровнями: менее P_L и более P_H с скважностью ШИМ, задаваемой микроконтроллером.

Применение ШИМ позволяет плавно и по линейному закону изменять время жизни носителей заряда, соответственно, скорость их рекомбинации в освещаемой области 2 магниторекомбинационного транзистора.

При этом частота широтно-импульсной модуляции выбирается выше максимальной частоты изменения измеряемого магнитного поля, но меньше постоянной времени жизни неравновесных носителей заряда.

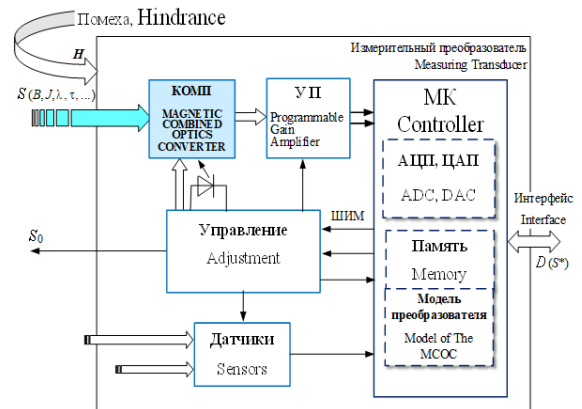


Рисунок 3 – Схема измерительного преобразователя на основе оптико магнитного датчика

Измерительный преобразователь на основе комбинированного датчика может использоваться в приборах неразрушающего контроля.

Преобразование разнородных физических величин: магнитного поля и оптического излучения – производится одновременно, в одной и той же пространственной области полупроводника, что обеспечивает высокую верность формирования измерительного сигнала.

Независимо от изменений напряженности магнитного поля значение интенсивности оптического излучения измеряется при подключении к микроконтроллеру датчика в фоторезистивном включении через отдельные выводы базы B1, B2.

Измерение параметров магнитного поля производится при ненулевом значении интенсивности управляющего излучения, причем чувствительность преобразовательной функции магнитного поля, возрастает при увеличении разности скоростей рекомбинации в областях 1 и 2 датчика, в свою очередь, вызванной увеличением средней интенсивности управляющего излучения.

Применение эффектов, проявляющихся в объеме полупроводника, по сравнению с использованием разности поверхностной и объемной скоростей рекомбинации, позволяет повысить повторяемость свойств комбинированного оптико магнитного датчика при одновременном увеличении чувствительности преобразователя.

Литература

1. Филачев, А. М. Фотоприемники в оптико-электронных приборах и системах / А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко – М.: Физматкнига, 2016. – 104 с.
2. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / под общ. ред. О. К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.

3. Магниторекомбинационный преобразователь с оптическим управлением / Воробей Р.И. [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов // Сборник статей 8-й Междунар. научн.-технич. конфер. – Министерство образования Респ. Бела-русь, Министерство образования и науки Рос. Федерации, НАН Беларуси. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 74–78.

4. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.

5. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей / Гусев О. К. [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 2. – С. 34–42.

УДК 681.513.8

ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ АГЕНТОВ РОЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТА ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ АТОМОВ

Гейс Э.А., Морозов О.О.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. В ранее опубликованных работах представлен метод организации движения агентов роя, названный методом эквивалента теплового движения. Данный метод основан на методе потенциального поля и побуждает агентов к поведенческому повторению теплового движения атомов. Согласно методу, каждый агент может характеризоваться скалярным параметром «температура». При «низкой температуре» агенты образуют «кристаллическую решетку», при «высокой температуре» агенты воспроизводят характер поступательного броуновского движения молекул газа. В работе выполнен анализ распределения скоростей агентов в состоянии эквивалента термодинамического равновесия. Показана высокая степень корреляции характера распределения скоростей агентов с распределением молекул газа по критерию Пирсона.

Ключевые слова: многоагентная система, рой, распределение Максвелла, метод эквивалента теплового движения.

FEATURES OF THE SWARM AGENTS' MOTION USING THE THERMAL EQUIVALENT MOTION METHOD

Heiss E., Morozov O.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. Previously published works present a method for organizing the swarm agents' motion, called the thermal equivalent motion method. This method is based on the artificial potential field and induces agents to repeat the atoms thermal motion. A scalar parameter that is equivalent to temperature can be used in modeling the swarm behavior. At "low temperature", the agents form a "crystal lattice". At "high temperature", the agents reproduce the gas molecules random motion. The paper analyzes the agents' speed distribution in a state of equivalent thermodynamic equilibrium. Agents speed distribution correlate to the gas molecules distribution according to the Pearson criterion.

Key words: multi-agent system, swarm, Maxwell distribution, thermal equivalent motion method.

*Адрес для переписки: Гейс Э.А., ул. Епифанская, 125, Тула 100003, Российская Федерация
e-mail: edheiss73@gmail.com*

Введение. Одной из основополагающих задач проектирования роя является задача организации взаимодействия агентов [1, 2]. Под роём понимается многоагентная система, где агентом является программно-аппаратный комплекс, имеющий устройства взаимодействия со средой и другими агентами. Основная идея метода эквивалента теплового движения заключается в организации поведенческого повторения роём теплового движения атомов. Поведенческое повторение агентами теплового движения в теории позволит использовать известные законы термодинамики для обеспечения требуемых свойств роя.

В предыдущих работах [3, 4] предложен метод эквивалента теплового движения. Данный метод основан на методе потенциального поля [5].

Постановка задачи. Первым этапом оценки качества поведенческого повторения агентами

роя теплового движения является анализ распределения скоростей агентов роя в состоянии эквивалента термодинамического равновесия. Согласно методу, каждый агент может характеризоваться скалярным параметром «температура». При «высокой температуре» характер движения агентов должен коррелировать с поступательным броуновским движением молекул газа.

Целью работы является оценка корреляции между движением агентов роя при «высокой температуре» и движением молекул газа.

Анализ характера движения агентов роя. Распределение скоростей молекул газа в состоянии термодинамического равновесия соответствует распределению Больцмана-Максвелла [6, 7]. Требуется оценить распределение скоростей агентов при разном значении эквивалента внутренней энергии, то есть температуры.

Функция распределения агентов в зависимости от эквивалента температуры роя имеет вид

$$F(V, V_s) = 4N\pi \left(\frac{3}{2\pi V_s^2}\right)^{\frac{3}{2}} V^2 \exp\left(-\frac{3V^2}{2V_s^2}\right), \quad (1)$$

где V – скорость агентов, м/с; N – количество агентов, V_s – средняя скорость агентов роя, м/с.

График теоретического распределения агентов по скоростям, приведенный на рис. 1, получен подстановкой в (1) значений средней скорости 1,49, 3,62 и 4,60 метров в секунду.

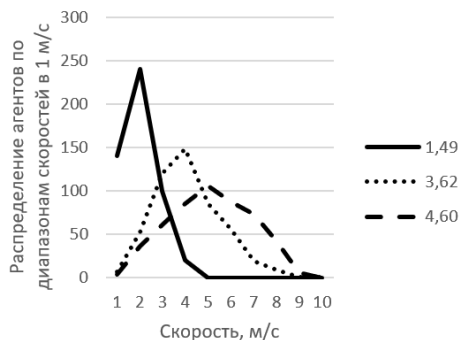


Рисунок 1 – Теоретическое распределение для 500 агентов роя при средней скорости 1,49, 3,62 и 4,60 метров в секунду

Моделирование 500 агентов выполнялось в разработанной среде проектирования роевых систем MASPlatform при следующих условиях:

- 1) время свободного пробега агентов много больше времени взаимодействия с соседями и границами допустимой области;
- 2) фиксация данных происходила в тот момент, когда все агенты находились в состоянии свободного пробега.

Агенты функционировали в сферической допустимой области в состоянии эквивалента термодинамического равновесия [3]. График распределения скоростей представлен на рис. 2:

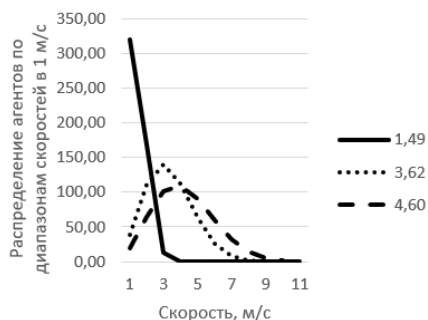


Рисунок 2 – Распределение скоростей 500 агентов роя при средней скорости 1,49, 3,62 и 4,60 метров в секунду

Начальные координаты агентов выбирались так, чтобы пересечения радиусов [3] с соседями и границей допустимой области не имело место.

Начальное направление вектора скорости устанавливалось случайным образом. Значение амплитуды скорости устанавливалось пользователем перед началом моделирования. С течением времени распределение скоростей агентов роя приходит к распределению Максвелла-Больцмана, что отражает схожая тенденция графиков на рис. 1 и рис. 2.

Численным критерием корреляции является критерий Пирсона. В данной работе он определяется по значениям, найденным из функции распределения Максвелла, примененной к рою.

Критерий Пирсона, рассчитанный для теоретических результатов и результатов моделирования, при средней скорости в соответствии с рис. 2 равны соответственно 0,82, 0,87, 0,77. Анализ показал высокую силу корреляции между результатами, полученными теоретически и с помощью разработанной среды моделирования.

Заключение. Полученные результаты говорят о корректном поведенческом повторении агентами роя теплового движения атомов в части характера поступательного движения.

Такое движения агентов роя полезно при решении задач мониторинга местности, поиска объектов, поиска пути.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

Литература

1. Rastgoftar, H. Cooperative aerial lift and manipulation / H. Rastgoftar, E.M. Atkins // *Aerospace Science and Technology*. – 2018. – Vol. 82. – P. 105–118.
2. Ding, X. C. Multi-UAV convoy protection: An optimal approach to path planning and coordination / X. C. Ding, A. R. Rahmani, M. Egerstedt // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2010. – Vol 26. – P. 256–268.
3. Гейс, Э. А. Разработка метода организации движения группы БЛА на основе эквивалента теплового движения / Э. А. Гейс // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2021. – № 11. – С. 41–45.
4. Гейс, Э. А. Разработка регулятора квадрокоптера, входным воздействием которого является эквивалент вектора силы потенциального поля / Э. А. Гейс // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2021. – № 11. – С. 10–15.
5. Liu, W. h. Dynamic collision avoidance for cooperative fixed-wing UAV swarm based on normalized artificial potential field optimization / W. h. Liu, X. Zheng, Z. h. Deng // *Journal of Central South University*. – 2021. – Vol. 28, № 10. – P. 3159–3172.
6. Евдокимов, И. Н. Молекулярные механизмы вязкости жидкости и газа / И. Н. Евдокимов, Н. Ю. Елисеев. – М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. – 59 с.
7. Молекулярная физика и термодинамика. Методика решения задач / Г. А. Миронова [и др.]. – М.: Физический факультет МГУ, 2016. – 416 с.

УДК 378.162.33

ОСНАЩЕНИЕ СОВМЕСТНОЙ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ»

Тявловский А.К.¹, Воробей Р.И.¹, Свистун А.И.¹, Скребцов О.Ю.², Рачицкий А.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрено перспективное оснащение совместной учебной лаборатории для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Измерительные приборы и системы» для студентов специальности «Информационно-измерительная техника». Использование для оснащения лаборатории современной отечественной приборной базы позволяет повысить качество учебного процесса и обеспечить его сближение с нуждами реального производства.

Ключевые слова: учебная лаборатория, измерения, лабораторная работа, приборостроение.

EQUIPMENT FOR A JOINT EDUCATIONAL LABORATORY TO IMPROVE THE EDUCATIONAL PROCESS ON THE COURSE "MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS"

Tyavlovsky A.¹, Vorobey R.¹, Svistun A.¹, Scrabtsou A.², Rachytski A.²

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²JSC "MNIPI"

Abstract. Prospective equipment of a joint educational laboratory for performing laboratory work on the discipline "Measuring Instruments and Systems" for students of the specialty "Information and Measuring Equipment" is considered. The use of modern domestic instrumentation to equip the laboratory allows to improve the quality of the educational process and ensure its convergence with the needs of real production.

Key words: Educational Laboratory, Measurements, Laboratory Work, Instrumentation.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для реализации Протокола о намерениях, заключенного в рамках Международной выставки «RADEL: Радиоэлектроника и приборостроение 2022» между Белорусским национальным техническим университетом и ОАО «МНИПИ» (Минск) был предварительно согласован план работ по созданию совместной учебной лаборатории для обучения и подготовки специалистов в интересах приборостроительной отрасли.

Планом предусматривается организация на базе предприятия или с использованием его базы совместной учебной лаборатории для проведения учебных практик, практических и лабораторных занятий по дисциплине «Измерительные приборы и системы», изучаемой студентами специальности 1-38 02 01 «Информационно-измерительная техника» на 3 и 4 курсах обучения. Для выполнения лабораторных работ на данный момент планируется организация 6 рабочих мест, с перспективой дальнейшего расширения. Тематика работ соответствует действующей учебной программе дисциплины, при этом для оснащения рабочих мест предусмотрено использование исключительно современного приборного оснащения в соответствии с производственной программой ОАО «МНИПИ», а содержание работ приводится в соответствие с реальными задачами, стоящими перед современным приборостроительным производством.

Оснащение рабочих мест и тематика лабораторных работ предполагаются следующими:

1. Рабочее место № 1 «Изучение работы входных блоков вольтметров»:

- вольтметр В7-77 (рис. 1) или аналогичный;
- источник напряжения постоянного тока до 20 В (или калибратор);
- «образцовые» резисторы ≈ 1 МОм, ≈ 3 МОм, ≈ 10 МОм;
- генератор сигналов специальной формы Г6-49.



Рисунок 1 – Внешний вид вольтметра В7-77

Тематика лабораторной работы включает изучение конструкции и принципа действия современного многоцелевого цифрового вольтметра, изучение влияния на показания выходного сопротивления источника сигнала, экспериментальное определение входного сопротивления вольтметра, исследование влияния формы кривой напряжения на показания вольтметра.

2. Рабочее место № 2 «Изучение частотных характеристик вольтметров»:

- вольтметр В7-77 или аналогичный;

- вольтметр В7-65 или аналогичный, с отличной от предыдущего полосой пропускания;
- генератор гармонических сигналов Г4-221.

Тематика лабораторной работы включает изучение конструкции и принципа действия электронных вольтметров, экспериментальное определение полосы пропускания изучаемых вольтметров при измерении напряжения переменного тока и сопоставление их частотных характеристик.

3. Рабочее место № 3: Изучение работы измерительных генераторов:

- генератор сигналов специальной формы Г6-46 (рис. 2);
- осциллограф аналоговый С1-176 или аналогичный.



Рисунок 2 – Внешний вид генератор сигналов специальной формы Г6-46

Тематика лабораторной работы включает изучение конструкции и принципа действия генератора сигналов специальной формы, принципов получения образцовых сигналов синусоидальной, треугольной, прямоугольной, пилообразной и произвольной формы, параметров, характеризующих такие сигналы и экспериментальное определение этих параметров, а также параметров, характеризующих отклонение формы сигнала от заданной.

4. Рабочее место № 4: Изучение работы электронно-счетного частотомера

- частотомер ЧЗ-88 (рис. 3);
- генератор Г3-131 – 2 шт;
- осциллограф аналоговый С1-176 или аналогичный двухканальный.



Рисунок 3 – Внешний вид частотомера ЧЗ-88

Тематика лабораторной работы включает изучение конструкции и принципа действия электронно-счетного частотомера, его режимов ра-

боты и порядка выполнения измерений, практические измерения частоты, периода и отношения частот сигналов различного уровня и формы.

5. Рабочее место № 5: Изучение работы электронного осциллографа

- осциллограф аналоговый С1-176 (рис. 4) или аналогичный двухканальный;
- генератор Г3-131 – 2 шт.

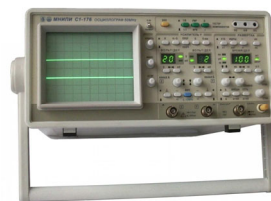


Рисунок 4 – Внешний вид осциллографа С1-176

Тематика лабораторной работы включает изучение конструкции и принципа действия современных электронных осциллографов, порядка работы с осциллографом при выполнении измерений по одному и двум каналам, приобретение навыков использования осциллографа для определения параметров сигналов и сравнения сигналов, включая измерение частоты сигнала по методу фигур Лиссажу.

6. Рабочее место № 6: Изучение работы анализаторов спектра сигнала

- анализатор спектра С4-101 (рис. 5);
- генератор сигналов Г4-221;
- генератор сигналов специальной формы Г6-49.



Рисунок 5 – Внешний вид анализатор спектра С4-101

Тематика лабораторной работы включает изучение конструкции и принципа действия автоматических анализаторов спектра, порядка работы с анализаторами спектра, экспериментальное определение спектров немодулированного сигнала, сигнала амплитудной модуляции, импульсных сигналов и сигналов специальной формы, определение коэффициентов гармоник сигналов.

Непосредственное участие в организации лабораторных практикумов специалистов приборостроительного предприятия с использованием полностью отечественного современного приборного оснащения позволит повысить качество учебного процесса и послужит его дальнейшему сближению с нуждами производства.

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 004.42

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Акиншева И.В., Микулич С.В.

Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова
Могилев, Республика Беларусь

Аннотация. Разработано приложение, предназначенное для обеспечения системы измерения моментов и электрических величин при испытании энергоэффективных двигателей. Выполнена синхронизация данных с различных приборов, обеспечивающих измерение момента и электрических величин, в конкретные временные интервалы. Автоматизирована обработка единого массива измерений характеристик электродвигателей.

Ключевые слова: испытание электродвигателей, синхронизация данных, электрические величины, программное обеспечение.

AUTOMATION OF CALCULATION OF TEST CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MOTORS
Akinsheva I., Mikulich S.

Mogilev State University named after A.A. Kuleshova
Mogilev, Republic of Belarus

Abstract. An application has been developed to provide a system for measuring moments and electrical quantities when testing energyefficient motors. Synchronization of data from various instruments providing measurement of torque and electrical quantities was performed in specific time intervals. The processing of a single array of measurements of the characteristics of electric motors has been automated.

Key words: motor testing, data synchronization, electrical quantities, software.

Адрес для переписки: Акиншева И.В., ул. Космонавтов, 1, Могилев 212022, Республика Беларусь
e-mail: akinsheva@msu.by

Реализация производственных задач в настоящее время требует совокупного применения как технических, так и программных средств. Для решения индивидуальных производственных задач необходимо разрабатывать программное обеспечение, способное автоматизировать процесс сбора информации с технических средств (первичных преобразователей, измерительных систем и т. п.) и процесс обработки полученной информации, проводить вычисления. Важное значение имеет разработка интерфейса пользователя, выполняемого для удобства оператора и предоставляющего ему полную информацию о протекающих процессах. Управление выполнением поставленной производственной задачи через интерфейс пользователя упрощает и значительно ускоряет ее решение.

Объектом исследования в поставленной задаче является испытательный стенд для электродвигателей.

Цель – разработка программного обеспечения для управления работой испытательного стенда и автоматизация обработки полученной информации, сводимой в отчет о проведенных испытаниях.

Информация о работе и характеристиках испытуемого двигателя была получена в виде показаний двух основных датчиков М40-Х с декодером Т45 и Elspec G4420, измеряющих электрические характеристики, момент и скорость вращения [1].

Показания датчиков были синхронизированы по времени, что позволило в режиме реального

времени формировать массив данных для дальнейшей обработки.

Разработана база данных в системе управления базами данных Oracle [2]. Выбор системы обусловлен возможностью работы и передачи информации по сети, что является целесообразным в случае масштабирования программного обеспечения для других испытательных стендов схожих по назначению. Выполнение различных сложив при работе с данными реализовано на исполняющих триггерах, а также путем sql-запросов к данным в базе данных. Рабочие языки программирования C++ и Delphi [3].

На рис. 1 представлен внешний вид главного окна программного обеспечения, в котором реализован интерфейс пользователя с требуемым функционалом.

В правой части главного окна расположены данные датчика Elspec G4420, такие как IP адрес, порт и идентификатор устройства. Кнопка «Датчик М45» позволяет указать путь к программе для сбора показаний с датчика М40-Х с декодером Т45. Верхняя часть окна программного обеспечения служит для заполнения данными о текущих параметрах испытания и двигателя. В нижней части размещен раздел для выбора этапов текущего испытания «Управление испытанием» с индикацией выполнения и функцией «отложенного испытания», дополнительные возможности и показания датчика Elspec G4420 для проверки его работоспособности.

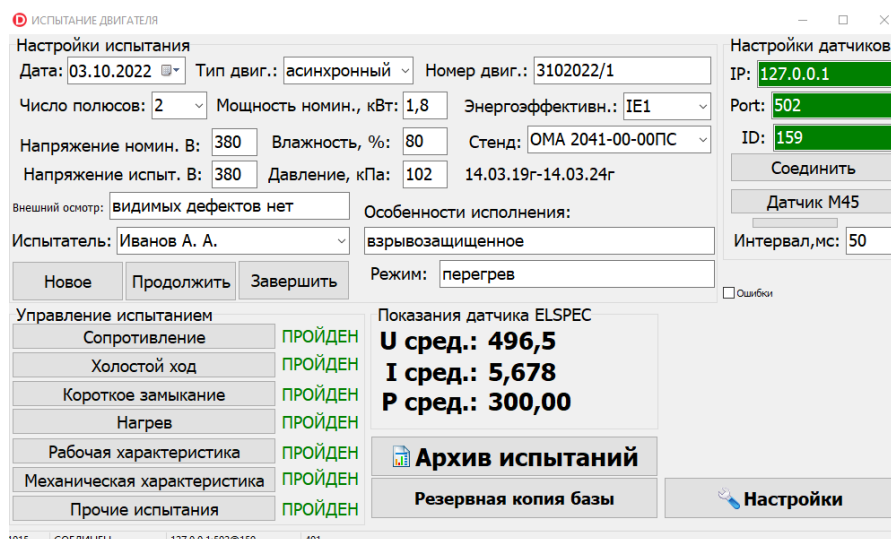


Рисунок 1 – Главное окно разработанного программного обеспечения

«Управление испытанием» состоит из семи основных пунктов. Результаты проведения испытания по каждому из пунктов автоматически записываются в формирующийся отчет.

Перед началом испытания программно предусмотрена автоматическая корректировка нуля на датчике М40-Х с декодером Т45.

До начала испытания необходимо заполнить данные двигателя и условия испытания. После заполнения нажать кнопку «Новое». Автоматически присвоится номер испытания, будет подготовлена база данных и станет активным выбор конкретного пункта испытания.

Испытание холостого хода проводится при трех различных вариантах изменения напряжения холостого хода, выбираемых самостоятельно испытателем. При проведении испытания рассчитываются средние значения напряжения, тока и мощности, а также максимальное отклонение напряжения от текущего значения. Для индикации завершения испытания предусмотрена функция звукового оповещения испытателя. Также в любой момент времени можно указать строку с желаемым шагом испытания и выполнить испытание повторно, данные текущего шага будут перезаписаны. При проведении испытания, после каждого шага необходимо обращать внимание на значение перекоса фаз для контроля настройки трансформатора тока.

Для проведения испытания короткого замыкания необходимо установить допустимое отклонение напряжения, после чего автоматически производятся замеры, количество которых отображается в режиме реального времени.

Реализация функции «отложенного испытания» позволяет обратиться к уже выполненному испытанию для определенного двигателя и провести заново одно или несколько испытаний из раздела «Управление испытанием». Если испытание завершено, то напротив испытываемого параметра появляется слово «пройден», выделенное зеленым цветом, если нет, то появляется знак «х», выделенный красным цветом.

Все пройденные испытания и отчеты по ним сохраняются в базе данных, что ускоряет поиск проведенных испытаний по интересующему двигателю, а также дает возможность анализировать результаты испытаний после отправления испытываемых двигателей на доработку. Для просмотра списка неоконченных испытаний разработано отдельное окно «Выбор неоконченного испытания» с целью последующего их выполнения.

Предусмотрена возможность масштабирования программного обеспечения на другие испытательные стенды.

Благодарности. Работа выполнена при финансировании ОАО «Могилевский завод лифтового машиностроения».

Литература

1. Фролов, Ю. М. Регулируемый асинхронный электропривод: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. – СПб.: Лань, 2018. – 464 с.
2. Льюис, Дж. Ядро Oracle. Внутреннее устройство для администраторов и разработчиков баз данных / Дж. Льюис. – М.: ДМК-Пресс, 2015. – 374 с.
3. Лоспинозо, Дж. С++ для профи / Дж. Лоспинозо. – СПб.: Питер, 2021. – 816 с.

УДК 621.396.67

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ
Алешкевич Н.Н., Гринчук А.П., Громыко А.В., Кныш В.П.*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ*
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведены методика измерения эффективной поверхности рассеяния крупногабаритных объектов и результаты экспериментального исследования макета беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, беспилотный летательный аппарат.

FEATURES OF MEASURING FIELDSCATTERING OF LARGE OBJECTS
Aleshkevich N., Grinchuk A., Gromyko A., Knysh V.*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU*
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper presents a technique for measuring the effective scattering surface of large objects and the results of an experimental study of an unmanned aerial vehicle model.

Key words: effective scattering surface, unmanned aerial vehicle.

Адрес для переписки: Кныш В.П., ул. Курчатова 7, 220045, Минск, Республика Беларусь.
e-mail: lperfp@bsu.by

Измерение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) любого объекта предполагает размещение его в поле плоской волны. Распространенным способом получения нужного распределения поля является выбор такого расстояния от приемо-передающей антенны, на котором поле в зоне объекта можно было бы считать квазиплоским. Для крупногабаритных объектов это расстояние может быть таким большим, что измерения с трудом реализуемы даже в полигонных условиях [1].

Существует методика расчета ЭПР тела сложной формы расчленением его на элементы, которую, в принципе, можно применить для измерения ЭПР [2].

Методика измерений ЭПР заключается в формировании в зоне расположения объекта пятна с квазиплоским распределением поля. В зависимости от размеров пятна объект разбивается на n фрагментов, которые последовательно помещаются в зону пятна и фиксируется их ЭПР σ_n для получения ЭПР всего объекта.

Существует несколько методов объединения величин ЭПР отдельных фрагментов в [1]:

- метод относительной фазы;
- метод случайной фазы;
- метод аддитивных средних ЭПР;
- метод дисперсии.

В ряде задач необходимо предварительно оценить хотя бы максимально возможную ЭПР объекта. В этом случае сигналы от всех фрагментов приходят в приемную антенну синфазно, а ЭПР объекта, состоящего из N фрагментов имеющих ЭПР σ_n можно оценить как

$$\sigma \left(\sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} \right)_{\max}^2. \quad (1)$$

Так, например, для объекта из двух фрагментов:

$$\sigma_{\max 2} = \left(\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2} \right)^2 = \sigma_1 + \sigma_2 + 2\sqrt{\sigma_1\sigma_2}, \quad (2)$$

из трех:

$$\sigma_{\max 3} = \left(\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2} + \sqrt{\sigma_3} \right)^2 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + 2\sqrt{\sigma_1\sigma_2} + 2\sqrt{\sigma_1\sigma_3} + 2\sqrt{\sigma_2\sigma_3}. \quad (3)$$

То есть ЭПР объекта может быть больше суммы ЭПР фрагментов. В то же время просто сумма ЭПР σ_n довольно близка по своему значению к среднему значению ЭПР σ_{cp} :

$$\sigma_{cp} = \sum_n \sigma_n \quad (4)$$

Именно этот критерий был выбран в данной работе для оценки ЭПР макета беспилотного летательного аппарата (БЛА). Корпус БЛА имел диаметр 0,2 м и длину 1,5 м. Отсоединяемые крылья имели длину по 1,3 м.

Из-за больших размеров БЛА пришлось проводить фрагментальные обмеры корпуса и крыла макета отдельно и последующей оценкой суммарной ЭПР с учетом затенения крылом корпуса.

Измерение ЭПР объектов проводилось в безэховой камере размерами 2,5×3,5×6,5 м³, покрытой ПЭВ ТОРА 25. В качестве приемо-передающей антенны была использована измерительная антенна Пб-23М, которая подключена к векторному анализатору MS4642В.

Объект устанавливался на пенопластовую подставку рис. 1, которая в свою очередь размещалась на поворотном столике с возможностью

перемещения вдоль задней стенки камеры. Расстояние до антенны – 5 м.

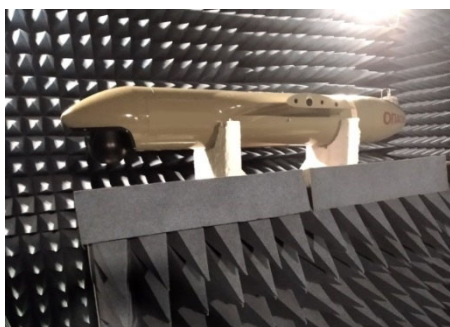


Рисунок 1 – Корпус БЛА в зоне измерений

Первоначально выбиралась рабочая зона установки объекта и в центр ее юстировалась антенна П6-23М. Во всем рабочем диапазоне 8–12 ГГц спад амплитуды поля менее 3 дБ и разностью хода меньше полдлины волны на краях рабочей зоны был при ее размерах 60×60 см². Такой размер рабочей зоны предполагает разбиение корпуса и крыла макета в зависимости от ракурса на 1–3 фрагмента

С помощью векторного анализатора MS4642B осуществляется компенсация принятого антенной сигнала, обусловленного КСВ антенны, и внешним шумовым фоном камеры. Обычно в экранированной камере помеховый сигнал после компенсации не превышает уровня в от –80 до –90 дБ.

Калибровка измерительного тракта осуществлялась с помощью эталонного диска диаметром 2а = 140 мм при СВЧ излучении с длиной волны λ, ЭПР которого описывается формулой [3, 4]:

$$\sigma_0 = \frac{2\pi}{a^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda^2} \right)^2 \quad (5)$$

Для этого в рабочую зону помещается и юстируется диск и фиксируется частотная зависимость принятого сигнала $S_{эт}$.

Далее в рабочую зону помещается объект и для каждого его ракурса и фрагмента фиксируется в частотном диапазоне отраженный сигнал $S_{об}$. При фиксировании отраженных сигналов в децибелах ЭПР σ вычисляется:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot 10^{\Delta/10} \quad (6)$$

где $\Delta = S_{об} - S_{эт}$.

В соответствии с приведенной методикой макет БЛА был исследован в горизонтальной плоскости при углах поворота БЛА от оси симметрии 0°–180° в частотном диапазоне 8–16 ГГц и горизонтальной поляризации вектора E падающей волны. Весь диапазон принимаемых сигналов в рамках исследования был в диапазоне от –65 до –35 дБ, что позволяет не учитывать уровни некомпенсированного сигнала. На рис. 2 приведены зависимости ЭПР макета от угла поворота для частот 8, 12 и 16 ГГц.

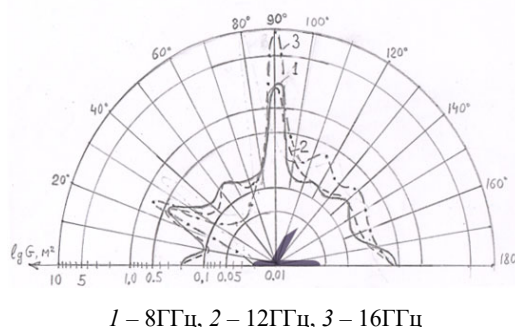


Рисунок 2 – Зависимость ЭПР БЛА от угла поворота для частот

Ожидаемо максимумы ЭПР наблюдаются при 90° (падение волны перпендикулярно корпусу) и 25° (падение волны перпендикулярно кромке крыла).

Следует отметить, что макет изготовлен из стеклопластиковых и металлических частей и никаких мер по коррекции ЭПР не проводилось. Основной задачей макета было соответствие аэродинамическим требованиям.

Что касается вида частотной зависимости реальной ЭПР, то в силу наличия нескольких центров рассеяния он имеет довольно изрезанный характер, анализировать который в полной мере невозможно.

Литература

1. Майзельс, Е. Н. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей / Е. Н. Майзельс, В. А. Торгованов. – М. «Сов. радио», 1972. – 235 с.
2. Штагер, Е. А. Рассеяние волн на телах сложной формы. / Е. А. Штагер, Е. В. Чаевский. – М.: «Сов. Радио», 1974. – 240 с.
3. Кобак, В. О. Радиолокационные отражатели / В. О. Кобак. – М.: «Сов. радио», 1975. – 248 с.
4. Методы исследования радиолокационных характеристик объектов. Монография / Под ред. С. В. Ягольникова. – М.: Радиотехника, 2012. – 296 с.

УДК 621.396.67

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АНТЕНН. ОБЩИЙ ПОДХОД Алешкевич Н.Н., Гринчук А.П., Громько А.В., Кныш В.П.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе изложен общий подход к разработке и созданию системы тестирования антенн. Отмечено, что основной и исчерпывающей характеристикой антенн является ее пространственная диаграмма направленности. Предложен новый подход к паспортизации основных характеристик тестируемой антенны и формализации процедуры тестирования.

Ключевые слова: система тестирования, антенна, диаграмма направленности, сферические гармоники.

DEVELOPMENT OF ANTENNA TESTING SYSTEM. GENERAL APPROACH Aleshkevich N., Grinchuk A., Gromyko A., Knysh V.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper outlines a general approach to the development and creation of an antenna testing system. It is noted that the main and exhaustive characteristic of antennas is its spatial radiation pattern. A new approach to the certification of the main characteristics of the tested antenna and the formalization of the testing procedure is proposed.

Key words: testing system, antenna, radiation pattern, spherical harmonics.

Адрес для переписки: Гринчук А.П., ул. Курчатова 7, 220045, Минск, Республика Беларусь.
e-mail: lpepfp@bsu.by

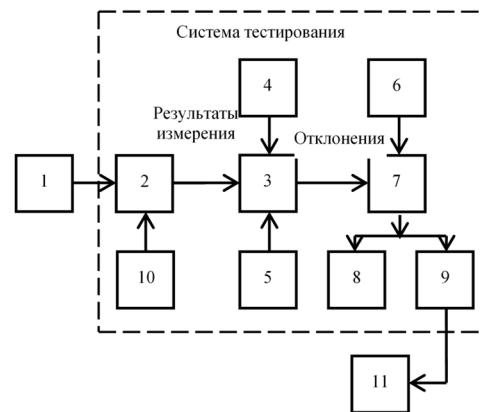
В соответствии с общими положениями тестирования это проверка соответствия параметров системы (объекта) неким заранее заданным или ранее измеренным значениям этих параметров. Процедура тестирования, как правило, проводится на двух важнейших этапах жизненного цикла системы: на этапе разработки и на этапе эксплуатации. В первом случае тестирование проводится на соответствие параметров созданного образца системы заданным значениям этих параметров (например, в техническом задании на разработку). Во втором – на соответствие паспортным значениям параметров при регламентных работах или при возникновении неисправностей. На основании этого определения можно представить обобщенную структурную схему системы тестирования (рис. 1).

Важными элементами системы тестирования являются блоки сравнения и принятия решений. Для принятия решений необходимы два значения параметров – заданный (ранее измеренный) и полученный экспериментально, т. е. системы тестирования предполагают наличие соответствующих измерительных систем, а также программ и методик измерения параметров. Наличие последних позволит получать достоверные результаты и принимать обоснованные решения. Еще одним определяющим элементом является блок заданных разбросов параметров, позволяющий правильно выбрать порог принятия решений.

Конкретизируем обобщенное представление системы тестирования для решения задач тестирования элементов и систем антенной техники.

Основные характеристики антенных систем можно условно разбить на внутренние и внешние.

Внутренние определяют условия подключения антенной системы к питающему фидеру. Это коэффициент отражения (КО) и коэффициент стоячей волны (КСВ) на входе антенной системы в рабочей полосе частот. Два этих параметра позволяют оценить часть мощности питающего генератора, поступающую непосредственно в антенную систему.



- 1 – тестируемый объект; 2 – система измерения заданных параметров; 3 – блок сравнения;
4 – полученные значения параметров; 5 – паспортные (ранее измеренные) значения параметров;
6 – заданные значения отклонения параметров;
7 – блок принятия решений; 8 – соответствует;
9 – не соответствует; 10 – программы и методики измерения параметров; 11 – система диагностики

Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема системы тестирования

Важнейшим дополнением системы тестирования является системы диагностики. Поскольку

рассматриваемые объекты тестирования представляют собой сложные системы, то практически невозможно однозначно определить причины несоответствия параметров. Для этого требуются квалифицированные экспертные оценки причин несоответствия.

Универсальными внешними характеристиками, полностью определяющими антенную систему как излучающее (приемное) устройство, являются комплексные пространственные диаграммы направленности (ДН) на основной и кросс-поляризации. Используя пространственные ДН, можно рассчитать вторичные параметры антенной системы: направление главного максимума (или минимума равносигнальной зоны при работе в моноимпульсном режиме), относительный (средний) уровень боковых лепестков, угловую ширину главного лепестка, коэффициент направленного действия (КНД). Как правило, именно эти параметры являются важнейшими в задании на разработку антенной системы, поскольку они определяют такие практически важнейшие характеристики антенной системы, как разрешающая способность, дальность действия, помехозащищенность и т. д.

В настоящее время пространственные ДН антенных систем рассчитывают путем обработки результатов измерения амплитудно – фазового распределения (АФР) поля излучения антенны в ближней зоне. Поскольку структура поля излучения на любом расстоянии от излучающей апертуры определяется на основании строгих интегральных преобразований, то вместо пространственной ДН можно использовать однозначно с ней связанное измеренное АФР поля излучения. Кроме того, рассматривая процедуру тестирования не только как самостоятельную оценку соответствия реальных характеристик антенной системы их паспортным значениям, но и как первый шаг более широкой системы дефектоскопии и диагностики, приходим к выводу, что пространственные ДН не предоставляют исчерпывающей информации для решения подобной задачи. Дело в том, что несоответствия измеренных характеристик и параметров антенной системы их паспортным значениям вызвано возникшими дефектами в элементах антенной системы, изменившими структуру АФР поля в апертуре антенны. Поскольку ДН является интегральной характеристикой, то в подавляющем большинстве случаев достоверно установить причину выявленного несоответствия практически невозможно. Значительно более информативным является измеренное АФР

поля излучения на некоторой поверхности в ближней зоне антенны.

Широкие возможности для решения этой задачи предоставляет разработанный в рамках НИР компактный антенный полигон [1], его аппаратная часть и специальное программное обеспечение (ПО) для обработки структуры АФР полей.

Паспортизовать измеренное АФР поля излучения антенной системы на сферической поверхности представляется нам наиболее перспективным, так как это позволяет восстановить пространственную ДН и все вторичные параметры, включая КНД, а также дает возможность провести дефектоскопию и, возможно, локализацию дефекта. Естественно, в этом случае необходимо также сертифицировать измерительно – вычислительные комплексы и методики измерения. Единственным недостатком данного предложения является большой объем информации измеренных распределений полей. В связи с этим предлагается хранить не информацию об измеренном АФР, а информацию о спектре комплексных сферических гармоник. В этом случае объем необходимой информации сжимается в сотни и тысячи раз без потери достоверности.

В соответствии с предложенной процедурой на первом этапе проводится измерение АФР поля излучения тестируемой системы на сферической поверхности заданного радиуса с использованием сертифицированного измерительно – вычислительного комплекса и методики измерения. Также по стандартной методике измеряется КСВ на входе антенной системы. Далее рассчитывается спектр сферических гармоник измеренного АФР поля, пространственная ДН и ее вторичные параметры. Со второй стороны из паспортного спектра сферических гармоник восстанавливается эталонные АФР поля, ДН и вторичные параметры. Оценка соответствия проводится путем сравнения целого ряда характеристик и параметров: спектров сферических гармоник, структуры АФР полей, пространственных ДН (или их главных сечений) и вторичных параметров. Такая многоступенчатость позволяет получать более объективную оценку годности тестируемой системы, а также в будущем выделить процедуру экспресс оценки.

Литература

1. Будаев, А. Г. Разработка концепции построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А. Г. Будаев, А. П. Гринчук, А. В. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 2. – С. 151–159.

УДК 338

ОЦЕНКА УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ УСЛУГАМИ МЕТРОПОЛИТЕНА Берлович Т.И., Спесивцева Ю.Б.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведен анализ качества обслуживания пассажиров метрополитена. Разработана и апробирована методика оценки удовлетворенности потребителей с помощью индекса CSI. Предложены направления развития метрополитена на основе модели Канно.

Ключевые слова: показатели качества метрополитена, удовлетворенность потребителей, модель Канно.

SATISFACTION ASSESSMENT OF METRO SERVICES CUSTOMERS Berlovich T., Spesivtseva Y.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A quality analysis of the service for metro passengers was conducted. A methodology for calculating customer satisfaction was developed and tested by the means of the CSI index. Metro development directions are proposed based on the Kano model.

Key words: metro quality indicators, customer satisfaction, the Kano model.

Адрес для переписки: Y.B. Spesivtseva, pr. Nezavisimosti., 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: spesivtseva@bntu.by

Проблема обеспеченности населения услугами пассажирского транспорта всегда является актуальной. Метрополитен – самый быстрый и экологичный вид общественного транспорта, который осуществляет большую часть городских перевозок пассажиров, поэтому обеспечение качества обслуживания на всех уровнях предоставления услуг в метрополитене является важной задачей.

Работа выполнялась для Минского метрополитена. Проведен анализ системы менеджмента качества, действующей на предприятии. Согласно методике оценки результативности процесс «Перевозка пассажиров» является результативным. Однако имеют место жалобы пассажиров.

Для выявления причин неудовлетворенности пассажиров построена диаграмма Исикавы, на ее основе предложены мероприятия для повышения качества перевозок.

Для мониторинга восприятия потребителями того, в какой степени были выполнены их потребности и ожидания предложен метод расчета удовлетворенности потребителей с помощью индекса удовлетворенности клиентов (CSI). Итоговый показатель складывается из оценок по пяти показателям качества услуги (комфортность, своевременность, доступность, экономичность и безопасность). При расчете индекса CSI учитываются веса, отражающие степень влияния каждого отдельного показателя на итоговую оценку удовлетворенности. Полученный показатель (сумма) делится на максимально возможное значение показателя и выражается в процентах.

Показатели качества услуг метрополитена выделены на основе анализа поступающих на предприятие жалоб потребителей и диаграммы Исикавы, они составляют пять групп:

- 1) комфортабельность (удобство посадочных мест, наполненность вагонов, чистота, температура, освещенность, работа эскалаторов и др.);
- 2) своевременность (соблюдение расписания движения, максимальный интервал движения);
- 3) доступность (расстояние до станций метро, стоимость поездки, наличие необходимой информации);
- 4) экономичность (стоимость поездки, возможность доехать до места назначения без пересадки на другой транспорт);
- 5) безопасность поездки.

Весомости показателей качества определены экспертным методом – методом попарного сопоставления (рис.1).

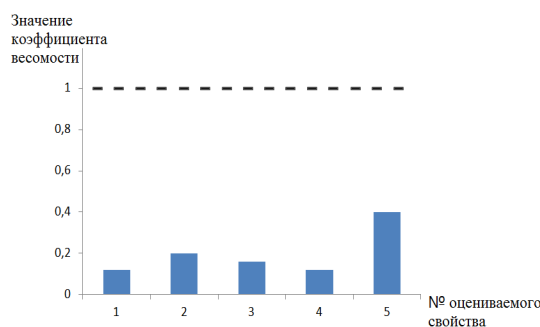


Рисунок 1 – Коэффициенты весомости групп показателей

Составлена анкета для опроса потребителей услуг метрополитена.

Первая часть анкеты включает вопросы, касающиеся удовлетворенности качеством предоставляемых услуг. Оценки удовлетворенности проводились по пятибалльной шкале как наиболее воспринимаемой людьми:

- «5» – полностью удовлетворен;
- «4» – удовлетворен, но не полностью;
- «3» – нейтральное отношение;
- «2» – не удовлетворен, но не полностью;
- «1» – полностью не удовлетворен.

Вторая часть анкеты составлялась, исходя из условия отнесения каждого респондента к определенным пунктам предполагаемых признаков сегментирования, в качестве которых были выбраны периодичность пользования метрополитеном и род деятельности.

По результатам оценки удовлетворенность потребителей услуг составляет 81 %. Результаты исследования показали, что потребители услуг общественного транспорта выражают недовольство в основном: комфортом поездки, а именно уровнем наполняемости вагона, соблюдением культуры обслуживания; а также расстоянием до ближайшей станции метро и возможностью доехать до места назначения без пересадки на другой транспорт (рис. 2, рис. 3).

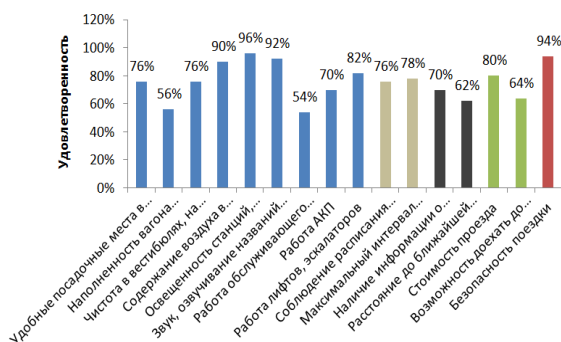


Рисунок 2 – Удовлетворенность потребителей по показателям качества

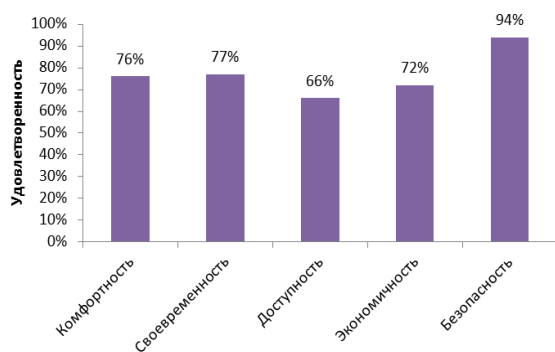


Рисунок 3 – Удовлетворенность потребителей по группам показателей качества

Исследование позволило оценить удовлетворенность работой метрополитена различных категорий населения города. Анализ показал, что в наименьшей степени удовлетворены работой пассажирского транспорта пенсионеры. Кроме ранее перечисленных недостатков в работе транспорта, причинами являются отсутствующие или временно неработающие лифты, эскалаторы, низкая культура обслуживания кассиров.

Рекомендации для направлений развития метрополитена разработаны на основе модели Кано – метода, используемого для оценки эмоциональной реакции потребителей на отдельные характеристики продукции или услуги [1].

Выделены атрибуты метрополитена четырех групп (подвижного состава, станций, обслуживающего персонала и дополнительные атрибуты) и распределены по категориям качества (обязательные, одномерные, привлекательные, неважные, нежелательные). Список атрибутов станций приведен ниже.

Обязательные характеристики (отсутствие затрудняет предоставление услуги): специальные табло, предупреждающие пассажиров о приближении поезда; информационный стенд со схемой линий метро; информация о улицах, ТЦ при выходе из станции.

Одномерные характеристики (вызывают удовлетворение, если они есть и неудовлетворение, если их нет): кондиционер, наличие Wi-Fi.

Привлекательные характеристики (вызывают удовлетворение и восторг, не вызывают неудовлетворения при их отсутствии): платформы надежно защищены специальным «экраном», стеклянные витражи, разрисованные стены, архитектурные экспозиции и скамейки на станциях, кафе, автоматические двери при входе и выходе из станций метро.

Неважные характеристики (неоднозначная реакция потребителей, чаще им все равно): экологическая система очистки, фотозоны, перевод на иностранный язык, увеличенная площадь станций, увеличение пространства между турникетами.

Нежелательные характеристики (услуги, которые не добавляют ей ценности): голосовые объявления о прибытии поезда, круглосуточная работа.

Для развития метрополитена предложена следующая стратегия:

- увеличить количество одномерных атрибутов метрополитена, таких как электронное табло с указанием следующей станции, наличие Wi-Fi, отделение боковых сидений конфигурацией или перегородкой, возможность провоза колясок, велосипедов и крупногабаритного багажа;

- инвестировать во внедрение привлекательных атрибутов, таких как, например, информирование о загруженности вагонов прибывающего поезда, USB-зарядки в вагонах, защита платформ специальным «экраном», автоматические двери при входе и выходе из станций метро, наличие скамеек на станциях и др.;

- сократить расходы на введение наименее важных атрибутов, поскольку большого влияния на удовлетворенность потребителей они не оказывают.

Литература

1. Тромпенаарс, Ф. 100 ключевых моделей и концепций управления / Ф. Тромпенаарс, П. Хейн Ку-берг. – ЛитРес, 2019 – 900 с.

УДК 621.382

ИНДЕНТИРОВАНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ ПЛЕНОК ПОЗИТИВНЫХ НОВОЛАЧНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ НА КРЕМНИИ

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Черный В.В.², Вабищевич С.А.³, Вабищевич Н.В.³

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Методом микроиндентирования исследованы прочностные и адгезионные свойства пленок диазохинон-новолачных позитивных фоторезистов S1813, SPR-700 и ФП9120 толщиной 1,2–1,8 мкм, облученных электронами с энергией 5 МэВ флюенсом $3 \cdot 10^{16}$ см⁻². Показано, что при облучении микротвердость фоторезистивных пленок возрастает, причем наиболее существенно в SPR-700.

Ключевые слова: диазохинонноволачный фоторезист, облучение электронами, микроиндентирование, адгезия, кремний.

INDENTATION OF ELECTRON IRRADIATED POSITIVE NOVOLAC PHOTORESISTS FILMS ON SILICON

Brinkevich D.¹, Prosolovich V.¹, Chernyi V.², Vabishchevich S.³, Vabishchevich N.³

¹Belarusian State University Minsk

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. The strength and adhesive properties of films of diazoquinone-novolac positive photoresists S1813, SPR-700 and FP9120 with a thickness of 1.2–1.8 microns irradiated with electrons with an energy of 5 MeV with a fluence of $3 \cdot 10^{16}$ cm⁻² were studied by microindentation. It is shown that under irradiation, the microhardness of photoresistive films increases, and most significantly in SPR-700.

Key words: diazoquinone-novolac photoresist, electron irradiation, microindentation, adhesion, silicon.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Современный технологический процесс получения изделий электроники основан на применении фотолитографии – метода формирования заданного рисунка на кремниевой подложке для получения необходимой топологии микросхем. В процессах субмикронной и нанолитографии в качестве фоторезистов (ФР) широко используются полимерные композиты на основе новолачной смолы [1]. Позитивные фоторезисты ФП9120, SPR-700 и S1813G2 SP15 являются аналогами по применению и оптимизированы под г-линию ртутной лампы. Они состоят из смеси фенолформальдегидных смол и светочувствительного нафтохинондиазида в соотношении 5:1 [2]. Одной из наиболее важных технологических характеристик фоторезистивных пленок является их адгезия к подложке монокристаллического кремния. Взаимодействие фоторезистов с ультрафиолетовым, рентгеновским и видимым излучением исследовано достаточно подробно, в то время как процессы, индуцированные электронным облучением, слабо изучены, несмотря на то, что они могут оказывать существенное влияние на качество создаваемых приборов.

Цель настоящей работы – исследование радиационно-индуцированных процессов, протекающих при облучении электронами пленок диазохинон-новолачных фоторезистов ФП9120, SPR-700 и S1813 G2 SP15 на кремнии.

Материалы и методы измерений. Пленки позитивных диазохинон-новолачных фоторезистов марок ФП9120, SPR-700 и S1813 G2 SP15 толщиной 1,2–1,8 мкм наносились методом центрифугирования на поверхность пластин кремния с ориентацией (100) и (111). Перед формированием пленки ФР кремниевые пластины подвергали стандартному циклу обработки поверхности в органических и неорганических растворителях. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка при температуре ~90 °С.

Облучение электронами с энергией 5 МэВ проводилось на линейном ускорителе электронов У-003 флюенсом $3 \cdot 10^{16}$ см⁻². Плотность потока электронов контролировалась с помощью цилиндра Фарадея и составляла $1 \cdot 10^{12}$ см⁻²с⁻¹. Температура образцов в процессе облучения не превышала 310 К.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике [3]. Нагрузка (P) на индентор варьировалась в пределах 1–50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой 5 с. Погрешность измерений микротвердости (H) составляла 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95).

Эксперимент. Отпечатки микроиндентора в пленках в пленках всех марок фоторезиста имели бочковидную форму (рис. 1, а), что свидетельствует о наличии растягивающих напряжений, формирующихся при сушке пленки. Параллельно сторонам отпечатка наблюдались навалы (светлые области на рис. 1, а), обусловленные выдавливанием материала из-под индентора.

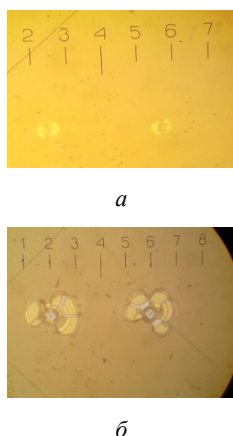


Рисунок 1 – Микрофотография отпечатков индентора в пленке фоторезиста SPR 700 толщиной 1,2 мкм при нагрузке 1 (а) и 50 г (б)

При минимальной нагрузке 1 г часть (от 40 % в ФП9120 до 85 % в S1813) отпечатков после снятия нагрузки частично или полностью восстанавливались, уменьшаясь в размерах или полностью исчезая. Однако уже при нагрузке 5 г эффект восстановления отпечатка не наблюдался. На нагрузках более 5 г вокруг отпечатков имела место зона разрушения, в которой наблюдались радиальные и боковые трещины, а также отслоения пленки от подложки в виде «бабочек» (рис. 1, б). Для ряда отпечатков на пленках SPR-700 при нагрузках 10–50 г наблюдался отрыв пленки от подложки при индентировании. При этом в области отпечатка обнажалась кремниевая подложка, что свидетельствовало о слабой адгезии фоторезиста SPR-700. В фоторезистивных пленках других марок таких отрывов практически не наблюдалось. Отметим, что при увеличении толщины пленки SPR-700 до 1,8 мкм размеры зоны разрушения существенно (на ~ 30 %) снижаются.

Зависимости микротвердости от нагрузки всех фоторезистов схожи (рис. 2). Расхождения при нагрузках > 10 г, когда индентор проникает в Si подложку, обусловлены, вероятнее всего, более низкой адгезией фоторезистов S1813 и SPR-700

по сравнению с ФП9120. Подтверждением сделанного вывода является то, что у отпечатков индентора в пленках S1813 и SPR-700 наблюдались отколы, отсутствующие в ФП9120.

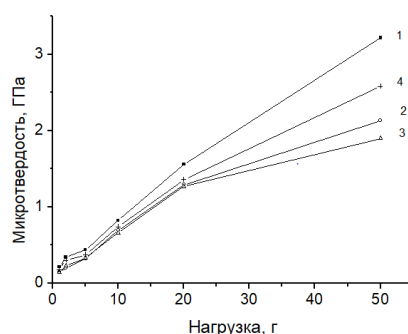


Рисунок 2 – Зависимости от нагрузки микротвердостей фоторезистивных пленок ФП9120 (1), S1813 (2) и SPR-700 толщиной 1,2 мкм (3) и 1,8 мкм (4)

Облучение 5 МэВ электронами приводило к увеличению значений микротвердости при нагрузке 1 г (табл. 1). При этой нагрузке глубина проникновения индентора составляла ~0,9 мкм. Поэтому эти значения соответствуют истинной микротвердости полимерной пленки. Т.о. при облучении микротвердость ФР возрастает, причем наиболее существенно (почти в 3 раза) в SPR-700 толщиной 1,8 мкм. При нагрузках свыше 20 г, когда основной вклад дает кремниевая подложка, существенной зависимости микротвердости от дозы облучения выявлено не было. Полученные результаты коррелируют с данными [4], в которой показано, что γ -облучение приводит к увеличению микротвердости пленок сополимеров метилметакрилата и метакриламида на кремнии.

Таблица 1. Микротвердость (ГПа) облученных пленок фоторезиста при нагрузке 2 г

Марка ФР	исходный	облученный
ФП9120	0,21	0,34
SPR 700 1,2 мкм	0,15	0,35
SPR 700 1,8 мкм	0,14	0,40
S1813 G2 SP15	0,23	0,41

Литература

1. Моро, У. Микрофотография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч. 2. / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – 632 с.
2. Brinkevich, S. D. Frustrated total internal reflection spectra of diazoquinone–novolac photoresist / S. D. Brinkevich [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2021. – V. 87, № 6 – P. 1072–1078.
3. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами В⁺ и Р⁺ / С. А.Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2016. – № 12. – С. 51–57.
4. Микротвердость пленок сополимеров на основе метилметакрилата, облученных γ -квантами / С. А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2016. – № 12. – С. 30–36.

УДК 539.172.12

ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ γ - И β -ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ

Бринкевич Д.И.¹, Бумай Ю.А.⁵, Киевицкая А.И.³, Кийко А.Н.⁴, Крот В.О.²

¹Белорусский государственный университет

²Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии

³Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова

⁴Белорусский государственный институт метрологии

⁵Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены одновременные измерения γ - и β -излучающих радионуклидов в регенерированной воде и картриджах сорбционной очистки, использовавшиеся в процессе производства радиофармпрепаратов на основе ^{18}F . Показана целесообразность использования гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315 для оперативного контроля содержания технологических радионуклидов при производстве радиофармпрепаратов.

Ключевые слова: радиофармпрепарат, радионуклиды, гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315, регенерат воды [^{18}O] H_2O

SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF γ - AND β -EMITTING RADIONUCLIDES FORMED DURING THE PRODUCTION OF RADIOPHARMACEUTICALS

Brinkevich D.¹, Bumai Y.⁵, Kiyavitskaya A.³, Kiyko A.⁴, Krot V.²

¹Belarusian State University

²N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus

³International Sakharov Environmental Institute

⁴Belarusian State. Institute of Metrology

⁵Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Simultaneous measurements of γ - and β -emitting radionuclides in regenerated water and sorption purification cartridges used in the production of radiopharmaceuticals based on ^{18}F were carried out. The expediency of using the MKS-AT1315 gamma-beta spectrometer for operational control of the content of technological radionuclides in the production of radiopharmaceuticals is shown.

Key words: radiopharmaceutical, radionuclides, gamma-beta spectrometer MKS-AT1315, water regenerate [^{18}O] H_2O .

Адрес для переписки: Бринкевич Д.И., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь

e-mail: brinkevich@bsu.by

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является динамично развивающимся методом ранней диагностики онкологических, неврологических и кардиологических заболеваний, в котором используется внутривенное введение радиофармацевтических препаратов (РФП) на основе позитрон-излучающих короткоживущих радионуклидов [1]. На ПЭТ-исследования приходится основная доля из ~ 40 миллионов диагностических процедур ядерной медицины, ежегодно выполняемых в мире. Доминирующее положение в ПЭТ-диагностике занимают радиофармпрепараты на основе ^{18}F , который образуется по реакции $^{18}\text{O} (p, n) ^{18}\text{F}$ при бомбардировке водной мишени, обогащенной ^{18}O , протонами с энергией 18 МэВ. ^{18}F является β^+ -эмиттером с периодом полураспада 108 мин.

В работе [2] в облученной на ускорителе Cyclone 18/9 НС воде были идентифицированы более 20 нежелательных γ -излучающих радионуклидов (РН). Большинство из них являются также β -излучателями [3], причем энергия их

излучения варьируется в широких пределах (вплоть до ~ 900 кэВ). Указанные обстоятельства обуславливают необходимость контроля содержания как γ - так и β -излучающих РН в промежуточных продуктах, отходах производства и конечном РФП. Кроме того, требуется мониторинг рабочих помещений ПЭТ центра с целью оценки доз, получаемых персоналом. Для этих целей может быть полезен гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315, который представляет собой комбинированное двухдетекторное спектрометрическое и радиометрическое средство измерения смешанного гамма-бета-излучения.

Целью настоящей работы являлось изучение возможности применения гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315 для одновременного измерения γ - и β -излучающих нежелательных РН, образующихся при производстве РФП на основе ^{18}F .

Материалы и методы измерений. В настоящей работе наработку радионуклида ^{18}F осуществляли на ускорителе Cyclone 18/9 НС (ИВА, Бельгия) при облучении 18 МэВ протонами воды,

обогащенной по кислороду ^{18}O до 97 % («Центр молекулярных исследований», Российская Федерация). Использовали ниобиевую мишень Nirta Fluor (IBA, Бельгия) объемом 3,2 мл. Время облучения мишени за один производственный цикл составляло 60–140 минут, ионный ток на мишени – 75–80 мкА.

Контроль содержания РН проводился с использованием гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315. Он обеспечивает регистрацию гамма-излучения в диапазоне энергий от 50 до 3000 кэВ и бета-излучения в диапазоне граничных энергий от 150 до 3500 кэВ. Средний фон для β -частиц – 270 имп/мин, чувствительность для ^{90}Sr в геометрии 0,03 л – $3,5 \cdot 10^{-3}$ имп-л/(с·Бк). Для сравнения определение активности γ -излучающих радионуклидов выполняли с использованием спектрометра на особо чистом германии: детекторная система GEM40-83/DSPEC jr 2.0; энергетический диапазон 14,5–2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал. Из-за высокой активности ^{18}F измерения проводили не менее, чем через двое суток после последнего облучения.

В качестве образцов для измерений были выбраны картриджи сорбционной очистки QMA, Alumina и SCX, использовавшиеся в процессе производства РФП, а также 6 проб объемом 1 мл воды H_2^{18}O , облученной в разные дни дозами 4800–9900 мкА·мин и прошедшей выделение ^{18}F на картридже QMA (далее – регенерат)

Эксперимент. Результаты измерений представлены в табл. 1. Кроме приведенных в таблице наблюдались фоновые ^{22}Na , ^{40}K , ^{60}Co , ^{109}Cd , и технологические РН ^{56}Co и ^{58}Co в концентрациях до 300 Бк. В картриджи сорбционной очистки QMA и Alumina были обнаружены в следовых количествах также технологические радиоизотопы рения, ниобия, тантала и вольфрама, которые образуются при облучении входного окна водной мишени и осаждаются на ионно-обменном картридже QMA [2, 4]. Доминирующими РН в регенерированной воде являются радиоизотопы хрома и кобальта (табл. 1). Отметим, что активности радионуклидов варьируются в широких пределах, что, вероятнее всего, связано с различной радиационной историей облучаемых мишеней [2, 6].

В β -спектрах регенерированной воды наблюдался ряд максимумов в высокоэнергетичной области, что указывает на облучение мишеней с большой накопленной дозой [3]. Как и для γ -излучающих РН интенсивность максимумов β -спектров варьировалась в широких пределах. К сожалению определить конкретные РН, связанные с

этим максимумами, не удалось. Имеет место суперпозиция ряда (до 10) РН.

Полученные в работе численные значения активностей технологических радионуклидов коррелируют с результатами работ различных авторов [2–6], Результаты измерений активностей РН на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 и при использовании спектрометра на особо чистом германии практически совпадали. Различия для всех образцов не превышали 20 %, что позволяет сделать вывод о целесообразности использования гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315 для оперативного контроля содержания технологических радионуклидов при производстве РФП на основе ^{18}F .

Таблица 1. Активности радионуклидов (в Бк) в регенерированной воде и картриджах сорбционной очистки через месяц после облучения

Образец	^{51}Cr	^{54}Mn	^{57}Co	^{65}Zn
Регенерат1	12000	30	5050	297
Регенерат2	20500	47	783	238
Регенерат3	5900	43	410	35
Регенерат4	6410	48	180	-
Регенерат5	7040	31	73	31
Регенерат6	15000	60	380	26
QMA6	7200	29	140	47
QMA	11000	5	56	=
SCX	5	3	16	-
Alumina	-	30	358	12

Литература

1. Позитронно-эмиссионная томография. – Ч.1: Характеристика метода. Получение радиофармпрепаратов / С. Д. Бринкевич [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2013. – № 2 – С. 129–137.
2. Brinkevich, S. D. Activation Radionuclides in the Process of Irradiation of a Niobium Target at the Cyclone 18/9 HC Cyclotron / S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, A. N. Kiyko // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – V. 83, № 12. – P. 1732–1737.
3. Долгоживущие β -излучающие радионуклиды при производстве радиофармпрепаратов на основе ^{18}F / Д. И. Бринкевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2019. – № 4. – С. 67–76.
4. Separation of Long-Lived Radionuclides on QMA Light Anion-Exchange Cartridge in Manufacture of Radiopharmaceutical Preparations Based on ^{18}F / V. O. Krot [et al.] // Radiochemistry – 2021. – V. 63, № 2. – P. 235–242.
5. Radionuclide impurities in proton-irradiated ^{18}O for the production of ^{18}F : Activities and distribution in the ^{18}F FDG synthesis process / L. Bowden [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – V. 67. – P. 248–255.
6. Очистка ^{18}F фторида от долгоживущих радионуклидов при производстве ^{18}F фтордезоксиглюкозы / А. А. Иванюкович [и др.] // Медицинская физика. – 2018. – № 4 (80). – С. 59–65.

УДК 621

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА Василевская А.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Определение результативности систем менеджмента является одним из требований международных стандартов. В данной статье рассмотрено понятие результативности, исследованы основные методы и проблемы оценки результативности систем менеджмента, а также описан выбор критериев результативности.

Ключевые слова: интегрированная система менеджмента, результативность, методика оценки результативности.

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF THE INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM Vasilevskaya A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Determining the performance of management systems is one of the requirements of international standards. This article discusses the concept of performance, explores the main methods and problems of assessing the performance of management systems, and describes the choice of performance criteria.

Key words: integrated management system, performance, performance evaluation methodology.

*Адрес для переписки: Василевская А.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Сегодня уделяется особое внимание системам управления предприятием, позволяющим организациям сохранять свое положение и оставаться конкурентоспособными. Для формирования успешных систем управления обычно применяются соответствующие международные стандарты, например, стандарты на системы менеджмента качества, экологического менеджмента, информационной безопасности и т. д. Данные стандарты устанавливают общее требование, заключающееся в необходимости проведения оценки результативности функционирования систем менеджмента.

В настоящее время на предприятиях все чаще встречаются интегрированные системы менеджмента (ИСМ), которые предполагают объединение в единую структуру нескольких систем менеджмента и их функционирование как одно целое. Внедрение и поддержание таких систем также связано с осуществлением оценки их результативности.

Результативность – это степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов [1]. По сути результативность определяет способность организации реализовывать политику и цели в области качества.

Сложность проблемы анализа и оценки результативности и эффективности связана с их многоаспектностью (мы можем рассматривать эти категории применительно к продукции (услуге), процессу или системе в целом) и многоуровневостью (компания в целом, структурное подразделение, бизнес-процесс, рабочее место) [2].

Кроме этого, в стандартах не прописаны конкретные методики оценки результативности

ИСМ. Следовательно, предприятия способны самостоятельно определять метод оценки результативности.

Наиболее распространенными являются следующие методики:

– расчет результативности системы менеджмента на основе балльных оценок по заданным параметрам;

– модель индексного нормирования оценки результативности;

– методика самооценки результативности предприятия и уровня зрелости системы менеджмента;

– комплексные подходы к самооценке управления качеством предприятия [3].

В общем случае методика оценки результативности ИСМ состоит из следующих этапов:

- 1) разработка критериев оценки;
- 2) определение показателей по каждому критерию;
- 3) определение значимости показателей;
- 4) определение результативности каждой системы менеджмента;
- 5) определение результативности ИСМ;
- 6) оценка устойчивости ИСМ;
- 7) принятие решений по управлению ИСМ.

Владелец каждого процесса должен установить критерии оценки и их предельные значения. При определении критериев необходимо обеспечивать адекватность отражения деятельности этого процесса, доступность для понимания пользователями, а также не допускать существенных дополнительных затрат. Наиболее часто показатели результативности определяются с использованием метода экспертных оценок. Целевые

значения назначаются на основе принятых целей и политики в области качества, стратегических планов предприятия и его подразделений. В последующем данные критерии оценки и их значения могут корректироваться руководством на основе результатов анализа ИСМ.

После определения результативности интегрированной системы менеджмента по шкале значимости и на основании сделанных выводов, представитель руководства по ИСМ вместе с владельцами процессов приступает к разработке корректирующих действий, мероприятий по улучшению с последующим контролем и анализом выполнения. В результате, полученная информация о результативности ИСМ является основой для анализа системы со стороны руководства, используется для оперативного контроля процессов, пересмотра документации и процедур, периодического пересмотра политики и целей, анализа и совершенствования ИСМ, информирования персонала и заинтересованных сторон [4].

Таким образом, процесс определения результативности интегрированной системы менеджмента не только является неотъемлемой частью оценки системы менеджмента на предмет соответствия требованиям международных стандартов,

но и позволяет высшему руководству более полно подходить к вопросам улучшения системы менеджмента, определив именно те процессы, которые требуют корректирующих действий. Кроме этого, оценка результативности способствует установке новых, более высоких целей, что несомненно приводит к улучшению деятельности организации и ее развитию.

Литература

1. Системы менеджмента качества. Требования : СТБ ISO 9001–20015.
2. Демьянович, И. В. Количественные подходы к оценке эффективности системы менеджмента качества // И. В. Демьянович // Экономические науки. – 2010. – № 11(72). – С. 120–123.
3. Определение комплекса показателей для формирования оценки интегрированной системы менеджмента / А. В. Петренко [и др.] // Управление качеством в образовании и промышленности: сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, Севастополь, 20–21 мая 2021 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2021. – С. 61–66.
4. Методика оценки результативности интегрированной системы менеджмента / В. В. Шимов // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – № 5–2 (26).

УДК 621.396.67

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОВ СФЕРИЧЕСКИХ ГАРМОНИК ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ АНТЕНН

Гринчук А.П., Громыко А.В., Кныш В.П.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе приведены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований по восстановлению полей излучения антенн с использованием спектров сферических гармоник. Показано, что этот алгоритм может быть эффективно использован при тестировании антенн.

Ключевые слова: система тестирования, структура поля излучения, сферические гармоники.

USE OF SPECTRA OF SPHERICAL HARMONICS IN TESTING ANTENNA

Grinchuk A., Gromyko A., Knysh V.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The paper presents the results of mathematical modeling and experimental studies on the reconstruction of radiation fields of antennas using the spectra of spherical harmonics. It is shown that this algorithm can be effectively used in antenna testing.

Key words: testing system, radiation field structure, spherical harmonics.

*Адрес для переписки: Гринчук А.П., ул. Курчатова 7, 220045, Минск, Республика Беларусь.
e-mail: lpepfp@bsu.by*

Решение уравнения Максвелла в сферической системе координат для комплексных амплитуд тангенциальных составляющих вектора электрического поля позволяет представить электромагнитное поле $\vec{E}_\tau(\theta, \phi, r)$ на поверхности сферы радиуса r , охватывающей излучающую систему, в

виде разложения по векторным сферическим функциям $\vec{M}_{mn}, \vec{N}_{mn}$ с соответствующими комплексными коэффициентами A_{mn}, B_{mn} , [1, 2], причем индекс n изменяется от 1 до некоторого максимального значения N , а индекс m от $-n$ до n . Векторные сферические функции $\vec{M}_{mn}, \vec{N}_{mn}$

(сферические гармоники) рассчитываются для сферической поверхности заданного радиуса r , а комплексные коэффициенты A_{mn} , B_{mn} , вычисляются с учетом амплитудно-фазового распределения (АФР) поля на этой поверхности и определяют вес данной сферической гармоники в спектре сферических гармоник. Таким образом, массив этих коэффициентов полностью определяет структуру поля излучения на заданной поверхности.

Как указано в [3], разложение по сферическим волнам никогда не является безусловно сходящимся. Поэтому для приближенного определения значения N предложена оценка:

$$N \geq 2\pi k R_0 \quad (1)$$

где R_0 – радиус минимальной сферы, физически охватывающей излучающий объект.

При формировании общего подхода к разработке системы тестирования антенн было предложено в качестве паспортизованных данных на антенну хранить спектр сферических гармоник ее амплитудно-фазового распределения поля в ближней зоне. Для подтверждения такого предложения было проведено математическое моделирование и экспериментальные исследования конкретных антенн.

В качестве модели выбрана двумерная излучающая поверхность, состоящая из 256 излучателей, расположенных в квадратной матрице 16×16 элементов с дискретом $0,5\lambda$ и распределением поля единичного элемента $\sin\theta \times \sin\varphi$. С помощью метода геометрической оптики (ГО) рассчитывалось поле излучения в переднем полупространстве (углы θ и φ изменялись в диапазоне $0-\pi$) на сфере большого диаметра $R \gg R_0$ (например, 1000λ), затем рассчитывался спектр сферических гармоник и с использованием полученных значений опять восстанавливалось это поле, но при разных значениях N . Степень совпадения структуры полей (ГО и восстановленного с помощью сферического спектра) определялась по величине комплексной разности значений полей в каждой точке.

Исходя из размера излучающей апертуры (16 элементов через $0,5\lambda$) величину $2R_0$ принимаем 12λ и получаем оценку $N \geq 38$. По рассчитанному спектру сферических гармоник были восстановлены АФР поля на той же сферической поверхности для $N = 40; 45$ и 50 и получены комплексные разности рассчитанных значений полей методом ГО и сферических функций в каждой точке. На рис. 1 представлены сечения поля излучения апертуры (1) и значения разностей полей при расчете с использованием N равно 40 (2), 45 (3) и 50 (4).

Из полученных результатов следует, что разности, которые в дальнейшем можно рассматривать как погрешности восстановления АФР полей с использованием конечного числа сферических гармоник, при всех выбранных N , лежат на уровне

и ниже -80 дБ, что вполне удовлетворяет всем практическим требованиям. Однако, меняется структура распределения разности. Для $N = 40$ и 50 разность полей носит более структурированный характер, в то время, как при $N = 45$, разность носит характер отдельных точек, разбросанных в большом динамическом диапазоне. На наш взгляд такое поведение разности обусловлено ошибками вычисления, в большей степени округления при вычислении факториалов для больших значений n . Это полностью согласуется с утверждением [3], что величина N имеет оптимальное значение, обеспечивающее наиболее точное восстановление структуры поля с использованием сферических гармоник.

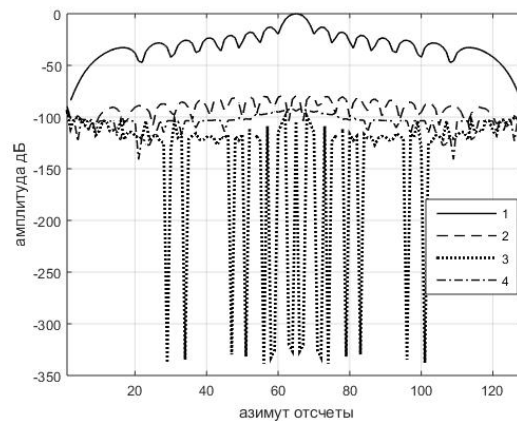


Рисунок 1 – Сечения амплитудных распределений поля излучения (1) и разностей полей при расчете с использованием $N = 40$ (2), 45 (3), и 50 (4)

Также проведено математическое моделирование восстановления структуры поля антенны при наличии амплитудных и фазовых дефектов. Дефекты задавались тем, что амплитуда излучения отдельных излучателей изменялась от единицы до нуля (амплитудные), или фаза излучения отдельных излучателей изменялась от 0 до 180 градусов с дискретом 45 градусов.

В качестве представителей двух типов антенн при проведении экспериментальных исследований выбраны щелевая волноводная решетка и пирамидальный рупор. Эксперименты проводились по следующему алгоритму:

1 – измерялось АФР поля излучения в ближней зоне;

2 – по результатам измерения рассчитывалась структура поля в дальней зоне, например на расстоянии 1000λ (диаграмма направленности);

3 – рассматривая поле в дальней зоне как поле на сфере большого радиуса (1000λ), по этим результатам рассчитывался спектр сферических гармоник;

4 – в апертуру антенн вносились некие дефекты и п.п. 1–3 повторялись;

5 – анализировались изменения структуры полей с структуры спектров сферических гармоник.

Измерения структуры полей излучения объектов и первичная обработка полученных результатов проводилась с использованием экспериментальных образцов измерительных аппаратно-программных комплексов компактного антенного полигона, разработанного и изготовленного ранее.

При анализе структуры полей в ближней и дальней зонах использовалось представление, что поле объекта с дефектом является векторной суммой полей свободного объекта и поля рассеяния дефекта, т. е. поле рассеяния дефекта (термин «рассеяния» употребляется в широком смысле) является разностью АФР полей свободного объекта и объекта с дефектом.

Анализ структуры спектров сферических гармоник показал наличие изменений указанной структуры для объектов с дефектами по сравнению со свободными объектами. Важнейшими результатами такого анализа являются следующие:

– структура и величина комплексной разности спектров сферических гармоник однозначно

связаны с наличием, величиной и даже расположением дефекта;

– поле, восстановленное из разности спектров полностью совпадает с полем рассеяния дефекта, полученным путем вычитания АФР полей излучения.

Вывод. Математическое моделирование и экспериментальные исследования показали, что использование спектра сферических гармоник позволяет восстановить поле излучения антенн с высокой точностью и однозначно реагирует на наличие амплитудных и фазовых дефектов в излучающей апертуре.

Литература

1. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев [и др.]. – М. – 1985. – 368 с.
2. Бахрах, Л. Д. Методы измерения излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. П. Курочкин. – Л. – 1985. – 272 с.
3. Вуд, П. Анализ и проектирование зеркальных антенн / П. Вуд. – М. – 1984. – 208 с.

УДК 621.314

ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ФИГУР ЛИССАЖУ

Громыко И.Л., Галушко В.Н.

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработана технология представления исходных данных в виде фигур Лиссажу для сверточных нейронных сетей. Данная технология позволяет: сократить затраты на создание и обновление базы данных испытаний; выявлять и классифицировать неисправности; оценивать остаточный ресурс трансформатора; самосовершенствоваться на основе накопления опыта реальных ситуаций.

Ключевые слова: трансформатор, изоляция, фигуры Лиссажу.

DIAGNOSTICS OF TRANSFORMER INSULATION WITH THE HELP OF LISSAGE FIGURES

Hramyko I., Galushko V.

*Belarusian State University of Transport
Gomel, Republic of Belarus*

Abstract. A technology for presenting initial data in the form of Lissajous figures for convolutional neural networks has been developed. This technology allows: to reduce the cost of creating and updating a test database; identify and classify faults; evaluate the residual life of the transformer; self-improvement based on the accumulation of experience in real situations.

Key words: transformer, insulation, Lissajous figures.

*Адрес для переписки: Громыко И.Л., ул. Громовой, 3, кв. 27, Гомель 246030, Республика Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru*

Существующая система технического диагностирования трансформаторов требует доработки. Это объясняется следующими причинами: используемая на практике нормативная документация по эксплуатации трансформаторов не учитывает в полной мере современные методы по технической диагностике; отсутствием современных знаний по технической диагностике у выпускников высших учебных заведений и низкой квалификации в этой области у лиц, принимающих решения; недоверием к новой организации ремонта и нежеланием уходить от системы организации

ремонта энергетического оборудования по регламенту из-за закладываемых значительных денежных средств на проведение ремонтных работ по старой схеме; недостаточным количеством, высокой стоимостью современных и эффективных приборов технического диагностирования; плохой организацией повышения квалификации специалистов всех уровней по проблемам технической диагностики оборудования; низкой достоверностью проводимых диагностических работ.

В Республике Беларусь и за рубежом в последнее время наблюдается тенденция перехода от

планово-предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому состоянию оборудования [1]. Для возможности реализации обслуживания оборудования по фактическому состоянию ведутся активные разработки и внедрение автоматизированных комплексных систем диагностики и диагностики, позволяющие в различных режимах без отключения оборудования, оценивать его текущее техническое состояние [Комбинированные системы сбора передачи технологической и диагностической информации АСУ ТП электроустановок [2]. Такие системы помогают выявлять различного вида дефекты, некоторые – формировать технические рекомендации продлению срока эксплуатации, планировать сервисное обслуживание и ремонтные циклы.

Современные автоматизированные системы диагностики состояния трансформаторов и электрических машин чаще всего разрабатываются для конкретного вида оборудования и их применение на других типах оборудования требует трудоемкой настройки библиотеки базы данных и значительной технической доработки. Этот недостаток можно избежать за счет применения самообучающихся интеллектуальных систем. Применение искусственных нейронных сетей позволяет унифицировать диагностические исследования, не прибегая к созданию библиотек баз данных для каждого типа трансформатора. Также оптимизируется применение данных систем за счет простоты практического применения и устранения человеческого фактора при анализе результатов. При этом с ростом числа исследований снижается вероятность ошибки, а системный подход (оценка множества факторов между собой в динамике) [3].

Большинство производителей программного обеспечения и оборудования в сфере мониторинга состояния трансформаторов достигло больших результатов. В то же время существующие технологии в сфере программного обеспечения позволяют перейти на качественно новый уровень, связанный с применением алгоритмов машинного обучения.

Состояние изоляции обмоток трансформатора можно оценить, измеряя всего несколько параметров: сопротивление изоляции постоянному току R_{ISO} , коэффициенты абсорбции DAR , поляризации PI и диэлектрического разряда DD . Значения этих величин позволяют обнаружить расслоение и загрязнение, определить ток утечки, степень влажности и старения, т.е. сделать вывод о пригодности изоляции обмоток к дальнейшей эксплуатации.

В данной публикации предлагается новая технология оценки состояния качества изоляции с помощью межобмоточных напряжений, схема измерения которых представлена на рис. 1. Измерения проводились на трансформаторе ПОбС-5АУЗ.

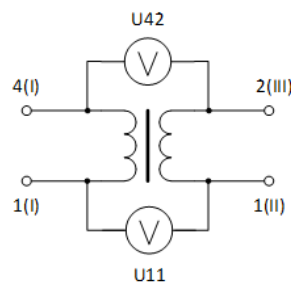


Рисунок 1 – Схема измерения межобмоточных напряжений

Измерения проводились с помощью двухканального осциллографа MDSO ISDS205A (рис. 2).

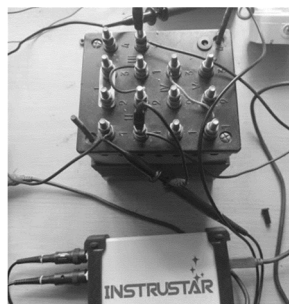


Рисунок 2 – Измерение межобмоточных напряжений осциллографом

Для учета не только величин данных напряжений, но и их начальных фаз, были построены фигуры Лиссажу, для различных состояний изоляции трансформатора. Данные фигуры представлены на рис. 3.

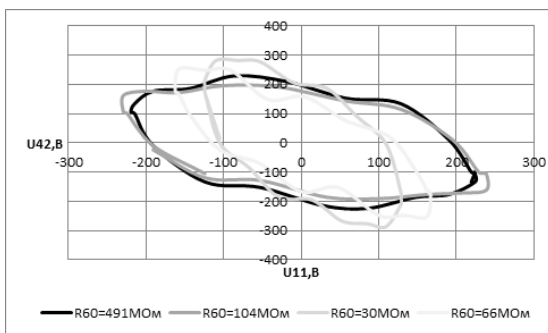


Рисунок 3 – Фигуры Лиссажу межобмоточных напряжений, при различных состояниях изоляции трансформатора

Как видно из данного рисунка, фигуры Лиссажу при нормальном состоянии трансформатора ($R_{60} \geq 100$ МОм) практически не отличаются. Фигура Лиссажу с ростом увлажненности изоляции обмоток изменяет свои размеры и наклон. При этом характер (емкостной, индуктивный или активный) и величина (коэффициент нагрузки изменялся от холостого хода до 1,2 номинальной нагрузки) нагрузки не изменяют данные фигуры (рис. 4).

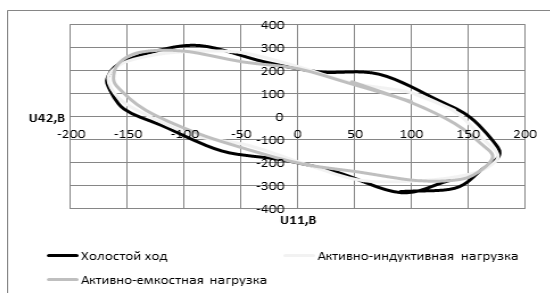


Рисунок 4 – Фигуры Лиссажу при различных нагрузках

Таким образом, полученные фигуры Лиссажу можно использовать для оценки качества изоля-

ции. Данные графические материалы авторы используют в качестве дополнительных исходных данных разработанной системы, основанной на применении сверточных нейронных сетей для цели диагностики, классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса.

Литература

1. Яхья, А. А. Проблемы энергетики / А. А. Яхья, В. М. Левин. – 2019. – № 21 (6). – С. 11–18.
2. Проблемы энергетики / А. Н. Васев [и др.]. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 16–26.
3. Вопросы современной науки и практики / А. И. Хальясмаа [и др.] // Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 1 (45). – С. 289–300.

УДК 658.51

ИНСТРУМЕНТЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА Гузаревич И.А., Домениковский Э.И., Спесивцева Ю.Б.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены инструменты бережливого производства на примере промышленного предприятия машиностроительного профиля.

Ключевые слова: инструменты бережливого производства.

LEAN MANUFACTURING TOOLS Guzarevich I., Domenikovskiy E., Spesivtseva Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The lean manufacturing tools are considered on the example of an industrial machine-building enterprise.
Key words: lean manufacturing tools.

*Correspondence address: Spesivtseva Y.B., pr. Nezavisimosti, 65, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Инструменты бережливого производства используют при стремлении улучшить процессы и предотвратить любую возможность возникновения дефектов [1]. Феномен бережливого производства – это философия, подходы которой являются универсальными для разных стран и отраслей промышленности [2].

Каждый из инструментов интересен сам по себе, однако наиболее эффективно использовать их в комплексе. Большинство из них универсальны и подходят как организациям, выпускающим продукцию, так и оказывающим услуги.

Рассмотрим как применяются принципы бережливого производства в цеху мелкой штамповки (ЦМШ) промышленного предприятия машиностроительного профиля.

5S – организация рабочего места, свободного от беспорядка и обеспечивающего эффективную, безопасную и эргономичную работу [3]. Инструмент реализуется пятью следующими действиями.

Сортировка. На рабочем столе прессы нет ничего лишнего. Все предметы, которые в данный момент не нужны убраны в специальные кармашки.

Рациональное расположение. Рабочие штампы в цеху пронумерованы и расположены согласно своему номеру на специальных полках, откуда снимаются (и куда ставятся) с помощью крана ручного управления. Такой прием помогает найти и достать нужный штамп за минимальное время.

Уборка. После окончания работы рабочий обязан убрать свое рабочее место от отходов. На некоторых штампах очистка отходов проводится регулярно в течении рабочего дня для поддержания работоспособности штампа.

Стандартизированная работа – процессы должны быть согласованы, задокументированы и контролироваться. Это базовый уровень, с которого начинается оптимизация. В ЦМШ все процессы задокументированы. При установке нового штампа на прессовый станок проводится наладка станка. В процессе работы, производится выборочный контроль деталей для проверки, нужна ли станку подналадка. Стабильность вышеперечисленных процессов обеспечивается соблюдением норм, установленных в документации.

Совершенствование установленных процедур. В ЦМШ используют приспособления для быстрого перемещения отштампованных деталей и удобной работы оператора.

Total Productive Maintenance (TPM) – комплексный подход, направленный на предотвращение возникновения каких-либо проблем. Основная идея TPM – вовлечение в процесс производства всего персонала предприятия, а не только соответствующих служб.

Элементы этого инструмент бережливого производства есть в ЦМШ. За исправностью каждого штампа следят не только наладчики, но и сами рабочие, что уменьшает вероятность простоя оборудования.

Визуальное управление – организация процесса таким образом, чтобы с первого взгляда было очевидно, как все работает. Это позволяет заметить, если произошло что-то ненормальное. В ЦМШ определить отклонения от нормального течения процесса достаточно несложно. При работе надо визуально оценивать качество отштампованной детали и если есть дефекты, например, наличие больших заусенцев или непробитое отверстие, то процесс требует вмешательства.

7 потерь. Потеря, в рамках этого инструмента, определяется как любое действие, не добавляющий ценности.

Переделка. В ЦМШ много брака. Прежде всего это связано с недостаточной квалификацией рабочих.

Ожидание. Основной причиной является неодинаковая загруженность отдельных рабочих и техники, например, при отсутствии свободных кранов для перемещения готовых деталей с первой операции на последующие и при замене штампа на прессе.

Излишние запасы. Неиспользуемых материалов в ЦМШ мало. Заготовки хранятся в самом цеху, что позволяет быстро доставить их к нужному прессу с помощью крана.

Ненужные движения. Могут возникнуть у левшей, т. к. положение ящиков с обработанными деталями и заготовками ориентировано на людей с рабочей правой рукой.

Излишняя работа. В ЦМШ работа строго соответствует инструкции, которая не предусматривает какие-либо альтернативные действия.

Простой оборудования. В ЦМШ неисправные штампы быстро меняют, простой оборудования незначительный.

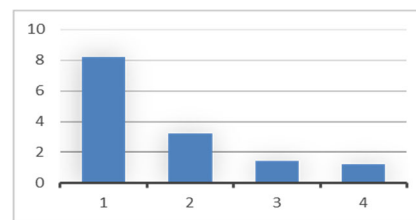
Проверки, выявление дефектов после того, как они возникли. Если станок настроен, нет необходимости для дополнительного контроля.

Just in Time (Точно в срок) или JIT – концепция управления производством, при которой производственные запасы подаются небольшими партиями непосредственно в нужные точки производственного процесса, минуя склад, а готовая продукция сразу отгружается покупателям. Элементы такого подхода присутствуют в цеху.

Сокращение запасов. Сокращение складских запасов изготовленной продукции жизненно важно для улучшения процессов. Выбранный цех эффективно реализует этот инструмент бережливого производства. Обработанные детали в течение часа отправляются в другой цех для сборки или отправляются заказчику.

Поток – это процесс, в котором продукты перетекают по одному от операции к операции без задержек между операциями. При этом выявляются любые проблемы в процессе, отсутствует потребность в хранении незавершенной продукции. Этот инструмент внедрить в ЦМШ невозможно, т. к. каждый пресс имеет свою мощность и располагается в ряду с такими же прессами, в большинстве случаев для вырубki требуется больше усилия, чем при гибке. Таким образом, при перетекании одной операции в другую, работнику придется постоянно перемещаться между рядами от одного пресса к другому, что приведет к большим потерям и простоям оборудования.

Выбрать наиболее актуальный в настоящее время инструмент бережливого производства можно с помощью анализа затрат, добавляющих и не добавляющих ценности продукту [4]. Такой анализ сделан для механосборочного цеха (рис. 1).



1 – материалы, обработка, сборка, установка, комплектующие, хранение, контроль качества; 2 – поиск нужного инструмента, повторная обработка, транспортировка заготовок, ненормированный режим; 3 – неорганизованность рабочего места; 4 – брак

Рисунок 1 – Диаграмма ценностей

Предложено использовать инструмент бережливого производства FOS-анализ, основным приемом которого является разработка карт стандартных операций.

В процессе наблюдения за технологическими операциями, последовательностью действий работников даются рекомендации по их корректированию. Последовательность действий оформляется стандартными операционными картами, в которых прописаны наиболее эффективные приемы труда.

Большинство инструментов бережливого производства можно внедрять в рамках системы менеджмента качества, реализуя подход постоянного совершенствования организации Кайдзен [5]. Японский термин означает непрерывное улучшение процессов, производительности, культуры, качества продукции с вовлечением каждого сотрудника организации на постоянной основе в этот процесс. Изменения не всегда являются

значительными, но за счет их большого количества они приводят заметному суммарному результату.

Литература

1. Бережливое производство. Основные положения и словарь : ГОСТ Р 56020-2014. – Стандартиформ. – Введ. 01.03.2015. – 15 с.
2. Вумек, Д. Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Д. Вумек, Д. Джонс. – Изд.: Альпина Паблишер, 2022. – 472 с.

3. Хироюки, Хирано. 5S для рабочих : как улучшить свое рабочее место / Хироюки Хирано. – Изд.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 158 с.

4. Шук, Д. Учитесь видеть бизнес-процессы: Практика построения карт потоков создания ценности / Д. Шук, М. Ротер. – Изд.: Альпина Паблишер. – 2015. – 136 с.

5. Масааки, Имаи. Гемба Кайдзен. Путь к снижению затрат и повышению качества / Имаи Масааки. – Изд.: Альпина Паблишер. – 2022. – 414 с.

УДК 621

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИКВИДУСА ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Au-Ge-Sb МЕТОДОМ СИМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Джураев Т.Д., Рахимов Ф.К., Мирзоева Б.М.

*ТТУ имени академика М. Осими
Душанбе, Республика Таджикистан*

Аннотация. В статье изучено и построено поверхность ликвидуса диаграммы состояния трехкомпонентной системы золота-германий-сурьма методом симплексного планирования экспериментов.

Ключевые слова: золота, германий, сурьма, сплав, диаграмма, ликвидус, симплекс, температура, раствор, эвтектика, плавления, матрица.

CONSTRUCTION OF THE LIQUIDUS TRIPLE SURFACE Au-Ge-Sb SYSTEMS BY THE SIMPLEX PLANNING METHOD

Dzhuraev T., Rakhimov F., Mirzoeva B., Nimonov R.

*TTU named after Academician M. Osimi
Dushanbe, Republic of Tajikistan*

Abstract. In the article, the liquidus surface of the state diagram of the three-component gold-germanium-antimony system was studied and constructed by the method of simplex planning of experiments.

Key words: gold, germanium, antimony, alloy, diagram, liquidus, simplex, temperature, solution, eutectic, melting, matrix.

*Адрес для переписки: Джураев Т.Д., пр. акад. Радажабовых, 10, Душанбе 734042, Республика Таджикистан
e-mail: mcm45@mail.ru*

Сплавы золота с германием обладают хорошими литейными свойствами, увеличиваются в объеме при затвердевании, поэтому могут служить для изготовления точных отливок. Эвтектический состав сплава золота с германием, характеризующийся высокой твердостью, предложен для нанесения твердых покрытий на золоте или на изделиях, покрытых золотом [1].

Для создание новых легкоплавких составов сплавов на основе золота с германием используется дополнительное легирование.

Таким легирующим компонентом в данном случае является сурьма, которая образует, как с золотом, так и с германием легкоплавкие эвтектические сплавы [1].

Сплав золото – сурьма применяют в радиоэлектронике для покрытия контактов, а также в медицинской промышленности для покрытия различного инструмента.

Покрытия сплавами золота с сурьмой характеризуются высокой твердостью и износостойкостью. Эти сплавы перспективны для их использования в качестве контактного материала, а также в производстве транзисторов.

Анализ показывает [2] что двойные диаграммы состояния систем Au-Ge, Au-Sb и Ge-Sb построены. В системе золото – германий наблюдается эвтектическое превращение при температуре 361 °С и содержании 28 % (ат.) германия (рис. 1). В твердом состоянии максимальная растворимость Ge в Au составляет 3,0 % (ат.).

Установлено, что золото с сурьмой образует диаграмму состояния с эвтектикой которая плавится при 360 °С и содержании 34,8 % (ат.) сурьмы [2]. При кристаллизации в системе наблюдается образование по перитектической реакции при температуре 460°С соединения AuSb₂, имеющего узкую область гомогенности (рис. 1). Растворимость Sb в твердом состоянии Au при различных температурах составляет в % (ат.): 1,12, 1,10, 0,91, 0,64 и 0,34, соответственно, при температурах 600, 500, 400, 360 и 300 °С.

Сплавы системы Ge-Sb представляют собой эвтектическую механическую смесь. В системе установлено эвтектическое равновесие между Ge-Sb, которое осуществляется при температуре 592°С и содержании 85,5% (ат.) Sb (см. рис. 1).

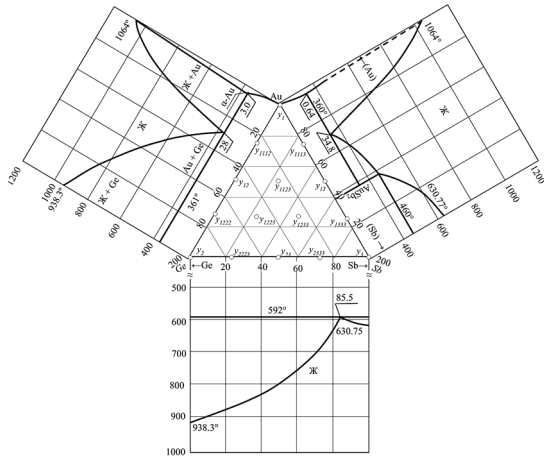


Рисунок 1 – Развертка тройной системы Au-Ge-Sb

В настоящее время представляют интерес математические методы планирования экспериментов, позволяющие уменьшить материальные затраты и получить требуемые результаты [3, 4]. Сущность одного из таких методов, предложен Шеффе [3].

Нами для построения поверхности ликвидуса системы Au-Ge-Sb математическая модель и формулы для расчета коэффициентов выводились аналогично работе [4].

Была выбрана модель четвертой степени для трехкомпонентной системы:

$$\begin{aligned}
 y = & \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j + \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \gamma_{ijk} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \delta_{ijk} x_i x_j (x_i - x_j)^2 + \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i^2 x_j x_k + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i x_j^2 x_k x_l + \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l^2 + \dots
 \end{aligned} \quad (1)$$

где y – свойство системы, т.е. температура плавления; $\beta_i, \beta_{ij}, \gamma_{ijk}, \delta_{ijk}$ и β_{ijkl} – коэффициенты регрессии и x_i, x_j и x_k – число компонентов.

Матрица планирования и результаты экспериментальных данных (см. табл.) по двойным диаграммам состояния составляющие систему Au-Ge-Sb брались из данных рис. 1. Температура плавления сплавов, лежащих в центре концентрационного треугольника (рис. 1), определена по данным термического анализа [5].

По результатам определения температуры плавления сплавов рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
 \beta_1 = y_1 &= 1064; \\
 \beta_2 = y_2 &= 938; \\
 \beta_3 = y_3 &= 630; \\
 \beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 &= -1544;
 \end{aligned}$$

$$\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = -1628;$$

$$\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = 104;$$

$$\gamma_{12} = 8/3 (-y_1 + 2y_{112} - 2y_{122} + y_2) = -1482,67;$$

$$\gamma_{13} = 8/3 (-y_1 + 2y_{113} - 2y_{133} + y_3) = -2037,33;$$

$$\gamma_{23} = 8/3 (-y_2 + 2y_{223} - 2y_{233} + y_3) = -5,3333;$$

$$\delta_{12} = 8/3 (-y_1 + 4y_{1112} - 6y_{1122} + 4y_{1222} - y_2) = -938,667;$$

$$\delta_{13} = 8/3 (-y_1 + 4y_{1113} - 6y_{1133} + 4y_{1333} - y_3) = -1584;$$

$$\delta_{23} = 8/3 (-y_2 + 4y_{2223} - 6y_{2233} + 4y_{2333} - y_3) = -549,3333;$$

$$\beta_{1123} = 32 (3y_{1123} - y_{1223} - y_{1233}) + 8/3 (6y_1 - y_2 - y_3) - 16 (y_{12} + y_{13}) - 16/3 (5y_{1112} + 5y_{1113} - 3y_{1222} - 3y_{1333} - y_{2223} - y_{2333}) = 12266,66;$$

$$\beta_{1223} = 32 (3y_{1223} - y_{1123} - y_{1233}) + 8/3 (6y_2 - y_1 - y_3) - 16 (y_{12} + y_{23}) - 16/3 (5y_{1222} + 5y_{2223} - 3y_{1112} - 3y_{2333} - y_{1113} - y_{1333}) = -1109,33;$$

$$\beta_{1233} = 32 (3y_{1233} - y_{1123} - y_{1233}) + 8/3 (6y_3 - y_1 - y_2) - 16 (y_{13} + y_{23}) - 16/3 (5y_{1333} + 5y_{2333} - 3y_{1113} - 3y_{2223} - y_{1112} - y_{1222}) = -2325,33.$$

Таким образом, модель четвертой степени поверхности ликвидуса системы золото-германий-сурьма по данным таблицы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y = & 1064x_1 + 938,3x_2 + 630x_3 - 1544x_1x_2 - \\
 & - 1628x_1x_3 + 104x_2x_3 - 1482,67x_1x_2(x_1 - x_2) - \\
 & - 2037,33x_1x_3(x_1 - x_3) - 5,333x_2x_3(x_2 - x_3) - \\
 & - 938,667x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 1584x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - \\
 & - 549,33x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 12266,66x_1^2x_2x_3 - \\
 & - 1109,33x_1x_2^2x_3 - 2325,33x_1x_2x_3^2,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1, x_2 и x_3 – содержание в сплавах Au, Ge и Sb в атомных долях.

Полученное уравнение регрессии (1) позволяет не только предсказывать температуру начала кристаллизации сплавов данной системы без дополнительных экспериментов, но и определять области, линии и точки фазовых равновесий.

Для геометрического представления полученной поверхности ликвидуса строили изотермы ликвидуса через каждые 50 °C (две линии ликвидуса через 25 °C, см. рис. 2). Все вычисления проводили на ЭВМ.

Полученная проекция системы (рис. 2) хорошо передает геометрический образ поверхности ликвидуса. Выявляются три области первичной кристаллизации двойных сплавов эвтектических смесей. Кристаллизация всех трех областей сплавов заканчивается образованием тройной эвтектической механической смеси состоящий из трех твердых растворов на основе чистых компонентов. Равновесие наступает при температуре 355 °C и содержании 92 % ат. Au, 7,5 % ат. Ge и 0,5 % ат. Sb, по реакции $Ж \rightleftharpoons \alpha\text{-Au} + \beta\text{-Ge} + \gamma\text{-Sb}$.

Таблица. Матрица планирования и результаты эксперимента системы Au-Ge-Sb

№/№ п/п	Код сплава	Состав сплавов						Температура ликвидуса, °С
		в кодовом масштабе, доли единиц			в натуральном выражении ат.%			
		x_1	x_2	x_3	Au	Ge	Sb	
1	y_1	1,0	0,0	0,0	100	0	0	1064
2	y_2	0,0	1,0	0,0	0	100	0	938
3	y_3	0,0	0,0	1,0	0	0	100	630
4	y_{12}	0,5	0,5	0,0	50	50	0	615
5	y_{13}	0,5	0,0	0,5	50	0	50	440
6	y_{23}	0,0	0,5	0,5	0	50	50	810
7	y_{112}	0,75	0,25	0,00	75	25	0	560
8	y_{122}	0,25	0,75	0,00	25	75	0	775
9	y_{113}	0,75	0,00	0,25	75	0	25	385
10	y_{133}	0,25	0,00	0,75	25	0	75	550
11	y_{223}	0,00	0,75	0,25	0	75	25	870
12	y_{233}	0,00	0,25	0,75	0	25	75	717
13	y_{1123}	0,50	0,25	0,25	50	25	25	550
14	y_{1223}	0,25	0,50	0,25	25	50	25	670
15	y_{1233}	0,25	0,25	0,50	25	25	50	610

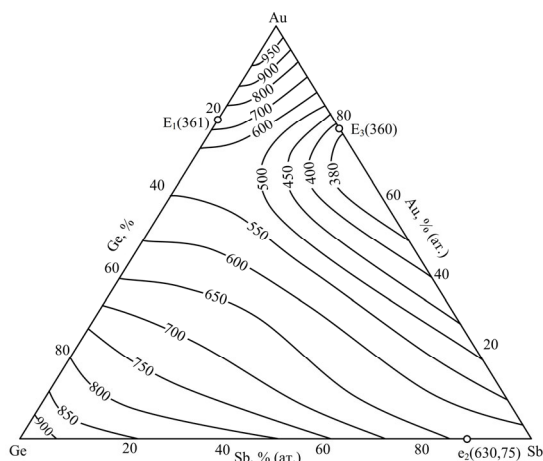


Рисунок 2 – Проекция поверхности ликвидуса тройной системы Au-Ge-Sb

Литература

1. Справочник химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chem21.info/info/1656899>.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. акад. РАН Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996, 1997. – Т. 1, 2, 992. – 1024 с.
3. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел IV / Ф. С. Новик. – М., 1970. – 149 с.
4. Джураев, Т. Д. Изучение диаграммы состояния системы Sr-Ba-Al методом симплексных решеток / Т. Д. Джураев, А. В. Вахобов, К. К. Эшонов // Журн. Заводская лаборатория. – 1975. – Т. 41, № 3. – С. 335–337.
5. Разработка универсальной установки для определения теплофизических свойств веществ / Т. Д. Джураев [и др.] // Материалы VI-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», посвященной 20-летию XVI сессии верховного совета Республики Таджикистан. – Душанбе: ТТУ им. М. С. Осими, 2012.

УДК 621.31/36

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА КАЛИБРОВКИ КОНТРОЛЬНЫХ СИТ Коробко Ю.С., Булыга Д.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены актуальные вопросы калибровки контрольных сит, применяемых в различных отраслях народного хозяйства.

Ключевые слова: контрольные сита, аттестация, калибровка, метод калибровки, рабочее место калибровщика.

OPTIMIZATION OF GEOMETRIC MEASUREMENTS INSTRUMENT CALIBRATION

Korobko Yu., Buliga D.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Topical issues of calibration of control sieves used in various sectors of the national economy are considered.
Key words: measurement, calibration, calibration method, calibrator workplace.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

В настоящее время в связи с интенсивным развитием производства и повышенными требованиями потребителей относительно качества товаров, работ и услуг предъявляются определенные требования к оборудованию, обеспечивающему это качество. В предлагаемом докладе рассматривается вариант организации и оптимизации рабочего места калибратора контрольных сит на базе имеющегося в наличии оборудования.

Контрольные сита – это устройства, предназначенные для определения размеров частиц при просеивании через них сыпучих материалов. Диапазон использования контрольных сит очень широк: строительство, фармацевтика, пищевая промышленность, нефтяная промышленность, печатное дело, электроника и т. п. В связи с этим очень широк и парк применяемых контрольных сит, отличающихся как диапазоном номинала ячеек (от единиц микрон до десятков сантиметров), так и их конструкцией (деревянные, проволочные, тканевые, полимерные и др.), формой (круглые, квадратные, звездчатые и т. д.) и размерами.

В настоящее время наиболее распространенным методом метрологической оценки контрольных сит является их аттестация. Известно, что метрологическая аттестация – это комплекс мероприятий по исследованию метрологических характеристик и свойств средств измерений с целью принятия решения о пригодности его применения. Обычно метрологическую аттестацию производят перед вводом в эксплуатацию средства измерения. Результатом метрологической аттестации является протокол либо аттестат о пригодности средства измерения. Однако в процессе эксплуатации контрольного сита его метрологические характеристики изменяются. Так, изменяются линейные размеры ячеек сита вследствие их износа, ухудшаются свойства материала, из которого изготовлено сито, провисание и т. п. В связи с этим в целях экономии материальных средств и возможности более длительной эксплуатации сит актуальным встает вопрос, связанный с их калибровкой. Известно, что калибровка – это мероприятие, связанное с установлением метрологических характеристик средства измерения. В результате калибровки сита устанавливается реальный номинал его ячеек, что позволяет его дальнейшее использование, возможно даже в других областях.

В докладе предлагаются различные методы организации калибровки контрольных сит.

Например, в определенном диапазоне (номинале) ячеек сита можно использовать метод стеклянных шариков (сфер). Для более мелких ячеек предлагается использовать трехкоординатную видеоизмерительную машину. Эти методы довольно точны, хотя они и затратные. Более дешевым является метод калибровки с помощью микроскопа.

В докладе проведен детальный анализ востребованности в калибровке контрольных сит определенного номинала. Это позволило организовать рабочие места калибровщиков контрольных сит определенного номинала на базе имеющегося в наличии оборудования.

Кроме того, в докладе предлагается схема метрологической прослеживаемости калибровки контрольных сит, а также приведена методика оценки неопределенности калибровки.

Литература

1. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений. Постановление государственного комитета по стандартизации [Электронный ресурс] : Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 42 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W22136599>. – Дата доступа: 10.10.2022.
2. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-4. – Госстандарт. – Введ. 01.07.2003. – 32 с.
3. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем : СТБ 2450-16. – Госстандарт. – Введ. 01.03.2017. – 258 с.
4. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры : ГОСТ 8.558. – Стандартинформ. – Введ. 01.17.2002. – 15 с.
5. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения : СТБ 8014. – Госстандарт. – Введ. 31.10.2000. – 10 с.
6. Сита контрольные. Технические требования и испытания. Часть 1. Сита контрольные из металлической проволочной сетки : СТБ ISO 3310-1-2019. – Госстандарт. – Введ. 01.03.2020. – 20 с.
7. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками : ГОСТ 6613-86. – Введ. 01.01.1988. – 11 с.
8. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками : ГОСТ 3826-82. – Введ. 01.01.1983. – 14 с.
9. Ткани для сит из шелковых и синтетических нитей : ГОСТ 4403-91. – Введ. 01.01.1993. – 18 с.

УДК 621.762.4

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСОЛЬНОЙ БАЛКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ ТОРЦЕВ КОНСОЛИ

Дудяк А.И., Хвасько В.М., Сахнович А.Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен вопрос напряженно-деформированного состояния консольной балки, состоящей из двух стержней и нагруженной сосредоточенной силой. В правой, подвижной по вертикали, части консольной балки концы прочно соединены между собой на небольшой длине. Установлено, что при таком способе закрепления концов консоли в зоне скрепления возникает сосредоточенный изгибающий момент. В результате этого уменьшаются максимальные нормальные напряжения в наиболее нагруженной части сечений стержней и уменьшаются прогибы сечений.

Ключевые слова: деформация, нормальное напряжение, поперечное сечение, изгибающий момент, упругая линия.

DEFORMATIONS AND STRESSES IN THE CANTILEVER BEAM DEPENDING ON THE METHOD OF ATTACHING BEAM ENDS

Dudjak A., Khvasko V., Sakhnovich A.

Belarussian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The question of the stress-strain state of a cantilever beam consisting of two rods and loaded with a concentrated force is considered. In the right, vertically movable part of the cantilever beam, the ends are firmly connected to each other over a short length. It was found that with this method of fixing the ends of the cantilever, a concentrated bending moment occurs in the bonding zone. As a result, the maximum normal stresses in the most loaded part of the cross-sections of the rods decrease and the deflections of the cross-sections decrease.

Key words: deformation, normal stress, cross section, bending moment, elastic line.

Адрес для переписки: Дудяк А.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: smat@bntu.by, dudjak@mail.ru, hvasko.victoriya@gmail.com

Рассмотрим деформацию и возникающие нормальные напряжения в поперечных сечениях консоли, состоящей из двух стержней прямоугольного сечения одинаковой высоты и ширины. Консоль состоит из двух стержней из одинакового материала, не связанных друг с другом какими-либо связями по длине. При деформации такой консоли каждый стержень изгибается самостоятельно под действием силы F (рис. 1). Внешняя сила, приходящаяся на один стержень, равна $F/2$ [1–2].

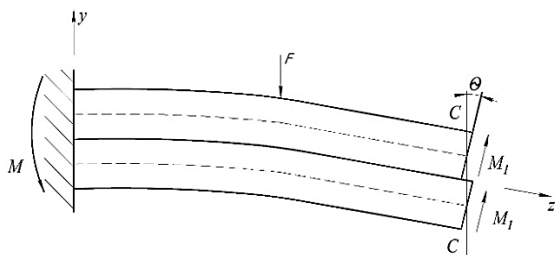


Рисунок 1 – Схема деформированной консоли

Максимальные нормальные напряжения в поперечных сечениях стержней будут равны:

$$\sigma_{max} = \frac{F \cdot \frac{l}{2}}{2W_x} = \frac{Fl}{4W_x}, \quad (1)$$

где $W_x = \frac{bh^2}{6}$ – момент сопротивления сечения одного стержня; b и h – соответственно ширина и высота прямоугольного сечения стержня.

Нейтральные слои стержней проходят через центры тяжести сечений и обозначены пунктирными линиями (рис. 1) на торцах консоли нейтральные слои будут находиться на одной вертикали $C-C$, а торцы консоли повернутся относительно нейтральных слоев на некоторый угол θ , который определяется методом начальных параметров [3]. Исходя из схемы действия сил (рис. 1) угол поворота θ определяется из выражения:

$$E2J_x\theta = R \frac{l^2}{2} - M \cdot l - \frac{F(\frac{l}{2})^2}{2} = -\frac{Fl^2}{8}, \quad (2)$$

или

$$\frac{\theta}{2} = -\frac{Fl^2}{32EJ_x}. \quad (3)$$

Рассмотрим условия приведения торцов стержней в одну плоскость. Для этого необходимо на оба торца стержней воздействовать одинаковыми изгибающими моментами M_1 , которые повернут их на угол $\theta/2$. В результате на консоль из двух стержней будет действовать суммарный изгибающий момент $M_c = 2M_1$.

Рассмотрим методику определения изгибающего момента M_c в прочно соединенных стержнях в зоне A на конце консоли (рис. 2). В заделке будет возникать реактивный изгибающий момент M_B .

Статическое условие равновесия в заделке можно представить следующим уравнением:

$$M_B + M_c - F \frac{l}{2} = 0. \quad (4)$$

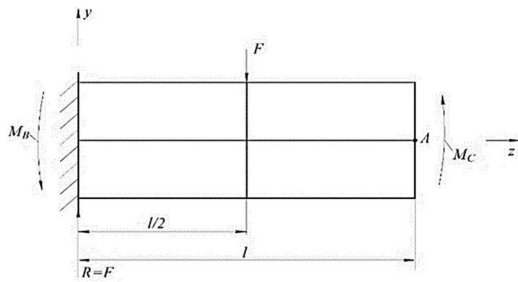


Рисунок 2 – Схема действия сил на консольную балку при прочном соединении стержней в зоне А

При воздействии силы F плоскость торца сечения повернется на угол $\theta/2$, при таком закреплении стержней в зоне А, а торец будет представлять плоскость, образованную двумя торцами стержней. Методом начальных параметров угол поворота торца $\theta/2$ можно представить уравнением:

$$E2J_x \frac{\theta}{2} = R \frac{l^2}{2} - M_B \cdot l - \frac{F(\frac{l}{2})^2}{2} = (\frac{3Fl^2}{8} - M_B l), \quad (5)$$

или

$$\frac{\theta}{2} = \frac{1}{2EJ_x} \left[\frac{3Fl^2}{8} - M_B l \right]. \quad (6)$$

Приравнивая между собой правые части уравнений (3) и (6), будем иметь:

$$\frac{1}{2EJ_x} \left[\frac{3Fl^2}{8} - M_B \cdot l \right] = -\frac{Fl^2}{32EJ_x}. \quad (7)$$

Решая уравнение (7) относительно изгибающего момента M_B , получим:

$$M_B = \frac{7Fl}{16}. \quad (8)$$

Рассматривая совместно полученное уравнение (8) и уравнение статического равновесия (4), будем иметь:

$$M_C = \frac{Fl}{16}. \quad (9)$$

Максимальные нормальные напряжения в поперечных сечениях такой консоли будут возникать в окрестности заделки и равны:

$$\sigma_{max} = \frac{M_B}{2W_x} = \frac{7Fl}{32W_x}. \quad (10)$$

Из сравнения напряжений в стержнях со свободными концами консоли (1) и с жестко закрепленными между собой концами такой же консоли (10) следует, что скрепление концов способствует снижению максимальных напряжений.

Литература

1. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, 1972. – 541 с.
2. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, А. Л. Квитка. – Киев: Техника, 1967. – 783 с.
3. Татур, Г. К. Общий курс сопротивления материалов / Г. К. Татур. – Минск: «Вышэйшая школа», 1974. – 462 с.

УДК 621.31/36

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ковалёнок А.А., Коробко Ю.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены актуальные вопросы обеспечения единства измерений при калибровке средств измерения температуры – обеспечение метрологической прослеживаемости. На основании поверочной схемы разработана методика калибровки термометров определенного типа и предложена схема метрологической прослеживаемости калибровки. Разработан вариант реализации рабочего места для проведения калибровок.

Ключевые слова: температура, измерение, калибровка, метод калибровки, метрологическая прослеживаемость, рабочее место калибровщика.

ENSURING METROLOGICAL TRACEABILITY OF CALIBRATION OF TEMPERATURE MEASURING INSTRUMENTS

Kovalyonok A., Korobko Yu.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Topical issues of ensuring the uniformity of measurements during calibration of temperature measuring instruments – ensuring metrological traceability are considered. On the basis of the calibration scheme, a method for calibrating thermometers of a certain type has been developed and a scheme for metrological traceability of calibration has been proposed. A variant of the workplace implementation for calibrations has been developed.

Key words: temperature, measurement, calibration, calibration method, metrological traceability, calibrator's workplace.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Согласно Закону «Об обеспечении единства измерений» одним из принципов обеспечения единства измерений является обеспечение метрологической прослеживаемости. Это понятие в отечественной метрологии относительно новое и повсеместно внедряется в метрологическую практику. Кроме того, Закон определяет метрологическую прослеживаемость как одну из основ обеспечения единства измерений. Под метрологической прослеживаемостью результатов измерения понимают свойство этого результата, в соответствии с которым он может быть соотнесен с национальным эталоном единицы величины или иной основы для сравнения через документированную неразрывную цепь поверок и калибровок средств измерений. Таким образом, метрологическая прослеживаемость призвана обеспечить доверие к эквивалентности измерений на международном уровне, что, в свою очередь, способствует снятию различного рода барьеров между государствами в том числе и в торговле. В глобальном масштабе метрологическая прослеживаемость определена Договоренностью о взаимном признании национальных эталонов, сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами.

В Республике Беларусь традиционно еще широко используется метрологическая практика, основанная на разработанных ранее стандартах, таких понятиях как «методика выполнения измерений», «поверка средств измерений» и т.п., базирующихся на теории погрешностей. Поверка средств измерений при этом, как один из видов деятельности, по метрологической оценке, способна обеспечить метрологическую прослеживаемость согласно поверочной схеме.

В данной статье предлагаются различные варианты реализации схем метрологической прослеживаемости в процессе калибровки средств измерения температуры погружного типа, разработанных согласно государственных поверочных схем. Результаты поверки используются также и для разработки методики оценки неопределенности измерений. Все эти разработки в совокупности с имеющимся поверочным оборудованием и предлагаемыми методиками калибровки позволили организовать оптимальные калибровочные места для термометров определенного типа.

Так, в статье предлагается «унифицированное» калибровочное место, суть методики калибровки которого заключается в том, что она реализуется «от обратного». Имея определенный парк эталонного оборудования и оборудования, воспроизводящего заданную температуру, а также на основании точностных характеристик калибруемого средства измерения, становится возможным проводить калибровку широкого спектра средств измерений в заданном диапазоне температур с заданной точностью путем целенаправленного подбора необходимого оборудования. Таким образом, реализуется

гибкая математическая модель методики калибровки, которая зависит только от имеющегося в наличии на данный момент оборудования.

При разработке схемы метрологической прослеживаемости за основу была принята государственная поверочная схема, регламентированная стандартом ГОСТ 8.558-2009 «Государственная поверочная схема для средств измерений температуры». Схема отражает иерархию средств измерения температуры и нормирует на каждом этапе передачи размера конкретные интервалы погрешности СИ и методы передачи.

Для демонстрации метрологической прослеживаемости необходимо документально подтвердить неопределенность калибровки на каждом этапе и рассчитать итоговую неопределенность всей цепочки, ведущей от рабочего СИ к эталону. С этой целью был проведен анализ метрологических характеристик наиболее востребованных средств измерений температуры – показывающих термометров погружного типа в диапазоне температуры от 193,15 К до 1473,15 К с пределом допускаемой абсолютной погрешности Δ от 0,05 °С до 1,00 °С. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что указанные термометры относятся к группе рабочих СИ. Схема цепочки метрологической прослеживаемости при калибровке термометров погружного типа показана на рис. 1.

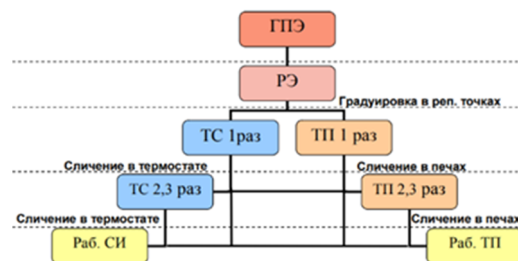


Рисунок 1 – Упрощенная схема передачи единицы температуры

На рис. 1 обозначено: ТС – термометр сопротивления, ТП – термопара, СИ – любые рабочие средства измерения температуры.

Методика оценки неопределенности при калибровке устанавливается исходя из математической модели процесса калибровки. При этом основными факторами, влияющими на суммарную неопределенность калибровки являются стандартная неопределенность, расширенная неопределенность и комбинированная стандартная неопределенность.

Литература

1. Дивин, А. Г. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин: учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов: Издательство ФБГОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с.
2. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений [Электронный ресурс] : Постановление

государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 42. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W22136599>. – Дата доступа: 10.10.2022.

3. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Поверка средств измерений. Правила проведения работ : ТКП 8.003-2011 (03220). – Госстандарт. – Введ. 01.01.2012. – 26 с.

4. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения : СТБ ИСО 5725-1. – Госстандарт. – Введ. 01.07.2003. – 28 с.

5. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-2. – Госстандарт. – Введ. 01.01.2022. – 68 с.

6. СТБ ИСО 5725-3 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода». – Госстандарт. – Введ. 01.07.2003. – 36 с.

7. СТБ ИСО 5725-4 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные

методы определения правильности стандартного метода измерений». – Госстандарт. – Введ. 26.03.2020. – 34 с.

8. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем : СТБ 2450-16. – Госстандарт.

9. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры : ГОСТ 8.558. – Стандартинформ. – Введ. 01.07.2012. – 26 с.

10. СТБ 8014 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения». – Госстандарт. – Введ. 01.07.2001. – 16 с.

11. Об обеспечении единства измерений [Электронный ресурс] : Закон Республики Беларусь от 5 сентября 1995 г. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19503848>.

12. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий : ISO/IEC 17025-2019. – Стандартинформ. – Введ. 01.09.2009. – 32 с.

13. Рекомендация КООМЕТ. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности : СОМЕТ R/GM/32:2017. – Минск: Коомет, 2017. – 43 с.

УДК 528.021

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ В УСЛОВИЯХ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ПРЕЦИЗИОННОСТИ

Козаченков С.А.

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений
р.п. Менделеево, Солнечногорск, Московская обл., Российская Федерация*

Аннотация. Проведен анализ состояния эталонной базы средств измерений длины. Приведены результаты промежуточных исследований перспективного метрологического комплекса. Предложены вариант и схема создания линейного полевого эталонного базиса.

Ключевые слова: эталон, средство измерения длины, метрологический комплекс.

THE RESULTS OF THE STUDY OF A PROMISING METROLOGICAL COMPLEX OF LENGTH MEASUREMENT IN CONDITIONS OF INTERMEDIATE PRECISION

Kozachenkov S.

*Russian metrological institute of physico-technical and radio-technical measurements
Mendeleevo, Solnechnogorsk, Moscow region, Russian Federation*

Abstract. The analysis of the state of the reference base of length measuring instruments is carried out. The results of intermediate studies of a promising metrological complex are presented. A variant and a scheme for creating a linear field reference basis are proposed.

Key words: standard, means of measuring length, metrological complex.

Адрес для переписки: Козаченков С.А., р.п. Менделеево, Солнечногорск, Московская обл., 141570, Российская Федерация, e-mail: ksa@vniiftri.ru

На протяжении многих лет странами ЕС и США против Российской Федерации вводятся экономические санкции разного характера. Одним из запретов является экспорт лазерных технологий и оптико-волоконного оборудования.

В современном мире науки и техники России, а в частности в развитии способов решения различных задач в области дальнометрии, остро стоит вопрос создания отечественного эталонного комплекса средств метрологического обеспечения средств измерения длины в полевых условиях.

Одной из таких разработок является макет высокоточного метрологического комплекса средств измерений приращений координат (далее по тексту –

комплекс) созданный специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» в рамках опытно-конструкторской работы.

Особенностью данного комплекса является воспроизведение единицы длины в полевых условиях в соответствии с международным определением метра.

Исследования метрологических характеристик комплекса проводились в условиях промежуточной прецизионности измерений [3] с использованием геодезических пунктов из состава астрономо-геодезического полигона комплекса средств метрологического обеспечения средств измерения азимута.

Основным компонентом комплекса, является неравноплечий интерферометр Майкельсона имеющий в своем составе фемтосекундный лазер, который стабилизирован по частоте повторения импульсов с рубидиевым стандартом частоты в качестве опорного генератора, обеспечивая связь единиц длины и частоты.

Для воспроизведения единицы длины на основе фемтосекундного лазера применялся метод [1], основанный на регистрации максимумов совпадения фемтосекундных импульсов, который позволяет воспроизводить единицу длины равную 2,5 м, определяемую частотой повторения импульсов лазера равной 61 МГц.

Сутью данного метода воспроизведения длины [1] является получение интерференционной картины в результате работы устройства внутрифазовой модуляции при совпадении фемтосекундных импульсов от опорного и измерительного плеча интерферометра.

Интерференционная картина [3] представляет собой сигнал интерференции двух совмещенных в пространстве лазерных пучков в точках *A*, *B* («реперные» точки), в зависимости от дистанции *L* вдоль измеряемой линии. Расстояния между точками *A*, *B* и соседними реперными точками *C*, *D* имеют одинаковую протяженность (рис. 1).

$$|AB| = \frac{c}{2nF} = |BC| = |CD|, \quad (1)$$

где *c* – скорость света в вакууме; *n* – показатель преломления среды; *F* – частота повторения фемтосекундных импульсов.

Показатель *n* рассчитывается по данным метеопараметров (температура, давление, влажность).

На макете комплекса, реализующего вышеописанный метод, были проведены экспериментальные исследования стабильности положения «реперного» узла, чувствительности к изменению длины при разности хода волн интерферометра на дистанциях 309 м и 421 м, соблюдая условия промежуточной прецизионности (измерения выполнялись многократно на одних и тех же пункта в течение длительного периода времени).

Результаты проведенных исследований макета высокоточного метрологического комплекса средств измерений приращений координат (длины) в полевых условиях показывают, что воспроизведение единицы длины с использованием аппаратуры из состава комплекса позволяет создать эталон воспроизведения длины в полевых условиях с получением СКО результата измерения менее 11 мкм.

В процессе дальнейшего развития метрологического комплекса средств измерения приращений координат (длины) и поддержания в готовности к применению по назначению эталонной базы метрологического обеспечения средств измере-

ния длины, планируется проектирование и строительство эталонного линейного полевого базиса (далее по тексту - базиса), интегрировав его в уже существующий астрономо-геодезический полигон расположенный на территории ФГУП «ВНИИФТРИ», что позволит в будущем проводить совместные измерения длины и углов при выполнении метрологических работ различного характера.

Эталонный линейный полевой базис должен в себя включать:

- набор геодезических опорных пунктов (ГОП);
- комплект датчиков измерения температуры окружающей среды на каждом геодезическом опорном пункте;
- комплект датчиков измерения относительной влажности на каждом геодезическом опорном пункте;
- комплект датчиков измерения атмосферного давления на крайних и центральном ГОП;
- пункт управления и контроля работ (ПУКР) в виде одноэтажного легко возводимого здания, где предусмотрено рабочее место оператора оборудованное ПВЭМ и волоконно-оптической линией связи с выходом в сеть «Интернет» (создание локальной сети) для передачи, контроля и регистрации метеорологических параметров получаемых с метеодатчиков, а также дистанционного управления средствами измерений.

Здание ПУКР подключено к электрической сети и оборудовано телефонной связью, внутри установлена система поддержания температурно-влажностного режима (система кондиционирования воздуха) для комфортного проведения метрологических работ;

– электрическую сеть для электроснабжения всех элементов базиса.

На всем протяжении измерительной линии от первого до последнего геодезического опорного пункта базиса планируется дополнительно установить защитные экраны, с целью создания приблизительно однородной метеорологической среды, а также для защиты от случайного попадания в створ базиса посторонних целей и предметов.

Перспективный комплекс средств метрологического обеспечения средств измерения длины в полевых условиях предполагает объединение в себе эталона воспроизведения единицы длины и базиса, что позволит в будущем решать задачи научного и прикладного характера по метрологическому обеспечению большого спектра современной измерительной техники.

Литература

1. Воспроизведение единицы длины в диапазоне от 64 до 575 м с применением фемтосекундного лазера / Д. А. Соколов [и др.] // Вестник метролога, 2021. – 3 с.

2. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

3. Козаченков, С. А. Перспективы метрологического обеспечения геодезических средств измерений в части поверки линейных характеристик в лабораторных условиях в диапазоне до 300 метров / С. А. Козаченков, Д. А. Соколов. – Сборник: Актуальные проблемы метрологического обеспечения научно-практи-

ческой деятельности. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: САФУ, 2019. – 214-217 с.

4. Способ воспроизведения единицы длины в лазерных дальнометрах на основе интерферометра Майкельсона : патент РФ 2698699 / С. А. Губин, Д. А. Соколов, В. М. Татаренков. – Опубл. 29.08.2019.

УДК 53.089

МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕАДДИТИВНОЙ ВЕЛИЧИНЫ (ТЕОРИЯ РЕЙТИНГОВ)

Романчак В.М., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена модель измерения неаддитивной величины, в частности модель субъективного измерения. Рассмотрена обобщенная структура модели измерения, которая включает эмпирическую систему, математическую систему и гомоморфизм эмпирической системы в числовую систему. Установлено, что основными недостатками классических теорий измерения являются: 1) гомоморфизм не отображает операции в системах, что позволило бы говорить об осмысленности теоретической модели измерений; 2) отсутствует модель эмпирического измерения, которая могла бы подтвердить существование гомоморфизма. Для преодоления недостатков существующих теорий определено уравнение измерения, связывающее результаты отображения эмпирической операции в числовую, а также сформулирована модель эмпирического измерения. Для этого предложено использовать скорректированную модель Стивенса, которая дополнена принципом отражения Дж. Барзилая.

Ключевые слова: теория измерений, рейтинг, функция полезности, квалиметрия.

NON-ADDITIVE QUANTITY MEASUREMENT MODEL (RATING THEORY)

Romanchak V., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This work considers a model for measuring non-additive quantities, in particular a model for subjective measurement. For this, a structure was considered that included an empirical system, a mathematical system, and a homomorphism of the empirical system into a numerical system. The main shortcomings of classical measurement theories seem to be: 1) homomorphism does not display operations (in this case, one cannot speak of the meaningfulness of the model); and 2) there is no empirical measurement model that could confirm the existence of a homomorphism. To overcome the shortcomings of existing theories, a definition of the measurement equation is given. As a result, a measurement model is obtained that is free from the shortcomings of classical measurement theories. The model uses the corrected model of S. Stevens and the reflection principle of J. Barzilai.

Key words: measurement theory, rating, utility function, qualimetry.

*Адрес для переписки: Романчак В.М., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Romanchak@bntu.by*

В настоящее время в теории измерений появились новые тенденции, которые необходимо учитывать для обоснования процесса субъективного измерения [1]. Например, предложена математическая модель эмпирической системы [2, 3]. Недостатком теорий измерения является отсутствие уравнения измерения. Чтобы реализовать на практике процедуру измерения, т. е. проводить эмпирические измерения, необходимо определить модель измерения.

Получена модель измерения, на основании которой сформулирована новая классификация шкал измерения [4, 5]. В новой модели значения величины определены в шкале интервалов, и (или) в шкале лог-интервалов. Шкала отношений – это

шкала интервалов, в которой определен нулевой элемент – начало отсчета. Шкала отношений является вспомогательной шкалой. Кроме того, для модели измерения выполняются принципы:

Принцип отражения [2]. Необходимым условием применимости операций над значениями шкалы является существование соответствующей эмпирической операции.

Принципу эквивалентности [4]. Результаты измерения, полученные в шкале интервалов и шкале лог-интервалов, эквиваленты.

Из принципа эквивалентности органично следуют:

– эмпирический закон Стивенса в форме парных сравнений [4];

- эмпирический закон Фехнера в форме парных сравнений [4];
- модель Раша [7].

Выделение четырех шкал измерения было проведено С.С. Стивенсом еще в 1946 году. Позже С.С. Стивенс добавил к ним пятую – шкалу логарифмических интервалов, однако потом посчитал ее бесполезной и в настоящее время ее не применяют. Модель Стивенса можно рассматривать с позиции концепции современного реализма [1]. Например, Дж. Мишель считает, что эмпирические структуры, поддерживающие измерение, должны естественным образом создавать, а не присваивать действительные числа. Такую эмпирическую структуру рассматривал в 1923 г. академик А. Фридман. Аналогичные структуры использовал С.С. Стивенс в качестве уравнения измерения.

Следует отметить, что хотя шкала измерений Стивенса была включена в репрезентативную теорию измерений, модель измерения Стивенса до недавнего времени в теории измерений не рассматривалась. Это привело к тому, что появились многочисленные варианты обработки экспертных оценок, которые не опираются на адекватную модель измерений.

На первый взгляд концепция шкалирования С.С. Стивенса выглядит убедительно и только наличие «ненужной» пятой шкалы нарушает логику изложения. По мнению С.С. Стивенса шкала лог-интервалов интересна с математической точки зрения, но, как и многие математические модели, она доказала свою эмпирическую бесполезность.

Покажем, что такое утверждение является спорным. Для этого достаточно сравнить между собой значения неаддитивной величины. Плотность является примером неаддитивной величины. Например, если значения плотности двух образцов равны 1 кг/м^3 и 2 кг/м^3 , то непонятно что будет означать сумма значений.

По определению С.С. Стивенса шкала отношений – это шкала, в которой значения величины определены с точностью до постоянного множителя [4]. Ее числовые значения могут быть преобразованы (например, из метров в сантиметры). Плотность является неаддитивной величиной, поэтому ее нельзя измерить в шкале отношений. Плотность можно определить в шкале лог-интервалов, так как для плотности определены отношения значений. Поэтому есть основания считать, что модель Стивенса требует исправления.

Установлено, что в теории измерений нет уравнения измерения, определяющего естественную связь между эмпирической и математической системами. Реалистический принцип получения масштабных значений формируется на основе модели Стивенса.

Исправленная модель Стивенса является обоснованием классификации шкал измерений. Тем самым решена проблема выбора шкалы измерений, так как шкала измерений должна соответствовать уравнению измерений. Значения величины определены в шкале интервалов, если определяют разности значений, и в шкале лог-интервалов, если определяют отношения значений.

Из модели измерения Стивенса следует, что обе шкалы измерения могут использоваться одновременно для измерения одной и той же величины. При этом результаты измерений в этом случае эквивалентны. На этом основании формулируется принцип эквивалентности. Из которого следует, что противоречия между эмпирическими законами Фехнера и Стивенса не существует. Показано, что они эквивалентны. Поэтому предложенная модель измерения имеет убедительное экспериментальное подтверждение.

Дано определение уравнения измерения. Уравнение измерения отображает эмпирическую систему в числовую систему. Из уравнения измерения следует определение шкалы измерений. В целом сформирована концепция измерения, рассматривающая субъективные и объективные измерения с единой точки зрения.

Кроме того показано, что расширенный анализ экспертных оценок может быть выполнен с использованием предложенной модели измерения. Предлагаемая модель измерения, может найти применение в теории принятия решений, теории полезности, квалиметрии при проведении экспертных оценок.

Литература

1. Michell, J. Quantitative science and the definition of measurement in psychology / J. Michell // *British Journal of Psychology*. – 1997. – № 88. – P. 355–383.
2. Barzilai, J. Inapplicable Operations on Ordinal, Cardinal, and Expected Utility / J. Barzilai // *Real-World Economic Review*. – 2013. – № 63. – P. 98–103.
3. Barzilai, J. Preference function modelling: the mathematical foundations of decision theory / J. Barzilai // *Trends in multiple criteria decision analysis*. – 2010. – С. 57–86.
4. Романчук, В. М. Измерение нефизической величины / В. М. Романчук // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2017. – № 4. – С. 39–44.
5. Романчук, В. М. Субъективные измерения (теория рейтингов) // В. М. Романчук // *Журнал Белорусского государственного университета. Философия. Психология*. – 2020. – № 3. – С. 87–98.
6. Briggs, D. C. Interpreting and visualizing the unit of measurement in the Rasch Model / D. Briggs // *Measurement*. – 2019. – Vol. 146. – P. 961–971.
7. Lubashevsky, I. Psychophysical laws as reflection of mental space properties / I. Lubashevsky // *Phys. Life Rev.* – 2019. – № 31. – P. 276–303.

УДК 389.1

ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Романчак В.М., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложен подход разработки процесса оценивания неопределенности методики измерений, в основу которого положен метод морфологического ящика как метод разработки многомерных объектов в случаях, когда обычные методы моделирования не дают нужного результата. Основные положения подхода адаптированы к задаче разработки приемлемого для конкретного случая метода оценивания неопределенности результата измерений.

Ключевые слова: метод измерений, результат измерений, неопределенность, морфологический ящик.

APPLICATION OF A MORPHOLOGICAL APPROACH TO DEVELOP THE METHOD FOR ESTIMATION OF THE MEASUREMENT RESULTS UNCERTAINTY

Romanchak V., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An approach is proposed for developing a process for estimating the uncertainty of a measurement technique, which is based on the morphological box method as a method for developing multidimensional objects in cases where conventional modeling methods do not give the desired result. The main provisions of the approach are adapted to the task of developing an acceptable method for estimating the uncertainty of the measurement result for a particular case.

Key words: measurement method, measurement result, uncertainty, morphological box.

*Адрес для переписки: Серенков П.С., ул. Я. Коласа, 22, 518, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by*

В научных исследованиях существует правило: если задача имеет общее теоретическое решение, практическая реализация которого в конкретном случае невозможна, то среди альтернативных методов ее приближенного решения наиболее достоверным (надежным) считается тот, который методологически ближе всего к теоретическому решению.

В настоящее время выделяют три общепринятых способа количественной оценки неопределенности измерения:

а) модельный подход, изложенный в руководстве по выражению неопределенности GUM (ГОСТ 34100.3-2017/ ISO/IEC Guide 98-3/ 2008);

б) метод моделирования Монте-Карло (ГОСТ 34100.3.1-2017/ ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008);

в) эмпирические методы, основанные на использовании результатов внутрилабораторных или межлабораторных исследованиях методов измерений (испытаний) (СТБ ISO/TS 21748-2019).

Естественным образом сформировался так называемый комбинированный подход к оцениванию неопределенности как комбинация модельного и эмпирического подходов при исследовании одного и того же метода измерений изложенный в СТБ ISO/TS 21748-2019.

Примечание. Общепринятыми считаются методы, которые изложены в ТНПА или иных источниках, типа «наилучшие метрологические практики».

Приведенные выше методы являются альтернативами друг для друга. Очевидно уверенности в преимуществах того или иного метода и, как следствие, в достоверности оценки неопределенности результатов измерений нет по-прежнему.

Возникает необходимость в разработке новых методов оценки неопределенности для конкретных методов измерений и ситуаций, в которых они реализуются.

Предлагается формировать методику оценки неопределенности из отдельных элементов. При этом элементами выступают этапы процесса оценки неопределенности. Выдвинута гипотеза о возможности использования морфологического подхода. Адаптация морфологического подхода как техники «морфологического ящика» к решению задачи оценивания неопределенности предполагает реализацию четырех этапов:

1 – выявление влияющих факторов (данный этап необходим при любом методе оценки неопределенности),

2 – входные величины,

3 – составление функции связи (модели измерения),

4 – трансформирование законов распределения.

Первый этап не рассматривается в докладе, так как выявление влияющих факторов является общеметодологической задачей и методы, применяемые для ее решения, следует искать в задачах

менеджмента качества. В табл. 1 представлен вариант морфологического ящика, построенного на процессном подходе, с помощью которого можно формировать альтернативные методики оценивания неопределенности как комбинацию этапов 2–4 процесса оценки неопределенности.

Таблица 1. Морфологический ящик оценки неопределенности

Этапы	Варианты			
	По типу А, по типу В			
	\bar{X} (экспериментально, априорно)			
Входные величины*	σ (экспериментально, априорно)			
	Функция связи (модель измерения)	Функция связи известна (модельный подход)		Функция связи неизвестна
точно (физическая модель)		приближенно (например, ряд Тейлора)	Эмпирический подход (регрессионная модель по результатам эксперимента)	
Трансформирование законов распределения	Закон распределения не используется (частотный подход)		Закон распределения используется (байесовский подход)	
	Пересчет параметров распределения		аналитическое решение (вычисление интеграла)	численное решение
*Следует учитывать тот факт что входные величины могут рассматриваться как дискретные или непрерывные и следовательно расчеты будут производиться по разному				

Представленный выше морфологический ящик можно рассматривать как инструмент и для формирования новых методов оценивания неопределенности. С его помощью можно формировать эффективный метод для конкретной поставленной задачи, сочетая различные варианты реализации данных этапов.

На рис. 1–3 представлены примеры формирования трех различных методик оценивания неопределенности, включающих различные реализации каждого из этапов 2...4.

С помощью морфологического ящика возможно обосновать разработку нового метода, состоящего из любого сочетания его элементов (рис. 3). Представленное на рис. 3 сочетание представляет из себя альтернативу методу Монте-Карло и решает задачу трансформирования законов распределения численными методами.

Реализация четвертого элемента морфологического ящика «аналитическое решение (вычисление интеграла)» (см. рис. 3) была разработана в БНТУ и была названа авторами как «метод последовательных трансформаций», который предна-

значен для оценивания неопределенности измерений при заданной математической модели измерений с произвольным числом входных величин и единственной выходной величиной.

Этапы	Варианты			
	По типу А по типу В			
	\bar{X} (экспериментально, априорно)			
Входные величины	σ (экспериментально, априорно)			
	Функция связи (модель измерения)	Функция связи известна (модельный подход)		Функция связи неизвестна
точно (физическая модель)		приближенно (например, ряд Тейлора)	эмпирический подход (регрессионная модель по результатам эксперимента)	
Трансформирование законов распределения	Закон распределения не используется (частотный подход)		Закон распределения используется (байесовский подход)	
	пересчет параметров распределения		аналитическое решение (вычисление интеграла)	численное решение

Рисунок 1 – Реализация метода GUM через морфологический ящик

Этапы	Варианты			
	По типу А по типу В			
	\bar{X} (экспериментально, априорно)			
Входные величины	σ (экспериментально, априорно)			
	Функция связи (модель измерения)	Функция связи известна (модельный подход)		Функция связи неизвестна
точно (физическая модель)		приближенно (например, ряд Тейлора)	эмпирический подход (регрессионная модель по результатам эксперимента)	
Трансформирование законов распределения	Закон распределения не используется (частотный подход)		Закон распределения используется (байесовский подход)	
	пересчет параметров распределения		аналитическое решение (вычисление интеграла)	численное решение

Рисунок 2 – Реализация метода Монте-Карло через морфологический ящик

Этапы	Варианты			
	По типу А по типу В			
	\bar{X} (экспериментально, априорно)			
Входные величины*	σ (экспериментально, априорно)			
	Функция связи (модель измерения)	Функция связи известна (модельный подход)		Функция связи неизвестна
точно (физическая модель)		приближенно (например, ряд Тейлора)	эмпирический подход (регрессионная модель по результатам эксперимента)	
Трансформирование законов распределения	Закон распределения не используется (частотный подход)		Закон распределения используется (байесовский подход)	
	пересчет параметров распределения		аналитическое решение (вычисление интеграла)	численное решение

Рисунок 3 – Формирование нового метода через морфологический ящик

УДК 621

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОТСЛЕЖИВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Саечников И.В., Скакун В.В., Чернявская Э.А.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Последние тренды в развитии микроэлектроники для малых космических и беспилотных аппаратов открывают широкие перспективы для внедрения методов идентификации и отслеживания в системах компьютерного зрения. В данной работе мы предлагаем подобный метод и его программную реализацию для автономной системы компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов. Метод основан на идентификации глубокой нейронной сетью YOLOv5tr и отслеживании двунаправленной сетью „долгой краткосрочная память“, дополненной сетью на базе автоэнкодера, формирующей карту признаков. Метод был обучен на отмаркированном наборе данных видеоряда с БПЛА и реализован в программной среде Python. Сравнительный анализ предложенного метода с существующими показал эффективность для практического применения на системах компьютерного зрения БПЛА.

Ключевые слова: компьютерное зрение, идентификация объекта, отслеживание объекта, нейронная сеть, беспилотный летательный аппарат (БПЛА).

**A SOFTWARE IMPLEMENTATION OF AN OBJECT IDENTIFICATION AND TRACKING
METHOD FOR AN AUTONOMOUS COMPUTER VISION SYSTEM OF AN UNMANNED
AERIAL VEHICLE**

Saetchnikov I., Skakun V., Tcherniavskaia E.

*Belarussian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Recent trends in the development of microelectronics for small spacecrafts and drones offer broad prospects for the implementation of identification and tracking methods in computer vision systems. In this paper, we propose a similar method and its software implementation for an autonomous computer vision system for unmanned aerial vehicles. The method is based on the identification by a deep neural network YOLOv5tr and tracking by a bi-directional network „long short-term memory, augmented by an autoencoder-based network that forms a feature map. The method was trained on a labelled UAV video dataset and implemented in a Python software environment. A comparative analysis of the proposed method with existing ones showed the effectiveness for practical application on UAV computer vision systems.

Key words: computer vision, object identification, object tracking, neural network, unmanned aerial vehicle (UAV).

*Адрес для переписки: Саечников И.В., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: saetchnikovivan@gmail.com*

В течение последних десятилетий область компьютерного зрения сделала заметный рыбок в задачах обнаружения объектов и их семантического анализа [1, 2]. При этом одним из наиболее перспективных областей применения являются системы компьютерного зрения [3], установленный на беспилотных летательных аппаратах. Однако, сценарии обнаружения и сопровождения объектов с беспилотных летательных аппаратов, особенно методами на основе глубокого обучения, сопровождаются требованиями устойчивости метода к спецификам перспективы съемки, сложности внешнего фона, варьировании высот съемки и т. д. [4, 5]. С другой стороны с точки зрения практического применения программная реализация должна быть аппаратно кросс-платформенна, чтобы обученные нейронные сети можно было запускать в реальном времени на борту беспилотного летательного аппарата.

Таким образом, в данной работе представлен разработанный адаптивный метод идентификации и отслеживания объектов и его программная реализация для автономной системы компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов.

Метод включает 3 основных этапа: формирование карты признаков кадров видеоряда путем прогона дифференциальных изображений через нейронную сеть на основе автоэнкодера, детектирование объекта техникой YOLOv5tr (дополненная 5-ю парами CSP, заменой на Mish активацию, размер входной якорной ячейки 10x10) и техника отслеживания двунаправленной нейронной сетью “долгой краткосрочная память” (LSTM) с заменой полностью связанных слоев сверточными, что улучшает понимание сети пространственно-временной связи. Двунаправленная сеть позволяет обучаться в обоих направлениях временной последовательности входного сигнала, что заметно улучшает

точность прогнозирования последующего состояния объекта на видеокдрах.

Обучение и тестирование проводилось на базе как самостоятельного набора данных, так и на предразмеченных кадрах видеорядов датасетов VisDrone 2020 и DTB70 [5]. При этом проводилось ранжирование выборок по высоте съемки от 10 до 50 м с шагом 10 для более скорого обучения сетей. Окончательный датасет включал 150 видеопоследовательностей общей длительностью 2 часа 20 минут с 40 % отмаркированными кадрами. После предобработки, включающей приведение к единому разрешению и разбивки на батчи, данные проходили процесс обучения через 3 этапа шаг за шагом.

Программная реализация метода была выполнена в среде Python с задействованием специализированных библиотек для анализа данных (например, Pandas, matplotlib, keras, и т. д.), а также библиотек для машинного обучения и построения нейронных сетей TensorFlow и Pytorch. Процесс обучения метода происходил следующим образом: после высчитывания дифференцирующего изображения он подавался на автоэнкодер, результат в виде карты признаков и соответствующих изображений шли на сеть детектирования объектов. По аннотируемым bounding boxes происходило обучение сети YOLOv5tr. Далее результаты работы сети YOLOv5tr, карты признаков построенные автоэнкодером подавалась на вход двунаправленной сети LSTM, которая в конечном счете после обучения выдавала прогноз по месторасположению объекта на следующем кадре с значением confidence score. Работа метода оценивалась по 6 метрикам [6]. Результаты работы метода представлены в таблице 1. Для сравнительного анализа эффективности метода по сравнению с конкурирующими решениями, были оптимизированы и протестированы на том же наборе выборок методы DeepSort и FairMot.

Таблица 1. Результаты работы метода идентификации и отслеживания объектов с БПЛА

	MOTA ↑ (%)	MOTP ↑ (%)	IDsw ↓
Предложенный метод	56,7	70,6	51
DeepSort	51,2	70,1	89
FairMot	44,5	67,2	153
	FN ↓ (%)	FP ↓ (%)	MT ↑
Предложенный метод	9,3	16,2	152
DeepSort	15,6	15,9	115
FairMot	11,1	25,4	124

где MOTA – Accuracy отслеживания объектов, MOTP – Precision отслеживания объектов, FN – false negative, FP – false positive, MT – mostly tracked, ML – mostly lost, IDsw – количество ложной смены ID.

Предложенный метод превзошел DeepSort и FairMot по двум основополагающим метрикам идентификации и отслеживания MOT и MOTP достиг значений 56,7 и 70,6 соответственно. Стоит отметить, что метод имеет значительное преимущество по метрике IDsw, что с нашей точки зрения связано с эффективно обученной техникой отслеживания, в частности, двунаправленной сетью, что позволяет оптимизировать долгосрочные и краткосрочные знания об объектах. Более низкое значение метрики FN нивелируется комплексной метрикой MOTA, составной частью которой она является.

Таким образом, результаты точности адаптивного метода идентификации и отслеживания показывают перспективу внедрения в рамках системы компьютерного зрения БПЛА. В частности, предварительно обученный метод, запущенный на компьютере Nvidia Jetson Nano, дополненный модулем передатчика, будет способен в режиме реального времени обрабатывать объекты на изображениях и получать данные для идентификации параметров обратных задач с последующей их передачей на землю. Совместимость программного кода с фреймворком Nano позволяет использовать DeepStream SDK на борту БПЛА.

Литература

1. Martinez-Martin, E. Object Detection and Recognition for Assistive Robots: Experimentation and Implementation / E. Martinez-Martin, A. P. del Pobil // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2017. – Vol. 24, №. 3. – P. 123–138.
2. The Unmanned Aerial Vehicle Benchmark: Object Detection and Tracking / Du, Dawei [et al.].
3. Online Multi-object Tracking Using CNN-Based Single Object Tracker with Spatial-Temporal Attention Mechanism / Q. Chu [et al.] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2017. – P. 4846–4855.
4. Saetchnikov, I. Pattern recognition on aerospace images using deep neural networks / Saetchnikov, V. Skakun and E. Tcherniavskaia // IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2020. – P. 336–340.
5. Saetchnikov, I. Object detection for unmanned aerial vehicle camera via convolutional neural networks / I. Saetchnikov, E. A. Tcherniavskaia, V. V. Skakun // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – 2020.
6. Saetchnikov, I. Efficient objects tracking from an unmanned aerial vehicle / I. Saetchnikov, V. Skakun E. Tcherniavskaia // IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2021. – P. 221–225.

УДК 53.088.22

**ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОСАНКИ ЧЕЛОВЕКА
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТА**

Самохвал П.М., Бельский И.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проблема нарушения осанки является одной из проблем современности [1, 2]. В своей работе «Коррекция функциональных нарушений опорно-двигательного аппарата у детей 5–6 лет с учетом пространственной организации их тела» Бондарь Е.М. [3], отмечает, что нарушения осанки, кроме влияния на внутренние органы, часто приводят к формированию стойких деформаций других компонентов опорно-двигательного аппарата и является предшественником таких заболеваний опорно-двигательного аппарата, как сколиоз, остеохондроз, межпозвоночная грыжа. В данной статье расписан расчет неопределенности результата измерений параметров осанки человека по фотографии.

Ключевые слова: осанка, неопределенности измерений, погрешность измерений, модель измерений.

**PAPE SUBSTANTIATION OF THE MODEL OF MEASUREMENTS OF HUMAN POSTURE
PARAMETERS TO PROVIDE A RELIABLE ASSESSMENT OF THE UNCERTAINTY
OF THE RESULT**

Samokhval P., Belsky I.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The problem of posture disorder is one of the problems of our time [1, 2]. In his work «Correction of functional disorders of the musculoskeletal system in children aged 5–6 years, taking into account the spatial organization of their body» Bondar E.M. [3], notes that posture disorders, in addition to affecting internal organs, often lead to the formation of persistent deformities of other components of the musculoskeletal system and is a precursor to such diseases of the musculoskeletal system as scoliosis, osteochondrosis, and intervertebral hernia. This article describes the calculation of the uncertainty of the result of measuring the parameters of a person's posture from a photograph.

Key words: posture, measurement uncertainties, measurement error, measurement model.

*Адрес для переписки: Самохвал П.М., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: p.samokhval@yandex.ru*

Нарушение, или дефект, осанки считается функциональным отклонением опорно-двигательного аппарата. В его основе лежит образование порочных условно-рефлекторных связей, что способствует закреплению неправильного положения тела в пространстве и утрате навыка правильной осанки [4]. Поэтому нарушения осанки оказывают негативное влияние на организм человека. Изменение в той или иной области позвоночного столба вызывают изменения во всем организме в целом. Для преждевременного выявления нарушений, нужны надежные и доступные методики контроля нарушений для своевременного выявления и коррекции.

Для выявления нарушений и своевременного контроля параметров осанки нами на базе Белорусского национального технического университета создана методика оценки параметров осанки человека по фотографии. В данной работе рассмотрена модель измерений параметров осанки человека для обеспечения достоверной оценки неопределенности результата.

Требование к оцениванию неопределенности измерений заложено в межгосударственном стандарте ГОСТ 34100.3 – 2017/ISO/IEC Guide 98 – 3:2008, а также политике ILAC-G17:2002.

Базовые понятия классической теории погрешности – истинное значение, действительное значение и погрешность измерения – не вводятся (при этом подразумевается, что истинное (действительное) значение величины существует, поскольку признается, что целью измерения является нахождение этого значения) [5].

Вводится понятие неопределенность измерения. При этом термин неопределенность вводится в двух смыслах [5]:

1. Как сомнение, неполное знание о значении измеряемой величины после проведения измерений.
2. Для характеристик этого неполного знания.

Таким образом неопределенность измерения есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине [5].

В большинстве случаев измеряемая величина Y не является прямо измеряемой, а зависит от других измеряемых величин X_1, X_2, \dots, X_N рис. 1.

Таким образом, измеряемую величину Y представляют как:

$$Y = f(x_{ind}, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) входные величины; Y – выходная величина.



Рисунок 1 – Процесс преобразования измеряемой величины в процессе измерения

Иногда, в более простом виде, выходная величина может быть выражена просто как:

$$Y = x + C_1 + C_2 + \dots + C_i, \quad (2)$$

где C_i – это поправки, например, для оператора, условий окружающей среды, лаборатории и т. д.

Именно данную формулы мы использовали в качестве основной в расчетах неопределенности.

В качестве входной величины « x » в нашей методике выступает величина изгибов позвоночного столба испытуемого в миллиметрах полученная по фотографии ио с четырех сторон (2 фотографии во фронтальной плоскости (спереди и сзади), 2 фотографии в сагиттальной плоскости (справа и слева)).

Поправки, относящиеся к нашему методу измерения, можно разложить на группы в зависимости от этапа проведения процедуры оценки осанки. Основными этапами являются:

- подготовка оборудования;
- подготовка объекта;
- выполнение измерений;
- обработка результатов.

На первом этапе можно выделить такие поправки как:

- на установку оборудования;
- объектива (величина искажения вызванная искажением на краях снимка, чаще всего зависит от типа объекта);
- на окружающие условия (падение света).

На втором этапе выделяются следующие поправки:

- на не достаточно точное объяснение процесса измерения тестируемому;
- связанную с коррекцией положения фотоаппарата относительно антропометрических параметров испытуемого (расположение камеры на уровне общего центра тяжести тела человека)

На третьем этапе можно выделить поправку связанную с погрешностью пространственного по-

ложения испытуемого во время выполнения измерений и поправку связанную с невнимательностью оператора во время проведения измерения (не сфокусированное изображение).

На четвертом этапе можно выделить следующие поправки:

- поправка связанная с квалификацией человека которые производит обработку;
- поправка позиционирования;
- математическая поправка вызванная (округлением величин и дискретностью отсчета).

Проблема вызванная нарушением осанки наблюдается у 90 % студентов высших учебных заведений. Для мониторинга и проведения мероприятий по реабилитации необходимы довольно простые и надежные средства контроля за состоянием осанки. Разработанная нами методика оценки параметров осанки человека по фотографии позволяет в полной мере контролировать состояние осанки.

В данной статье расписан расчет неопределенности результата измерений параметров осанки человека по фотографии. В качестве формулы для расчета нами выбрана упрощенная формула (2), где в качестве выходной величины у нас выступает величина изгиба позвоночника в миллиметрах. В расчете у нас присутствуют 10 поправок которые разделены на 4 группы, в зависимости от этапа проведения измерения.

Литература

1. Неинфекционные заболевания [Электронный ресурс]: Информационный бюллетень. Апрель 2017 // Всемирная организация здравоохранения. – Режим доступа: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs355/ru>.
2. Кочоманов, В. Н. Нарушения осанки у детей младшего школьного возраста – как основная причина проблемы здоровья / В. Н. Кочоманов, Р. В. Калашникова // Материалы международной научно-практической конференции. – Иркутский государственный медицинский университет Минздрава России. – 2016. – С. 100–103.
3. Бондарь, Е. М. Коррекция функциональных нарушений опорно-двигательного аппарата у детей 5-6 лет с учетом пространственной организации их тела: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. наук по физическому воспитанию и спорту: спец. 24.00.02.
4. Солодков, А. С. Физическое и функциональное развитие и состояние здоровья школьников и студентов России / А. С. Солодков // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2013. – № 3 (97). – С. 163–170.
5. Ефремова, Н. Ю. Оценка неопределенности измерений: Практическое пособие / Н. Ю. Ефремова. – Мн.: БелГИМ, 2003 – С. 50.

УДК 669.14 : 620.178.1

РАЗРАБОТКА ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОПРАВочНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ НА НЕПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сандомирский С.Г., Валько А.Л., Руденко С.П.

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получены формулы для расчета поправочных коэффициентов K при измерении твердости HV по Виккерсу на сферических и цилиндрических (вогнутых и выпуклых) поверхностях. Для расчета проведен статистический анализ данных, приведенных в нормативных документах в виде таблиц. Обоснована достаточность квадратичной функции для аппроксимации полученных зависимостей и необходимость выполнения физически обоснованного условия $K \equiv 1$ при нулевой кривизне поверхности. Показано упрощение и снижение погрешности расчета K по сравнению с рекомендованным в нормативных документах. Формулы целесообразно использовать для автоматического расчета твердости по Виккерсу на изделиях с не плоской поверхностью.

Ключевые слова: измерения твердости, метод Виккерса, не плоские поверхности, поправочные коэффициенты.

DEVELOPMENT OF FORMULAS TO CALCULATE CORRECTION FACTORS FOR VICKERS HARDNESS MEASUREMENTS ON A NON-PLANAR SURFACE

Sandomirski S., Val'ko A., Rudenko S.

*Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Formulas for calculating correction factors K for Vickers hardness measurements on spherical and cylindrical (concave and convex) surfaces were obtained. Statistical analysis of the data given in normative documents in the form of tables was carried out for calculation. The sufficiency of the quadratic function for approximating the obtained dependences and the necessity of fulfilling the physically justified condition $K \equiv 1$ at zero surface curvature have been substantiated. The simplification and reduction of the error of calculation of K as compared with that recommended in the normative documents is shown. It is advisable to use the formulas for automatic calculation of Vickers hardness on products with a non-planar surface.

Key words: hardness measurements, Vickers method, non-planar surfaces, correction factors.

Адрес для переписки: Сандомирский С.Г., ул. Академическая, 12, Минск 220072, Республика Беларусь, e-mail: sand_work@mail.ru

Измерение твердости – один из основных методов оценки прочностных характеристик металлов [1]. Твердость деталей малой толщины и поверхностных слоев определяют по Виккерсу (HV) [2]. Важным аспектом измерения твердости HV является получение ее значений на не плоской поверхности изделий. В ГОСТ [2] включены поправочные коэффициенты K , зависящие от формы (выпуклая, вогнутая, сферическая, цилиндрическая) поверхности, ее кривизны (диаметра D) и твердости (среднего арифметического d длин диагоналей отпечатка). В [2] значения коэффициентов K представлены в табличном виде. Значениям K от значения 0,995 или 1,005 с дискретностью 0,005, поставлены в соответствие значения (с точностью до третьего знака после запятой) отношения d/D . Значения K для отношений d/D , не приведенным в табл., в [2, приложение В] предлагают определять «интерполяцией» значений K , из соответствующих таблиц для значений d/D , ближайших к измеренному.

Регламентированная в [2] методика определения поправочных коэффициентов K , учитывающих форму и кривизну не плоской поверхности измеряемого изделия, не удобна в использовании

и недостаточно точна. По ней для определения значения K для полученного в результате измерения отношения d/D , используют ближайшие табличные значения d/D , точность представления которых ограничена третьим десятичным знаком после запятой. Погрешность представления этих «ближайших» значений d/D полностью включается в погрешность определения искомого коэффициента K для измеренного отношения d/D . Это снижает достижимую точность применения метода измерения твердости HV по Виккерсу для изделий с криволинейной поверхностью.

Цель доклада – разработать формулы для расчета поправочных коэффициентов K при измерении твердости HV на не плоских поверхностях, обеспечивающие упрощение расчета и снижение погрешности расчета K .

Для **разработки искомых формул** воспользуемся [3] данными о взаимосвязях значений корректирующего коэффициента K со значениями отношения d/D для поверхностей разной формы и кривизны, приведенными в табл. В.1–В.6 Приложения В ГОСТа [2]. В качестве примера в табл. 1 приведены поправочные коэффициенты K для выпуклых цилиндрических поверхностей для

случая, когда одна из диагоналей отпечатка параллельна оси цилиндра.

Таблица 1. Поправочные коэффициенты K для выпуклых цилиндрических поверхностей. Одна из диагоналей параллельна оси

K по [2]	d/D по [2]	Расчет K по (6)
0,995	0,009	0,9956
0,990	0,019	0,99091
0,985	0,029	0,98644
0,980	0,041	0,98135
0,975	0,054	0,97618
0,970	0,068	0,97101
0,965	0,085	0,96529
0,960	0,104	0,95963
0,955	0,126	0,95403
0,950	0,153	0,94855
0,945	0,189	0,94366
0,940	0,243	0,94147

Для построения корреляционных полей между значениями коэффициентов K и отношений d/D для поверхностей разной формы использована программа «Microsoft Excel» и значения K и d/D , приведенные в табл. [2]. Пример такого поля, построенного по данным табл. 1, приведен на рис. 1.

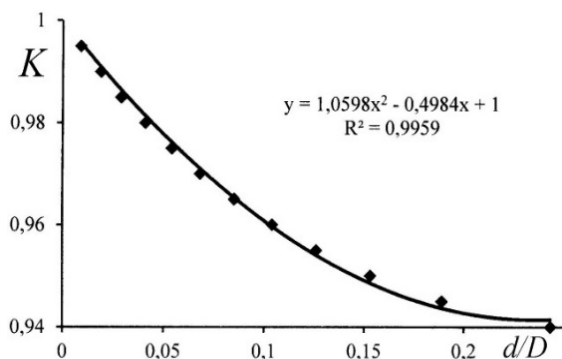


Рисунок 1 – Зависимость поправочного коэффициента K при измерении твердости HV на выпуклой цилиндрической поверхности при ориентации диагонали параллельно оси цилиндра от отношения d/D , интерполирующая их степенная линия тренда, проходящая через значение $K = 1$ при $d/D = 0$, ее уравнение и достоверность R^2 аппроксимации

Статистическая обработка корреляционных зависимостей между K и d/D , построение линий тренда (полиномы второй степени) этих зависимостей и расчет достоверности аппроксимации R^2 (квадрат коэффициента R корреляции) проведены по процедуре программы «Microsoft Excel». Отметим, что построенные линии программным путем проведены через физически верное значение $K \equiv 1$ при нулевой кривизне испытуемой поверхности (при $d/D = 0$).

Анализ результатов. Получены следующие (последовательно для случаев, указанных в табл. 2) уравнения для определения поправочных коэффициентов K по отношениям d/D при измерении твердости HV:

$$K = 1,7729 (d/D)^2 - 1,0838 (d/D) + 1, \quad (1)$$

$$K = 5,0954 (d/D)^2 + 1,1138 (d/D) + 1, \quad (2)$$

$$K = 0,4446 (d/D)^2 + 0,05759 (d/D) + 1, \quad (3)$$

$$K = 6,1573 (d/D)^2 + 0,4967 (d/D) + 1, \quad (4)$$

$$K = 0,2711 (d/D)^2 - 0,5788 (d/D) + 1, \quad (5)$$

$$K = 1,0598 (d/D)^2 - 0,4984 (d/D) + 1. \quad (6)$$

Сведения о достоверности аппроксимации R^2 и средние значения δ модуля относительного отклонения между результатами расчета K по разработанным формулам (1)–(6) и табличными [2] значениями K сведены в табл. 2.

Таблица 2. Сведения об уравнениях для расчета коэффициентов K при измерении твердости HV по Виккерсу на не плоской поверхности

Поверхность и № формулы	Расположение индентора	R^2	$\delta, \%$
Сферическая, выпуклая, (1)	Произвольно	0,9995	0,0907
Сферическая, вогнутая, (2)		0,9998	0,0456
Цилиндрическая, выпуклая, (3)	Диагонали развернуты на 45° от оси	1,0000	0,0153
Цилиндрическая, вогнутая, (4)		1,0000	0,0132
Цилиндрическая, выпуклая, (5)	Диагональ параллельна оси	0,9959	0,1069
Цилиндрическая, вогнутая, (6)		0,9986	0,1293

Анализ полученных результатов показал, что квадратичные степенные функции (1)–(6) обеспечивают близкие к «1» достоверности аппроксимации табличных данных [2] и не значительные численные отклонения при расчете K . Использование полиномов более высоких степеней или функций другого вида не имеет смысла.

Расчет K по разработанным формулам обеспечивает получение результата проще и точнее, чем регламентированная в [2] методика. Это следствие того, что формулы (1)–(6) используют в расчете не ближайшие к измеренному значению d/D табличные значения, а усредняют табличные данные по всем приведенным в табл. значениям. Полученные формулы (1)–(6) предназначены для автоматического расчета твердости HV на изделиях с не плоской поверхностью.

Литература

- Агамиров, Л. В. Физико- механические свойства. Испытания металлических материалов Машиностроение / Л. В. Алгамиров Энциклопедия : в 40 т. – М.: Машиностроение, 2010. – Т. 2–1.
- Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1 : ГОСТ Р ИСО 6507-1 – 2007. – Стандартинформ. – Введ. 01.08.2008.
- Sandomirski, S. G. Calculation of Correction Factors when Measuring Vickers Hardness on a Non-Planar Surface / S. G. Sandomirski, A. L. Val'ko, S. P. Rudenko // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13. – № 3. – С. 105–111.

УДК 666.295.4:666.75

**АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КАОЛИНОВОГО СЫРЬЯ БЕЛОРУССКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «СИТНИЦА»**

Сергиевич О.А.¹, Попов Р.Ю.¹, Богдан Е.О.¹, Дятлова Е.М.¹, Щербанев Е.Н.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе установлена возможность применения природного и обогащенного каолина «Ситница» для получения алюмосиликатных огнеупорных материалов.

Ключевые слова: алюмосиликатный огнеупор, фазовый состав, структура, спекание.

**ALUMINOSILICATE REFRACTORY MATERIALS WITH USING KAOLIN RAW MATERIALS
FROM THE BELARUSIAN DEPOSIT "SITNICA"**

Sergievich O.¹, Popov R.¹, Bogdan E.¹, Dyatlova E.¹, Shcherbanev E.²

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In work installed possibility use natural and enriched kaolin "Sitnitsa" for the production of aluminosilicate refractory materials.

Key words: aluminosilicate refractory, phase composition, structure, sintering.

Адрес для переписки: Сергиевич О.А., ул. Свердлова, 13а, Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: Topochka.83@mail.ru

Известно, что наиболее распространенные шамотные и полукислые огнеупорные изделия составляют группу алюмосиликатных огнеупоров, минеральной основой которых являются муллит, кристаллические модификации кремнезема и кремнеземистое стекло со значительным содержанием глинозема [1]. В Республике Беларусь алюмосиликатные огнеупоры широко используют в машиностроении, химической, керамической, стекольной, цементной и других отраслях промышленности. Вся потребность в огнеупорах удовлетворяется за счет их импорта из других стран, т. к. собственного производства таких изделий в РБ нет, что обусловлено отсутствием доступного огнеупорного сырья, хотя в Республике имеются месторождения каолинов. Наиболее перспективным месторождением с точки зрения практического использования являются каолины белорусского месторождения «Ситница» [2].

Таким образом, целью данного исследования является разработка составов масс с использованием природного и обогащенного каолинов «Ситница» для получения алюмосиликатных огнеупорных изделий (шамотных и полукислых), отвечающих требованиям ГОСТ 28874-2004 «Огнеупоры. Классификация».

Месторождение первичных каолинов «Ситница» расположено в Лунинецком районе Брестской области. Мощность каолинов по контуру месторождения составляет 2,0–9,1 м, средняя – 3,6 м, определены запасы в 1,714 млн.т по категории С₁ и 0,695 млн.т – по С₂. Средний выход обогащенного каолина около 30 %.

Опытные сырьевые композиции содержали природный или обогащенный каолин «Ситница»,

пластичную огнеупорную глину и алюмосиликатный шамот. В составах масс на основе обогащенного каолина «Ситница» содержание Al₂O₃ находится в пределах 35,5–36,5 %, что является предпосылкой увеличения огнеупорности и других термомеханических характеристик полученных шамотных огнеупорных материалов. После обжига образцы имели удовлетворительный внешний вид без признаков деформации.

На основе анализа данных физико-механических свойств опытных образцов установлено оптимальное соотношение каолина, огнеупорной глины и шамота (К:Г:Ш = 1,5:1:2,5), обеспечивающее хорошее спекание и удовлетворительные свойства материала. Значения показателей механической прочности при сжатии образцов с увеличением количества огнеупорной глины возрастают от 48,7 до 50,9 МПа ($T_{обж.} = 1300$ °С), при минимальном содержании природного каолина 30 %. Образцы с использованием обогащенного каолина обладают более высокими прочностными показателями (на 18,8–24,5 МПа выше), что обусловлено увеличением в фазовом составе доли высокопрочного муллита за счет повышения содержания Al₂O₃.

Огнеупорность исследованных образцов составляет свыше 1580 °С для всех изученных составов и соответствует требованиям ГОСТ 28874–2004. Основные показатели свойств разработанных огнеупорных материалов приведены в табл. 1.

При исследовании фазового состава образцов оптимальных составов, синтезированных с использованием природного и обогащенного каолина «Ситница» при 1250 °С, были идентифицированы фазы муллита (3Al₂O₃·2SiO₂), кварца (SiO₂) и кристобалита (SiO₂), что свидетельствует

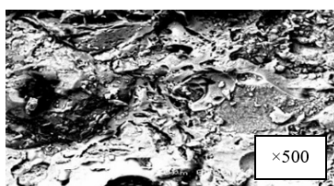
о схожести качественного фазового состава образцов с минеральным составом производственных шамотных огнеупорных изделий. При этом в составе с использованием обогащенного каолина «Ситница» наблюдается увеличение интенсивности дифракционных максимумов муллита за счет большего содержания Al_2O_3 .

Характер высокотемпературных дилатометрических кривых огнеупорных материалов с использованием природного и обогащенного каолина

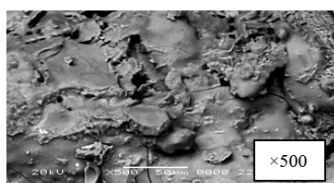
«Ситница» имеет практически одинаковый характер с небольшим смещением кривой образцов с обогащенным каолином в высокотемпературную область, что обусловлено большим содержанием в его составе Al_2O_3 . Характеристические точки на дилатометрических высокотемпературных кривых, а именно температура спекания, при котором изменение размеров устанавливается на уровне 5 % (для состава на природном каолине – 1238 °С, а с использованием обогащенного каолина – 1243 °С).

Таблица 1. Свойства разработанных огнеупорных материалов

Наименование показателей	С природным каолином	С обогащенным каолином	Требования ГОСТ 28874–2004		
			Низкоглиноземистые полукислые (10–28) / менее 85 группа LF 10	Шамотные (28–35) / – группа FC 30	Шамотные (28–45) / – группа FC 35
Массовая доля компонентов, выраженная соотношением Al_2O_3 / SiO_2 , %	31,79 / 60,59	36,0 / 56,10			
Огнеупорность, °С	Более 1580	Более 1580	Огнеупорные (1580–1770)		
Пористость открытая, %	15,9	14,0	Уплотненные больше или равно (16–20)		Плотные больше (10–16)
Механическая прочность при сжатии, МПа	42,2	74,6	Не регламентируется		
ТКЛР, $\cdot 10^{-6}, K^{-1}$	4,85	4,36	Не регламентируется		
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,65	0,79	Не регламентируется		
Область применения	Для различных тепловых агрегатов (общего назначения)		Для различных тепловых агрегатов (общего назначения)		Для определенных тепловых агрегатов



а



б

Составы с каолином «Ситница»: а – природным; б – обогащенным

Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение поверхности скола огнеупорных материалов, обожженных при температуре 1250 °С

Микроструктура поверхности исследованных образцов огнеупорных материалов с использованием природного и обогащенного каолинов «Ситница», приведенная на рисунке 1, поликристаллическая, мелкозернистая, текстура неоднородная, однако при использовании обогащенного каолина она становится более однородной, содержащей меньше крупных включений, что обусловлено

увеличением количества тонких фракций, интенсифицирующих спекание. Кварц представлен в виде крупных зерен осколчатой угловатой формы и распределен равномерно. Зерна кварца в образцах на основе обогащенного каолина мелкозернистые при меньшем их содержании и равномерно распределены. Поверхность образцов в разработанных материалах на основе более дисперсного, обогащенного каолина ровная без стекловидных выступов.

Разработанные огнеупорные материалы на основе природного и обогащенного каолинов «Ситница» соответствуют требованиям ГОСТ 28874–2004. Используя небогатый каолиновое сырье, можно получить низкоглиноземистые шамотные (полукислые) алюмосиликатные огнеупорные материалы группы LF 10, а на основе обогащенных каолинов – шамотные уплотненные алюмосиликатные огнеупорные материалы группы FC 35 при температуре синтеза 1250 °С.

Литература

1. Производство огнеупоров / И.Д. Кашеев [и др.] // Огнеупоры для промышленных агрегатов и топков: справочное издание в 2 книгах. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – Кн. 1.– 663 с.
2. Thermal and deformative characteristics of kaolin raw deposits of the Republic of Belarus / O. A. Sergievich [et al.] Sobachevskiy // Engineering Structures a. Technologies. – 2015. – Vol. 7, № 2. – P. 93–98.

УДК 658.512

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАЙЦЕН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССАМ

Серенков П.С.¹, Бережных Е.В.², Сильчук В.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный центр аккредитации

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведены результаты анализа существующих подходов к совершенствованию СМК. Рассмотрены основные аспекты подхода Кайцен применительно к производственным процессам. Определена тактика применения подхода, этапы его реализации. Определены основные задачи применительно к производственным процессам, предложены основные инструменты для их решения. Приведен пример практического применения подхода кайцен для решения конкретной производственной задачи.

Ключевые слова: процесс, структура, совершенствование, подход кайцен.

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE KAIZEN IMPROVEMENT APPROACH IN RELATION TO PRODUCTION PROCESSES

Serenkov P.¹, Berezhnykh E.², Silchuk V.¹

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Accreditation Center

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of the analysis of existing approaches to improving the QMS are presented. The main aspects of the Kaizen approach in relation to production processes are considered. The tactics of applying the approach, the stages of its implementation are determined. The main tasks in relation to production processes are defined, the main tools for their solution are proposed. An example of practical application of the kaitzen approach for solving a specific production task is given.

Key words: process, structure, improvement, kaitzen approach.

Адрес для переписки: Серенков П.С., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Основная стратегия устойчивого развития организации базируется, прежде всего, на принципе постоянного совершенствования – повторяющейся деятельности по повышению способности выполнить требования. Система менеджмента качества (СМК) считается зрелой, если ее организационно – техническая структура нацелена на постоянное улучшение процессов и продукции для обеспечения выгоды ее заинтересованным сторонам.

Процесс совершенствования системы измерений в соответствии с классическими принципами менеджмента качества процессного и системного подходов, с одной стороны, и установленными критериями соответствия, с другой стороны, может быть реализован по одному из двух направлений:

– через совершенствование структуры самого процесса измерений;

– через совершенствование ресурсов, участвующих в процессе измерений.

Применение новых инженерных технических методов должно иметь большое значение для обеспечения результативности и эффективности систем менеджмента качества.

В докладе сделан акцент на реализацию первой фазы совершенствования процессов СМК, в основе которой положен кайцен-подход. На начальном этапе выбора стратегии совершенствования процесса для оценки и анализа его точности и ста-

бильности используется проверка соответствия закона распределения значений показателя результативности продукции в потоке технологического процесса закону распределения Гаусса.

Сущность подхода кайцен заключается в том, что совершенствование СМК раздроблено на мелкие шаги, и эффект от одного такого шага будет практически незаметен. Но непрерывная серия мелких улучшений, как правило, дает эффект, соизмеримый с тем, который обес-печивается реинжинирингом. Но при этом эффект будет достигнут при значительно меньших инвестициях.

Действия системы кайцен по непрерывному улучшению направлены в основном на устранение проблем, возникающих в процессе производства.

Основные направления деятельности в рамках подхода кайцен:

– рабочее место – управление рабочим местом с целью оптимизации деятельности;

– неоправданные потери – процесс поиска и устранения действий в процессах, которые не добавляют ценности;

– стандартизация – процесс стандартизации процессов, оборудования, производственной среды и т.п.

Объектами кайцен подхода в рамках промышленного предприятия выступают главным образом производственные процессы, а точнее характеристики их выходов. Для производственных

процессов действия в рамках стратегии кайцен как правило сводятся к статистическому управлению этими характеристиками. К характеристикам выхода процесса обычно относят:

- целевое значение (математическое ожидание);
- вариация (дисперсия или стандартное отклонение).

Таким образом, типовая реализация стратегии улучшения кайцен производственных процессов, сводится к решению 3 задач:

1 задача. Проверка соответствия закона распределения значений показателя результативности партии продукции в потоке технологического процесса закону распределения Гаусса. Наиболее часто применяется оценка по критерию χ^2 -квadrat Пирсона и λ Колмогорова-Смирнова.

2 задача. Для сравнения влияния двух объектов на показатели качества продукции и процесса производства в условиях повторяемости проверка гипотезы о равенстве выборочных средних значений (Например, одинаково ли настроены станки-автоматы?). Для решения данной задачи зачастую прибегают к использованию критерию Стьюдента.

3 задача. Для сравнения влияния двух объектов на показатели качества продукции и процесса производства в условиях повторяемости проверка гипотезы о равенстве выборочных дисперсий или стандартных отклонений (Например, одинакова ли точность станков-автоматов?). Для проверки гипотезы о равенстве выборочных дисперсий или стандартных отклонений выборочных средних с помощью критерия Фишера.

В докладе приведен пример улучшения характеристик производственного процесса, а именно сравнение точности и стабильности настроенных двух станков-автоматов в соответствии со стратегией кайцен.

В процессе производства возникла задача выявить причины различия размеров деталей, получаемых на станков-автоматов. Различие имеет место на систематическом уровне и относится:

- к различиям средних значений размеров в партиях деталей;
- к рассеянию значений размеров в партиях деталей (размахи значений, стандартные отклонения).

Для решения задачи следовало с учетом видов различий определить:

- одинаково ли настроены станки с точки зрения математического ожидания;
- обеспечивают ли станки одинаковую вариацию размеров деталей (в смысле рассеяние).

Для анализа статистических показателей математического ожидания и дисперсии были использованы критерий Стьюдента и критерий Фишера.

Для сравнения точности и стабильности двух станков-автоматов взяты две выборки, объемы которых $n_1 = 10$ и $n_2 = 8$. В результате измерений контролируемого размера отобранных изделий

получены следующие результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений размера

x_i	1,08	1,10	1,12	1,14	1,15	1,25	1,36	1,38	1,4	1,4
y_j	1,11	1,12	1,18	1,22	1,33	1,35	1,36	1,38	–	–

где x_i – размеры деталей, обработанных на первом станке-автомате. y_j – размеры деталей, обработанных на втором станке-автомате.

Можно ли считать, что станки настроены и обрабатывают одинаковой точностью при уровне значимости 0,05?

Предварительно, при аттестации процесса было установлено, что размеры деталей, изготавливаемых на станках, имеют закон распределения, близкий к нормальному. Расчеты выполнены в пакете Statistica.

Выдвигаем гипотезы о равенстве выборочных средних, нулевую и альтернативную:

$$H_0: E(X) = E(Y),$$

$$H_1: E(X) > E(Y).$$

Проверим нулевую гипотезу по выборочным данным с помощью статистики t Стьюдента:

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} = 0,26.$$

По таблице критических точек распределения Стьюдента, по заданному уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы k найдем $t_{кр}(\alpha, k) = t_{кр}(0,05; 16) = 2,119$. Сравниваем $t = 0,26$ и $t_{кр}(\alpha, k) = 2,119$.

Так как $|t| < t_{двуст.кр}$ – гипотеза о равенстве двух средних отвергается, то можно утверждать, что станки настроены неодинаково.

Выдвигаем гипотезу о равенстве дисперсий:

$$H_0: D(X) = D(Y),$$

$$H_1: D(X) > D(Y).$$

Проверим нулевую гипотезу по тем же выборочным данным с помощью статистики Фишера,

$$F = \frac{S_{больш}^2}{S_{меньш}^2} = 1,5.$$

По таблице критических точек распределения Фишера $F_{кр}(\alpha, k_1, k_2) = F_{кр}(0,05; 9, 7) = 3,68$. Сравниваем F и $F_{крит}$.

Так как $F_{набл} < F_{крит}$, то гипотеза о равенстве двух дисперсий принимается. Можно утверждать, что станки имеют одинаковую точность, то есть наблюдаемое расхождение между выборочными дисперсиями случайное.

Полученная информация является основой для принятия решения в отношении совершенствования процесса.

УДК 658.512

**РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СМК В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ
Серенков П.С.¹, Бережных Е.В.², Сильчук В.А.¹**

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный центр аккредитации
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проанализирован процесс совершенствования системы менеджмента качества. Рассмотрены основные подходы к совершенствованию процессов системы менеджмента качества. Выделены основные положения, применяемых для совершенствования, подходов и проведен анализ возможности применения представленных подходов.

Ключевые слова: техническая структура, процесс, совершенствование, подход Кайцен.

**DEVELOPMENT OF A STRATEGY FOR IMPROVING THE SMK IN MODERN CONDITIONS
Serenkov P.¹, Berezhnykh E.², Silchuk V.¹**

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Accreditation Center
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The process of improving the quality management system is analyzed. The main approaches to improving the processes of the quality management system are considered. The main provisions of the approaches used for improvement are highlighted and the analysis of the possibility of applying the presented approaches is carried out.

Key words: technical structure, process, improvement, kaitzen approach.

Адрес для переписки: Серенков П.С., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Основной целью системы менеджмента качества (СМК) в организации является повышение ее результативности на основе удовлетворения потребностей потребителей и всех заинтересованных сторон с помощью совершенствования систем управления.

(СМК) считается зрелой, если ее организационно – техническая структура нацелена на постоянное улучшение процессов и продукции для обеспечения выгоды ее заинтересованным сторонам.

Организационной базой постоянной нацеленности на улучшение является тот факт, что каждый процесс, группы процессов и вся сеть процессов СМК погружена в цикл Р-D-C-A. Технической базой постоянной нацеленности на улучшение выступают полноценные информационные потоки, выстроенные синхронно с процессами сеть процессов СМК, включающие установление целей и поиск возможностей для улучшения. Поиск возможностей, в свою очередь, предполагает, что на основе информации о качестве (значимых данных), последующего анализа данных, разрабатываются, как правило, корректирующие или предупреждающие действия.

Причинами, вызывающими необходимость совершенствования системы, могут выступать:

– результаты мониторинга и полного анализа системы, свидетельствующие о критических изменениях в системе;

– изменившиеся требования к системе измерений.

Процесс совершенствования системы измерений в соответствии с классическими принципами менеджмента качества процессного и системного

подходов, с одной стороны, и установленными критериями соответствия, с другой стороны, может быть реализован по одному из двух направлений:

– через совершенствование структуры самого процесса измерений;

– через совершенствование ресурсов, участвующих в процессе измерений.

Применение новых инженерных технических методов должно иметь большое значение для обеспечения результативности и эффективности систем менеджмента качества.

Существует два подхода к совершенствованию процессов, продукции, систем:

– постепенный подход – совершенствование через серию мелких улучшений (подход Кайцен);

– кардинальный подход – реинжиниринг, принципиальные изменения как процесса, так и организационной структуры управления (подход Кайри).

Между этими подходами нет противоречий. Они взаимно дополняют друг друга. Совместное последовательное применение двух путей улучшений позволяет организациям достигать существенных конкурентных преимуществ.

Очевидно, что некорректно рассуждать, какой подход лучше. Реинжиниринг эффективен только тогда, когда «внутренние резервы» исчерпаны, т. е., когда невозможно «здесь и сейчас» предложить более высокое качество за более низкую цену. Налицо циклическая схема руководства организацией, использующая оба этих подхода:

– первая фаза – системный постоянный менеджмент качества, на постоянной основе повышающий результативность и эффективность

процессов организации за счет «внутренних резервов», например, за счет самоорганизации, оптимизации параметров и т. п.;

– затем, когда возможности процессов в существующей реализации исчерпаны, следует вторая фаза – реинжиниринг, как кардинальная перестройка делового процесса.

В докладе сделан акцент на реализацию первой фазы совершенствования процессов СМК, в основе которой положен кайцен-подход. На начальном этапе выбора стратегии совершенствования процесса для оценки и анализа его точности и стабильности используется проверка соответствия закона распределения значений показателя результативности продукции в потоке технологического процесса закону распределения Гаусса.

В зависимости от этих условий законы распределения условно можно разделить на две группы:

– специальные (закон эксцентриситета (Релея), модальный, антимодальный, экспоненциальный и др.),

– близкие к нормальному (распределению Гаусса),

Специальные законы можно объединить в одну группу по причине того, что каждый из них отражает проявление специфических факторов, присущих процессу, сопровождающему проявление анализируемой случайной величины.

Например, специфическая форма закона распределения эксцентриситета (Релея) отражает особенности технологических процессов обработки (точения, шлифования) номинально соосных цилиндрических поверхностей в части «формирования» отклонений от соосности осей или биения поверхностей деталей.

Очевидно, что корректная идентификация того или иного специального закона распределения анализируемой случайной величины предполагает, что для управления ею прежде всего следует использовать доминирующий фактор (факторы), определяющие специфику процесса.

Нормальный закон распределения используется для оценки и анализа точности и стабильности технологических процессов. Именно проверка соответствия закона распределения значений показателя результативности продукции в потоке технологического процесса (анализируемой случайной величины) закону распределения Гаусса – начальный этап выбора тактики управления и совершенствования процесса. Проверка соответствия осуществляется с целью ответа на во-

прос, имеются ли у процесса особые причины изменчивости. Механизм, лежащий в основе нормального распределения, можно представить следующим образом: имеется бесконечное число независимых случайных факторов, которые вносят вклад в значения наблюдаемой переменной – показателя результативности продукции.

Проверка соответствия осуществляется с целью ответа на вопрос, имеются ли у процесса особые причины изменчивости?

Можно говорить о двух возможных ситуациях по результатам проверки соответствия:

1 ситуация. Результат проверки соответствия – закон распределения нормальный. Следовательно, ни один из влияющих факторов не имеет доминирующего значения. Все факторы процесса одинаково влияют на результат. При этом возможны 2 случая:

Случай 1. Процесс имеет нормальное распределение, но находится в статистически неуправляемом состоянии, индекс воспроизводимости $CP \leq 1,33$.

Вывод: процесс «серьезно болен». Все факторы одинаково неблагоприятны. Для решения этой проблемы необходим реинжиниринг – кардинальный подход «Кайрио». Систему необходимо менять.

Случай 2. Процесс имеет нормальное распределение и находится в статистически управляемом состоянии, индекс воспроизводимости $CP > 1,33$.

Вывод: процесс «здоров». Все факторы одинаково благоприятны. Проблем нет, следует продолжать мониторинг процесса в ослабленном режиме.

2 ситуация. Результат проверки соответствия – закон распределения отличается от нормального. Следовательно, один или несколько факторов процесса вносят доминирующий вклад в значения наблюдаемой переменной.

Это тот самый случай, когда подход Кайцен является наиболее эффективным решением проблемы. Задача совершенствования сводится к очередному количественному анализу факторов процесса. Факторами могут выступать: технологии, оборудование, операторы, условия и т. д.

Данный случай – типичный. Улучшение происходит за счет решения серии частных задач. Процесс в целом остается неизменным.

В докладе приведены реальные примеры, демонстрирующие приведенные выше ситуации и действия организаций по их идентификации, анализу и устранению.

УДК 535.6

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Серенков П.С., Романчак В.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. По результатам анализа общепринятых методов оценивания неопределенности измерений с позиций их соответствия «байесовскому» подходу предложен альтернативный метод оценивания как «метод последовательных трансформаций» (МПТ), имеющий ряд преимуществ по сравнению с общепринятыми методами. Метод строго соответствует «байесовскому» подходу, поэтому лишен методической ошибки в оценивании. В основе метода лежит техника последовательной аналитической свертки распределений входных величин с учетом модели измерений.

Ключевые слова: результат измерений, неопределенность измерений, метод последовательных трансформаций.

ANALYTICAL METHOD FOR ESTIMATION OF THE MEASUREMENT RESULTS

Serenkov P., Romanchak V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Based on the results of the analysis of generally accepted methods for estimating measurement uncertainty from the standpoint of their compliance with the "Bayesian" approach, an alternative estimation method is proposed as the "method of step by step transformations", which has a number of advantages compared to conventional methods. The method strictly corresponds to the "Bayesian" approach, therefore, it is free from methodological error in estimation. The method is based on the technique of sequential analytical convolution of the input quantities distributions, taking into account the measurement model.

Key words: measurement result, measurement uncertainty, method of step by step transformations.

Адрес для переписки: Серенков П.С., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

С учетом резкого увеличения рисков некорректного принятия решений по результатам контроля и испытаний продукции метрологической общественностью сформулирован идеализированный подход к оцениванию неопределенности измерений, известный как «байесовский» подход. Наш взгляд «все точки над *i*» расставил с методологической точки зрения стандарт, определив в качестве идеальной модели оценивания так называемый «байесовский подход». Идеализированное представление о решении задачи оценивания неопределенности измерения как процесса определения случайной величины, сводится к трем этапам:

- формулировка измерительной задачи;
- трансформирование распределений;
- получение окончательного результата.

Основным моментом этапа формулировки измерительной задачи является составление модели измерения $Y = f(X)$, определяющей взаимосвязь Y (измеряемой величины) с вектором входных величин $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ и приписывание распределений вероятностей (нормального, прямоугольного и т. д.) N входным величинам X_i (или совместного распределения вероятностей входным величинам, не являющимся независимыми) на основе имеющейся информации.

Ключевой (второй) этап – трансформирование распределений входных величин X_i , которое предусматривает определение плотности распределения

вероятности выходной величины Y на основе плотностей распределения вероятностей входных величин X_i и используемой модели измерения.

Третий этап предполагает использование плотности распределения вероятностей выходной величины Y для определения:

- 1) оценки математического ожидания величины Y в виде оценки y ;
- 2) интервала охвата для величины Y , соответствующего заданной вероятности (вероятности охвата) P , как расширенной неопределенности $U(y)$;
- 3) оценки стандартного отклонения величины Y как стандартной неопределенности $u_c(y)$, ассоциированной с y .

Т. е. для «байесовского» или вероятностного подхода количественной мерой неопределенности результата измерений y в широком смысле является распределение вероятностей, а в узком смысле – параметр рассеяния этого же распределения ($u_c(y)$ или $U(y)$, P). Иными словами, сначала должен быть получен закон распределения вероятности величины Y , а потом уже из него оценка неопределенности результатов измерений y в виде $u_c(y)$ или $U(y)$, P .

В этом смысле подход GUM реализует отличный от «байесовского» подход, называемый «частотным».

Среди общепринятых методически корректных методов нахождения неопределенности есть

только один – метод Монте-Карло. Метод в соответствии с концепцией вероятностной трансформации законов распределения входных величин формирует с учетом модели измерений закон распределения результата измерений, но не аналитически (непосредственно), а численными методами (опосредованно).

Следует отметить, что метод Монте-Карло, как и любой другой метод численного моделирования, лишь имитирует аналитическое (точное) решение задачи, поскольку величина Y непосредственно не измеряется.

Естественно, любая имитация предполагает целый ряд допущений и ограничений, что естественно вносит искажение в оценку $u_c(y)$ или $U(y)$, P . Устойчивые, адекватные результаты моделирования методом Монте-Карло требуют дополнительных программных алгоритмов и приложений (генераторов случайных чисел, буд - стрэп процедур и т. п.), а также большого количества генераций последовательностей значений y_i .

Предлагается авторский «метод последовательных трансформаций» (МПТ) для эффективного оценивания неопределенности измерений для заданной математической модели измерений с произвольным числом входных величин и единственной выходной величиной. Эффективность оценивания проявляется в том, что:

МПТ решает задачу детерминировано, т. е. детально реализует алгоритм оценки неопределенности измерений через трансформацию распределений входных величин;

МПТ в отличие от метода Монте-Карло предполагает возможность типового решения задачи оценивания с минимальными затратами ресурсов.

Ключевым моментом предлагаемого МПТ является техника аналитической свертки распределений входных величин с учетом модели измерений

$$Y = f(X_1, \dots, X_N). \quad (1)$$

Модель измерений (1) как математическое выражение любой, самой сложной структуры может быть приведено к выражению

$$Y = f_1(x_1) \oplus f_2(x_2) \oplus \dots \oplus f_n(x) \quad (2)$$

где \oplus обозначает произвольную алгебраическую операцию (сложение, вычитание, умножение, или деление). Т.е. исходная функция связи может быть представлена как последовательность выполнения алгебраических операций, что создает предпосылки для последовательной пооперационной свертки ($Z_i = f_i(x_i) \oplus f_{i+1}(x_{i+1})$) в соответствии с логикой модели измерения (2) получения конечного результата Y .

МПТ заключается в последовательном нахождении функции распределения результата измерений GY в результате последовательных попарных сверток для каждой алгебраической операции

$Z_i = f_i(x_i) \oplus f_{i+1}(x_{i+1})$ модели измерений (1). При этом можно использовать аддитивную и мультипликативную модели свертки распределений.

Иными словами, алгоритм МПТ включает два этапа:

– приведение исходной модели измерений (1) к выражению (2);

– последовательная попарная свертка распределений входных случайных величин X_i и X_{i+1} модели измерений (1, 2), синхронизированная с пооперационными свертками ($Z_i = f_i(x_i) \oplus f_{i+1}(x_{i+1})$) выражения (2).

В настоящее время авторами ведется исследование возможностей МПТ. Для предварительной оценки состоятельности МПТ был рассмотрен пример модели косвенных измерений силы электрического тока с помощью вольтметра и шунта, где неопределенность результатов измерений оценивают методом GUM. Модель косвенных измерений имеет вид:

$$I = f(V, R) = \frac{V}{R},$$

где I – сила электрического тока; V – электрическое напряжение; R – сопротивление шунта.

Для конкретного примера проведена альтернативная оценка неопределенности измерений силы тока I методами Монте-Карло и МПТ. Результаты оценок расширенной неопределенности измерений I для различных доверительных уровней приведены в таблице.

Таблица. Оценки неопределенности измерений силы тока, полученные различными методами

Уровень доверия	Метод GUM	Метод Монте-Карло	Метод МПТ
$P = 0,90$	0,0049, А	0,0049, А	0,0049, А
$P = 0,95$	0,0098, А	0,0093, А	0,0093, А
$P = 0,99$	0,0147, А	0,0112, А	0,0112, А

Как следует из таблицы, МПТ и метод Монте-Карло дают схожие результаты, что вполне ожидаемо в силу того, что они оба реализуют «байесовский» подход к оценке неопределенности, корректный с позиций бацесовского подхода. Метод GUM на невысоких уровнях доверия ($p = 0,9$) дает подобный результат. Однако на высоких уровнях доверия ($p = 0,95-0,99$) метод GUM дает завышенную на 31% оценку. Что подтверждает опасения в отношении методической ошибки «частотного подхода», реализуемого в методе GUM. Причем, следует отметить ее непредсказуемый характер.

МПТ актуален и имеет особое значение, когда:

– линеаризация модели (1) не обеспечивает ее адекватного представления;

– распределение выходной величины имеет выраженную асимметрию, в этом случае при оценке неопределенности могут быть получены недостоверные интервалы.

УДК 006.9:004.415.2(047)(476)

ВОПРОСЫ СЕРТИФИКАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДНЕГО ОСВЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Сернов С.П.¹, Балохонов Д.В.¹, Колонтаева Т.В.¹, Тадэуш Н.Н.¹, Коничева Л.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «РУДЕНСК»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описываются основные вопросы сертификации систем головного освещения транспортных средств на соответствие Правилам ООН № 148 и № 149. Предлагаются рекомендации по решению данных вопросов.

Ключевые слова: системы переднего (головного) освещения транспортных средств, Правила ООН, сертификация.

MODERN VEHICLE HEAD LIGHTING SYSTEMS CERTIFICATION ISSUES

Sernov S.¹, Balokhonov D.¹, Kolontaeva T.¹, Tadeush N.¹, Konicheva L.²

¹Belarusian National Technical University

²JSC "RUDENSK"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Main issues in the field of vehicle forward lighting systems certification using UN Regulations № 148 and № 149 are discussed. Recommendations to solve said issues are proposed.

Key words: vehicle forward lighting systems, UN Regulations, certification.

Адрес для переписки: Балохонов Д.В., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by

Современные исследования показывают, что системы головного освещения транспортных средств (самыми простыми из которых являются фары) для обеспечения безопасности дорожного движения должны удовлетворять жестким требованиям, которые перечислены в соответствующих международных стандартах, основными из которых в Республике Беларусь являются Правила ООН. В настоящее время для упрощения процесса сертификации и дальнейшей гармонизации требований к светотехническому оборудованию транспортных средств были введены в действие новые Правила ООН №№ 148, 149, 150, обобщающие уже существующие требования к светотехническим изделиям и одновременно вводящие ряд новых требований и категорий для систем головного освещения расширенного функционального назначения.

Однако в Правилах ООН № 149 содержатся ряд спорных положений, которые могут быть причиной затруднений при сертификации систем головного освещения транспортных средств.

Одной из основных проблем в области головного освещения является отсутствие в указанных Правилах единой классификации источников света. В текущей редакции Правил параллельно существуют две классификации источников света.

В соответствии с первой классификацией, источники света могут быть сменными, то есть их можно заменять с помощью инструмента или вручную, оставляя остальную часть фары или фонаря без изменений, и несменными, то есть источник света должен встраиваться в фару так, чтобы его нельзя было извлечь (инструментом или вручную)

без разрушения изделия. В этом случае светотехническое изделие вполне можно считать источником света.

В соответствии со второй классификацией, источники света разделяются на источники с нитью накала (регламентируются Правилами ООН № 37), источники света газоразрядные (регламентируются Правилами ООН № 99), источники света светодиодные (регламентируются Правилами ООН № 128), светодиодные модули (впервые введены Приложением 9 Правил ООН № 149).

Два параллельных подхода создают проблемы идентификации при конструировании и испытании систем головного освещения транспортных средств, так как понятия «светодиодный источник света» и «светодиодный модуль» иногда используются совместно, и неясно, чем одно отличается от другого. Например, в технической литературе понятие «светодиодный модуль» означает светодиод вместе с деталями вторичной оптики и электронной схемой питания, а в Правилах № 149 указано, что модуль может иметь, а может и не иметь электронной схемы питания. Это принципиальное различие влияет не только на конструкцию фар, но и на стандартные методики испытаний: если светодиодный модуль имеет электронную схему питания, то в стабилизации тока светодиода нет необходимости. Если схемы питания нет, то стабильность тока инжекции светодиодов становится значимым фактором.

Неопределенность понятия «светодиодный модуль» уже имеет свои результаты: некоторые производители выпускают светодиодные модули для монтажа в фарах и обеспечения ближнего или дальнего света, и при этом контролируются харак-

теристики фар в сборе, то есть не производится никакой сертификации светодиодных модулей, поскольку эта процедура не детализирована.

В приведенных стандартных классификациях источников света не представлены процедуры проведения испытаний с такими перспективными источниками света как многокристальные светодиоды, светодиодные матрицы и лазеры (применяются вместе с люминофорными деталями). Таким образом, системы переднего освещения проекционного и лазерного типов остаются неохваченными Правилами ООН. Это означает, что для этих систем головного освещения транспортных средств не имеется стандартных методик сертификационных испытаний, и от этого им невозможно присвоить категорию и выдать сертификат соответствия.

Далее, в Правилах ООН № 149 вводится множество категорий систем головного освещения транспортных средств (включая адаптивные системы головного освещения транспортных средств, что сделано впервые), для каждой из которых прописываются разрешенные источники света.

Новинкой является появление требований к многомодульным системам и новых определений дополнительных огней подсветки поворота (систем поворотного освещения) нескольких классов, отличающихся не только функциональным назначением и количеством возможных источников света, но способами реализации либо поворотом светотеневой границы ближнего света либо применением отдельных модулей

Среди возможных источников света нет перспективных новых источников и требований к ним, и это замедлит появление новых систем, которые могли бы улучшить эффективность освещения и повысить безопасность движения.

Для разных категорий огней в одной фаре (особенно в адаптивных системах головного освещения) Правила ООН в текущей редакции позволяют использовать принципиально различные источники света. Даже если оставить за скобками вопросы конструирования, то при сертификации таких изделий возникнут дополнительные трудности, например, с испытаниями фар со светодиодным ближним светом, но «ламповым» огнем подсветки поворота, поскольку фотометрические характеристики будут зависеть от времени наработки. Поскольку в условиях реальной эксплуатации время наработки каждого функционального

модуля является случайным, то все рекомендуемые режимы проверки стабильности световых характеристик являются усредненными. Нельзя также обойти стороной вопрос множества вариантов методик проведения испытаний в случае модульных (блочных) фар. Например, вместо измерения силы света основных огней фары в грязном и чистом состояниях предлагается измерять силу света каждого огня в отдельности и в различных сочетаниях, что существенно влияет на время проведения испытаний.

Для минимизации перечисленных проблем при сертификацию систем переднего (головного) освещения транспортных средств предлагаются следующие рекомендации:

– до установления разночтений определения понятия «светодиодный модуль» целесообразно ограничиться существующими требованиями к фотометрическим характеристикам фар и их стабильности, исключив вопросы о сертификации светодиодных модулей;

– для целей сертификации принять, что для любого источника света (включая лазеры, матрицы и т. п.) система головного освещения должна удовлетворять минимальным требованиям в условиях «наихудшего случая» с индикацией отказов отдельных частей системы.

Литература

1. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 147 – UN Regulation No. 148. Uniform provisions concerning the approval of light-signalling devices (lamps) for power-driven vehicles and their trailers // UNECE [Electronic resource]. – 2019. – <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R148e.pdf> – Date of access : 01.10.2022
2. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 148 – UN Regulation No. 149. Uniform provisions concerning the approval of road illumination devices (lamps) and systems for power-driven vehicles // UNECE [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf> – Date of access : 01.10.2022

УДК 001.893:65.011.56:658.562

СПЕЦИФИКА КАЛИБРОВКИ 3D-ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Соколовский С.С.¹, Гомма М.А.¹, Алешевич Д.Д.²¹Белорусский национальный технический университет²РУП «Белорусский государственный институт метрологии»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлена оригинальная методика калибровки 3D-видеоизмерительной машины при выполнении измерений в направлении координатной оси Oz, позволяющая обеспечить необходимую точность и достоверность результатов калибровки.

Ключевые слова: геометрические параметры деталей, контроль, 3D-измерения, видеоизмерительная машина, методика калибровки.

THE SPECIFICS OF THE CALIBRATION 3D-VIDEOMEASURING MACHINE

Sokolovsky S.¹, Homma M.¹, Aleshevich D.²¹Belarusian National Technical University²Republican unitary enterprise «Belarusian state institute of metrology»

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An original technique for calibration a 3D-videomeasuring machine when performing measurements in the direction of the Oz axis is presented, which make it possible to provide the necessary accuracy and reliability of the calibration results.

Key words: geometrical parameters of parts, control, 3D-measurements, videomeasuring machine, calibration method.

Адрес для переписки: Соколовский С.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sokolovski@bntu.by

С учетом особенностей измерений, выполняемых на базе видеоизмерительных машин, очевидным решением для их калибровки при измерениях вдоль координатных осей Ox и Oy является использование штриховых мер длины соответствующей точности.

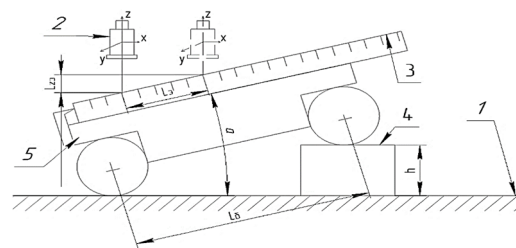
Однако такой подход нельзя реализовать напрямую для калибровки машин в направлении координатной оси Oz. С учетом этого обстоятельства нами была предложена оригинальная методика калибровки машины при выполнении измерений вдоль оси Oz, основанная на косвенном воспроизведении эталонных длин в направлении этой оси, суть которой заключается в следующем.

Штриховая мера длины 3 (рис. 1) требуемой точности устанавливается на верхнюю рабочую поверхность синусной линейки 5, располагающейся, но предметном столе 1 калибруемого средства измерения и фиксируется в продольном направлении с помощью жесткого упора. Под один из роликов синусной линейки устанавливается концевая мера длины или блок мер 4 определенного размера h. В результате синусная линейка вместе с установленной на ней штриховой мерой длины поворачивается на некоторый известный угол α по отношению к рабочей поверхности предметного стола средства измерения.

Это позволяет любую эталонную длину L_э, воспроизводимую штриховой мерой, трансформировать в эталонную разновысотность L_{э3} соответствующих штрихов меры на основании следующего элементарного уравнения связи между этими величинами:

$$L_{э3} = h \cdot (L_3 / L_6),$$

где L₆ – базовое расстояние между роликами синусной линейки.



1 – предметный стол; 2 – объектив СИ;
3 – штриховая мера длины; 4 – концевая мера длины или блок мер; 5 – синусная линейка

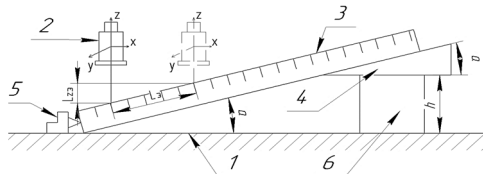
Рисунок 1 – Схема калибровки с использованием штриховой меры длины, концевых мер длины и синусной линейки

При проведении калибровки машины вдоль рассматриваемой координатной оси требуется последовательно сфокусировать ее оптическую систему на два крайних штриха линейки, задающих эталонную длину L_э, и измерить их разновысотность L_{э3изм}. Тогда абсолютная погрешность машины Δ, мм, при выполнении измерений в направлении координатной оси Oz может быть определена по следующей формуле:

$$\Delta = L_{э3изм} - L_{э3}.$$

Проведя метрологический анализ представленной методики калибровки, можно сделать вывод, что доминирующее влияние на неопределённость измерений при ее реализации будут оказывать следующие факторы: а) погрешность штриховой

меры длины; б) погрешность концевой меры длины (блока мер); в) погрешность синусной линейки, включающая в себя такие составляющие как погрешность базового расстояния между роликами L_6 , разноразмерность роликов, погрешности их формы и расположения, погрешности формы верхней номинально плоской рабочей поверхности и пр. Из проведенного анализа следует, что довольно значительный вклад в суммарную неопределенность измерений, выполняемых при реализации данной методики, будет вносить синусная линейка. Исходя из этого, предлагается второй вариант методики калибровки, реализуемой без использования синусной линейки в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.



1 – предметный стол калибруемого СИ; 2 – объектив СИ; 3 – штриховая мера длины; 4 – угловая призматическая мера; 5 – ножевая опора на массивном основании; 6 – концевая мера длины

Рисунок 2 – Схема калибровки с использованием штриховой меры длины и угловых призматических мер

При проведении калибровки по этому варианту на предметный стол видеоизмерительной машины 1

устанавливается специальная ножевая опора 5, имеющая массивное основание и служащая для фиксации штриховой меры длины 3 в продольном направлении, которая также располагается на этом столе. Для обеспечения требуемого угла наклона α штриховой меры длины предлагается использовать комбинированный блок мер, состоящий из угловой призматической меры 4, задающей угол α и концевой меры длины определенного размера b , к верхней поверхности которой должна быть притерта угловая мера. При реализации процедуры калибровки штриховая мера длины одним из торцов упирается в ножевую опору, а с другой стороны под ее нижнюю установочную поверхность подставляется комбинированный блок мер, который перемещается в направлении ножевой опора до устранения углового просвета между верхней рабочей поверхностью угловой меры и нижней установочной поверхностью штриховой меры длины. При выполнении этого условия любая эталонная длина L_3 , воспроизводимая штриховой мерой, может быть трансформирована в эталонную разновысотность L_{23} соответствующих штрихов меры с использованием следующего элементарного уравнения связи между этими величинами:

$$L_{23} = L_3 \times \sin \alpha.$$

В остальном реализуемая процедура ничем не отличается от описанного выше варианта методики калибровки.

УДК 006.053

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Соколовский С.С.¹, Сергей Е.Г.²

¹Белорусский национальный технический университет

²РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты системного анализа существующего нормативного обеспечения деятельности экспертов по стандартизации и определены пути его совершенствования, включая аспекты подготовки специалистов такого профиля и подтверждения соответствия.

Ключевые слова: эксперты по стандартизации, нормативное обеспечение деятельности, состояние и перспективы развития, подготовка специалистов, подтверждение соответствия.

ANALYSIS OF THE STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF REGULATORY SUPPORT FOR THE ACTIVITIES OF EXPERTS IN STANDARDIZATION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Sokolovsky S.¹, Sergey E.²

¹Belarusian National Technical University

²Republican unitary enterprise «Belarusian state institute of metrology»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of a systematic analysis of the existing regulatory support for the activities of standardization experts are presented and ways to improve it are determined, including aspects of training specialists of this profile and confirming compliance.

Key words: standardization experts, regulatory support of activities status and development prospects, training of specialists, confirmation of compliance

Адрес для переписки: Соколовский С.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sokolovski@bntu.by

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствуют документы, устанавливающие требования к квалификации специалистов в области стандартизации, а также требования к порядку подтверждения их квалификации. Требования современной практики обуславливают необходимость установления основных критериев компетентности и квалификационных требований к специалистам в области стандартизации, а также порядка подтверждения их квалификации и присвоения им статуса эксперта по стандартизации.

У отдельных партнеров Республики Беларусь по Евразийскому экономическому союзу существуют документы, устанавливающие требования к экспертам по стандартизации. На межгосударственном уровне разработаны рекомендации, содержащие положения для национальных органов по стандартизации, на которых должно основываться присвоение квалификации эксперта по стандартизации, однако данные рекомендации не введены в действие в Республике Беларусь.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость создания в Республике Беларусь нормативной базы для успешной деятельности института экспертов по стандартизации. Здесь необходимо использовать комплексный подход, предполагающий разработку серии нормативных документов, определяющих общие положения, на которых должна базироваться такая деятельность, требования, предъявляемые к экспертам по стандартизации, их программу подготовки и общий порядок сертификации профессиональной компетентности.

В результате анализа информационных источников можно выделить основные действующие документы в области технического нормирования и стандартизации, а также стратегические документы и законодательную базу стран-членов СНГ, у которых уже введено понятие «эксперт по стандартизации». Документы в области технического нормирования и стандартизации:

- РМГ 79-2007 «Эксперты по стандартизации. Общие положения»;
- ГОСТ Р 1.1-2013 «Стандартизация в Российской Федерации. Технические комитеты по стандартизации. Правила создания и деятельности»;
- ГОСТ Р 1.6-2013 «Стандартизация в Российской Федерации. Проекты стандартов. Правила организации и проведения экспертизы»;
- ГОСТ Р 1.17-2017 «Стандартизация в Российской Федерации. Эксперт по стандартизации. Общие требования»;
- СТ РК 1.36-2015 «Государственная система технического регулирования Республики Казахстан. Управление трудовыми ресурсами. Требования к квалификации специалистов в области стандартизации»;
- СТ РК 1.45-2019 «Государственная система технического регулирования Республики Казахстан. Организации, осуществляющие подготовку,

переподготовку, повышение квалификации специалистов в области технического регулирования. Общие требования».

Стратегические документы и законодательная база стран-членов СНГ:

- Федеральный Закон «О стандартизации в Российской Федерации» от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ (с изменениями на 3 июля 2016 года);
- Концепция развития национальной системы стандартизации Российской Федерации на период до 2027 года (проект);
- Закон Республики Казахстан от 5 октября 2018 года № 183-VI «О стандартизации» (с изменениями от 18.03.2019 г.);
- Стратегический план развития РГП «Казахстанский институт стандартизации и сертификации» Комитета технического регулирования и метрологии Министерства индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан (Национальный орган по стандартизации) на 2019–2023 годы.

Проанализировав данные документы, можно сделать следующие общие выводы.

Проведенный системный анализ показал наличие большого количества противоречий и нестыковок в сфере организации деятельности специалистов, занимающихся вопросами технического нормирования и стандартизации. Это относится как к самому термину «технический эксперт по стандартизации», так и к определению области решаемых задач такими специалистами, порядка их подготовки и подтверждения соответствия.

Во избежание вышеперечисленных противоречий и недочетов, необходимо определить основные требования к экспертам по стандартизации и их форму подтверждения соответствия.

- Эксперт по стандартизации должен знать:
- законодательство в области технического нормирования и стандартизации, метрологии и оценки соответствия;
 - концепцию национальной системы стандартизации;
 - основополагающие документы национальной системы стандартизации, определяющие принципы и методологию стандартизации;
 - порядок планирования работ по стандартизации;
 - постановления и документы организационно-методического характера, изданные национальным органом по стандартизации;
 - основные направления развития межгосударственной системы стандартизации;
 - международные и региональные практики стандартизации;
 - правила и рекомендации по стандартизации, разработанные в развитие основополагающих национальных и межгосударственных стандартов;
 - требования документов по межгосударственной стандартизации к объектам стандартизации;

- требования, предъявляемые к профессиональной компетентности экспертов по стандартизации;
- порядок проведения экспертизы.

Основными видами деятельности эксперта по стандартизации являются:

- экспертиза проектов документов по стандартизации;
- проведение работ по разработке, подготовке к утверждению, изменению, отмене, применению документов по стандартизации;
- участие в работе национальных, региональных (межгосударственных) и международных технических комитетов по стандартизации.
- участие в формировании перечней документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технических регламентов, и перечней документов в области стандартизации, которые содержат правила и методы исследований (испытаний) и измерений, необходимые для применения и исполнения технических регламентов и осуществления оценки соответствия;

Эксперт по стандартизации должен уметь:

- осуществлять разработку (в том числе и на основе международных и региональных стандартов), а также пересмотр национальных стандартов и внесение в них изменений;

– осуществлять экспертизу законодательных актов, национальных и межгосударственных стандартов и иных документов по стандартизации;

– участвовать в работе национальных технических комитетов и сотрудничать с техническими комитетами по стандартизации смежных отраслей;

– анализировать отзывы, поступившие от заинтересованных сторон, по проектам межгосударственных стандартов для выработки позиции страны (государства) по рассматриваемым проектам;

– проводить работу по принятию международных, региональных (межгосударственных) стандартов и национальных стандартов других государств в качестве национальных (государственных) стандартов.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки государственных стандартов «Эксперты по стандартизации. Общие положения» и «Эксперты по стандартизации. Сертификация профессиональной компетентности».

УДК 535.37+543.545.2

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ГЕЛЬ-ЭЛЕКТРОФОРЕГРАМ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Тарасов Д.С.^{1,2}, Самцов М.П.¹, Малюшкова Е.В.¹, Хлудеев И.И.², Семак И.В.²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе предложен макет сканирующего лазерного устройства с высоким спектральным разрешением для детектирования на электрофореграммах флуоресцирующих комплексов трикарбocyаниновых красителей с белками сыворотки крови.

Ключевые слова: трикарбocyаниновые красители, комплексобразование, белки плазмы крови, гель-электрофорез, лазерная флуоресцентная спектроскопия.

METHOD FOR ANALYSIS OF ELECTROPHOREGRAMS WITH SPECTRAL RESOLUTION OF FLUORESCENCE

Tarasov D.^{1,2}, Samtsov M.¹, Maliushkova E.², Khludееv I.², Semak I.²

¹A.N Sevchenko Institute for Applied Physical Problems of BSU

²Belarussian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper proposed model of the scanning laser device with high spectral resolution for detecting on electrophoregrams fluorescent complexes of tricarbo-cyanine dyes with blood plasma proteins.

Key words: tricarbo-cyanine dyes, complexation, blood plasma proteins, gel-electrophoresis, laser-induced fluorescence spectroscopy.

Адрес для переписки: Тарасов Д.С., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: dmitrij-tarasov@list.ru

Гель-электрофорез один из основных инструментов молекулярной биологии и биохимии для разделения и анализа белков. Разделение происходит за счет разницы скоростей движения анализируемых макромолекул с разным соотношением

молекулярной массы к заряду в постоянном электрическом поле. Путем использования флуоресцентных меток становится возможным определение молекулярной массы белковых макромолекул и их фрагментов. При этом для обнаружения на

электрофореграммах флуоресцирующих белков широкое распространение получила регистрация их изображений с помощью чувствительных ССD-матриц. Как правило, флуоресцентное изображение в интересующем спектральном диапазоне регистрируется при использовании соответствующего набора фильтров. Такой мультиспектральный подход обеспечивает высокое пространственное разрешение при приемлемом уровне чувствительности. В то же время, спектральная селективность составляет от десятков до сотен нанометров. Во многих задачах информация о состоянии метки содержится в ее спектрально-люминесцентных характеристиках, что требует более высокого спектрального разрешения. В данной работе предложен макет сканирующего устройства со спектральным разрешением для исследования взаимодействия индотрикарбоцианиновых красителей с белками плазмы крови.

Основным объектом исследования выступал разработанный в лаборатории спектроскопии НИИ-ИПФП им. А.Н. Севченко БГУ симметричный индотрикарбоцианиновый краситель ПК1, который по многим параметрам перспективен для использования в качестве фотосенсибилизатора для ФДТ [1], а также два близких по структуре красителя – ПК2 и ПК3. У первого по сравнению с ПК1 отсутствуют полиэтиленгликоли на концевых группах, а у второго – хлорзамещенный ортофениленовый мостик.

В качестве модельной биологической среды использовался раствор бычьего сывороточного альбумина (концентрация белка 2 г/л). Растворы готовились в натрий-калиевом фосфатном буфере Дюльбекко (0,14 моль/л) с pH=7,4 (ФСБ). Концентрация белков в анализируемых на электрофорезе образцах составляла 30 мкМ. Стоковые растворы красителей готовились в ФСБ. Краситель ПК2 обладает низкой растворимостью в воде, в связи с чем стоковый раствор для него готовился с 5 % содержанием этанола. Исследования проводились при двух концентрациях красителей – 30 мкМ и 10 мкМ. Исследования на электрофорезе проводились для двух серий образцов: при комнатной температуре (22 °С) и при инкубации в течение 120 минут при 37 °С.

Анализ связывания красителей с белками в растворах БСА выполнялся с помощью электрофореза белков по методу Лэммли в полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия в восстанавливающих условиях (SDS-PAGE). Электрофоретическое разделение белков проводили в 15 % полиакриламидном геле в диссоциирующих условиях. В связи с тем, что на стадии окрашивания используются агрессивные среды, которые приводят к необратимой деструкции индотрикарбоцианиновых красителей, места локализации красителей на электрофореграмме определяли до

начала процедуры окрашивания раствором Кумасси для визуализации полос белков. В обоих случаях координаты фиксировались относительно границ гелей, что позволило совместить распределение белков и индотрикарбоцианиновых красителей на электрофореграмме. После детектирования красителя осуществляли осаждение белков в геле с помощью 30 % раствора трихлоруксусной кислоты. Далее проводили окрашивание раствором Кумасси. После окрашивания, гель отмывали 7 % уксусной кислотой до полного обесцвечивания фона. Имеющееся в распоряжении оборудование позволяет исследовать на одной электрофореграмме до 9 образцов. Для определения молекулярной массы белков в одну из лунок вносили набор белков стандартов с известными молекулярными массами – от 10 кДа до 200 кДа.

Макет сканирующего устройства со спектральным разрешением конструктивно состоит из перемещаемой микрометрическими винтами платформы, на которой перпендикулярно исследуемой плоскости закреплен держатель световода лазерного флуоресцентного спектрометра, в котором для возбуждения флуоресценции использован лазер с длиной волны 684 нм. Подвод возбуждающего излучения к исследуемому образцу и свечения флуоресценции в полихроматор осуществлялся с помощью оптоволоконного кабеля. Путем перемещения светокolleктора вдоль белковых полос на электрофореграмме по флуоресценции определяли координаты молекул красителей. При этом информационным считался сигнал флуоресценции красителей в случае его устойчивого превышения по сравнению с фоновым. Полученные визуализированные электрофореграммы исследуемых образцов фиксировались с помощью фотоаппарата, и на снимки переносились координаты обнаружения красителей.

В результате сканирования лазерным флуоресцентным спектрометром геле-электрофореграммы обнаружено несколько позиций с выраженным сигналом, близким по спектральному составу со спектром флуоресценции исследованных красителей. На фотографиях гелей после окрашивания эти позиции отмечены метками (рис. 1). В пределах полос, соответствующих движению растворов БСА не окрашенных красителями не наблюдается никакого свечения при возбуждении лазером с длиной волны 684 нм.

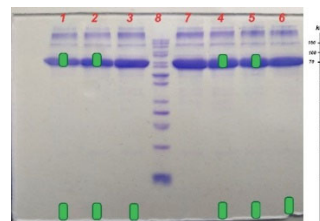
Молекулярная масса бычьего сывороточного альбумина – 69 кДа, на электрофореграмме ей соответствует полоса вблизи (72 ± 4) кДа. Здесь наблюдается выраженный сигнал флуоресценции образцов окрашенных красителями ПК1 и ПК2 для обеих серий. Учитывая пространственное разрешение сканирующей системы, можно утверждать, что флуоресценция в данной области соответствует ковалентным комплексам ПК1 и ПК2 с

альбумином. Максимум флуоресценции красителей ПК1 и ПК2 в комплексах с альбумином располагается на 754 нм и 762 нм соответственно, что в пределах погрешности коррелирует со значением данного параметра в исходных растворах красителей в БСА. Это указывает на то, что гель практически не оказывает влияние на спектры флуоресценции молекул красителя.

Для всех красителей обнаружен интенсивный сигнал флуоресценции на нижнем краю геля. Согласно экстраполяции стандарта, молекулярная масса объектов в этой области, соответствует приблизительно 1,5–6,0 кДа. При этом после окрашивания геля здесь не обнаруживаются визуально присутствие каких-либо белков. Молекулярная масса исследованных красителей: ПК1 – 1270 Да, ПК2 – 740 Да, ПК3 – 1117 Да. Учитывая точность определения координаты, справедливо утверждать, что в данной области обнаруживаются несвязанные с белками красители.

Таким образом, в работе предложен макет сканирующего лазерного устройства с высоким спектральным разрешением для детектирования флуоресцирующих белков на электрофореграммах.

Показано, что регистрация спектров флуоресценции дает дополнительную информации для идентификации флуоресцентной метки и анализа ее состояния.



1 – ПК1, 22 °С; 2 – ПК2, 22 °С; 3 – ПК3, 22 °С; 4 – ПК1, 37 °С; 5 – ПК2, 37 °С; 6 – ПК3, 37 °С; 7 – раствор без красителей; 8 – набор белков стандартов с известными молекулярными массами

Рисунок 1 – Электрофореграмма растворов БСА, предварительно обработанных трикарбоцианиновыми красителями

Литература

1. Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics / A. A. Lugovski [et al.] *Istomin // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.* – 2016. – Vol. 316. – P. 31–36.

УДК 621.81:159.9.07

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛ КАК СПОСОБ СУБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Токарь О.В., Серенкова Е.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье изложены результаты субъективной оценки трех деталей машиностроения методом семантического дифференциала. С помощью кластерного анализа выявлено четыре фактора универсального семантического пространства, объясняющих восприятие респондентов.

Ключевые слова: семантический дифференциал, кластерный анализ, субъективная оценка, деталь.

SEMANTIC DIFFERENTIAL AS A METHOD OF SUBJECTIVE EVALUATION OF ENGINEERING DETAILS

Tokar O., Serenkova E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article presents the results of a subjective assessment of three parts of engineering by the method of semantic differential. With the help of cluster analysis, four factors of the universal semantic space were identified that explain the perception of the respondents.

Key words: semantic differential, cluster analysis, subjective evaluation, engineering detail.

*Адрес для переписки: Токарь О.В., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tokar.o@bntu.by*

Известно, что детали в машиностроении имеют конструктивную форму, позволяющую их выпускать наиболее простыми и производительными технологическими процессами. Изучение конструктивной формы возможно методами, позволяющими установить стереотипы (устойчивые образы) относительно детали машиностроения, которые влияют на освоение студентами инженерных дисциплин.

Количественное измерение субъективных значений объекта может быть проведено с помощью

семантического дифференциала Ч. Осгуда, который относится к числу проективных методик, направленных не на выявление объективных характеристик, а на перевод реакции респондента на объект в оценочное отношение к нему [1].

Цель работы – выявить факторное пространство, объясняющее субъективные оценки респондентов для деталей машиностроения (подшипник, зубчатое колесо, болт).

Задачи работы: выбор семантического пространства семантического дифференциала, подго-

товка анкеты и проведение опроса, выбор метода обработки данных, анализ результатов.

Американский психолог Ч. Осгуд использовал процедуру измерения эмоционального значения понятия и его описания в пространстве трех факторов (оценка, активность и сила). Российский ученый В.Ф. Петренко разработал пять факторов семантического пространства (оценка, сила, активность, сложность, стабильность) [2]. Данный семантический дифференциал можно назвать универсальным.

В работе были использованы антонимичные прилагательные, отражающие эти пять факторов («приятное–неприятное», «теплое–холодное», «легкое–тяжелое», «быстрое–медленное» и т. д.). Респондентам демонстрировались по очереди подшипник, зубчатое колесо, болт с резьбой. Было предложено попробовать связать данные детали с определенным ощущением и указать насколько оно характерно для каждой детали с помощью анкеты. Она состояла из 19 пар прилагательных и семибалльной шкалы, причем максимальное количество баллов (7) соответствовало понятию, расположенному слева в предложенной паре, наименьшее количество баллов (1) – правому понятию. Было опрошено 20 студентов БНТУ 1-го курса обучения.

Полученные количественные результаты были обработаны и усреднены по каждому объекту изучения. Полученные средние значения по трем объектам и по 19 пар прилагательных были обработаны методом кластерного анализа с помощью программы StatGraphics Plus v5.1. Данный метод позволяет упорядочить данные в однородные группы на основе сходства между объектами (Q -анализ) или признаками (R -анализ). Кластеризация позволяет выявить факторы, объясняющие полученные данные, перейти от многомерного пространства к пространству меньшего количества факторов, выбирая из каждого сформированного фактора по одному признаку, выявить нетипичные признаки, неприсоединившиеся ни к одному из кластеров.

Для кластеризации использовались расстояние Евклида, алгоритмы «дальнего соседа» и центроидный при поиске расстояния между данными. Результаты представлены на рис. 1 и 2, где по оси X расположены объединенные в кластеры пары прилагательных.

Результаты кластерного анализа показали, что шкалы объединились в четыре фактора на уровне равном пяти. В первый фактор «Оценка» вошли шкалы «приятное–неприятное» (1), «легкое–тяжелое» (3), «чистое–грязное» (4).

Во второй фактор «Активность» вошли шкалы «возбужденное–расслабленное» (6), «яркое–тусклое» (7), «упругое–пластичное» (8).

Третий фактор образовали шкалы, относящиеся к факторам «Сила» и «Стабильность»:

«сильное–слабое» (10), «густое–жидкое» (12), «упорядоченное–хаотичное» (13), «устойчивое–изменчивое» (14).

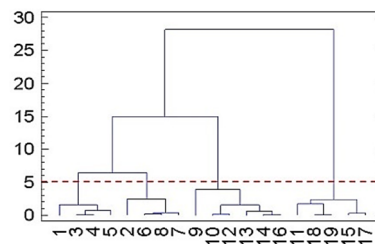


Рисунок 1 – Результаты кластерного анализа антонимичных шкал (алгоритм «дальнего соседа»)

Четвертый фактор состоит из шкал «сложное–простое» (17), «таинственное–обычное» (18), «неограниченное–ограниченное» (19).

В целом формирование универсального факторного пространства произошло, несмотря на то, что несколько шкал (5, 11, 15, 9, 2) оказались в соседних факторах.

В принципе изучаемые объекты могут быть оценены с помощью данного универсального семантического пространства, поскольку шкалы сгруппировались в заданные факторы с высокой полнотой. Сцепление двух факторов в один является распространенным случаем и зависит от специфики объекта оценивания.

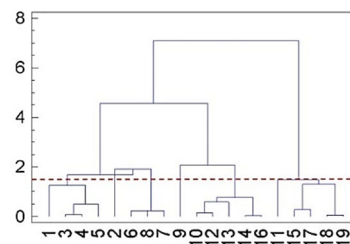


Рисунок 2 – Результаты кластерного анализа антонимичных шкал (алгоритм центроидный)

При центроидном алгоритме поиска связи между объектами полученная дендрограмма (рис. 2) показывает, что на уровне 1,75 кластеров по-прежнему остается четыре, однако некоторые шкалы (2, 9, 11) не вошли ни в один из них. Это шкалы «теплое–холодное» (2), «быстрое–медленное» (9), «большое–маленькое» (11). И хотя они относятся к факторам оценки, активности и силы соответственно, но баллы, данные объектам по этим шкалам респондентами отличались от оценок по другим шкалам данных факторов. На наш взгляд, это происходило во многом потому, что эти шкалы отражали более конкретные понятия, чем другие шкалы абстрактного содержания, поэтому три шкалы оказались отделены от фактора, к которому они должны относиться.

Как и при алгоритме «дальнего соседа» наблюдается сцепление шкал 10, 12, 13, 14 и 16 в один фактор «Сила и стабильность», а к фактору «Сложность», образуемого шкалами 17, 18 и 19,

также присоединилась шкала «неподвижное–движущееся» (15), отражающее стабильность, а не сложность объекта. Все это характеризует восприятие респондентами изучаемого объекта машиностроения.

Таким образом, в рамках предложенного универсального семантического пространства для таких объектов, как подшипник, зубчатое колесо и болт, выделены четыре фактора «Оценка», «Активность», «Сила и стабильность», «Сложность» (в идеальном случае «Сила и стабильность» должна разделиться на два отдельных фактора). Сформированные факторы показывают, что респонденты выделяют данные характеристики при оценке объекта, даже не отдавая себе в этом отчет, а значит в назначении баллов наблюдается система. Однако низкий уровень, на котором происходит объединение шкал в кластеры, говорит о

достаточно высокой степени близости между ними, о близких оценках. Дополнение универсального семантического дифференциала частным, позволяющим провести более тонкий семантический анализ, возможно, позволит повысить степень различимости между шкалами и между самими объектами. Кластеризация деталей не проводилась из-за их малого количества.

Литература

1. Кухта, М. С. Оценка критериев визуально-комфортного сценария освещения производственного помещения методом семантического дифференциала / М. С. Кухта, М. О. Васильева // Эргодизайн. – 2021. – № 1 (11). – С. 57–63.
2. Токарь, О. В. Определение семантической структуры зрительного поля экрана методом семантического дифференциала / О. В. Токарь // Труды БГТУ. Серия 4: Принт- и медиатехнологии. – 2019. – № 1. – С. 36–40.

УДК 621.2.082.18, 620.178.143

НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ

Трухан Р.Э.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Торская Е.В.³, Муравьёва Т.И.³, Мерзин А.М.³, Самардак В.Ю.⁴

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН
Москва, Российская Федерация

⁴Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. Проведено испытание алмазоподобных покрытий толщиной 100, 300 и 500 нм на стали методом наноскретч-теста. В результате получены значения коэффициента трения при нагрузках 200, 1400 и 2500 мкН. Наименьшим коэффициентом трения до нагрузки 1400 мкН обладает покрытие толщиной 500 нм $0,29 \pm 0,08$.

Ключевые слова: алмазоподобные покрытия, наноскретч-тест, коэффициент трения, атомно-силовая микроскопия.

SCRATCH TEST OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS ON STEEL

Trukhan R.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Habarova A.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Torskaya E.³, Myravyeva T.³, Merzin A.³, Samardak V.⁴

¹A.V. Lukov Heat- and Mass Transfer institute NAS Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

³Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS
Moscow, Russian Federation

⁴School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Nanoscratch-test of diamond-like coating on steel with 100, 300 and 500 nm thickness was carried out. As a result, the friction coefficient values were obtained for loads of 200, 1400, and 2500 μN . The smallest coefficient of friction up to a load of 1400 μN has a coating with 500 nm thickness 0.29 ± 0.08 .

Key words: Diamond like carbon coatings, nanoscratch-test, friction coefficient, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Трухан Р.Э., ул. Петруся Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Введение. Алмазоподобные покрытия (АПП) обладают вариативностью структуры, которая придает им свойства, необходимые для применения в качестве износостойких и упрочняющих покрытий поверхностей различных изделий. Среди

покрываемых объектов могут быть как компоненты машин, деталей приборов, так и микроразмерные устройства [1, 2].

Структура близкая к алмазу в таких покрытиях приводит к повышению твердости, когда

графитоподобная – приводит к более легкому смещению слоев на поверхности покрытия, вызывая эффект самосмазывания.

В условиях микроконтакта трение происходит за счет столкновения неровностей, параметры которых характеризуют шероховатость поверхности. В случае АПП эти неровности могут обладать различной твердостью и модулем упругости, что влияет на их поведение в контакте. Более твердые структуры будут измельчать менее твердые или смещать слои с низким сопротивлением сдвигу [2].

Проведение наноскретч-теста позволяет симитировать контакт поверхности покрытия с единичной неровностью. В результате чего, можно получить сведения о поведении покрытия в условиях нагруженного скользящего контакта на микроуровне.

Целью работы является определения поведения алмазоподобных покрытий в условиях наноскретч-теста при разных нагрузках.

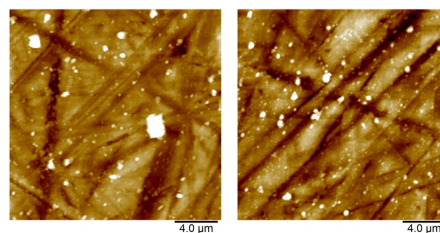
Материалы и методы исследования. Исследуемые покрытия представляют собой алмазоподобные углеродные пленки, нанесенные на поверхность стали ШХ15 с шероховатостью $R_a = 0,1$ нм методами лазерной абляции и осаждения импульсным дуговым разрядом на установке SWISSNANO COAT PVD COATING SYSTEM (NCI-Swissnanocoat, Швейцария) толщиной 100, 300 и 500 нм. Для 300 и 500-нанометровых покрытий предварительно наносился подслой титана толщиной 800 нм.

Получение изображений морфологии покрытий и определение шероховатости проводилось методом атомно-силовой микроскопии на микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping) на полях 20×20 мкм². Характеристики зонда – NSC-11 (MicroMasch, Эстония), радиус закругления острия – 10 нм, жесткость консоли – 4,8 Н/м.

Определение микротвердости и коэффициента трения ($k_{тр}$) выполнялись на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (Hysitron, США) алмазным индентором с радиусом закругления 226 нм и модулем упругости 1140 ГПа. Микротвердость оценивалась по модели Оливера-Фарра на основе 9 кривых индентирования при нагрузке 1000 мкН. $k_{тр}$ оценивался методом царапания при скорости 1,33 мкм/с, длине царапины – 20 мкм и нагрузках 200, 1400 и 2500 мкН.

Результаты и обсуждение. Коэффициент трения $k_{тр}$ при царапании индентором зависит от нагрузки, состояния поверхности, а также от твердости покрытия [3].

На поверхности с большей шероховатостью присутствует больше неоднородностей рельефа и частиц (рис. 1), взаимодействие индентора с которыми увеличивает величину стандартного отклонения (рис. 2).



а – 100 нм, б – 500 нм

Рисунок 1 – изображения поверхности (поля: 20×20 мкм) покрытий толщиной

Таблица 1. Свойства алмазоподобных покрытий

Параметр	Толщина покрытия		
	100 нм	300 нм	500 нм
R_a , нм	$24,7 \pm 1,2$	$24,4 \pm 1,2$	$18,6 \pm 0,9$
R_q , нм	$36,2 \pm 1,8$	$36,3 \pm 1,8$	$25,2 \pm 1,3$
R_z , нм	$53,6 \pm 2,7$	$40,9 \pm 2,0$	$35,2 \pm 1,8$
H, ГПа	$39,2 \pm 9,6$	$34,7 \pm 8,3$	$32,2 \pm 3,5$

Коэффициенты трения при нагрузках 200, 1400 и 2500 мкН показаны на рисунке 2. Покрытие толщиной 500 нм имеет самое низкое значения $k_{тр}$ при нагрузках 200 и 1400 мкН $0,21 \pm 0,06$ и $0,29 \pm 0,08$ соответственно, и самое высокое при 2500 мкН $0,49 \pm 0,03$. С повышением нагрузки при толщине 300 нм $k_{тр}$ изменяется от самого высокого до самого низкого с $0,26 \pm 0,08$ до $0,40 \pm 0,07$. $k_{тр}$ покрытия толщиной 100 нм занимает промежуточное положение при нагрузках 200 и 2500 мкН, но максимальное – при 1400 мкН ($k_{тр} = 0,34 \pm 0,08$).

Как видно из графика, с увеличением нагрузки на индентор меняется характер изменения $k_{тр}$ относительно толщины покрытия. При нагрузке 1100 мкН наблюдается снижение коэффициента трения с увеличением толщины покрытия, что хорошо согласуется с величиной микротвердости, определенной при нагрузке в 1000 мкН (табл. 1). При нагрузках 200 и 1400 мкН экстремумы значений $k_{тр}$ наблюдаются у АПП 300 и 500 нм.

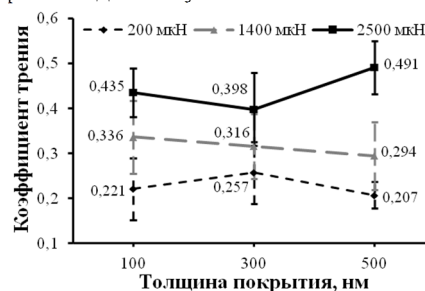


Рисунок 2 – Коэффициент трения при царапании АПП разной толщины

Резкое увеличение коэффициента трения покрытия толщиной 500 нм может быть следствием большей глубины царапины. Учитывая, что форма индентора сферическая, то с увеличением глубины внедрения увеличивается и площадь его контакта с покрытием. Это в свою очередь повышает силу трения, необходимую для царапания и, следовательно, коэффициент трения.

В процессе макротрения [1] покрытие толщиной 100 нм демонстрирует самый низкий коэффициент трения 0,57, когда при толщине 300 и 500 нм он составляет 0,79 и 0,61 соответственно. При переходе к царапанию реализуются большие контактные давления, и $k_{гр}$ в микромасштабе при толщине 100 нм становится больше, чем при 300 нм.

Заключение. Методом нанскретч-теста определены значения коэффициента трения алмазоподобных покрытий разной толщины на стальной подложке. Добавление подслоя титана и увеличение толщины покрытия снижали микротвердость и коэффициент трения покрытий. Для защиты поверхностей микроустройств можно рекомендовать покрытия толщиной 500 нм, за счет низкого коэффициента трения и меньшей шероховатости.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Ф20Р-217 и № Ф22М-006.

Литература

1. Evolution via friction of properties of DLC nanofilms on steel / Т. А. Kuznetsova [et. al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021.
2. Silicon addition as a way to control properties of tribofilms and friction of DLC coatings / Т. Kuznetsova [et al.] // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 608. – P. 155115.
3. Особенности наноскретч-теста при исследовании алмазоподобных покрытий / Р. Э. Трухан [и др.] // Приборостроение-2021 : матер. 14-й Междунар. науч.-техн. конфер., 17–19 ноября 2021 г., Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 239–241.

УДК 617-089.844

СВАРКА НИТИНОВЫХ ПРОВОЛОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТЕНТ-ГРАФТАХ

Уласевич А.О.¹, Минченя В.Т.², Савченко А.Л.²

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются различные методы сварки проволок нитинола, используемых в эндопротезах, и их воздействие на температурный интервал мартенситного превращения. Дается оценка наиболее подходящему методу сварки.

Ключевые слова: Стент-графт, нитинол, сварка, лазерно-импульсная, мартенситное превращение.

WELDING OF NITINOL WIRES USED IN STENT GRAFT

Ulasevich A.¹, Minchenya V.², Savchenko A.²

¹State enterprise “Science and technology park of BNTU Polytechnic”

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses various methods of welding nitinol wires used in endoprotheses and their effect on the temperature range of martensitic transformation. The most suitable welding method is evaluated.

Key words: Stent graft, nitinol, welding, laser pulse welding, martensitic transformation.

Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ulasevich_aleksandr@park.bntu.by

Стент-графт состоит из упругих элементов, которые поддерживают форму аорты и бесшовным полиэфирным материалом, выполняющий функцию недопуская попадая кровотока в ослабленные участки стенок аорты. Упругие элементы выполнены из материала с «памятью формы». Сплав этот называется – нитинол (сплав титана и никеля), обладающий высокой коррозионной и эрозивной стойкостью (рис. 1).



Рисунок 1 – Стент-графт грудного отдела аорты

При применении сплавов с эффектом памяти формы в медицине необходимо, чтобы они обеспечивали не только надежность выполнения механических функций, но и химическую надежность (сопротивление ухудшению свойства в биологической среде, сопротивление разложению, растворению, коррозии), биологическую надежность (биологическую совместимость, отсутствие токсичности, канцерогенности, сопротивление образованию тромбов и антигенов). Простые металлические элементы имеют сильное токсичное действие, но в соединении с другими элементами обнаруживается эффект взаимного ослабления токсичности. Однако большее значение, чем образование ионов, имеет растворимость пассивирующих пленок, возникающих на поверхности металлов. Например, используемые в качестве биологических материалов хромоникелевые сплавы, кобальтхромовые сплавы, чистый Ti,

содержит элементы, имеющие сильное токсичное действие в виде простых элементов, но пассивирующие пленки, образующиеся в контакте с биологическими организмами, являются достаточно стабильными. В связи с этим наиболее широкое распространение в медицине получил сплав никеля с титаном.

Эффект памяти первоначальной формы нитинола выражается в способности при повышении температуры воздействия до порога фазового превращения восстанавливать деформированный профиль в исходное состояние, которое было придано нитинолу при определенной температуре. Сверхупругость проявляется во время перехода при нагревании из одного структурного внутреннего состояния в другое. При достижении значения фазового превращения сплав как пружина принимает первоначальный вид. Эффект памяти формы нитинола стал возможен благодаря изменению кристаллической решетки во время полиморфного превращения из фазы аустенита в фазу мартенсита, рис. 2.

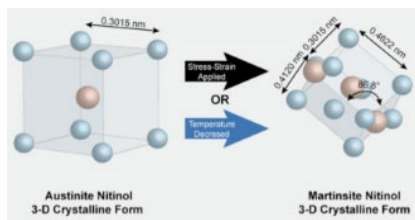


Рисунок 2 – Изменение кристаллической решетки нитинола

При сварочном нагреве возможен распад интерметаллидов эквиатомного состава с образованием Ti_2Ni и $TiNi_3$ и появление внутренних термических напряжений, что может привести к изменению температурного интервала мартенситного превращения и степени восстановления формы. Для соединения сплавов системы Ni-Ti ранее были опробованы такие процессы сварки плавлением, как сварка вольфрамовым электродом в инертном газе, лазерная и электронно-лучевая сварка. При сварке плавлением возникает несколько проблем, которые приводят к растворению кислорода, водорода и азота, потере сверхупругости и эффекта памяти формы в месте сварки, формированию интерметаллических соединений, хрупких и не имеющих памяти формы. Вместе с тем поверхностный нагрев нитинола ультракороткими импульсами не приводит к ухудшению структуры. Существуют исследования в которых были приведены данные степени восстановления формы после сварки и результатами стало восстановление формы от 80–100 процентов от исходной формы.

Известно, что наиболее производительными являются различные способы сварки плавлением, однако при их использовании в зоне соединения всегда образуется переходная литая сварная зона,

которая может обладать повышенной, по сравнению с основой соединяемых материалов, хрупкостью. Для соединения нитинола с титаном и его сплавами исследовали способ лазерной сварки. Установлено, что получению качественных сварных соединений препятствуют формирование литой дендритной микроструктуры в сварном шве и изменение его фазового состава.

Способ лазерной сварки позволяет получить сварное соединение нитинола с титаном с прочностью при растяжении 108 МПа. Аналогичные результаты обнаружены и при применении электронно-лучевой и аргонодуговой сварки. Однако у лазерной сварки есть очень необходимый параметр – точность сварочного места и уменьшением количества энергии, наличие которого приводит к нагреву поверхности выше температуры распада металлидов типа Ti_2Ni и снижению температуры мартенситного превращения, что для является нежелательным явлением, так как в случае раннего «раскрытия» стент-элемента в доставочной системе создаст дополнительное трение для его высвобождения.

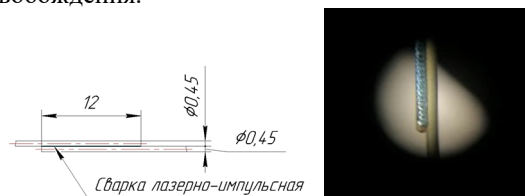


Рисунок 3 – Фото под микроскопом места приварки лазерно-импульсной сваркой нитинола с нитинолом и схемы приваривания

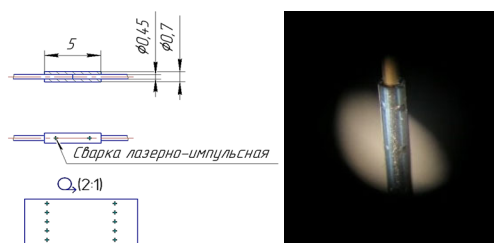


Рисунок 4 – Фото под микроскопом места приварки лазерно-импульсной сваркой нитинола с нитинолом и схемы приваривания

В случае ручной дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде инертного защитного газа было получено сварное соединение нитинола с его сплавом с прочностью при растяжении 108 МПа. Однако использование ручной дуговой сварки невозможно из-за габаритных размеров свариваемых проволок. У сварных соединений, полученных электронно-лучевой сваркой, этот показатель составил 70,85 МПа.

Диффузионные и сварки трением рассматривать не имеет смысла из-за необходимости в высокой скорости вращения и толщины свариваемой нити.

В экспериментальной части использовалась импульсно-лазерная сварка Coherent Rofin. Примеры экспериментальных мест сварки на рис. 3 и 4.

В работе были разработаны новые способы крепления концов нитиноловой проволоки методом точечной лазерной сварки. Все эти способы были подвергнуты одинаковому испытанию на прочностную характеристику. В результате испытания удалось установить, что при точечной сварке нитинола с нитинолом без втулки происходит значительный

нагрев материала, что приводит к изменениям температурного интервала мартенситного превращения, что может вызвать неполноценное восстановление формы в организме человека или более раннее восстановление формы, что затруднит установку стент-графта во время операции.

УДК 658.562

ПРОБЛЕМЫ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СМК НА ЭТАПЕ ПРИМЕНЕНИЯ Хвистик М.Д., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены основные этапы жизненного цикла СМК. Приведен анализ целей и задач, решаемых на этапах разработки и применения СМК. Рассмотрен комплекс функциональных подсистем, необходимых СМК. Приведены результаты анализа функциональной подсистемы сбора и анализа данных, выявлены ключевые функции и определены целевые показатели. С учетом структурной неоднородности выявлена необходимость представления подсистемы сбора и анализа данных в виде двух контуров (локальный и общий). Определены задачи по разработке комплексной методики организации эффективной системы сбора и анализа данных СМК организации на стадии применения.

Ключевые слова: СМК, система сбора и анализа данных, локальный контур, общий контур.

PROBLEMS OF SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SUPPORT OF THE QMS AT THE STAGE OF IMPLEMENTATION Khvistik M., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The main stages of the life cycle of the QMS are considered. The analysis of objectives and tasks to be solved at the stages of development and application of QMS. The complex of functional subsystems required by the QMS is considered. The results of the analysis of the functional subsystem of data collection and analysis are presented, the key functions and the target indicators are defined. Taking into account the structure variety of data collection and analysis system the necessity of data collection and analysis system presentation in the form of two concepts (local and general) is determined. Tasks to develop a complex methodology for the organization of an effective system of data collection and analysis of the QMS of the organization are defined at the stage of implementation.

Key words: QMS, data collection and analysis system, local concepts, general concepts.

*Адрес для переписки: Хвистик М.Д., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mkhivistikm@gmail.com*

В соответствии с определением ISO 9000, СМК – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, предназначенных для руководства и управления организацией применительно к качеству, т. е. для разработки политики и целей в области качества и достижения этих целей. Качество является одним из ключевых критериев выбора для потребителя, однако оно также является эффективным инструментом повышения конкурентоспособности и развития.

В современных условиях результативный менеджмент качества возможен при условии решения групп задач и их согласования на трех основных этапах жизненного цикла СМК[1]:

- разработка и проектирование СМК;
- внедрение и применение СМК как инструмента менеджмента, а также поддержание ее в рабочем состоянии;
- анализ и совершенствование СМК.

Предположим, что для решения групп задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла СМК, следует использовать различные модели процессов представления СМК.

Несмотря на разницу решаемых задач на различных этапах жизненного цикла СМК, на каждом этапе должны использоваться четыре функциональные подсистемы [2]:

- сеть процессов – описание процессов СМК, их состава, взаимодействий и взаимосвязей;
- целеполагание – структурирование функции качества по всей иерархии процессов и ответственности, распределения ответственности и полномочий в отношении деятельности в области качества;
- сбор и анализ данных о результативности продукции и процессов;
- поддержка принятия управленческих решений, привязанную к структуре процесса.

Именно на этапе применения функциональных подсистем можно отследить разницу, так как модели, представляющие одну и ту же подсистему, могут отличаться в силу различия выполняемых задач.

На этапе разработки СМК используется модели, привязанные к модели сети процессов, в то время, как на этапе применения - модели, привязанные к организационной структуре (организграмме). Например, для функциональной подсистемы «система сбора и анализа данных» на этапе разработки СМК может использоваться модель оценки результативности, привязанная к иерархии сети процессов СМК, в то время как на этапе применения СМК используются модель оценки результативности, привязанная к иерархии организационной структуры, а также модель контроля и мониторинга продукции и процессов в потоках работ структурных подразделений. То есть, на этапе применения осуществляется адаптация разработанных процессов к организационной структуре организации.

Следует обратить внимание, что модели могут отличаться по содержанию при условии, что модели, представляющие одну и ту же функциональную подсистему, должны быть согласованы между собой на различных этапах жизненного цикла СМК. Модели можно считать согласованными, если процессы и, соответственно, ресурсы, разработанные на этапе разработки СМК будут задействованы в процессах на этапе применения СМК.

Учитывая, что из всех видов ресурсов СМК, информационные ресурсы являются ключевыми, следовательно неотъемлемая задача менеджмента качества – менеджмент потоков информации, касающихся планирования, обеспечения качества, управления и улучшения качества продукции и процессов, ее формирующих (это могут быть данные о продукции или процессах, их анализ и т. д.). Для реализации данных задач в СМК используется подсистема сбора и анализа данных в качестве информационного механизма функционирования.

Система сбора и анализа данных реализует один из принципов менеджмента качества «принятие решений, основанных на свидетельствах», и соответственно, является информационной основой менеджмента качества.

Система сбора и анализа данных должна выполнять следующие функции:

- определять критерии и методы, необходимые для обеспечения результативности и эффективности СМК как при осуществлении, так и при управлении ее процессов;
- осуществлять мониторинг, измерение и анализ процессов для разработки мер, необходимых для достижения запланированных результатов и постоянного улучшения процессов;
- обеспечивать наличие ресурсов и информации, необходимых для поддержания процессов и их мониторинга.

В результате анализа подходов и требований к СМК очевидно, что ключевыми функциями системы сбора и анализа данных о качестве являются определение и анализ результативности и эффективности. Более подробно целевые показатели системы сбора и анализа данных рассмотрены в НИР.

Система сбора и анализа данных в силу своей структурной неоднородности не может быть представлена одной моделью. В рамках исследования были рассмотрены такие причины неоднородности, как объекты, способы функционирования и структура данных. Основываясь на анализе данных причин, можно сделать вывод, что объективно существуют два контура СМК, которые отличаются по объектам, показателям, и способу сбора данных – общий и локальный.

Общий контур системы сбора и анализа данных предназначен для обеспечения комплексного подхода к менеджменту качества на уровне, абстрагированном от вида выпускаемой продукции, особенностей жизненного цикла, структуры организации, формы собственности.

В свою очередь локальный контур не регламентирован нормативными документами и должен быть гибким по отношению к внутренним процессам организации.

Каждый контур менеджмента качества имеет свой контур системы сбора и анализа данных.

Таким образом, в рамках НИР поставлена следующая цель: разработать комплексную методику организации эффективной системы сбора и анализа данных СМК организации на стадии применения.

Для достижения цели необходимо решить 4 комплексные задачи:

1. Структуризация и кластеризация функций и задач системы сбора и анализа данных о качестве на этапе применения СМК.
2. Обоснование и разработка структуры процессов и ресурсов системы сбора и анализа данных для обслуживания общего контура СМК по критерию полноты и избыточности информации для поддержки принятия управленческих решений.
3. Обоснование и разработка структуры процессов и ресурсов системы сбора и анализа данных для обслуживания локального контура СМК по критерию полноты и избыточности информации для поддержки принятия управленческих решений.
4. Разработка методики проверки адекватности системы сбора и анализа данных на этапах разработки и применения СМК.

Литература

1. Серенков, П. С. Концепция системы сбора и анализа данных о качестве как информационной основы системы менеджмента качества / П. С. Серенков, Н. А. Жагора, Л. И. Толстик // Метрология и приборостроение. – 2004. – № 2. – С. 2–6.
2. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Методология организационного проектирования инженерной составляющей системы менеджмента качества: монография / П. С. Серенков. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. – 491 с.

УДК 621.3.087.92

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ,
ПРЕОБРАЗУЮЩИХ СИГНАЛ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Цитович Б.В.¹, Соломахо В.Л.²

¹Белорусский государственный институт повышения квалификации
по стандартизации, метрологии и управлению качеством

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Интенсивное развитие средств измерений, осуществляющих дискретное преобразование сигнала измерительной информации, потребовало расширения номенклатуры применяемых метрологических характеристик. Рассмотрены особенности их использования.

Ключевые слова: цифровые средства измерений, метрологические характеристики.

**METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MEASURING INSTRUMENTS CONVERTING
THE SIGNAL OF MEASURING INFORMATION**

Citovich B.¹, Solomachov V.²

*Belarusian State Institute for qualification raising and staff retraining in the field
of standardization, metrology and quality management*

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The intensive development of means of measurement carrying out signal discrete transformation of the measurement system has led to an expansion of the applied metrological characteristics. The features of their use are considered.

Key words: transformation means of measurement, metrological characteristics.

Все средства измерений (СИ), осуществляющие преобразование сигнала измерительной информации (измерительные преобразователи и приборы, измерительные каналы установок и систем), в соответствии с реализацией функции преобразования делят на две группы:

- аналоговые (континуальные) СИ;
- «цифровые» (дискретные СИ).

Распространено мнение, что дискретные СИ появились только в связи с применением электрических и электронных элементов СИ. Реально дискретные СИ появились более пяти веков назад, когда для астрономических приборов было разработано устройство дискретизации отсчитываемой доли основного деления (название «нониус» оно получило в честь португальского математика Педру Нуниша (1502–1578 лат. *Nonius*). В современных приборах используют вариант, предложенный в 1631 году французским математиком Пьером Вернье («верньёр»). Возможности применения микропроцессоров только существенно интенсифицировали процесс разработки дискретных СИ, что связано с их существенными достоинствами. Значительное число известных ранее и широко применяемых СИ, например, микрометры, измерительные головки, весы, термометры и др. модернизируют в дискретные.

Переход к иной форме преобразования сигнала измерительной информации приводит к некоторым качественным изменениям в их использовании. Различия функций преобразования сигнала измерительной информации аналоговым

(непрерывным, континуальным) и дискретным средствами измерений иллюстрируют рис. 1 и 2.

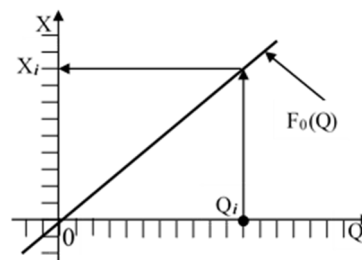


Рисунок 1 – Идеализированная модель непрерывного преобразования сигнала

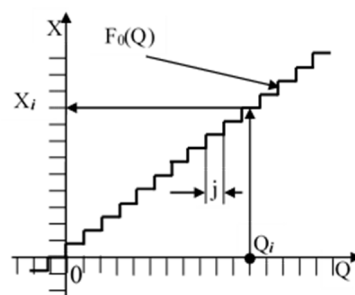


Рисунок 2 – Идеализированная модель дискретного преобразования сигнала

На рис. 2 обозначены система координат, где Q – ось интенсивности измеряемого свойства, а X – шкала для отображения выходного сигнала. $F_0(Q)$ – номинальная функция преобразования сигнала измерительной информации. Значение X_i

– выходной сигнал (результат преобразования измерения произвольного значения). Q_i – значение измеряемая величина.

Кажущееся сходство функций мешает различению некоторых важных особенностей нормирования их метрологических характеристик. Различия в трактовках при нормировании комплексов метрологических характеристик СИ связаны с разными подходами к ним пользователя и разработчика или исследователя СИ. Пользователь ставит во главу угла диапазон измерений и погрешности СИ, а для разработчика весьма существенными являются вариация показаний, порог чувствительности, соотношение систематической и случайной составляющих погрешности СИ и ряд других характеристик.

Для дискретных СИ важнейшей особенностью является номинальная ступень квантования j . Термин, установленный ГОСТ 8.009-84 «Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» иногда подменяют нестандартными терминами «дискрета», «дискретность», «шаг дискретности» или стандартными, но не соответствующими сути («чувствительность», «точность» и даже «цена деления»).

Примерным аналогом номинальной ступени квантования некорректно считают цену деления шкалы аналоговых приборов. У аналоговых СИ указатель может остановиться между отметками шкалы, что позволяет оператору округлять значение до ближайшей отметки или интерполировать долю деления «на глаз». В отличие от аналоговых, дискретные СИ имеют фиксированную разницу между любой парой соседних показаний, равную номинальной ступени квантования, поделить которую на доли невозможно. На эти различия следует обращать внимание при разработке методик выполнения измерений, методик поверки и калибровки СИ. Для этого следует четко различать альтернативные СИ.

Введение в действие ГОСТ 8.009 привело к стандартизации ряда метрологических характеристик, отсутствующих у аналоговых СИ. К ним в первую очередь относятся вид выходного кода и число разрядов кода. Код может быть десятичный (десятичный), двенадцатиричный, шестидесятиричный и другой, например, семиричный (для дней недели). Важно также предельное число

знаков на цифровом табло, которое может не совпадать с числом разрядов кода. Цифровое табло не определяет возможный диапазон показаний, заложенный в конструкцию СИ. Исправные часы не показывают 99 часов и 99 минут; поскольку значения текущего времени более 24 часов не несут бытового смысла.

Цена единицы наименьшего разряда выходного кода в предельном случае может совпадать с номинальной ступенью квантования входного сигнала. Однако номинальная ступень квантования может быть больше цены единицы наименьшего разряда кода. Номинальная ступень квантования для прибора (см. рис. 2) – наименьшее изменение измеряемой величины, на которое прибор реагирует сменной показаний на цифровом табло. Значение номинальной ступени квантования может быть кратно цене единицы наименьшего разряда кода.

Попытка однозначно связать аналоговых СИ с системой шкала-указатель, а «цифровые» СИ с наличием числового табло метрологически безграмотна. Например, бытовой «счетчик расхода воды» с «всплывающей» цифрой непрерывно вращающегося при работе прибора последнего барабана явно соответствует рис. 1. Сегодня с «цифровыми» электронными часами конкурируют электронно-механические часы с шаговым двигателем, функция преобразования которых полностью соответствует показанной на рис. 2. У таких часов при наличии выходных кодов (двенадцатиричного для часов, шестидесятиричных для минут и секунд) при наличии системы шкала-указатель имеются такие метрологические характеристики, как диапазон показаний (для часовой стрелки с пределами от 0 до 12 часов, для минутной стрелки от 0 до 60 минут и для секундной стрелки от 0 до 60 секунд (нулевое и последнее деления совпадают через оборот). Если цена наименьшего деления одна секунда, ее значение совпадает с номинальной ступенью квантования. Если штрихи на циферблате поставлены только у часовых цифровых отметок, цена деления для часовой стрелки равна 1 час, а для минутной 5 минут, и для секундной 5 секунд.

Очевидно, что для обеспечения единства измерений необходимо не только нормативно установить единицу и/или шкалу физической величины, но и обеспечить поверку применяемых средств измерений с корректным нормированием и контролем метрологических характеристик.

УДК 621

ПОВЫШЕНИЕ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
Якуть Ю.П., Ленкевич О.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе представлена современная методология, стимулирующая удовлетворение потребностей потребителей: QFD.

Ключевые слова: удовлетворенность потребителей, методология QFD.

INCREASING CUSTOMER SATISFACTION
Yakut Y.¹, Lenkevich O.²

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This paper presents a modern methodology that stimulates the satisfaction of consumer needs: QFD.

Key words: customer satisfaction, QFD methodology.

Адрес для переписки: Якуть Ю.П., ул. Сурганова 47/3, Минск 220100, Республика Беларусь
e-mail: yulia.yakut@gmail.com

Спрос вызвал активный рост рынка товаров и услуг. Из этого следует то, что потребитель начал предъявлять высокие требования к качеству продукции. Соответственно современные компании обязаны проследить и учитывать в производстве удовлетворенность своих потребителей и использовать все возможные методы для достижения максимальной конкурентоспособности.

Для контроля интересов потенциальных потребителей существует большое количество разнообразных методов, такие как, например, анкетирование или опрос. В современных реалиях данные способы стали затруднительными, либо невозможными. Таким образом, у организаций появилась необходимость использовать иные методы, чтобы оставаться конкурентоспособными. Эффективным может оказаться использование метода QFD.

Развертывание функции качества (Quality Function Deployment – QFD) – это методология систематического и организованного преобразования желаний и интересов покупателей (уже на ранних этапах пегли качества) в технические требования к качеству продукции, услуги и/или процесса.

Цель QFD – помочь организации планировать свои продукты и услуги, которые будут полностью отвечать требованиям заказчиков, а так же иметь постоянный контроль над тенденциями изменений интересов потенциального потребителя.

Идея развертывания организации качества позволяет узнать какие показатели продукции для потребителей представляют важность и на сколько они важнее других. Методология позволяет перевести потребности клиента в определенные технические характеристики, идентифицировать компоненты и части проекта, которые могут или должны быть изменены или добавлены для достижения удовлетворенности всех потребностей, а также расположить по предпочтениям модификации проекта, которые должны быть

сделаны, чтобы потребитель выиграл в стоимости и в качестве, то есть – остался довольным.

QFD-методология является оригинальной теорией, разработанной в Японии, в соответствии с которой пожелания и интересы, а так же установленные и ожидаемые требования потребителей с помощью математических матриц переводятся в подробные технические параметры и характеристики продукции, из чего формируются цели дальнейшего проектирования. Представленная структура, которая состоит из нескольких таблиц и используется в рамках метода QFD, из-за ее внешнего вида получила название «Дом качества» (Quality house) (рис. 1).



Рисунок 1 – «Дом качества»

Изначально наиважнейшие либо критические желания потребителей в первом «Доме качества» (коих несколько) отражают в виде технических характеристики продукта, после с помощью трех по-

следующих «Домов качества» (рис. 2), – в более детализированные технические требования к отдельным частям продукции, а дальше, как бы углубляясь, – к характеристикам процессов и, в завершение, к способам контроля производством в целом.

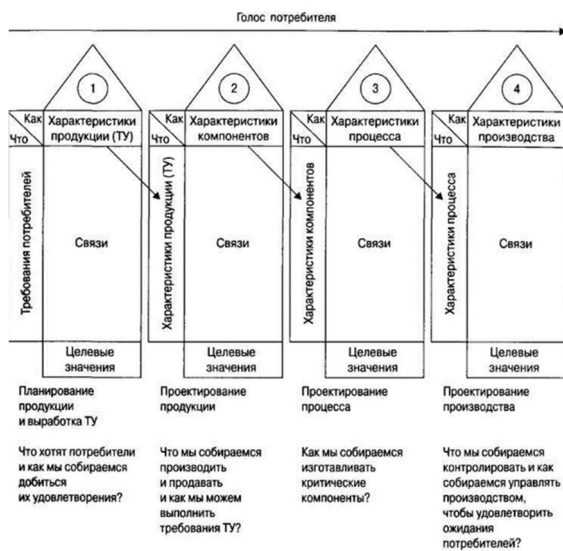


Рисунок 2 – Совокупность «Домов качества»

Данные технические требования к производству обеспечивают внушительное повышение конкурентоспособности свойств производимой продукции.

Первый «дом качества» отслеживает связь между интересами покупателей и соответствующими техническими условиями, которые содержат требования к качеству продукции. А вот для второго «дома качества» центром наблюдения является связь между свойствами продукции и свойствами определенных частей данной продукции.

Задачи QFD:

– услышать «голос потребителей» и ясно его трактовать в процессе проектирования и последующего улучшения как продукции, так и соответствующего производства;

– выполнить принцип «все должно быть сделано правильно с первого раза и точно в срок».

Порядок применения QFD: собрать особую команду специалистов, под руководством ответственного руководителя команды и с поддержкой эксперта, разбирающимся в методологии QFD. Эксперт должен снабжать актуальными данными и давать советы, повышающие эффективность методологии, а на начальной стадии работы оказывать помощь в построении четких целей, задач и сферы деятельности метода QFD, как проекта.

Рекомендации при построении первого «дома качества» являются следующими:

– определить область, в которую входят потенциальные покупатели, составить список ожидаемых

интересов и определить их приоритеты с использованием методов квалитметрии. Список желаний потребителей, касающийся характеристик продукции, может составляться с помощью очных или заочных опросов, направленных к имеющимся покупателям, путем проведения интервью, либо применяя «мозговой штурм» с командой специалистов;

– сравнить свойства продукции с результатом реализации продукции конкурентов. Отобразить в виде технических параметров качество продукции, а затем письменно выделить ее сильные и слабые стороны;

– построить и задать цели и задачи улучшений. Выделить характеристики продукции, являющиеся наиболее важными по мнению покупателей и которые должны быть подвержены улучшению сравнительно с продукцией конкурентов. Отобразить эти цели в виде соответствующей документации;

– отобразить ожидания опрошенных потребителей в виде технических свойств и характеристик продукции. Определить использование известных интересов потребителей для выполнения задач и получения преимущества на рынке;

– исследовать зависимость между полученными результатами опросов, содержащими в себе потребности покупателей и параметрами технических условий на производимую продукцию. Отобразить в матрице, насколько сильно оказывают влияние технические характеристики на удовлетворенность потребностей;

– идентифицировать силу взаимодействия между техническими характеристиками и отобразить это в треугольной матрице связи;

– письменно оформить и выразить в виде измеримых данных итоговые технические параметры с указанием единиц их измерения;

– определить целевые показатели проектирования новой продукции;

Аналогичный план действий при построении каждого из последующих «домов качества».

Таким образом, QFD-методология необходима для обеспечения большей чувствительности к интересам потребителей и ориентированием на постоянное улучшение понимания установленных и предполагаемых потребности потребителей.

Литература

1. Кузьмин, А. М. История возникновения, развития и использования метода развертывания функции качества / А. М. Кузьмин // Методы Менеджмента Качества. – 2005.

2. Маркушина, Е. Структурирование Функции Качества (QFD) / Е. Маркушина // Электронный журнал «Управление изменениями в компании» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ncspearson.com/research-notes/97-11.htm>.

УДК 532.135

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Коробко Е.В., Радкевич Л.В., Журавский Н.А., Кузьмин В.А.

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы тиксотропные явления и переходные релаксационные процессы в магниточувствительных материалах. Установлено, что площадь петли гистерезиса для составов магнитоуправляемых материалов меньше при большей концентрации магнитной дисперсной фазы. Исследованы переходные релаксационные процессы в магнитоуправляемых материалах в режиме непрерывного сдвига при включении магнитного поля. Установлено, что время достижения равновесного значения напряжения сдвига уменьшается с ростом скорости сдвига.

Ключевые слова: реологические свойства, магнитореологические жидкости, время релаксации.

INVESTIGATIONS OF THE EFFECT OF RELAXATION PROCESSES ON THE EFFICIENCY OF MAGNETOREOLOGICAL MATERIALS

Korobko E., Radkevich L., Zhurauski M., Kuzmin V.

*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Thixotropic phenomena and transient relaxation processes in magnetically sensitive materials have been studied. It has been established that the area of the hysteresis loop for the compositions of magnetically controlled materials is smaller at a higher concentration of the magnetic dispersed phase. Transient relaxation processes in magnetically controlled materials are studied in the continuous shear regime with the inclusion of a magnetic field. It has been established that the time to reach the equilibrium value of the shear stress decreases with increasing shear rate.

Key words: rheological properties, magnetoreological liquids, relaxation time.

*Адрес для переписки: Коробко Е.В., пр. Петруся Бровки, 15, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: evkorobko@gmail.com*

Научно-технический прогресс на современном этапе определяется явно выраженной тенденцией к широкому использованию «интеллектуальных» материалов, позволяющих осуществлять многостороннее и эффективное управление их свойствами, а также к разработке устройств, в которых они применяются. Способность управлять силовыми и температурными характеристиками реологических материалов, включающих поляризующиеся в электрическом или магнитном поле дисперсные наполнители в дисперсионной среде, открывает реальные перспективы новых путей решения актуальных технических задач для энергетики, прецизионного оборудования, машиностроения и строительства [1, 2], что подтверждает актуальность и необходимость развития данного направления исследований, в том числе, целенаправленной разработки их составов и алгоритмов управления их характеристиками.

Реологические особенности материалов определяются комплексом характеристик материала: расположением частиц в объеме, характером их молекулярного и поляризационного взаимодействия, степенью управляемого структурообразования в полях, влиянием температуры, уровнем диссипации энергии при нестационарном силовом воздействии и др. Малочисленные исследования конкретных реологических материалов, созданных авторами, показали, что характер

деформирования определяется также временем действия силового фактора и величиной поля по сравнению со временем релаксации среды. В частности, при росте скорости сдвига и последующем ее снижении в некоторых реологических материалах имеет место гистерезис напряжения сдвига [3, 4]. Это явление оказывает существенное влияние на исполнительные характеристики устройств с реологическими жидкостями.

В настоящей работе исследованы магнитореологические жидкости (МРЖ) с 20 об.%, 30 об.% и 40 об.% карбонильного железа, а также с 30 об.% карбонильного железа и 10 об.% ферримагнитного оксидного наполнителя при воздействии магнитных полей различной величины при различных сдвиговых нагрузках.

Тиксотропные явления в магниточувствительных материалах экспериментально исследованы в фиксированном магнитном поле в диапазоне скоростей сдвига $0,01-536 \text{ с}^{-1}$ в магнитном поле $62,5-625 \text{ мТл}$. Измерения проведены при непрерывном увеличении и, затем, уменьшении скоростей сдвига. Установлено, что площадь петли гистерезиса для составов только с карбонильным железом меньше при большей концентрации магнитной дисперсной фазы в магнитном поле $300-625 \text{ мТл}$. Так, при 250 мТл у МРЖ с 20 об.% площадь гистерезиса равна $1,22 \cdot 10^5 \text{ Па/с}$, а при 625 мТл равна $1,87 \cdot 10^5 \text{ Па/с}$. У МРЖ с

40 об.% при $B = 250$ мТл площадь гистерезиса равна $1,37 \cdot 10^5$ Па/с, а при 625 мТл – $1,46 \cdot 10^5$ Па/с. Добавление оксидных ферромагнитных частиц к карбонильному железу способствует значительному увеличению петли гистерезиса МРЖ. Показано, что использование таких частиц в составе магнито-реологических жидкостей позволяет дополнительно расширить диапазон напряжений сдвига.

Изучены переходные релаксационные процессы в исследуемых МРЖ в режиме непрерывного сдвига при фиксированной скорости сдвига при включении магнитного поля. Диапазон скоростей сдвига составил от 0,01 до 32 с^{-1} , величина магнитного поля 62,5–625 мТл. Характерные зависимости времени достижения устойчивого состояния МРЖ представлены на рис. 1.

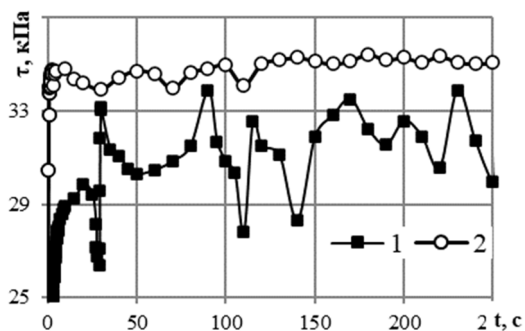


Рисунок 1 – Время достижения устойчивого состояния МРЖ при скоростях сдвига $0,1 \text{ с}^{-1}$ (1) и $32,0 \text{ с}^{-1}$ (2) при воздействии магнитного поля 625 мТл

Установлено, что время достижения равновесного значения напряжения сдвига уменьшается с ростом скорости сдвига. Оно существенно меньше, чем у МРЖ только с оксидным ферромагнитным наполнителем. Ускорение процесса обусловлено большей намагниченностью частиц наполнителя и, соответственно, большей силой их взаимодействия. Для МРЖ с большими концентрациями карбонильного железа при скорости сдвига до 1 с^{-1} релаксация напряжения сдвига происходит за меньшее время при меньших индукциях магнитного поля, а при больших скоростях сдвига напряжение сдвига устанавливается быстрее при больших значениях поля. Таким образом, увеличение скорости сдвига приводит к повышению темпа структурной релаксации в МРЖ в магнитном поле. Уменьшение concentra-

ции частиц карбонильного железа приводит к повышению времени достижения стабильного значения напряжения сопротивления сдвиговому воздействию. Однако при индукции поля 375 мТл и выше и скоростях сдвига 8 с^{-1} и более время достижения стабильного значения напряжения сдвига при меньшей концентрации частиц дисперсной фазы становится меньше, чем при большей концентрации. Для МРЖ, содержащей 30 об.% карбонильного железа и 10 об.% оксидного ферромагнитного наполнителя, характерно более медленное установление динамического равновесия по сравнению с МРЖ только с карбонильным железом. Это обусловлено наличием анизодиаметричных частиц оксидного ферромагнитного наполнителя, создающих дополнительные механические помехи структурообразованию в магнитном поле.

Таким образом, время релаксации МРЖ при включении магнитного поля зависит от состава жидкости и соотношения между гидродинамическими силами течения жидкости и магнитными силами взаимодействия между частицами дисперсной фазы. Полученные результаты являются основой для разработки методов комплексного исследования влияния процессов сдвиговой и структурной поляризации с учетом влияния релаксации для создания обобщенных алгоритмов управления материалами и устройствами в энергетике, прецизионном приборостроении, транспортном машиностроении, авиастроении и строительстве.

Литература

1. Ahamed, R. A State of Art on Magnetorheological Materials and their Potential Applications / R. Ahamed, S.-B. Choi, M. M. Ferdous // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2018. – Vol. 29, № 10. – P. 2051–2095.
2. A Test of Giant Electrorheological Valve in DC and Square Wave AC Fields with Different Frequencies / L. Xu [et al.] // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2018. – Vol. 29, № 2. – P. 250–254.
3. Aizawa, R. Hysteresis Phenomenon in Flow-Curves of ER Fluids Containing Sulfonated Polymer Particles / R. Aizawa, S. L. Vieira, M. Nakano // *International Journal of Modern Physics B*. – 2001. – Vol. 15, № 6–7. – P. 1070–1077.
4. Gorodkin, S. Irreversible Effects in Magnetorheological Fluids / S. Gorodkin, R. James, W. Kordonski // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2011. – Vol. 22, № 15. – P. 1749–1754.

УДК 616.77, 621.78

ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ НА ЖЕСТКОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИТИНОЛА

Богдан П.С., Савченко А.Л., Минченя В.Т.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием изделий медицинского назначения. Задачей исследования является анализ влияния натяжения нитиноловой проволоки при термообработке на ее механические характеристики. Показано, что при увеличении силы натяжения изгибная жесткость образцов снижается.

Ключевые слова: нитинол, проволока, термообработка, натяжение, изгибная жесткость.

EFFECT OF TENSION DURING HEAT TREATMENT ON THE RIGIDITY OF NITINOL SPECIMENS

Bogdan P., Savchenko A., Minchenya V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republik of Belarus

Abstract. The research topic is related to the improvement of medical devices. The task of the study is to analyze the influence of the tension of the nitinol wire during heat treatment on its mechanical characteristics. It is shown that with an increase in the tension force, the bending rigidity of the samples decreases.

Key words: nitinol, wire, heat treatment, tension, flexural rigidity.

Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

Объектом исследования является сплав никелида титана (нитинол) и технологические процессы формообразования изделий из проволоки на его основе.

Для формообразования пространственных структур из нитиноловой проволоки требуется термообработка с фиксацией требуемой формы. Режим термической обработки определяет температуру, при которой нитинол находится в состоянии сверхупругости, то есть воссоздает форму, запомненную при термообработке.

Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» выпускает ряд изделий для кардиохирургии из нитиноловой проволоки. В частности, налажен серийный выпуск стентграфтов, в конструкции которых имеются зигзагообразные элементы их нитинола (рис. 1).



Рисунок 1 – Зигзагообразный элемент стентграфта из нитинола

Для термообработки такие элементы размещают на многоместных приспособлениях в виде труб со штифтами для придания проволоке зигзагообразной формы. Экспериментальный вариант такого приспособления показан на рис. 2 [1].

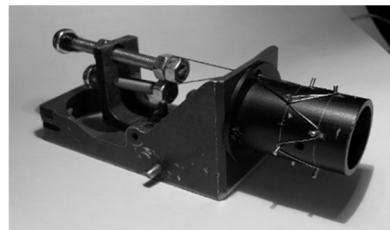


Рисунок 2 – Экспериментальный вариант приспособления для придания проволоки зигзагообразной формы

После навивки на штифты проволока натягивается и в таком состоянии вместе с приспособлением помещается в печь.

При разработке технологического процесса термообработки исследовались такие параметры, влияющие на механические свойства образцов, как температура термообработки, геометрия готовых изделий и ее изменение в процессе термообработки, режимы охлаждения и другие [2]. Тем не менее, выяснилось, что часть образцов имеют при рабочей температуре недостаточную жесткость, то есть при выходе из системы доставки стентграфт может иметь значительную остаточную деформацию. В ходе анализа технологического процесса возникло подозрение, что при навивке проволоки на приспособление различные участки могут иметь различное натяжение, что может привести к отличиям в механических характеристик этих участков после термообработки. Поэтому были выполнены экспериментальные исследования влияния натяжения при термообработке на жесткость образцов из нитинола.

Для исследования были взяты образцы проволоки Ti-44,48; Ni-49,16; Cu-6,02 фирмы «Фукарава» (Япония) диаметром 0,45 мм, используемой для изготовления каркасов стент-графтов.

Было разработано приспособление (рис. 3), в котором проволока навивалась на штифты и фиксировалась после задания натяжения динамометром. В результате получались Λ -образные элементы одинакового размера.



Рисунок 3 – Экспериментальный вариант приспособления для придания проволоки зигзагообразной формы

Одновременно на оправку устанавливалось несколько образцов с разным натяжением, которые вместе с приспособлением подвергались термической обработке. После этого образцы снимались и подвергались измерению жесткости в приспособлении, которое позволяло измерять усилие деформации образцов на заданный угол, в данном случае 30° (рис. 4).

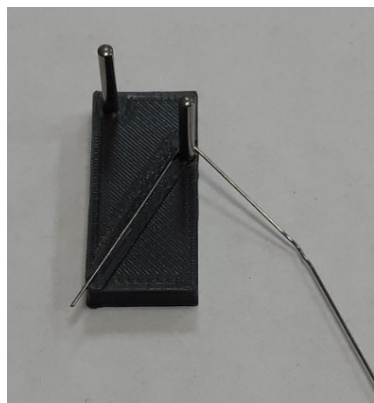


Рисунок 4 – Приспособление для измерения жесткости

Результаты измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений

Усилие натяжения, Н	Усилие деформации, Н
0	1,7
5	1,5
10	1,4
30	1,2
50	0,95
70	0,7
90	0,45

Видно, что при увеличении натяжения жесткость образцов снижается. Для наглядности это показано на графике (рис. 5).

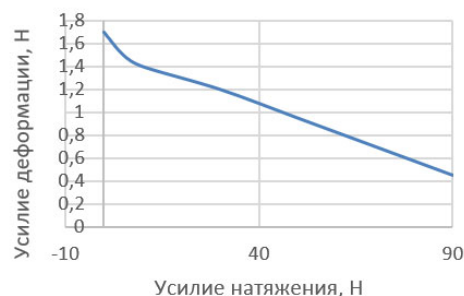


Рисунок 5 – График зависимости усилия деформации от натяжения

Технологические особенности процесса термической обработки не позволяют выполнять ее с нулевым натяжением проволоки, так как при этом сложно обеспечить требуемую форму. Но при навивке следует обеспечивать одинаковое натяжение всех ветвей зигзага, чтобы в результате обеспечить одинаковую жесткость элементов. Для этого предлагаются некоторые изменения в конструкцию приспособлений. В частности, предлагается использовать меньшее количество слоев навивки и изменить механику натяжения. Эти меры должны привести к снижению трения между проволокой и элементами приспособления и, следовательно, увеличить равномерность натяжения.

Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

Литература

1. Разработать оригинальную конструкцию системы аортального стентграфта и внедрить технологию применения системы аортального стентграфта для хирургического лечения аневризм грудной аорты при операциях с искусственным кровообращением [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключительный) : ГБ 03.08-1/2011 / кол. авт. Белорусский национальный технический университет, рук. Минченя В.Т., ис-полн. Минченя Н.Т., исполн. Савченко А.Л., исполн. Степаненко Д.А. – Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2013. . – № ГР 20113925.

2. Разработка и исследование конструктивных и технологических параметров формообразования изделий медицинского назначения из никелида титана» в рамках задания 4.1.08 «Разработка и исследование технологии задания формы материалам на основе никелида титана для получения изделий медицинского назначения [электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. В.Т. Минченя; исполн.: А.Л. Савченко [и др.]. – Минск, 2015. – 120 с. – Библиогр.: с. 117–120. – № ГР 20141055.

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 544.537

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СМЕСОВОЙ ТКАНИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ
КЛАСТЕРАМИ УГЛЕРОДА И ТИТАНА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВЫДЕРЖКОЙ
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Анисович А.Г.¹, Маркевич М.И.¹, Акула И.П.¹, Чекан Н.М.¹, Щербаклова Е.Н.², Кевра Е.В.²

¹ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе осуществлен синтез композиционного материала на основе смесовой ткани 07С11-КВ (производство ОАО Моготекс) путем модификации кластерами углерода и титана. Проведено исследование морфологии поверхности полученного материала после выдержки при низких температурах.
Ключевые слова: морфология поверхности, смесовая ткань, катодно-дуговая плазма.

SURFACE MORPHOLOGY OF A MIXED FABRIC MODIFIED BY CARBON AND TITANIUM
CLUSTERS AFTER EXPOSURE TO LOW TEMPERATURES

Anisovich A.¹, Markevich M.¹, Akula I.¹, Chekan N.¹, Shcherbakova E.², Kevra E.²

¹Physical-technical Institute of the NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In this work a composite material based on a mixed fabric 07S11-KV (manufactured by ОАО Mogotex) was synthesized by modifying with carbon and titanium clusters. The study of the surface morphology of the obtained material after holding at low temperatures was carried out.

Key words: surface morphology, mixed fabric, cathode-arc plasma.

Адрес для переписки: Щербаклова Е.Н., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: scherbakova@bntu.by

В Республике Беларусь разработка и производство текстиля, обладающего специальными свойствами, является приоритетным и инновационным направлением.

В настоящее время уделяется большое внимание формированию комбинированных текстильных материалов. Актуальна разработка таких материалов на основе смесовых тканей. Значимость приобретают разработки технического текстиля на основе отечественного сырья [1, 2].

Так, при разработке новых антистатических комбинированных материалов можно проводить модификацию тканей кластерами металлов и углерода. В связи с вышеизложенным, нами была выбрана ткань 07С11-КВ и проведена модификация ее кластерами углерода и титана.

Целью данной работы являлось: синтез и исследование морфологии поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани 07С11-КВ (производство ОАО Моготекс), модифицированной кластерами углерода и титана, после выдержки при низких температурах.

Предварительно перед формированием покрытий поверхность ткани обрабатывалась высокоэнергетичными ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 минут при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере порядка $3,7 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее

напряжение 2 кВ, ионный ток 20 мА, время очистки 15 минут.

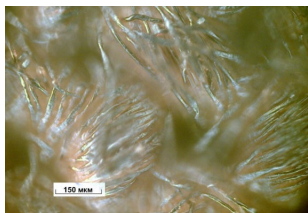
В данной работе титан осаждался на одну сторону ткани, а на другую сторону – углерод. При нанесении покрытия из титана использовался дуговой источник (ток дуги 55 А) в режиме сепарации плазмы. Поскольку температура покрытия при его формировании на поверхности ткани может достигать нескольких сотен градусов Цельсия, то процесс велся путем чередования периодов работы источника плазмы (1 минута) и паузы для охлаждения ткани (1 минута). Толщина покрытия составила примерно 0,5 мкм.

Затем ткань переворачивалась и при достижении в камере остаточного вакуума порядка $3 \cdot 10^{-3}$ Па снова выполнялась очистка поверхности ткани ускоренными ионами аргона. Затем включались два источника импульсной катодно-дуговой плазмы углерода и при подаче в вакуумную камеру реакционного газа (ацетилен) до давления порядка 0,7–1,0 Па выполнялось осаждение углеродного покрытия.

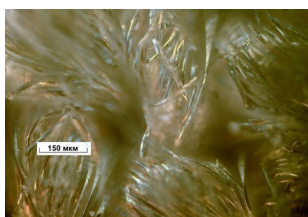
Параметры работы импульсных источников плазмы следующие: напряжение основного разряда 300 В, длительность разрядного импульса порядка 300 мкс, ток разрядного импульса (2500–3000) А, частота следования разрядных импульсов 5 Гц. Общее число разрядных импульсов

составляло 12000. Толщина углеродного покрытия составила приблизительно 0,8–1,2 мкм.

Испытания при низких температурах производились в климатической камере СМ-70/150-80 ТВХ. Образцы подвергались температурному воздействию при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 часов при влажности 50 %.



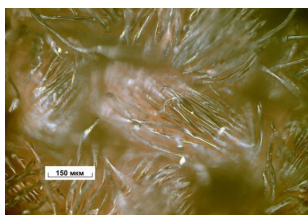
a



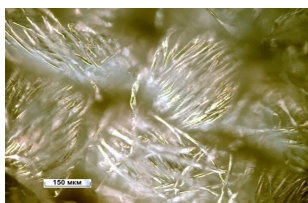
б

a – углерод, *б* – титан

Рисунок 1 – Поверхность ткани после нанесения покрытия



a



б

a – углерод, *б* – титан

Рисунок 2 – Морфология поверхности ткани после климатических испытаний, температура $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

На поверхности волокон не наблюдается изменений структуры покрытия или нарушения металлизированного слоя (рис. 3).

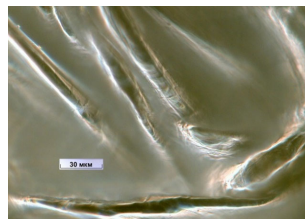


Рисунок 3 – Отдельные волокна ткани с покрытием титана после климатических испытаний, $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Исследование морфологии поверхности производилось с использованием инвертированного оптического микроскопа МИ-1. При светлопольном освещении не удается получить изображение требуемой контрастности и цветности, поскольку поверхность композиционного материала не является полностью плоской. Поэтому для исследования поверхности применялся режим освещения по методу темного поля [3]. На рис. 1 представлена морфология поверхности композиционного материала с двух сторон в исходном состоянии.

Поверхность образцов неоднородна. На всех снимках видна диффузия (через отверстия в переплетениях) наносимых элементов на другую сторону. Так, на стороне, где наносился углерод, имеются филаменты, покрытые титаном поверх покрытия углерода. Такое же явление наблюдается и с обратной стороны. После климатических испытаний поверхность ткани не претерпевает существенных изменений (рис. 2).

Исследования показали, что разработанный и полуживой композиционный материал хорошо выдерживает пониженные температуры, не наблюдается дополнительной деформации композиционного материала и дефектов структуры.

Таким образом, композиционный материал на основе смесовой ткани 07С11-КВ (производство ОАО Моготекс), модифицированной кластерами углерода и титана может быть использован в специальных применениях.

Литература

1. Морфология поверхности ткани 07С11-КВ после лазерного воздействия / А. Г. Анисович [и др.] // Материалы 13 Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника». – 2021. – С. 461–464.
2. Магниторезонансная диагностика радиопоглощающих композиционных материалов / С. В. Адашкевич [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 71–75.
3. Анисович, А. Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн.наук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.

УДК 539.12.04

МИКРОТВЕРДОСТЬ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ БрБ2, ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ УГЛЕРОДА СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Поляк Н.И.¹, Шарипов Ш.Д.¹, Шалыга А.В.¹, Анищик В.М.¹, Лигачев А.Е.², Понарядов В.В.¹

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Изучено влияние облучения ионами C^+ с энергией $E = 250$ кэВ ($J = 25 \pm 5, 65 \pm 5$ и 105 ± 15 А/см²) единичным импульсом на изменение микротвердости сплава БрБ2 на разных стадиях старения. Наблюдаемые изменения микротвердости сплава связаны с исходным состоянием и структурно-фазовыми превращениями при облучении.

Ключевые слова: дисперсионно твердеющие сплавы, бериллиевая бронза БрБ2, термическая обработка, облучение, микротвердость по Виккерсу.

MICROHARDNESS OF BERYLLIUM BRONZE BrB2 IRRADIATED WITH MEDIUM-ENERGY CARBON IONS

Poliak N.¹, Sharipov S.¹, Shalyga A.¹, Anishchik V.¹, Ligachev A.², Ponariadov V.¹

¹Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

²A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS
Moscow, Russian Federation

Abstract. The effect of irradiation with C^+ ions with energy $E = 250$ keV ($J = 25 \pm 5, 65 \pm 5$ and 105 ± 15 A/cm²) by a single pulse on the change in the microhardness of the BrB2 alloy at different stages of aging was studied. The observed changes in the microhardness of the alloy are associated with the initial state and structural-phase transformations during irradiation.

Key words: dispersion hardening alloys, beryllium bronze BrB2, heat treatment, irradiation, Vickers microhardness.

Адрес для переписки: Поляк Н.И., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: n.poliak@mail.ru

Одним из путей повышения надежности материалов и изделий для приборостроения является модификация их свойств пучками заряженных частиц.

Бериллиевые бронзы используются в пружинных контактах, переключателях, соединителях, в оптико-волоконной продукции, гнездовых разъемах для соединения интегральных схем с печатной платой. Не смотря на относительную дороговизну бериллиевых бронз, их применение оправдано, когда требуются высокие технологические характеристики изделий. Наиболее применяемым сплавом системы Cu-Be является сплав БрБ2, содержащий около 2 % Be, обладающий в закаленном состоянии хорошей пластичностью и технологичностью, повышенными механическими свойствами в состаренном состоянии [1].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния облучения ионами C^+ на микротвердость бериллиевой бронзы БрБ2, находящейся на разных стадиях старения.

Методика эксперимента. В качестве объекта исследования использовался сплав БрБ2 следующего состава (вес. %): Be – (1,8–2,2), Ni < 0,5, остальное – Cu. Закалка проводилась путем выдержки образцов при температуре $T = 1053$ К в течение 20 минут и последующем их охлаждении в воду со льдом. С целью получения различных

структурно-фазовых состояний образцы искусственно состаривались при $T = 623$ К в течение $\tau = 0,17; 0,5; 1; 2$ и 5 ч.

Облучение ионами C^+ с энергией $E = 250$ кэВ осуществлялось на установке ТЕМП-4 при различных плотностях тока ($J = 25 \pm 5, 65 \pm 5$ и 105 ± 15 А/см²) единичным импульсом длительностью ≈ 100 нс. Проекционный пробег ионов в исследуемой мишени (оценивался с помощью программы SRIM) составил 0,3 мкм.

Микротвердость образцов H_u по Виккерсу измерялась на микротвердомере DHV-1000 при различных нагрузках P на индентор ($P = 0,098–2,94$ Н), при этом они подбирались в зависимости от условий старения так, чтобы анализируемые слои находились на одинаковой глубине h . Время выдержки под нагрузкой составило 10 с.

Основные результаты и их обсуждение. Бериллиевые бронзы являются стареющими сплавами благодаря существенному уменьшению растворимости бериллия в меди при снижении температуры, поэтому к ним применима термическая обработка. На рис. 1 приведена кривая старения сплава БрБ2 при температуре $T = 1053$ К, построенная на основании анализа глубинных зависимостей его микротвердости при различных временах отжига.

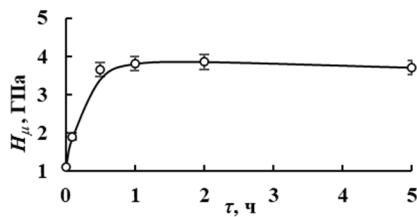


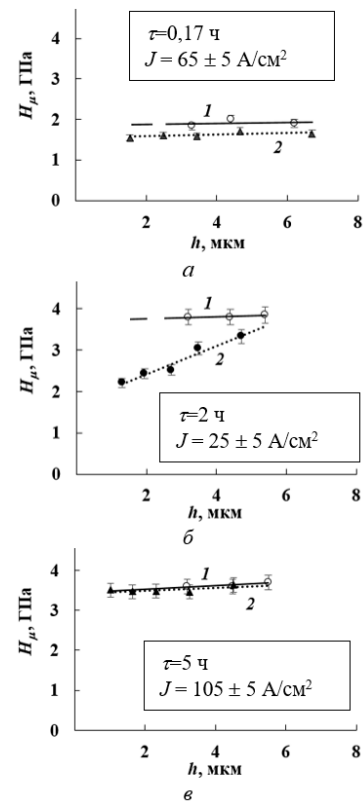
Рисунок 1 – Кинетика старения сплава БрБ2 при $T = 623 \text{ K}$

Начальный рост H_{μ} сплава, состаренного в течение $\tau = 0,17 \text{ ч}$, по сравнению с закаленным ($H_{\mu}^{\text{зак}} = 1,1 \text{ ГПа}$) составил 73 % и обусловлено диффузией атомов Ве с образованием зон Гинье-Престона [2]. После старения в течение $\tau = 0,5; 1$ и 2 ч наблюдается последующий рост H_{μ} (на 250 %) и достигается максимальное значение, что может быть вызвано последовательным образованием включений γ'' -и γ' -фаз. Таким образом, основная часть процесса старения протекает в интервале $0,17-1 \text{ ч}$. При дальнейшем отжиге (до 5 ч) микротвердость сплава практически не изменяется (в пределах погрешности измерений), что может быть связано с ростом γ' -фазы и образованием γ -фазы.

Известно, что микротвердость стареющих сплавов (в частности, бериллиевых бронз) определяется типом связи выделений с матрицей, которая может быть когерентной (зоны Гинье-Престона), полукogerентной (γ'' -и γ' -фазы) и некогерентной (γ -фаза), их объемной долей, степенью дисперсности [2, 3]. Эволюция структурно-фазовых превращений, протекающая в стареющих сплавах при воздействии заряженных частиц, обуславливает изменение их свойств [4, 5]. В зависимости от режимов облучения может иметь место как упрочнение, так и разупрочнение сплава [4].

Для выявления стабильности структурно-фазового состояния сплава БрБ2 при облучении выбраны образцы, состаренные в течение $0,17; 2$ и 5 ч , т. е. находящиеся на разных стадиях старения и отличающиеся типом связи образующихся частиц с матрицей сплава. Результаты измерений микротвердости до и после облучения приведены на рис. 2. Обнаружено, что микротвердость образцов, содержащих когерентные и полукogerентные включения (рис. 2, а и б), уменьшается, причем более сильно при меньшей плотности тока и их структурно-фазовое состояние менее стабильно под облучением, а микротвердость образца, содержащего полукogerентные и некогерентные включения, напротив, не меняется, т. е. его структурно-фазовое состояние стабильно (рис. 2, в).

Следовательно, наблюдаемое изменение микротвердости сплава БрБ2 при облучении обусловлено типом связи упрочняющих частиц с матрицей сплава, и соответственно, вызываемым ими уровнем напряжений на границе матрица-выделение.



1 – исходные образцы; 2 – облученные

Рисунок 2 – Глубинные зависимости микротвердости сплава БрБ2 после старения при $T = 623 \text{ K}$

Литература

1. Мысик, Р. К. Литье и обработка бронз со специальными свойствами / Р. К. Мысик, Ю. Н. Логинов, А. В. Сулицин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 312 с.
2. Чуистов, К. В. Старение металлических сплавов / К. В. Чуистов. – Киев : Академперіодика, 2003. – 568 с.
3. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов: учебник для вузов / И. И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
4. Effect of High Energy Ion Implantation on the Structure and Mechanical Properties of Aluminium Alloys / V. M. Anishchik [et al.] // Acta Physica Polonica A. – 2017. – Vol. 132, № 2. – P. 291–294.
5. Structural Evolution of Copper Alloys under High Power Ion Beam Irradiation / T. V. Panova [et al.] // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – Vol. 8, № 2. – P. 243–246.

УДК 616.71-001.5-021.3

МОДИФИКАЦИЯ БЛОКИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ОСТЕСИНТЕЗА ПЕРЕЛОМОВ ДИСТАЛЬНОГО МЕТАЭПИФИЗА ЛУЧЕВОЙ КОСТИ

Анщиц А.А.¹, Минченя В.Т.², Ситник А.А.³, Дежец В.И.⁴

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет

³ГУ «РНПЦ травматологии и ортопедии»

Минск, Республика Беларусь

⁴УЗ «Брестская областная клиническая больница»

Брест, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрен способ компьютерной оптимизации системы фиксации перелома лучевой кости пластиной с угловой стабильностью с заостренными, сферическими и скругленными установочными выступами, сравнение их воздействия на поверхность кости и выборе наилучшего варианта фиксации. При построении моделей фиксации и исследовании полей напряжений и перемещений использовался современный программный продукт SolidWorks 2018 и программная система конечно-элементного анализа Ansys 2021.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, лучевая кость, блокированная пластина, пакет Ansys 2021.

MODIFICATION OF A BLOCKED PLATE FOR OSTESYNTHESIS OF FRACTURES OF THE DISTAL RADIAL METAEPIPHYSIS

Anshyts A.¹, Minchenya V.², Sitnik A.³, Dezhets V.⁴

¹State enterprise "Science and technology park of BNTU Polytechnic"

²Belarusian National Technical University

³State Institution "Respublican Scientific Center for Traumatology and Orthopedics"

Minsk, Republic of Belarus

⁴Health-care institutions "Brest Regional Clinical Hospital"

Brest, Republic of Belarus

Abstract. The paper considers a method for computer optimization of the fracture fixation system, the radius with an angular stability plate with pointed, spherical and rounded mounting protrusions, a comparison of their effect on the bone surface and the choice of the best fixation option. When building fixation models and studying stress and displacement fields, the modern software product SolidWorks 2018 and the software system of finite element analysis Ansys 2021 were used.

Key words: computer modeling, radius, blocked plate, Ansys 2021.

Адрес для переписки: Анщиц А.А., Сурганова 47/1, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: anshyts.a.a@gmail.com

Переломы дистального метаэпифиза лучевой кости – это один из наиболее распространенных переломов у пациентов пожилого и старческого возраста [1]. В последние десятилетия в клинической практике для фиксирования переломов начали использовать пластины и стержни. Однако практика использования показала, что такой метод лечения имеет разную степень успешности из-за состояния костной ткани и возраста пациента. Поэтому представляют интерес работы по биомеханике остеосинтеза пластинами с угловой стабильностью с учетом состояния костной ткани и возраста пациента [2].

Экспериментальные методы биомеханики, которые часто используются для оценки жесткости фиксации переломов *in vitro*, имеют такие недостатки как невозможность обеспечить одинаковую геометрическую форму образцов и также оценить динамику изменения жесткости систем фиксации во время сращения перелома. Поэтому перспективным является создание компьютерных 3D моделей

систем фиксации переломов дистального метаэпифиза лучевой кости с учетом состояния костной ткани. Сложные геометрические формы лучевой кости и наконечников пластин делают необходимым использование современных компьютерных методов анализа и синтеза звеньев систем фиксации [3]. В данной работе выполнено исследование биомеханики систем фиксации перелома лучевой кости блокируемой пластиной, модифицированной тремя вариантами установочных выступов.

Материалы и методы. Исследовались варианты остеосинтеза перелома дистального метаэпифиза лучевой кости блокированной пластиной с заостренными, сферическими и скругленными установочными выступами. Анализировался вариант нагрузки на кость во время установки пластины врачом, вручную прикладывающим усилие для удержания пластины и создающим крутящий момент при блокировании винта в отверстии.

Все модели были построены с использованием пакета компьютерного моделирования SolidWorks

2018. На первом этапе была создана 3D-модель, повторяющая геометрию лучевой кости (рис. 1).

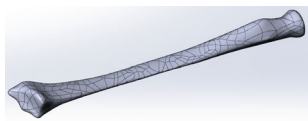


Рисунок 1 – Трехмерная модель лучевой кости

На втором этапе были построены трехмерные компьютерные модели пластины (рис. 2, а) и винтов (рис. 2, б). Все винты для установки пластины с угловой стабильностью имеют диаметр 2,7 мм.

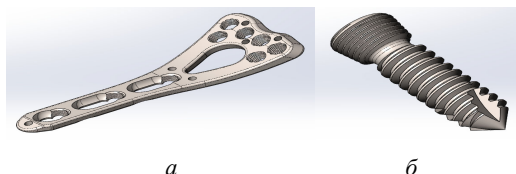
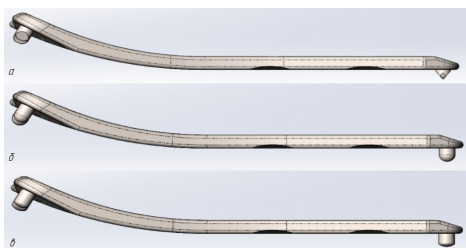


Рисунок 2 – Трехмерные модели блокированной пластины (а) и блокирующего винта (б)

На третьем этапе были смоделированы выступы с различными геометрическими параметрами (рис. 3).



а – заостренные; б – сферические; в – скругленные

Рисунок 3 – Трехмерные модели блокируемых пластин с выступами различных форм

Для того чтобы описать напряженно деформированное состояние костной ткани пожилого организма, с помощью системы уравнений механики деформируемого твердого тела, материал костной ткани (кортикальной и спонгиозной) и сухожилий был принят неупругим. Это дает возможность описать напряженно деформируемое состояние костной ткани с помощью системы уравнений механики деформируемого твердого тела.

Численный анализ. Задачи определения напряженно-деформированного состояния поверхности кости решены с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с использованием программной системы конечно-элементного анализа Ansys 2021.

Исследованы варианты остеосинтеза перелома дистального метаэпифиза лучевой кости пластинами с угловой стабильностью с установочными выступами, имеющими различные геометрические параметры. Анализ напряженно-деформированного состояния систем фиксации перелома дистального метаэпифиза лучевой кости накостными пластинами проведен для пластин с

заостренными (рис. 4), со сферическими (рис. 5) и со скругленными (рис. 6) выступами.

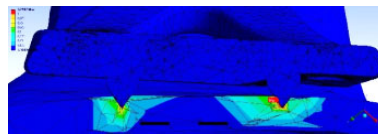


Рисунок 4 – Распределение деформаций в модели пластины с заостренными выступами

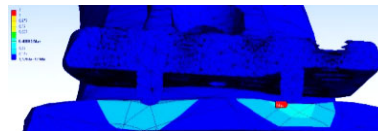


Рисунок 5 – Распределение деформаций в модели пластины со сферическими выступами



Рисунок 6 – Распределение деформаций в модели пластины со скругленными выступами

На рис. 4–6 приведены распределения деформаций в системах фиксации пластиной с угловой стабильностью перелома метаэпифиза лучевой кости. Определены значения наибольших напряжений в зоне перелома метаэпифиза лучевой кости. Максимальные деформации костной ткани в системах фиксации возникают при остеосинтезе пластиной с заостренными выступами (3,2 мм). При остеосинтезе пластиной со сферическими выступами максимальная деформация костной ткани при тех же нагрузках в 8 раз меньше предыдущего варианта (0,4 мм). Наилучший результат показала пластина со скругленными выступами (0,3 мм).

Заключение. Анализ результатов показал, что лучшими биомеханическими свойствами обладает пластина с скругленными выступами, поскольку деформации в этой пластине и в костной ткани метаэпифиза лучевой кости меньше, чем в системах фиксации пластинами с заостренными и сферическими выступами. Жесткость системы фиксации перелома пластиной с угловой стабильностью и выступами больше, поскольку полное и относительное перемещение в зоне дистального метаэпифиза лучевой кости меньше, чем в системах фиксации обычной пластиной с угловой стабильностью.

Литература

1. Biomechanical evaluation of 3-part proximal humerus fractures: A cadaveric study / R. J. Gillespie [et al.] // Orthopedics. – 2009. – Vol. 32. – P. 816.
2. Hepp, P. Biology and biomechanics in osteosynthesis of proximal humerus fractures / P. Hepp, C. Josten // Eur. J. Trauma Emerg. Surg. – 2007. – № 4. – P. 337–344.
3. Computer system for definition of the quantitative geometry of musculature from CT images / M. Daniel [et al.] // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. – 2005. – Vol. 8, № 1. – P. 25–29.

УДК 535.3

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТОНКОГО ОБРАЗЦА
МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАГРЕВА**

Бобученко Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получен алгоритм измерения теплофизических параметров материала методом периодического нагрева с учетом температуры среды на конце образца.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопередачи.

**MEASUREMENT OF THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF A THIN SAMPLE
BY THE METHOD OF PERIODIC HEATING**

Babuchenka D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An algorithm for measuring the thermophysical parameters of the material by the method of periodic heating is obtained, taking into account the temperature of the medium at the end of the sample.

Key words: heat equation, thermal conductivity coefficient, thermal diffusivity, heat transfer coefficient.

*Адрес для переписки: Бобученко Д.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

Метод периодического нагрева (методов регулярного режима третьего рода, метод температурных волн) – известный метод определения теплофизических свойств (ТФС) различных материалов. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Для измерения ТФС этим методом необходимо малое количество материала из-за резкого затухания температурной волны, это также обуславливает незначительность вклада радиационного переноса, и конвективного движения. В данной работе исследовано измерение ТФС с учетом влияния температуры среды на конце образца.

Рассмотрим полуограниченную среду из изучаемого материала. Распределение температуры T определяется уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (1)$$

с начальным условием: $T(t = 0, x) = T_0$, и на границе ($x = 0$) температура меняется по гармоническому закону: $T(t, 0) = T_0 + \Omega_{max} \sin(\omega t)$, $T(t, x = \infty) = T_0$, где a – коэффициент температуропроводности, T_0 – начальная температура среды, Ω_{max} – амплитуда колебаний температуры, $\omega = 2\pi/\tau_0$ – круговая частота, τ_0 – период колебаний. После замены переменной $\Omega(x, t) = T(x, t) - T_0$ в уравнении (1), т.е. отсчитывая температуру от уровня T_0 , задача нахождения распределения температуры сводится к решению уравнения с начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (2)$$

$$\Omega(t = 0, x) = 0, \quad (2.1)$$

$$\Omega(t, x = 0) = \Omega_{max} \sin(\omega t), \quad (2.2)$$

$$\Omega(t, x = \infty) = 0. \quad (2.3)$$

Решение задачи (2) имеет вид [1, 2]:

$$\Omega(t, x) = \Omega_{max} \exp\left\{-\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} x\right\} \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} x\right). \quad (3)$$

Амплитуда изменения температуры зависит от координаты по экспоненциальному закону:

$$A_{T1} = \Omega_{max} \exp\left\{-\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} x\right\}.$$

Анализ этого решения, имеющего вид температурной волны, позволяет установить параметры такой волны. Глубина проникновения волны (амплитуда уменьшается в e раз): $x_{np} = \sqrt{\frac{a\tau_0}{\pi}}$, фазовая скорость волны: $v_\phi = 2\sqrt{\frac{\pi a}{\tau_0}}$, длина волны:

$\lambda_{волны} = 2\sqrt{\pi a \tau_0}$. Из решения (3) по измеренным амплитудам колебаний на поверхности образца $x = 0$ Ω_{max} и в глубине $x = x_1$ $\Omega_m(x_1)$, можно определить коэффициент температуропроводности a [1]:

$$a = \frac{\pi x_1^2}{\tau_0 \left[\ln \frac{\Omega_{max}}{\Omega_m(x_1)} \right]}. \quad (4)$$

Также можно рассчитать a по измеренным амплитудам $\Omega_m(x_1), \Omega_m(x_2)$ на расстояниях x_1, x_2 от края образца [1]:

$$a = \frac{\pi(x_2 - x_1)^2}{\tau_0 \left[\ln \frac{\Omega_m(x_1)}{\Omega_m(x_2)} \right]}. \quad (5)$$

Из решения (3) также вытекает, что коэффициент температуропроводности a можно определить по измерению времени запаздывания гармонических колебаний в глубине x_1 и на поверхности образца $\tau_3(x_1)$ [1]:

$$a = \frac{\tau_0 x_1^2}{4\pi \tau_3^2(x_1)}, \quad (6)$$

или по времени запаздывания гармонических колебаний на расстояниях x_1, x_2 от поверхности образца $\tau_3(x_2, x_1)$ [1]:

$$a = \frac{\tau_0 (x_2 - x_1)^2}{4\pi \tau_3^2(x_2, x_1)}. \quad (7)$$

Формулы (6), (7) имеют более практическую «ценность» по сравнению с формулами (4), (5), поскольку, линейные размеры и время могут быть измерены наиболее точно. Но для достаточно тонкого образца необходимо учитывать условия теплообмена на границе (граничное условие 3 рода):

$$\alpha \Omega(x=l, t) = -\lambda \frac{\partial \Omega}{\partial x}(x=l, t), \quad (8)$$

где l – длина образца, α – коэффициент теплопередачи, λ – коэффициент теплопроводности материала. Рассмотрим получение общего решения уравнения (2) с начальными и граничными условиями (2.1), (2.2), (8). Решение уравнения (2) можно представить в виде произведения двух функций: $\Omega(x, t) = \chi(x)\eta(t)$, тогда при подстановке в уравнение (2) получится система из двух дифференциальных уравнений [2]:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \beta^2 \chi = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \beta^2 a \eta = 0. \quad (9)$$

Введя мнимую величину: $i\omega = -\beta^2 a$, и $\varepsilon^2 = -\beta^2$ следует: $\varepsilon = \sqrt{\frac{i\omega}{a}} = (1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2a}}$. Решениями уравнений (9) являются следующие функции [2]:

$$\chi(x) = A \sinh(\varepsilon x) + B \cosh(\varepsilon x), \quad \eta(t) = e^{i\omega t}. \quad (10)$$

A, B – постоянные, определяются из граничных условий (2.2, 8):

$$\begin{aligned} \Omega_{max} e^{i\omega t} &= B e^{i\omega t} \\ \alpha e^{i\omega t} \{A \sinh(\varepsilon l) + B \cosh(\varepsilon l)\} &= \\ &= -\varepsilon \lambda e^{i\omega t} \{ \cosh(\varepsilon l) + B \sinh(\varepsilon l) \}. \end{aligned}$$

Отсюда получается:

$$\begin{aligned} B &= \Omega_{max}, \\ A &= -B \frac{\cosh(\varepsilon l) + \frac{\varepsilon \lambda}{\alpha} \sinh(\varepsilon l)}{\sinh(\varepsilon l) + \frac{\varepsilon \lambda}{\alpha} \cosh(\varepsilon l)}. \end{aligned}$$

Тогда, решение в комплексном виде будет иметь вид:

$$\Omega(x, t) = \Omega_{max} \frac{\sinh(\varepsilon(l-x)) + \frac{\varepsilon \lambda}{\alpha} \cosh(\varepsilon(l-x))}{\sinh(\varepsilon l) + \frac{\varepsilon \lambda}{\alpha} \cosh(\varepsilon l)} \quad (11)$$

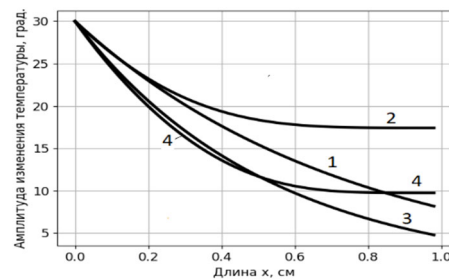
Выделив действительную и мнимую часть выражения (11), после громоздких математических преобразований, получим решение уравнения (2) с начальными и граничными условиями (2.1), (8), (2.3):

$$\begin{aligned} \Omega(x, t) &= \rho(x) \Omega_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_0} t + \varphi\right), \\ \rho(x) &= \sqrt{d_1^2 + d_2^2}, \quad \text{tg}(\varphi) = \frac{d_2}{d_1}, \\ d_1 &= \frac{c_3 c_1 + c_4 c_2}{c_1^2 + c_2^2}, \quad d_2 = \frac{c_4 c_1 - c_3 c_2}{c_1^2 + c_2^2}, \\ c_1 &= \cos(x_2) \sinh(x_2) + \\ &+ \frac{b\lambda}{\alpha} \cos(x_2) \cosh(x_2) - \frac{b\lambda}{\alpha} \sin(x_2) \sinh(x_2), \\ c_2 &= \sin(x_2) \cosh(x_2) + \\ &+ \frac{b\lambda}{\alpha} \cos(x_2) \cosh(x_2) + \frac{b\lambda}{\alpha} \sin(x_2) \sinh(x_2), \\ c_3 &= \cos(x_1) \sinh(x_1) + \\ &+ \frac{b\lambda}{\alpha} \cos(x_1) \cosh(x_1) - \frac{b\lambda}{\alpha} \sin(x_1) \sinh(x_1), \\ c_4 &= \sin(x_1) \cosh(x_1) + \\ &+ \frac{b\lambda}{\alpha} \cos(x_1) \cosh(x_1) + \frac{b\lambda}{\alpha} \sin(x_1) \sinh(x_1), \\ x_1 &= b(l-x), \quad x_2 = bl, \quad b = \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}. \end{aligned}$$

Амплитуда колебаний температуры:

$$A_{T2} = \Omega_{max} \rho(x), \quad (12)$$

зависит от координаты по другому закону, чем по экспоненциальному. Сравнение амплитуд, рассчитанных по формулам (12) и (3.1) приведены на рис. 1, использовались теплофизические параметры кремния, при коэффициенте теплопередачи $\alpha = 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2\text{К}}$. Имеют место существенные различия.



1, 3 – рассчитаны по формуле (3.1); 2, 4 – по формуле (12); 1, 2 – для $\tau_0 = 1$ с; 3, 4 – для $\tau_0 = 0,5$ с

Рисунок 1 – Зависимость амплитуды изменения температуры от длины;

Для определения коэффициента температуропроводности a и параметра λ/α можно измерить амплитуды колебаний температуры на расстояниях x_1, x_2 от края образца при определенном значении периода колебаний τ_0 и решить систему двух алгебраических уравнений:

$$A_{T2}^{\text{изм}}(x_i, \tau_0) - \Omega_{\max} \rho \left(x_i, \tau_0, a, \frac{\lambda}{\alpha} \right) = 0,$$

$$i = 1, 2.$$

Также возможно, решить аналогичную систему по измеренным амплитудам на одном расстоянии от края образца при двух значениях периода колебаний τ_0 .

УДК 681.2-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАНОВКИ РОТОРА ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Богдан П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе приведены и проанализированные экспериментальные данные, полученные с пьезоэлектрического преобразователя, закрепленного на шаговом электродвигателе. Показано, что применение такого преобразователя позволяет определить остановку ротора двигателя.

Ключевые слова: шаговый двигатель, пропуск шагов, пьезоэлектрический преобразователь.

STEP MOTOR STOP DETERMINATION USING A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

Bohdan P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This paper presents and analyzed experimental data obtained from a piezoelectric transducer mounted on a stepper motor. It is shown that the use of such a converter makes it possible to determine the stop of the motor rotor.

Key words: stepper motor, step skip, piezoelectric transducer.

*Адрес для переписки: Богдан П.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pbogdan@bntu.by*

Шаговые электродвигатели применяются в приводах, обеспечивающих точное позиционирование рабочего органа. Достоинством шаговых электродвигателей в таком применении по сравнению с остальными типами (двигатели постоянного тока, асинхронные и т.п.) является принцип их работы, заключающийся во вращении ротора путем выполнения дискретных угловых перемещений (шагов) с определенным углом. Это позволяет приводам с шаговыми двигателями обходиться без датчиков, обеспечивающих обратную связь по положению рабочего органа. Логика работы таких приводов основывается на предположении, что количество отданных двигателю драйвером «команд» на выполнение шага равняется количеству шагов, действительно выполненных двигателем. Величина перемещения рабочего органа определяется по известному шагу двигателя, типу используемых механических передач и их передаточным отношениям. Однако по количеству выполненных шагов можно только определять перемещение рабочего органа относительно предыдущего положения, поэтому в таких приводах все же используется один датчик конечного положения. В начале работы рабочий орган доводится до этого положения и система управления принимает его за нулевую

точку, относительно которой рассчитывается дальнейшее перемещение.

Такой принцип построения приводов избавляет от множества проблем, связанных с наличием системы определения положения: отсутствует необходимость в датчике углового или линейного перемещения, сложность и стоимость которых пропорционально (а иногда и не очень) увеличивается с увеличением точности или диапазона измерения; отсутствует необходимость в схеме обработки сигнала с датчика; отсутствует необходимость в схеме автоматического регулирования (и, соответственно, в наладке такой схемы), которая должна корректировать положение рабочего органа по информации с датчика.

Отсутствие обратной связи является и недостатком привод с шаговыми двигателями. При превышении моментом нагрузки крутящего момента двигателя, ротор перестает выполнять шаги, останавливаясь на месте. В зависимости от характера и причины возникновения дополнительной нагрузки, ротор может продолжить вращение, пропустив несколько шагов, или полностью остановиться. В обоих случаях количество «команд», отданных на выполнение шаг будет отличаться от количества реально выполненных

Литература

1. Любимова, Д. А. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин ; под науч. ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 80 с.
2. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – М.: Высшая. школа, 1964. – 492 с.

двигателем шагов, что приведет к потере управляющей схемой информации о выполненном перемещении рабочего органа, при этом управляющая схема не будет иметь сведений о возникшей ситуации.

В связи с описанными особенностями работы приводов с шаговыми двигателями актуальной является задача получения управляющей схемой информации о пропуске шагов двигателем без применения датчиков перемещения для рабочего органа.

В самом простом случае это может быть сигнал о возникновении пропуска, в более предпочтительном – информация о количестве пропущенных шагов, что позволит провести коррекцию положения.

Современные драйверы шаговых двигателей, например, Trinamic TMC2209, Leadshine EM705 и пр., имеют функции отслеживания состояния двигателя по параметрам питания его обмоток: токам, сдвигам фаз, выбросам противо-ЭДС и т.п., но такая технология является еще недостаточно надежной и стабильной в работе, к тому же требует тонкой настройки порога срабатывания.

Возможным сигналом для отслеживания пропуска шагов шаговым двигателем могут служить механические вибрации ротора, возникающие при срыве синхронизации переключения обмоток с положением ротора. Проверке возможности использования такого сигнала и посвящена данная работа.

В качестве датчика вибраций служил дисковый пьезоэлемент PIEZZO-KNOCK Olimex, жестко закрепленный на шаговом двигателе ДШ-200-0,08. Шаговый двигатель был подключен к драйверу A4988 от Allegro MicroSystems. Драйвер для выполнения шагов тактировался от генератора прямоугольных импульсов. Для получения сигнала пьезоэлемент был подключен к осциллографу.

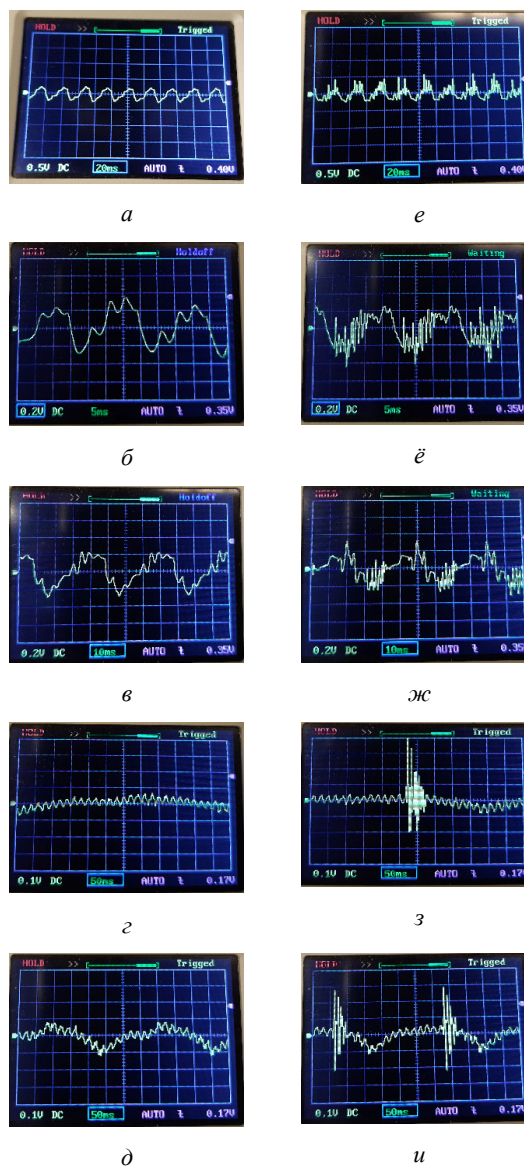
При проведении опытов снимались две осциллограммы – свободное вращение двигателя и пропуске шагов при работе «на упор» при зафиксированном роторе (предварительно ротор совершал один оборот для стабилизации режима). Такие данные снимались для пяти режимов работы драйвера – режиме полного шага и четырех режимах дробления шагов (от 1/2 до 1/16).

Полученные осциллограммы приведены на рис. 1.

При анализе приведенных результатов, в первую очередь, необходимо отметить различие между осциллограммой при свободном вращении и осциллограммой при заблокированном роторе для всех режимов дробления шага.

Для полношагового режима, а также для дроблений 1/2 и 1/4 амплитуда сигнала практически не отличается. Это связано с относительно большими шагами ротора при вращении и создаваемой вследствие этого вибрацией. В отличие от свободного вращения, работа с заблокированным ротором создает в сигнале дополнительные высокочастотные

составляющие, которые могут детектироваться с помощью фильтра высоких частот.



a–д – при свободном вращении в режиме полного шага, дробления 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 соответственно;
e–и при заблокированном роторе в аналогичных режимах

Рисунок 1 – Осциллограммы, снятые с пьезоэлемента

Для режимов дробления шага 1/8 и 1/16 амплитуда сигнала при свободном вращении значительно меньше, вследствие меньшего шага и меньших рывков ротора, поэтому на ее фоне при блокировке ротора появляются хорошо различимые всплески сигнала, которые должны быть распознаны компаратором.

Следует заметить, что более сложные модели драйверов шаговых двигателей обладают функцией внутренней интерполяции шагов (за счет плавного изменения тока в обмотках), за счет чего перемещение ротора двигателя даже в полношаго-

вом режиме происходит довольно плавно и с заметно меньшими вибрациями. При использовании драйверов с такими режимами различие выходного сигнала при пропуске шагов и при нормальном вращении может быть заметно больше (особенно для работы при малом дроблении шага).

Вывод. Использование пьезоэлектрического преобразователя с шаговым двигателем позволяет

получить выходной сигнал, с помощью которого возможно определить пропуск шагов двигателем.

Дальнейший интерес представляет исследование работы схем обработки с таким сигналом и определение возможности детектирования одиночных шагов при вращении и их подсчета, исследование зависимости выходного сигнала от механической жесткости системы.

УДК 628.941

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА

Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проанализированы перспективы применения гиперболических отражателей для увеличения углового размера светового пучка в светодиодных светильниках. Показано, что за счет увеличения длины хода светового пучка в этом случае уменьшается освещенность плоскости.

Ключевые слова: светодиодный источник света, гиперболический отражатель, распределение освещенности.

APPLICATION OF HYPERBOLIC REFLECTORS IN LED LIGHT SOURCES

Bogdan P., Zaytseva E., Baranov P., Stepanenko A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The prospects of using hyperbolic reflectors to increase the angular size of the light beam in LED lamps are analyzed. It is shown that by increasing the travel length of the light beam in this case, the illumination of the plane decreases.

Key words: LED light source, hyperbolic reflector, illumination distribution.

*Адрес для переписки: Богдан П.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pbogdan@bntu.by*

Широкое использование светодиодных источников света ограничивается малым угловым размером светового пучка. Компенсировать этот недостаток возможно, используя в осветительном приборе дополнительные оптические элементы (линзы, отражатели [1–3]) и рассеивающие фильтры [4]. Выбор оптимального варианта до сих пор остается актуальной задачей. Цель данного исследования – проанализировать, как введение в светодиодный светильник дополнительных отражающих элементов влияет на распределение освещенности. В качестве отражателя был выбран один из элементов двуполостного гиперboloида вращения, в фокусе которого располагался светодиод. Расчет распределения освещенности производился для двух вариантов, когда отражающий слой находился как на вогнутой, так и на выпуклой поверхности гиперboloида.

Схема для расчета распределения освещенности плоскости при отражении светодиодного луча от гиперboloида с внутренним зеркальным слоем представлена на рис. 1. Луч, выходящий из точки F расположения светодиода под углом α , отражается от внутренней поверхности верхней части

двуполостного гиперboloида в точке R и падает на освещаемую плоскость EQ под углом β .

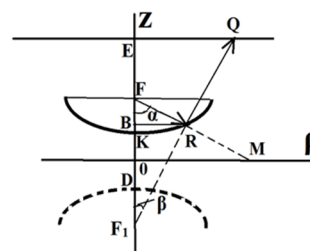


Рисунок 1 – Схема для расчета распределения освещенности плоскости при отражении светодиодного луча от гиперboloида с внутренним зеркальным слоем

Распределение освещенности на освещаемой плоскости EQ в функции угла α направления луча индикатрисы силы света светодиода и угла наклона β луча к перпендикуляру к освещаемой плоскости имеет вид:

$$E(\alpha, \beta) = \frac{I(\alpha) \cos \beta}{l^2}, \quad (1)$$

где $I(\alpha)$ – зависимость силы света от угла наклона луча к оси симметрии индикатрисы;

l – общая длина хода светового луча от светодиода до освещаемой поверхности.

Уравнение двуполостного гиперboloида вращения имеет вид:

$$\frac{\rho^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1, \quad (2)$$

из свойств гиперboloида следует

$$FF_1 = 2\sqrt{a^2 + c^2}, \quad (3)$$

где F и F_1 – фокусы гиперboloида.

Перейдем от распределения освещенности в функции углов α и β луча к распределению в функции координат x_Q и y_Q освещаемой поверхности. Эти координаты связаны с полярной координатой ρ_Q в освещаемой плоскости выражением:

$$\rho_Q = \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2}. \quad (4)$$

Чтобы получить распределение освещенности в функции углов α и β , необходимо выразить эти углы через координату ρ_Q и подставить полученные зависимости в формулу (1).

С учетом геометрических соотношений в треугольниках F_1EQ и F_1BR и уравнений гиперboloида (2) и (3)

$$\beta = \arctan \frac{\rho_Q}{r + 2\sqrt{a^2 + c^2}}, \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\frac{a}{c} \sqrt{z_R^2 - c^2}}{-z_R + \sqrt{a^2 + c^2}}, \quad (6)$$

где r – расстояние между светодиодом, расположенным фокусе гиперboloида F , и освещаемой плоскостью EQ , а связь между z_R и ρ_Q определяется решением уравнения

$$\frac{\rho_Q}{\frac{a}{c} \sqrt{z_R^2 - c^2}} = \frac{r + 2\sqrt{a^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + c^2} + z_R}. \quad (7)$$

Общая длина хода светового луча от светодиода до освещаемой поверхности l определяется выражением:

$$l = \frac{\rho_R}{\sin \alpha} + \frac{r + \sqrt{a^2 + c^2} - z_R}{\cos \beta}. \quad (8)$$

С использованием полученных выражений и с учетом экранирования части отраженного потока корпусом светодиода были произведены расчеты распределения освещенности на плоскости для расстояния 50 см до освещаемой поверхности и нескольких вариантов параметров гиперboloида a и c : 10 и 5; 10 и 10; 5 и 10 мм. Расчеты показали, что при постоянном расстоянии до освещаемой плоскости размер светового пятна и неравномерность освещенности увеличиваются, если параметр a превышает параметр c . Для сравнения с освещенностью, создаваемой светодиодом без отражателя, по методике, приведенной в [5], были

произведены соответствующие расчеты для расстояния 50 см до освещаемой поверхности. Графики распределения освещенности без отражателя и с отражателем при a и c , равных 10 и 5 мм, приведены на рис. 2 соответственно красным и зеленым цветом.

Анализ графиков показывает, что применение гиперboloидного отражателя при размещении светодиода в его фокусе не увеличило размер светового пятна и уменьшило освещенность в центре. Полученный результат объясняется превалирующим влиянием на освещенность длины хода лучей l , которая входит во второй степени в формулу (1). При наличии отражателя длина хода лучей от светодиода до освещаемой плоскости увеличивается, и это увеличение нивелирует полезный эффект от перераспределения светового пучка гиперboloическим отражателем.

Применение в качестве отражателя выпуклой поверхности гиперboloида дополнительно увеличивает ход светового луча и соответственно уменьшает значения освещенности.

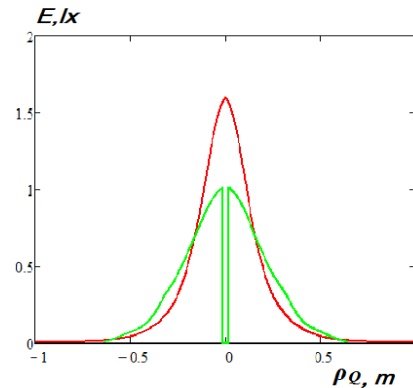


Рисунок 2 – Графики распределения освещенности без отражателя (зеленый цвет) и с отражателем при a и c , равных 10 и 5 мм (красный цвет)

Из вышеизложенного следует, что дополнительные оптические элементы не должны увеличивать длину хода светового луча, поэтому линзовые элементы являются более перспективными, чем отражатели.

Литература

1. Шэнь, Д. Коллиматорные линзы Edison Opto / Д. Шэнь // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – №1 (21). – С. 20–21.
2. Вертли, Й. Линзы с настраиваемым фокусом для светодиодов / Й. Вертли // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – №1 (21). – С. 22–23.
3. Трофимов, П. Рефлекторы и гибридные линзы от Ledlink Optics / П. Трофимов, О. Голиков // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – №1 (21). – С. 24–25.
4. Шаракшанэ, А. Об эффективности матовых светорассеивателей / А. Шаракшанэ // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – № 1 (27). – С. 8–11.
5. Analysis of illumination generated by LED matrices distribution / P. S. Bogdan [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2022. – Vol. 13, № 1. – P. 60–67.

УДК 617-089.844

ПРОЦЕСС ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ САМОРАСШИРЯЮЩЕГОСЯ СТЕНТА

Бодяк Д.А.¹, Вечорко А.В.¹, Минченя В.Т.²

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены способы компьютерной оптимизации конструкций на примере оптимизации конструкции саморасширяющегося стента, произведен анализ параметрической оптимизации конструкции, выполненный с применением пакета Isight.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, саморасширяющийся стент, пакет Isight.

THE PROCESS OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE DESIGN ON THE EXAMPLE OF A SELF-EXPANDING STENT

Bodyak D.¹, Vechorko A.¹, Minchenya V.²

¹State enterprise "Science and technology park of BNTU Polytechnic"

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses methods of computer optimization of structures using the example of optimizing the design of a self-expanding stent, and analyzes the parametric optimization of the design, performed using the Isight.

Key words: parametric optimization, self-expanding stent, Isight.

Адрес для переписки: Бодяк Д.А., Сурганова 47/1, Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: denis.bodyak@park.bntu.by

Оптимизация – это процесс приведения объекта (системы) в оптимальное (наилучшее из возможных) состояние. Существует два основных подхода к оптимизации: параметрический и структурный (т. е. топологический). В процессе топологической оптимизации оптимизируется структура объекта, в процессе же параметрической – оптимизируются параметры (номиналы) элементов объекта.

В зависимости от числа критериев, по которым выполняется оптимизация объекта, различают однокритериальную и многокритериальную оптимизацию. В данной работе рассматривается задача многокритериальной оптимизации, так как необходимо учесть, как минимум, следующие параметры: способность стента расширяться на заданный диаметр без его разрушения, отсутствие пластических деформаций, оптимальная радиальная жесткость, оптимальное усилие высвобождения стента, высокая усталостная долговечность.

Следует заметить, что задачи оптимизации являются сложными и многокритериальными, в следствие чего обычно не удается достичь максимума сразу по нескольким критериям. Это обусловлено множеством факторов, в том числе современным уровнем техники и ограниченной вычислительной мощностью.

Параметрическая оптимизация модели стента.

В процессе параметрической оптимизации применим пакет для автоматизации и оптимизации процессов Isight. Методика оптимизации со-

стоит в выборе и задании изменяемых параметров, настройке алгоритма оптимизационных расчетов и выявлении оптимальных значений данных параметров [1]. В качестве изменяемого параметра примем ширину ламели стента (рис. 1).

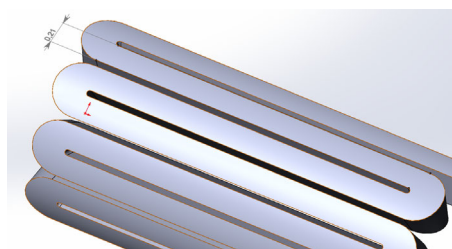


Рисунок 1 – Ширина ламели стента

Оптимизационная модель расчета в пакете Isight представлена на рис. 2.

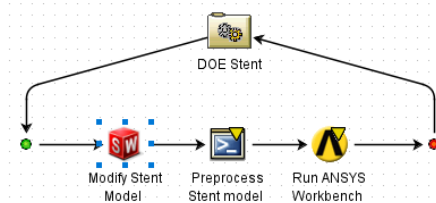


Рисунок 2 – Оптимизационная модель расчета стента

Ниже представим результаты расчетов для исходного и оптимизированного через несколько итераций образцов. Сравнение будем вести по критериям: максимальное напряжение по Мизесу,

максимальное главное напряжение, наличие зон возможных усталостных разрушений.

Исходная модель стента.

Напряжения по Мизесу в конечный момент расширения представлены на рис. 3.

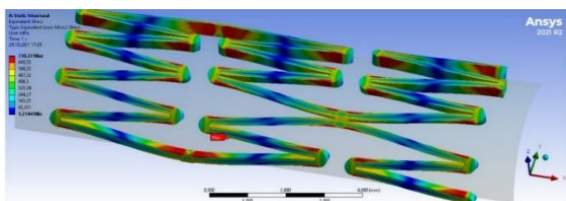


Рисунок 3 – Напряжения по Мизесу в исходном стенте

Распределения максимального главного напряжения представлены на рис. 4.

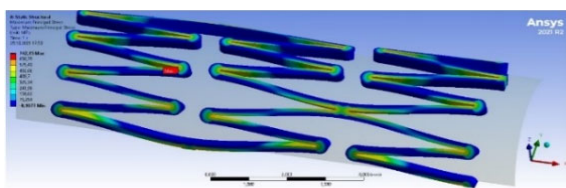


Рисунок 4 – Максимальное главное напряжение в исходном стенте

Результат расчета на наличие усталостных разрушений представлен на рис. 5.

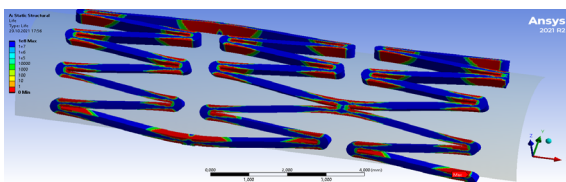


Рисунок 5 – Наличие усталостных разрушений в исходном стенте

Оптимизированная модель.

Напряжения по Мизесу в конечный момент расширения представлены на рис. 6.

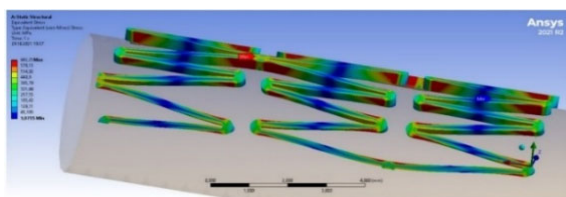


Рисунок 6 – Напряжения по Мизесу в оптимизированной модели

Распределения максимального главного напряжения представлены на рис. 7.

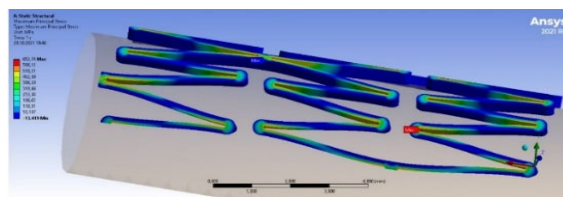


Рисунок 7 – Максимальное главное напряжение в оптимизированной модели

Результат расчета на наличие усталостных разрушений представлен на рис. 8.

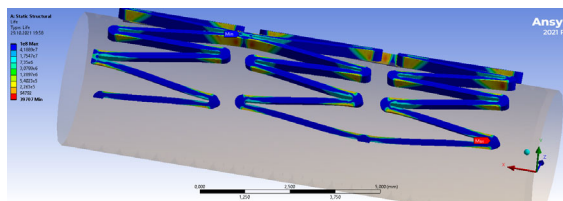


Рисунок 8 – Наличие усталостных разрушений в оптимизированной модели

Из полученных в процессе оптимизации результатов можно сделать выводы, что напряжения по Мизесу значительно падают при уменьшении ширины ламели на 10–15 %, однако, при дальнейшем ее уменьшении напряжения начинают возрастать. Уменьшив ширину ламели на 12 % мы смогли получить уменьшение напряжений по Мизесу с 730,37 МПа до 657,52 МПа, т.е. практически на 10 %. Аналогичная ситуация наблюдается и с распределением максимальных главных напряжений. Наблюдается снижение напряжения в оптимизированном образце на 10 % по сравнению с исходным, дальнейшее уменьшение ширины ламели не оказывает значительного влияния величину напряжения. С точки зрения долговечности наблюдается значительное улучшение. Согласно расчетам, в исходном стенте начинали проявляться усталостные разрушения уже с первого цикла сжатия. При уменьшении ширины ламели на 10 % количество циклов до проявления возможных усталостных разрушений значительно возрастает.

Литература

1. Design Optimization of Coronary Stent Based on Finite Element Models/ H. Li, [et al.]// The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 4. – 10 p.

УДК 537.874

ГИБКИЕ СЛОИСТЫЕ РАДИОПОГЛОТИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бойправ О.В., Богуш Н.В., Павлёнок М.В.

*Белорусский государственный университет
 информатики и радиоэлектроники
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены результаты теоретического и экспериментального обоснования методики изготовления гибких слоистых радиопоглотителей на основе фольгированных материалов. По сравнению с аналогами радиопоглотители, изготовленные в соответствии с обоснованной методикой, характеризуются более низкими значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне, достигающими величины $-35,0$ дБ. Такие радиопоглотители рекомендованы для использования в целях электромагнитного экранирования помещений, в которых расположены радиоизмерительные приборы.

Ключевые слова: радиопоглотитель, коэффициент отражения, коэффициент передачи, фольгированный материал.

FLEXIBLE LAYERED RADIO ABSORBERS BASED ON FOIL MATERIALS

Boiprav O., Bogush N., Pevlyonok M.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
 Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents the results of theoretical and experimental substantiation of the technique for manufacturing flexible layered radio absorbers based on foiled materials. Compared with analogues, radio absorbers manufactured in accordance with the substantiated methodology are characterized by lower values of the electromagnetic radiation transmission coefficient in the microwave range, reaching -35.0 dB. Such radio absorbers are recommended for use for the purpose of electromagnetic shielding of rooms in which radio measuring instruments are located.

Key words: radio absorber, reflection coefficient, transmission coefficient, foil material.

*Адрес для переписки: Бойправ О.В., ул. П. Бровки, 6, Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: smu@bsuir.by*

В настоящее время радиопоглотители находят широкое применение в целях обеспечения требуемого уровня электромагнитного фона в помещениях, в которых расположены радиоизмерительные приборы. Это обусловлено тем, что такой фон напрямую влияет на уровень погрешности измерений, проводимых с помощью этих приборов. В этой связи разработка и исследование радиопоглотителей является актуальным научным направлением в области функциональных материалов. В настоящей работе представлены результаты исследования, целью которого было поставлено теоретическое и экспериментальное обоснование методики изготовления гибких слоистых радиопоглотителей на основе фольгированных материалов. Это исследование являлось развитием исследований, результаты которых приведены в работах [1–3].

Постановке обозначенной цели предшествовало выдвижение гипотезы о возможности дополнительного снижения значений коэффициента передачи электромагнитного излучения разработанных в соответствии со способом [4] радиопоглотителей путем включения в их структуру слоя в виде дифракционной решетки, образованной путем упорядоченного расположения на их по-

верхности фрагментов фольгированного материала, характеризующихся правильной геометрической формой.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1) изготовление экспериментальных образцов в соответствии с разработанной методикой; 2) измерение значений коэффициента передачи электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне изготовленных образцов; 3) сравнительный анализ характеристик передачи электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне образцов, изготовленных в соответствии с разработанной методикой, и образцов, изготовленных в соответствии со способом [4]. Разработанная методика включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Изготовление первого слоя радиопоглотителя в соответствии со способом 4.

Этап 2. Формирование второго слоя радиопоглотителя путем поочередной реализации следующих процессов.

2.1 Раскрой фольгированного самоклеящегося материала на фрагменты прямоугольной формы с учетом совокупности следующих условий:

– ширина фрагментов сопоставима со значением длины волны, частота которой равна среднему значению рабочего диапазона частот изготавливаемого радиопоглотителя;

– длина фрагментов сопоставима с длиной первого слоя изготавливаемого радиопоглотителя;
– количество фрагментов эквивалентно количеству вертикальных швов, сформированных в результате простегивания первого слоя поглотителя в соответствии со способом [4].

2.2 Закрепление фрагментов раскроенного фольгированного самоклеящегося материала на одной из сторон первого слоя поглотителя таким образом, чтобы:

– фрагменты располагались поверх вертикальных швов, сформированных в результате простегивания первого слоя поглотителя в соответствии со способом [4];

– направление расположения фрагментов совпадало с направлением вертикальных швов, сформированных в результате простегивания первого слоя поглотителя в соответствии со способом [4].

2.3 Раскрой фольгированного самоклеящегося материала на фрагменты прямоугольной формы с учетом совокупности следующих условий:

– ширина фрагментов сопоставима со значением длины волны, частота которой равна среднему значению рабочего диапазона частот изготавливаемого радиопоглотителя;

– длина фрагментов сопоставима с шириной первого слоя изготавливаемого радиопоглотителя;

– количество фрагментов эквивалентно количеству горизонтальных швов, сформированных в результате простегивания первого слоя поглотителя в соответствии со способом 4.

2.4 Закрепление фрагментов раскроенного фольгированного самоклеящегося материала на одной стороне первого слоя поглотителя таким образом, чтобы:

– фрагменты располагались поверх горизонтальных швов, сформированных в результате простегивания первого слоя поглотителя в соответствии со способом [4];

– направление расположения фрагментов совпадало с направлением горизонтальных швов, сформированных в результате простегивания первого слоя поглотителя в соответствии со способом [4];

– фрагменты располагались на той же стороне, что и фрагменты, закрепленные в результате реализации процесса 2.2.

Измерения значений коэффициента передачи электромагнитного излучения образцов радиопоглотителей, изготовленных в соответствии с предложенной методикой, и образцов радиопоглотителей, изготовленных в соответствии со способом [4] были проведены с помощью панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18. Полученные на основе результатов таких измерений частотные зависимости представлены на рисунке 1. Из этого рисунка видно,

что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–15,0 ГГц слоистых радиопоглотителей, изготовленных в соответствии с предложенной методикой, на 5,0–10,0 дБ ниже значений аналогичного параметра радиопоглотителей, изготовленных в соответствии со способом [4]. Это обусловлено явлением дифракции электромагнитных волн на входящем в структуру таких радиопоглотителей слое на основе упорядоченно расположенных фрагментов фольгированного материала.

Таким образом, гипотеза, выдвижение которой предшествовало постановке цели представленного в работе исследования, подтвердилась.

Радиопоглотители, изготовленные в соответствии с предложенной методикой, наиболее целесообразно использовать в целях электромагнитного экранирования помещений, в которых расположены радиоизмерительные приборы.

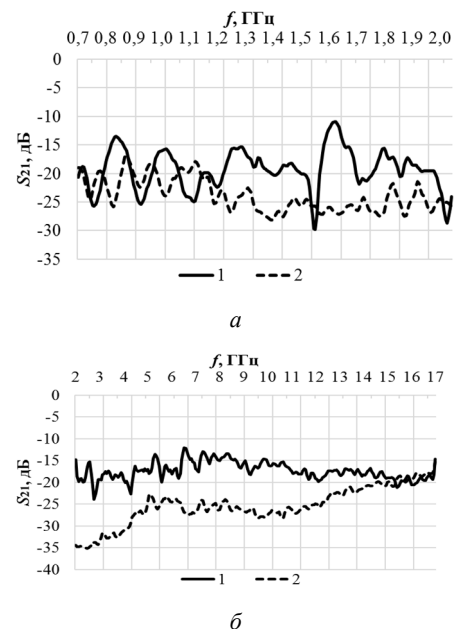


Рисунок 1 – Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) образцов радиопоглотителей, изготовленных в соответствии со способом [4], (кривые 1) и образцов радиопоглотителей, изготовленных в соответствии с предложенной методикой (кривые 2)

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР «Эластичные и воздухопроницаемые электромагнитные экраны на основе фольгированных материалов для обеспечения информационной и экологической безопасности» по заданию 1.5 «Разработка новых материалов и технологий для систем электромагнитной защиты радиоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от воздействия широкого спектра электромагнитных излучений, обеспечения электромагнитной безопасности населения».

и электромагнитной совместимости электро-, радиотехнических средств и оборудования» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг.

Литература

1. Эластичные электромагнитные экраны на основе комбинированных металлосодержащих элементов / О. В. Бойправ [и др.] // Комплексная защита информации : материалы XXIII научно-практической конференции. Суздаль, 22–24 мая 2018 г. – С. 312–315.
2. Электромагнитные экраны на основе трикотажных и фольгированных материалов для технических

средств защиты информации / Л. М. Лыньков [и др.] // Комплексная защита информации : материалы XIX научно-практической конференции. Витебск, 21–23 мая 2019 г. – С. 78–80.

3. Эластичные медьсодержащие электромагнитные экраны для снижения радиолокационной заметности наземных объектов / О. В. Бойправ [и др.] // Комплексная защита информации : материалы XX научно-практической конференции. Минск, 25–27 мая 2021 г. – С. 78–80.

4. Способ изготовления эластичного электромагнитного экрана и электромагнитный экран, изготовленный этим способом : пат РБ 23305 / Л. М. Лыньков, В. А. Богущ, О. В. Бойправ. – Опубл. 28.02.2021.

УДК 681.7.023.72

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШАРОВИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Козерук А.С., Филонова М.И., Сухоцкий А.А., Богдан Д.Ю.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведен анализ способов обработки шаровидных деталей.

Ключевые слова: изготовление шаровидных деталей, пневмоцентробежная обработка, хрупкий материал.

IMPROVED TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING SPHERICAL PARTS FROM BRITTLE MATERIALS

Kozeruk A., Filonova M., Sukhotsky A., Bogdan D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The analysis of methods for processing spherical parts was carried out.

Key words: production of spherical parts, pneumocentrifugal processing, brittle material.

*Адрес для переписки: Филонова М.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: filonovami@bntu.by*

В данной работе рассматриваются особенности производства шаровидных деталей из хрупких материалов (таких как оптическое стекло, керамика, драгоценные и полудрагоценные камни) малого диаметра. Эти материалы имеют высокую стоимость, и в то же время накладывают целый ряд ограничений на возможные способы их формообразования.

Первоначальная конфигурация заготовки чаще всего кубическая, поскольку хрупкий материал проще всего распилить на отдельные кубики, а другое силовое или термическое воздействие приводит к образованию дефектов. Поэтому актуальным является вопрос разработки способов формообразования шаровидной детали из кубической, а также совершенствование технологии свободной притирки.

По известной технологии сферические детали малого диаметра изготавливают, применяя три этапа шлифования и операцию полирования [1].

Современная технология финишной абразивной обработки деталей шарообразной формы свободной притиркой основана на формировании

точной сферической поверхности при одновременном вращении детали и упруго прижимаемого к ней чашечного притира [1, 2].

Обработка на отмеченных установках происходит в жестких осях, что не позволяет исключить влияние вибраций технологического оборудования на микропогрешности формируемой поверхности детали.

Применение жесткого инструмента в виде алмазных кругов не позволяет получить шаровидные детали высокой степени однородности в пределах одной партии.

В работах [3, 4] предложен способ пневмоцентробежной обработки (ПЦО) стеклянных шариков, который обеспечивает практически стопроцентный выход годных заготовок с отклонением их формы от правильной сферы в пределах 0,01 мм и шероховатостью поверхности $Ra = 0,6$ мкм на операции шлифования. Кроме этого, метод отличается простотой. Его сущность состоит в том, что заготовки кубической формы помещают между верхним и нижним соосно расположенными инструментами с коническими рабочими

участками и в полый цилиндр подают среду под давлением (например, сжатый воздух). Выходя через тангенциальные сопла последнего, рабочая среда вращает заготовки вокруг оси симметрии инструментов вдоль рабочих участков. В процессе этого движения кубики постоянно меняют свою ориентацию, что способствует равномерному съему припуска и превращению его в шарик. Достигнув окончательного размера, равного расстоянию между инструментами, шаровидная заготовка выходит из зоны обработки через специальный зазор. По данному способу один из инструментов установлен с возможностью вращения, как в направлении переносного движения заготовок, так и в противоположную сторону, а для повышения вероятности многоосного вращения последней между инструментами помещают воршитель в виде диска с внутренним отверстием, смещенным относительно оси симметрии диска.

Наиболее полное ПЦО получил в работе [5]. В ней определены параметры рабочей зоны устройства с совмещенными рабочими участками для предварительного, основного и окончательного шлифования и рассмотрены особенности получения шариков из хрупких материалов при сложном движении инструментов, когда им сообщают два возвратно-вращательных движения вокруг осей, точка пересечения которых не совпадает с осью симметрии инструментов.

В работе [6] предложены пути интенсификации формообразования тел качения по методу пневмоцентробежной обработки на основе изменения геометрических параметров рабочей зоны инструментов. Показано, что применение рабочих участков в виде шаровых поясов обеспечивает контакт кубической заготовки с инструментом исключительно ее вершинами, т. е. реализуется оптимальный вариант формообразования шара из куба.

Схема устройства для реализации рассматриваемого метода содержит инструменты 1 и 2 (рис. 1), снабженные по периферии рабочими участками в виде алмазносных конических колец 3.

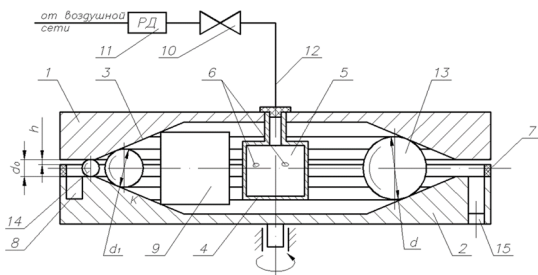


Рисунок 1 – Схема устройства

Инструменты расположены соосно с зазором, величину d_0 которого устанавливают равной диаметру готового шарика. На верхнем инструменте укреплен полый цилиндр 4, снабженный камерой расширения 5 с тангенциальными соплами 6 в его

боковой поверхности, а на нижнем – кольцо 7, которое направляет готовые шарики, выходящие из рабочей зоны, в наклонную канавку 8. Для выхода отработанного воздуха между кольцом 7 и инструментом 1 имеется зазор шириной h .

Автором работы [5] предложен способ полирования шариков. Согласно этому способу детали размещают в центральных и периферийных лунках инструментов, совершающих относительное вращательное движение и переносное вращение вместе с одним из инструментальных дисков, а второму инструментальному диску сообщают относительное вращение и возвратно-вращательное движение вокруг оси, параллельной оси вращения первого инструментального диска, при этом детали периферийной и центральной зон меняют местами по крайней мере один раз в пределах цикла обработки. Изложенный способ положен в основу устройства, в котором реализовано планетарное движение инструментов, обеспечивающее сложное вращение заготовки в зоне обработки.

В устройстве, представленном на рис. 2, планшайбу 2 с листовой резиной 3 закрепляют на шпиндель 4 базового станка, а в конические втулки 1 помещают шаровидные заготовки 5, а в находящихся на пересечении диагоналей основания 6 фиксирующих сухариках 7 выполнена сферическая лунка 8, в которую устанавливают сферический наконечник поводка 9 выходного звена исполнительного механизма базового шлифовально-полировального станка модели ШП.

В процессе обработки полирующую суспензию наносят на поверхность резины 3 и периодически проводят контроль диаметра шариков.

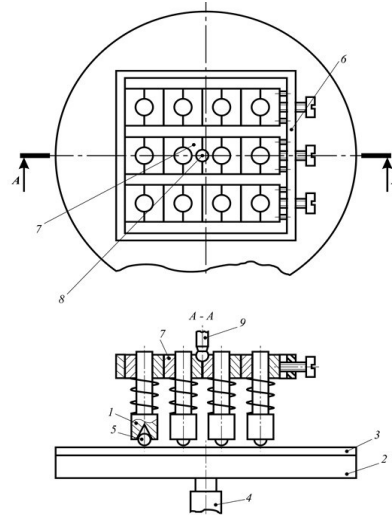


Рисунок 2 – Устройство для полирования заготовок шаровидной формы

Решение поставленных задач по увеличению выхода годных деталей и обеспечению заданного качества обработанной поверхности требует организации большого объема экспериментальных исследований, что влечет за собой необходимость

в привлечении существенных материальных средств. В целях минимизации данных затрат целесообразно пользоваться математическими моделями, позволяющими прогнозировать производительность и качество обрабатываемых изделий, изменяя огромное число параметров технологического процесса.

Литература

1. Технология оптических деталей ; под ред. М. Н. Семибратова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
2. Орлов, П. Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П. Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

3. Способ обработки шариков : а. с. 1776545 // Бюл. изобр. – 1992. – № 43. – С. 32.
4. Филонов, И. П. Кинетика формообразования шариков для микрооптики в поле сил инерции / И. П. Филонов, А. С. Козерук, В. И. Чембрович // Оптический журнал. – 1997. – Т. 64, № 6. – С. 108–109.
5. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: автореф. дис. ... док. техн. наук: 11.10.97. – Минск, 1991. – 33 с.
6. Филонова, М. И. Совершенствование процессов формообразования сферических поверхностей оптических деталей с применением УЗК и пневмоцентробежной обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Минск, 1997. – 18 с.

УДК 004.056:061.68

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ СООБЩЕНИЙ

Бокуть Л.В.¹, Деев Н.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрена задача выделения широкополосного сигнала в рамках теории нелинейной фильтрации марковских процессов. Предложенный способ позволяет достичь значительного улучшения помехоустойчивости систем связи.

Ключевые слова: частотно модулированный сигнал, узкополосные помехи, марковский процесс.

RESEARCH OF CHANNEL CODING ALGORITHMS IN THE SYSTEMS OF TRANSFER DISCRETELY - CONTINUOUS MESSAGES

Bokut L.¹, Deev N.²

¹Belarusian National Technical University

²The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Summary. In work the problem of allocation of a broadband signal within the theory of nonlinear filtration of Markov processes is considered. The offered way allows to reach considerable improvement of noise stability of communication systems.

Keywords: frequency-modulated signal, narrow-band hindrances, Markov process.

Адрес для переписки: Бокуть Л.В., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lvbokut@bntu.by

Широкополосным сигналам свойственна большая избыточность, которая требуется для преодоления высоких уровней интерференции, возникающей при передаче цифровой информации по некоторым радиоканалам. Кодирование служит важным элементом при синтезе широкополосных сигналов. Действительно, кодированный сигнал имеет показатель расширения спектра больше единицы, и кодирование является эффективным методом введения избыточности.

Широкополосные системы радиосвязи подвержены действию комплекса помех [1]. Обычно в полосу спектра широкополосного шумоподобного сигнала могут попасть несколько узкополосных частотно-модулированных (ЧМ) колебаний, интенсивность которых значительно больше

полезного сигнала. Задача выделения сигнала на фоне суммы квазигармонических колебаний и белого гауссовского шума может быть решена в рамках теории нелинейной фильтрации марковских процессов.

На передающей стороне системы связи формируется шумоподобный сигнал $S(t, \lambda)$, в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

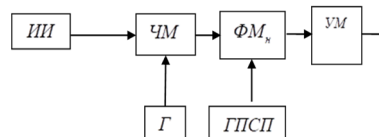


Рисунок 1 – Структурная схема формирователя скремблированного ЧМ сигнала

Схема формирует скремблированный ЧМ сигнал путем фазовой манипуляции узкополосного ЧМ сигнала псевдослучайной последовательностью (ПСП). Информация, поступающая от источника (ИИ) подается на частотный модулятор (ЧМ), запитываемый несущим колебанием от генератора (Г). ГПСЦП – генератор ПСП, тактовая частота которого f_T определяет спектр сигнала на выходе фазового манипулятора (ФМ_н). Усилитель мощности (УМ) включен на выходе формирователя.

Выражение, описывающее сигнал имеет вид:

$$S(t, \lambda) = a_o g(t) \cos[(\omega_o + \lambda)t + \beta], \quad (1)$$

здесь a_o – известная амплитуда, $g(t)$ – ПСП, принимающая значения ± 1 в соответствии с выбранным кодом, ω_o – известное значение несущей, β – случайная фаза. Равномерно распределенная в интервале $\pm\pi$. Сообщение $\lambda \cong \lambda(t)$ имеет спектр, значительно меньший, чем полоса спектра, причем $\lambda(t) \gg d\lambda/dt$.

На приемной стороне действует смесь $r(t)$ сигнала $S(t, \tau, \lambda, \beta)$, помехи $y_\Sigma(t)$ и белого гауссовского шума (БГШ) $n(t)$ со спектральной плотностью $N_o/2$.

$$r(t) = S(t, \tau, \lambda, \beta) + y_\Sigma(t) + n(t), \quad (2)$$

где $S(t, \tau, \lambda, \beta) = a_o g(t - \tau) \cos[(\omega_o + \lambda)t + \beta]$; $y_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos[\omega_i t + \Psi_i(t)]$.

Задержка τ и сообщение $\lambda(t)$ сигнала представляет случайные процессы, которые заданы стохастическими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = -\gamma\lambda(t) + n_\lambda(t); \quad \frac{d\tau(t)}{dt} = n_\tau(t), \quad (3)$$

где $n_\lambda(t)$ и $n_\tau(t)$ формирующие БГШ с заданными спектральными плотностями, γ – параметр, определяющий спектр сообщения. Суммарная помеха $y_\Sigma(t)$ включает N узкополосных помех с амплитудами α_i , частотами ω_i и фазами $\Psi_i(t)$, $i = 1, N$. Уравнения, описывающие процессы $\Psi_i(t)$ и α_i , имеют вид:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = 0; \quad \frac{d\Psi_i(t)}{dt} = n_i(t). \quad (4)$$

Таким образом, комплекс помех представлен марковскими процессами [3].

Учитывая, что сигнал слабый, в уравнениях для оценок $\alpha_i^*, \Psi_i^*(t)$ можно использовать следующее выражение для производной по времени от функции правдоподобия:

$$F(\alpha^*, \Psi^*) = \frac{2}{N_o} \left[r(t) y^* \Sigma(t) - \frac{1}{2} y^{*2} \Sigma(t) \right]. \quad (5)$$

Уравнения фильтрации параметров записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha_i^*}{dt} &= k_{\alpha i} \cdot \frac{\partial F(\alpha^*, \Psi^*)}{\partial \alpha_i^*} \\ \frac{d\Psi_i^*(t)}{dt} &= k_{\psi i} \cdot \frac{\partial F(\alpha^*, \Psi^*)}{\partial \Psi_i^*} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$i = \overline{1, N}$. С учетом (5) и (6) после преобразований получаем:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i^* &= \frac{k_{\alpha i}}{\rho + \gamma_i} \cdot r(t) \cos[\omega_i t + \Psi_i^*(t)] \\ \frac{d\Psi_i^*(t)}{dt} &= k_{\psi i} \cdot r(t) \alpha_i^* \sin[\omega_i t + \Psi_i^*(t)] \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$i = \overline{1, N}$, где $k_{\alpha i}$ и $k_{\psi i}$ – известные коэффициенты.

Для обработки сигнала после компенсатора суммарной помехи функционирует некогерентный приемник. Уравнения, описывающие его работу, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau^*(t)}{dt} &= k_i \left[L(\tau^* + \frac{d\tau}{2}, \lambda^* - L(\tau^* - \frac{d\tau}{2}, \lambda^*)) \right] \\ \lambda^*(t) &= \frac{k_\lambda}{p + \gamma} \left[L(\tau^*, \lambda^* + \frac{d\lambda}{2}) - L(\tau^*, \lambda^* - \frac{d\lambda}{2}, \Psi_i^*) \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В соответствии с уравнениями (8), где $L(\tau^*, \lambda^*)$ реализуется в виде согласованного фильтра и детектора огибающей, некогерентный приемник содержит схему слежения за задержкой τ и следящий некогерентный ЧМ приемник. Схема описана в работе [2].

За счет обработки сигнала в компенсаторе происходит подавление узкополосных помех, что и обеспечивает повышение помехоустойчивости.

Предложенный вариант формирования и обработки скремблирующего широкополосного сигнала на фоне суммы узкополосных помех обеспечивает значительное улучшение помехоустойчивости систем связи, использующих шумоподобные сигналы.

Литература

1. Бокуть, Л. В. Подавление помех в беспроводных информационных системах / Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Материалы 14-й международной научно-технической конференции «Приборостроение-2021». – Минск, БНТУ, 17–19 ноября 2021. – 2021. – С. 256–258.
2. Прием сигналов на фоне помех / В. А. Чердынцев [и др.]. – Мн: БГУИР, 1995.
3. Борисов, В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук; под ред. В.И. Борисова: 2-е изд., переработанное и дополненное – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.

УДК 616.13-089:616.14-089

СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ Филонова М.И., Бондаренко В.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы ныне существующие способы создания искусственных сосудов, их недостатки и преимущества применения.

Ключевые слова: искусственные кровеносные сосуды.

METHODS FOR MANUFACTURING ARTIFICIAL BLOOD VESSELS

Filonova M., Bondarenko V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The currently existing methods of creating artificial vessels, their disadvantages and advantages of application have been studied.

Key words: artificial blood vessels.

Адрес для переписки: Филонова М.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: filonovami@bntu.by

Целью данной работы является исследование ныне существующих способов создания искусственных сосудов, их недостатки и преимущества применения.

Искусственные кровеносные сосуды представляют собой трубки из синтетических (химически полученных) материалов для восстановления кровообращения. Для замены поврежденных или больных артерий или вен, хирурги первоначально пересаживали артерии или вены от доноров, но эти трансплантаты часто терпели неудачу. В некоторых случаях донорские артерии были отторгнуты реципиентом, а в других случаях в сосудах развился атеросклероз («затвердение артерий»). Пересадка сосудов из собственного тела пациента была проблематичной, поскольку потребовалось две операции: одна для забора необходимого сосуда, а вторая для его пересадки. Кроме того, у многих пациентов с проблемами кровообращения не было подходящих сосудов, которые можно было бы пересадить. Чтобы преодолеть эти проблемы, исследователи начали экспериментировать с синтетическими материалами для кровеносных сосудов.

Венский технологический университет и Венский медицинский университет выдвинули новый способ создания искусственных кровеносных сосудов из специального эластомерного материала, обладающего специфическими механическими свойствами. Для изготовления сосудистых протезов растворы полимеров формовали в электрическом поле, формируя очень тонкие нити, и наматывали их на катушку. Полимерная ткань слегка пористая и поэтому вначале пропускает небольшое количество крови, что обогащает стенку факторами роста. Это способствует миграции эндогенных клеток. Новый метод уже доказал свою эффективность в опытах на крысах. Кровеносные сосуды крыс исследовали через шесть месяцев

после установки сосудистых протезов, при этом не обнаружено никаких аневризм, тромбозов или воспалений. Эндогенные клетки колонизировали сосудистые протезы и превратили искусственные конструкции в естественные ткани организма. Фактически, естественная ткань тела восстанавливалась намного быстрее, чем ожидалось, так что период деградации пластиковых трубок может быть даже короче. В настоящее время производится дальнейшая адаптация материала.

Одним из необычных и новых направлений является 3D-печать. Команда из Brigham and Women's Hospital (BWH) добилась успехов в изготовлении кровеносных сосудов с использованием техники трехмерной (3D) биопечати (рис. 1).

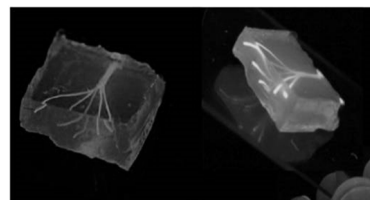


Рисунок 1 – Искусственные кровеносные сосуды с использованием конструкций из гидрогеля

Исследователи сначала использовали 3D-биопринтер для изготовления шаблона волокна из агарозы (молекула на основе сахара природного происхождения), которая служила бы формой для кровеносных сосудов. Затем они покрыли форму желатиноподобным веществом, называемым гидрогелем, сформировав слепок поверх формы, который затем был усилен с помощью фотопоперечных связей.

Подход включает печать агарозных волокон, которые становятся каналами кровеносных сосудов. Но уникальность его заключается в том, что напечатанные шаблоны волокон достаточно прочны, чтобы их можно было физически удалить

и сделать каналы. Это предотвращает растворение этих слоев шаблона, что может быть не очень хорошо для клеток, захваченных окружающим гелем. Ученые смогли построить микроканальные сети, демонстрирующие различные архитектурные особенности. Они также успешно внедрили эти функциональные и перфузируемые микроканалы в широкий спектр обычно используемых гидрогелей, таких как метакриловый желатин или гидрогели на основе полиэтиленгликоля в различных концентрациях.

Исследователи, работающие в Центре быстрого машиностроения Шанхайского университета в Китае, разработали то, что считается первым в мире трехслойным сосудистым протезом. Разработав трехслойный композит и применив комбинацию методов микроимпринтинга и электропрядения, ученые смогли разработать отдельные композитные материалы, способные соответственно обеспечить как механическую прочность, так и стимулирование роста новых клеток. Электропрядение, процесс, в котором используется электрический заряд для вытягивания жидких материалов – в данном случае композита хитозана и поливинилового спирта – в невероятно тонкие волокна, также позволяет получить высокое отношение площади поверхности к объему нановолокон. Все эти компоненты естественным образом разлагаются в течение от шести месяцев до года, оставляя после себя новый, неповрежденный кровеносный сосуд. Процесс формирования композита также облегчает контроль деградации композитного сосудистого протеза.

Однако эти электропряденные структуры не очень жесткие, поэтому включение микроотпечатанного среднего слоя поли-п-диоксана, био-разлагаемого полимера, обычно используемого в биомедицинских приложениях, решает проблему надежности.

Исследователи сообщают, что средний слой из трехслойного синтетического трансплантата изготавливается путем микроимпринтинга поли-п-диоксана (PPDO), а внутренний и внешний слои формируются из электропрядения хитозана и поливинилового спирта (ПВС). Морфология трансплантата охарактеризована с помощью сканирующей электронной микроскопии. Соответствующие качества материалов делают трехслойный трансплантат лучше, чем сумма составляющих его элементов. PPDO повышает механическую прочность и помогает обеспечить постоянную толщину трансплантата. Ученые объясняют, что клетки, культивированные на сосудистых трансплантатах, лучше прилипают и размножаются благодаря натуральному биологическому хитозану во внутреннем и внешнем слоях. Исследователи отмечают, что композитные сосудистые трансплантаты, сформированные

с помощью микроимпринтинга и электроспиннинга, обладают улучшенными механическими свойствами и биосовместимостью по сравнению с материалом трансплантата, сформированным только с помощью электроспиннинга. Они объясняют, что трехслойные композитные трансплантаты более точно имитируют трехслойную структуру естественных кровеносных сосудов, избегая при этом дефектов, возникающих в результате отдельных процессов.

Специалисты из лаборатории Лю объясняют, что для того, чтобы лучше стимулировать приживание и пролиферацию клеток, суррогатные каркасы должны быть биоинженерными, чтобы в максимально возможной степени обладать естественной гисто-архитектурой поврежденного сосуда. Они отмечают, что основной задачей инженерии синтетических тканей является изготовление настраиваемых и биоразлагаемых каркасов, которые имитируют компоненты и структурные аспекты нативных внеклеточных матриц, и поэтому «композитные трансплантаты для восстановления сосудов с помощью микроимпринтинга и электропрядения» имеют важные применения в биомедицине, предлагая уникальные преимущества в подготовке сосудистых трансплантатов, например, высокое отношение площади поверхности к объему нановолокон и биомимикрию структуры и функций внеклеточного матрикса.

Тем не менее, ученые отмечают, что структура этих сосудистых протезов не сохраняется из-за плохих механических свойств и рисунка их нетканых материалов, и что в идеале сосудистые протезы должны обладать надежной биосовместимостью и механическими свойствами, сочетая натуральные материалы, смешанные с синтетическими полимерами. Но, несмотря на попытки использования различных систем смешивания с использованием множества различных параметров процесса и обработки после обработки, механические свойства электропряденных фибриллярных матриц остаются низкими.

На территории нашей Республики производство искусственных сосудов только развивается, например, на опытном заводе «Политехник» разрабатывают конструкции вязанных и тканых сосудов.

Несмотря на то, что уже достигнуты значительные успехи, создание синтетического протеза с механическими свойствами, идентичными свойствам нативных артерий, остается труднодостижимой задачей. Однако следует подчеркнуть, что основным преимуществом искусственного сосуда при имплантации является то, что он не должен иметь механические свойства, идентичные свойствам нативной артерии. Будучи состоящим из жизнеспособной ткани с потенциалом ремоделирования, восстановления и роста, искусственный

сосуд теоретически способен полностью адаптироваться к локальным гемодинамическим условиям и приобретать структурные и механические характеристики замещаемого им сосуда, будь то артерия или вена. Однако необходимо решить определенные проблемы:

1. Исследуемые в настоящее время трансплантаты требуют длительного периода подготовки, обычно от 1 до 3 месяцев, поэтому их нельзя использовать в экстренных ситуациях.

2. Длительная продолжительность культивирования увеличивает риск заражения и повышает стоимость рабочей силы, оборудования и необходимых материалов.

3. Большинство биоразлагаемых полимеров, используемых в настоящее время в качестве каркасов для создания искусственных сосудов, уже

одобрены. На самом деле это может быть шагом назад. Нам нужен биополимер, пригодный для использования в качестве сосудистого проводника, а не готовый.

Литература

1. Scientists use 3D printing to make artificial blood vessels [Electronic resource]. – Mode of access: <https://phys.org/news/2014-05-scientists-3d-artificial-blood-vessels.html>. – Date of access: 27.09.2022.

2. “Artificial Blood Vessels” – Micro-Imprinting And Electrospinning Technology Yields Superior Synthetic Composite Vascular Graft Material [Electronic resource]. – Mode of access: <https://cardiovascular-disease-news.com/2015/02/13/artificial-blood-vessels-micro-imprinting-and-electrospinning-technology-yields-superior-synthetic-composite-vascular-graft-material>. – Date of access: 26.09.2022.

УДК 620.179.14

ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Бурак В.А.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведены исследования анизотропии магнитных свойств инструментальных углеродистых сталей. Установлено, что для инструментальных углеродистых сталей можно применять те же способы, основанные на импульсном магнитном намагничивании, что и для конструкционных углеродистых сталей. Показано, что для листового проката инструментальной стали У8А относительная разность величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после импульсного намагничивания и частичного перемагничивания может применяться как оценка величины анизотропии магнитных свойств, а также связанных с ними механических свойств.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, импульсное намагничивание, анизотропия, инструментальная сталь.

EVALUATION OF THE ROLLED TOOL STEELS MAGNETIC PROPERTIES ANISOTROPY BY THE PULSED MAGNETIC METHOD

Burak V.

*Institute of Applied Physics of NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The anisotropy of the tool carbon steels magnetic properties is studied. It is established that the methods for structural carbon steels based on pulsed magnetic magnetization can be used for tool carbon steels. It is considered that for rolled tool steel U8A the relative difference between the values of the gradient of the normal component of the residual magnetization field strength after pulsed magnetization and partial magnetization reversal can be used to estimate the anisotropy of the magnetic properties and the mechanical properties associated with them.

Key words: magnetic non-destructive testing, pulse magnetization, anisotropy, tool steel.

*Адрес для переписки: Бурак В.А. ул. Академическая, 16, г Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: veronika.burak@gmail.com*

Магнитные методы неразрушающего контроля широко применяются для решения различных задач магнитной структурокопии, однако для расширения перечня решаемых с помощью этих методов вопросов необходимо повышать точность и достоверность контроля, а также исследовать возможности их применения для различных ферромагнитных материалов и изделий из них.

Неравномерность механических свойств листового стального проката, возникающая из-за различия структурно-фазового состояния, может оказывать влияние на технологию производства и эксплуатационную стойкость изготовленных из него изделий, поэтому задача оценки и контроля анизотропии свойств листового проката различных классов сталей является актуальной [1].

В работах [2, 3] показано, что анализ зависимостей распределения поля остаточной намагниченности после намагничивания над поверхностью плоского ферромагнитного образца на примере конструкционных углеродистых сталей дает хороший результат при оценке несимметричности магнитных свойств.

Инструментальные углеродистые стали также являются классом сталей, нашедших широкое применение в народном хозяйстве, поэтому решение задачи контроля их физико-механических свойств методами неразрушающего контроля является важной для повышения качества изготавливаемой продукции.

Целью исследования является изучение возможности обнаружения и оценки анизотропии магнитных свойств инструментальных углеродистых сталей по величине градиента напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания симметричным импульсным полем путем разряда батареи конденсаторов через цилиндрические катушки.

Исследования проводились на образце листовой инструментальной углеродистой стали У8А толщиной 3 мм и размером 1000×1000 мм², находящейся в состоянии поставки. Измерения величины остаточной намагниченности производились в девяти областях на листе: в центре листа и в областях, равноудаленных от центра и края листа с целью снижения влияния краевого эффекта. Намагничивание и перемагничивание осуществлялось прибором ИМА-6 [4] импульсным магнитным полем длительностью 400 мс и амплитудами $H = 250$ кА/м и $H_p = 20$ кА/м. Измерение величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности феррозондовым датчиком осуществлялось на участке радиусом 100 мм в направлениях, совпадающем и противоположном направлению прокатки.

Как видно из представленных на рис. 1 кривых распределения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности над поверхностью листового стального проката для одной из рассматриваемых областей, зависимости характеристик остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, при удалении от центра намагничивания имеют похожий вид: величины максимумов и минимумов кривых практически равны, но не совпадают, а находятся на некотором расстоянии друг относительно друга.

В [3] предлагается способ оценки анизотропии листового проката конструкционных сталей по максимальной величине разности величин градиентов напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных на расстоянии от центра намагничивания в направлениях, совпадающем и перпендикулярном с направлением прокатки,

взятых относительно величины градиента остаточной намагниченности, измеренного в центре области намагничивания. Эта величина для рассматриваемой области листового проката инструментальной стали У8А (рис. 2) изменяется неоднозначно и так же, как и распределение величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности над поверхностью листового стального проката, имеет минимум и максимум, величины которых составляют 10 % и 15 % соответственно.

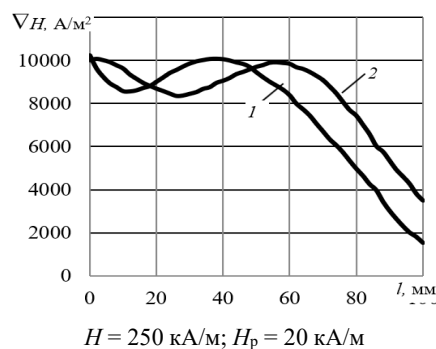


Рисунок 1 – Распределение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль (1) и поперек (2) направления прокатки по поверхности листового проката стали У8А

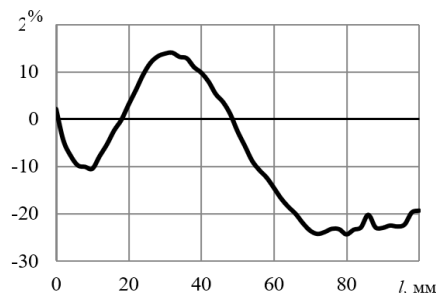


Рисунок 2 – Изменение значения относительной разности величин градиентов напряженности остаточной намагниченности при удалении от центра намагничивания

Проведенные исследования показали, что для инструментальных углеродистых сталей при оценке анизотропии магнитных свойств можно с достаточной точностью и достоверностью использовать те же подходы, что и для конструкционных марок сталей, то есть анализ распределения величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, после намагничивания и частичного перемагничивания позволяет оценить величину магнитной анизотропии листового проката инструментальных углеродистых сталей, а, значит, и величину несимметричности механических свойств, обусловленных технологическими процессами производства металла.

Литература

1. Счастный, А. С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А. С. Счастный, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.

2. Бурак, В. А. Анизотропия магнитных свойств листового проката из стали 35 / В. А. Бурак, В. Ф. Матюк, А. С. Счастный // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2019. – № 3. – С. 17–31.

3. Бурак, В. А. Влияние величины размагничивающего поля на магнитную анизотропию листового проката сталей // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: Сб. ст. 8-ой Междунар. научн.-технич. конф., Могилев, 29–30 сентября 2022 г. / Бел.Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 63–66.

4. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В. Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.

УДК 617-089.844

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ БАЛЛОНОРАСШИРЯЕМЫХ СТЕНТОВ Вечорко А.В.¹, Бодяк Д.А.¹, Минченя В.Т.²

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы при разработке конструкций баллонорасширяемых стентов и показана возможность их оптимизации с целью обеспечения заданных физико-механических характеристик. Показано, что для успешного и корректного решения задачи методом конечно-элементного анализа прежде всего необходимо создать геометрическую модель стента и выбрать правильно область для расчета, провести процедуру численного решения в Ansys и правильно задать граничные условия.

Ключевые слова: баллонорасширяемый стент, параметрическая оптимизация, рекойл.

STRENGTH ANALYSIS AND DESIGN OPTIMIZATION BALLOON EXPANDABLE STENTS Vechorko A.¹, Bodyak D.¹, Minchenya V.²

¹State enterprise “Science and technology park of BNTU Polytechnic”

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article deals with the problems in the development of designs of balloon-expandable stents and shows the possibility of their optimization in order to ensure the specified physical and mechanical characteristics. It is shown that for a successful and correct solution of the problem by the finite element analysis method, first of all, it is necessary to create a geometric model of the stent and choose the correct area for calculation, carry out the numerical solution procedure in Ansys and correctly set the boundary conditions.

Key word: balloon expandable stent, parametric optimization, recoil.

Адрес для переписки: Вечорко А.В., Сурганова 47/1, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: artvechorko@gmail.com

В последние десятилетия в клинической практике для лечения атеросклеротического поражения сосудов хорошие результаты показывают эндоваскулярные технологии лечения и сегодня коронарному стентированию отводится основное место в лечении больных. Однако, несмотря на значительный успехи и широкое распространение коронарного стентирования, ему присущи ряд недостатков, лимитирующие его эффективность. Чаще всего это связано с перераздутием баллона во время стентирования, неправильно подобранных геометрических характеристик стента, неправильного раскрытия стента при раздувании, недостаточная поддержка стенки сосуда из-за рекойла. Поэтому, одним из основных требований, предъявляемых к коронарным стентам, является обеспечение механической прочности и целостности

конструкции на всех этапах его установки, в том числе при перемещении стента в место постановки, при расширении и поддержании просвета сосуда.

Материал и дизайн, толщина ламелей (элементов структуры), площадь контакта со стенкой сосуда (металлонасыщенность) определяют качество проведения операций и долговечность работы баллонорасширяемого стента. В связи с этим, оценка механических характеристик, оптимизация конструкции стентов для устранения недостатков, выявленных на практике их использования очень актуальна как для разработчиков и производителей, так и для потенциальных потребителей – врачей.

Следует отметить, что нельзя одновременно улучшить все выше перечисленные параметры

баллонорасширяемого стента, так как одни из них могут быть взаимоисключающими. Например, выбранный материал и дизайна стента с большой радиальной жесткостью может привести к меньшей гибкости, а самый оптимальный дизайн может зависеть от механических свойств материала и процесса раскрытия его на баллоне. Экспериментальный метод поиска оптимальной конструкции стента очень трудоемкий и затратный, так как требуется множество экспериментальных образцов, поэтому использование методов компьютерного конечно-элементного моделирования является наиболее перспективным. Существует множество пакетов программного обеспечения для проведения конечно-элементного анализа. В научно-технологическом парке БНТУ «Политехник» практика применения пакета Ansys с приложением Isight и надстройки Tosca Structure for Ansys для топологической оптимизации, показала эффективность их использования для оптимизации параметров стентов.

Для исследования и проведения оптимизации нами за основу был взят дизайн стента представленный на рис. 1.

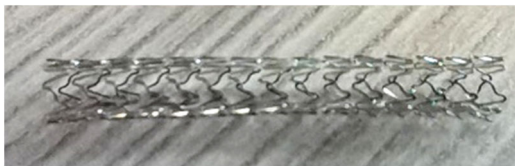


Рисунок 1 – Дизайн коронарного баллонорасширяемого стента

Для успешного и корректного решения задачи методом конечно-элементного анализа нами проведен предварительный анализ проблемы и установлен план решения задачи. На этапе предварительного анализа была рассмотрена геометрия стента и рассмотрены возможные ее упрощения, не влияющие на радиальную жесткость и гибкость, однако сокращающие количество элементов. Геометрическая модель заготовки саморасширяющегося стента была построена в пакете 3D моделирования Solidworks. Модели представляют собой резанные из трубки конструкции, состоящую из определенного количества сегментов (в зависимости от длины стента), соединенных между собой перемычками. Для баллонорасширяемых стентов использовались трубки из кобальт-хромового сплава L605, нержавеющей стали AISI 316LVM. Для построения математической модели были рассмотрены основные уравнения, граничные условия и допущения, содержащиеся в этой модели.

Анализ конструкции исходного стента показал, что для расчета достаточно использовать только одну область геометрии, которая повторяется по определенному закону. Так как расширение стента производится баллоном, то, для упрощения, в модели Ansys расширение стента будет

производиться с помощью цилиндрической поверхности имеющей свойства гиперэластичности, чтобы пренебречь напряжения в самом баллоне.

Следующим этапом компьютерного моделирования, явилось задание свойств материала баллона и свойств материала стента который расширяется этим баллоном в Ansys. Трением в контактной паре мы пренебрегли так как рассматривали исключительно напряжения внутри стента. После определения контактных поверхностей, задания параметров контакта и схемы контактного проникновения была создана расчетная сетка (Mesh). Последним этапом в подготовке к расчету, является задание граничных условий: расширение баллона до 5 мм; задание для стента поддержек с нулевым трением в местах его разделения на сегмент.

По полученной модели, была проведена предварительная оценка распределения напряжений и деформаций модели стента при расширении баллоном и определены максимальные напряжения в самых опасных местах, которые достигали 400 МПа. Были выявлены зоны с максимальной вероятностью разрушения материала в зонах на радиусах ламелей стента. После предварительного анализа, для устранения выявленных недостатков, нами была проведена параметрическая оптимизация стента в пакете для автоматизации и оптимизации процессов Isight. Изменяемым параметром приняли ширину ламелей стента.

По полученной развертке в параметрической оптимизации были изготовлены экспериментальные образцы стентов. Оценку оптимальности каждой развертки было решено проводить визуально, изучая качество раскрытия стента, а также по результатам измерения рекойла стента при его раскрытии и снятии давления в баллоне.

Оценка раскрытия стента и измерение его рекойла производилось на комбинированном тестере давления BWТес с интегрированным цифровым индикатором MITUTOYO (рис. 2).

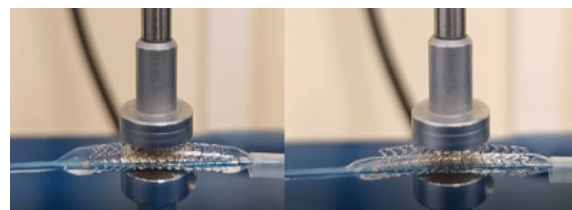


Рисунок 2 – Измерение рекойла стента

Измерение рекойла исходного образца показало значение в 10 % при раскрытии стента до номинального диаметра. Значение в 10 % слишком велико, при имплантации такого стента в сосуд может возникнуть его миграция с последующим рестенозом. Оптимизированная модель стента показала значения рекойла на уровне 2 %, что является хорошим результатом для баллоно-

расширяемых стентов. При этом у оптимизированного стента наблюдалось более равномерное раскрытие сегментов по сравнению с исходным образцом.

После проведения дальнейшей топологической оптимизации ожидается значительное улучшение характеристик стента, таких как его гибкость, увеличение усилия съема с системы доставки, дальнейшее снижение рекойла.

УДК 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ С ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ

Гацкевич Е.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В настоящей работе на основе теории распространения света в многослойных поглощающих средах проведено моделирование динамики отражения структуры аморфная пленка Ge на подложке кристаллического Si в условиях лазерно-индуцированного плавления и последующего отвердевания. Рассмотрены следующие ситуации при отвердевании: 1) граница фазового перехода расплав ↔ твердое тело движется от подложки по направлению к поверхности, 2) отвердевание происходит как со стороны поверхности, так и со стороны подложки.

Ключевые слова: отражение, германий, кремний, лазерное облучение, плавление, отвердевание.

SIMULATION OF REFLECTION DYNAMICS OF MULTILAYER SYSTEMS WITH MOVING BOUNDARIES

Gatskevich E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Simulation of reflection dynamics of amorphous Ge film on crystalline Si substrate under conditions of laser-induced melting and subsequent solidification has been carried out. The simulation is based on the theory of light propagation in multilayer absorbing media. The following situations for solidification are considered: 1) the phase transition melt ↔ solid boundary moves from the substrate towards the surface, 2) solidification occurs both from the side of the surface and from the side of the substrate.

Key words: Reflection, simulation, germanium, silicon, laser irradiation, melting, solidification.

*Адрес для переписки: Гацкевич Е.И., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: gatskevich_elenabk.ru*

При исследовании динамики отражения сложных систем иногда приходится иметь дело с многослойными структурами с движущимися границами. Подобного рода задачи, например, возникают при воздействии импульсного лазерного излучения на структуры аморфный слой германия на кристаллическом кремнии (a-Ge/Si) [1]. При поглощении излучения происходит нагрев пленки и последующее ее плавление. Поскольку температура плавления a-Ge ($T_a = 965$ К [2]) почти на 200 К ниже температуры плавления кристаллического Ge в результате плавления образуется переохлажденный расплав l-Ge, при остывании которого возможно отвердевание как со стороны подложки, так и одновременно со стороны поверхности и со стороны подложки, что приводит к специфическим зависимостям коэффициента отражения R от времени [1].

Литература

1. Bokeria, L. A. Public Health of the Russian Federation and surgical treatment of diseases of the heart and blood vessels in 2011 // Scientific Bulletin named after A.N. Bakulev RAMS. – 2012. – P. 5–47.

2. Зарецкий, А. П. / Биомеханическое моделирование персонафицированного коронарного стента / А. П. Зарецкий, А. В. Богомолов // Инжиниринг и телекоммуникации 2015. – 2015. – Том 7, № 3. – С. 82–90.

В настоящей работе проведено моделирование динамики отражения структуры пленка аморфного Ge на подложке кристаллического кремния в условиях импульсного лазерного воздействия. Толщина аморфной пленки считалась равной 100 нм, длительность импульса 10 нс. Предположим, что при воздействии лазерным импульсом на гетероструктуру a-Ge/Si наряду с обычным плавлением и отвердеванием, может наблюдаться также отвердевание с поверхности.

Моделирование отражение проводилось на основе теории распространения света в проводящих средах [3]. Оптические параметры каждого слоя считались независимыми от температуры. Параметры, используемые в вычислениях, приведены в табл. 1. Исследовалось отражение на длине волны $\lambda = 532$ нм при падении на поверхность под углом 45° .

Таблица 1. Оптические параметры

Материал	532 nm	
	n	k
a-Ge	4,7	2,2
l-Ge	2,8	5,4
cSi	4,2	0,005

Предположим, что на стадии плавления граница фазового перехода переохлажденный расплав – аморфное состояние движется с постоянной скоростью от поверхности вглубь образца V . При моделировании считали, что скорость $V = 2$ м/с. На стадии остывания скорость движения границы фазового перехода внутри образца равна V_1 , а с поверхности V_2 . Скорости V_1 и V_2 были варьируемыми параметрами задачи.

На стадии плавления характеристическая матрица [3] определялась следующим образом:

$$M = M(n_l, Vt)M(n_a, d - Vt)M(n_c, d_1), \quad (1)$$

где n_b, n_a, n_c – комплексные показатели преломления соответственно жидкого, аморфного Ge и кристаллического Si, $d = 100$ nm, $d_1 = 100$ nm.

При остывании

$$M = M(n_a, V_2t)M(n_l, d - V_1t - V_2t)M(n_a, V_1t)M(n_c, d_1). \quad (2)$$

Элементы матрицы M определялись по формуле [3]:

$$M(n_j, z_j) = \begin{bmatrix} \cos(\beta_j z_j) & \frac{-i}{p_j} \sin(\beta_j z_j) \\ -ip_j \sin(\beta_j z_j) & \cos(\beta_j z_j) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где n_j и z_j – комплексный показатель преломления и толщина j -го слоя, $k_o = 2\pi / \lambda$, $\beta_j = k_o n_j \cos \theta_j$, комплексный угол θ_j вычисляется из обобщенного закона преломления:

$$\sin \theta_j = \frac{n_o \sin \theta_0}{n_j}, \quad (4)$$

$$p_j = n_j \cos \theta_j, \quad (5)$$

$$q_j = \frac{\cos \theta_j}{n_j}. \quad (6)$$

Элементы указанных характеристических матриц использовались для вычисления коэффициента отражения R по методу, описанному в [3, 4].

Результаты моделирования представлены на рис. 1. Значения скоростей движущихся границ указаны на рисунке. С началом плавления наблюдается рост коэффициента отражения, связанный с плавлением поверхности и, соответственно, с переходом в металлическое состояние. При дальнейшем нагреве R не меняется.

После прекращения действия лазерного импульса начинается процесс остывания, при этом граница фазового перехода l-Ge \leftrightarrow a-Ge движется по направлению к поверхности (рис. 1, а).

После завершения процесса аморфизации Ge коэффициент отражения возвращается к исходному значению. Таким образом, в результате моделирования получилась типичная временная зависимость коэффициента отражения в условиях лазерно-индуцированного нагрева и остывания. Такая зависимость обусловлена тем, что при плавлении германий переходит в металлическое состояние, что вызывает скачок коэффициента отражения. Причем длительность фазы высокого отражения соответствует времени существования расплава [1].

При аморфизации с поверхности, когда на стадии остывания границы фазовых переходов движутся навстречу друг другу, динамика отражения меняется. В этом случае наличие тонкого металлического слоя внутри системы приводит к возникновению интерференционных эффектов, которые приводят к резкому понижению коэффициента отражения (ниже начального уровня) (рис 1, b, c).

Далее значение значения коэффициента отражения возрастают до начального значения. При равных скоростях V_1 и V_2 наблюдается кратковременный рост R и затем возвращение к нормальному значению. Аналогичные зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения при лазерно-индуцированном плавлении и остывании наблюдались в экспериментах с облучением структур a-Ge/Si эксимерным лазером [1].

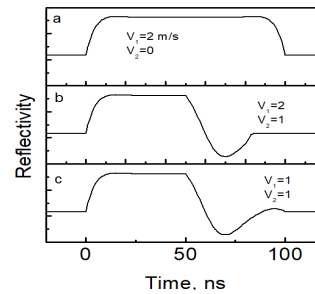


Рисунок 1 – Временные зависимости коэффициента отражения aGe/Si для различных скоростей движения межфазных границ ($\lambda = 532$ nm, $\Theta_0 = 45^\circ$)

Таким образом, предложенная модель позволяет определить характер временных изменений коэффициента отражения в условиях лазерно-индуцированных плавления и отвердевания.

Литература

- Ивлев, Г. Д. Фазовые превращения, инициируемые в тонких слоях аморфного кремния наносекундным воздействием излучения эксимерного лазера / Г. Д. Ивлев, Е. И. Гацкевич // ФТП. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 622–628.
- Szysko, W. Melting and diffusion under nanosecond laser pulse / W. Szysko // Appl.Surf. Science. – 1995. – V. 90. – P. 325–331.
- Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф.- М.: Наука, 1970. – 856 с.
- Гацкевич, Е. И. Отражательная способность тонкопленочного германия на кремниевых подложках / Е. И. Гацкевич, М. А. Альхимович // Матер. 10-й Международн. научн.-техн. конфер. «Приборостроение -2017», Минск, БНТУ. – 2017. – С. 357–359.

УДК 544.653.2, 678.073

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТАНТАЛОВЫХ НАНОСТРУКТУР В ПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПОЛИМЕРАМИ

Горох Г.Г.¹, Тураходжаев Н.Д.², Лозовенко А.А.¹, Федосенко В.С.¹, Худойкулов Ш.У.²

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

²*Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова
Ташкент, Узбекистан*

Аннотация. Разработаны методики формирования столбиковых танталовых наноструктур в пористых матрицах анодного оксида алюминия, модифицированных полимерными пленками поливиниленфторида. Представлены результаты исследований трибологических характеристик методами наноиндентирования и скретч-тестирования поверхностного слоя полученных материалов. Наноструктурированные композитные пленки использованы при создании исполнительного элемента типа «микросдвиг».

Ключевые слова: нанокompозит, пористые матрицы, полимерные пленки, трибопреобразователь

INTELLIGENT MATERIALS FOR CONVERTING DIFFERENT TYPES OF ENERGY BASED ON TANTALUM NANOSTRUCTURES IN POROUS MATRIXES MODIFIED WITH FUNCTIONAL POLYMERS

Gorokh G.¹, Turakhodjaev N.², Lazavenka A.¹, Fedosenko V.¹, Khydaykulov Sh.²

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

²*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Tashkent, Uzbekistan*

Abstract. Methods for the formation of columnar tantalum nanostructures in porous matrices of anodic alumina modified with polyvinylidene fluoride polymer films have been developed. The results of studies of tribological characteristics by nanoindentation and scratch testing of the surface layer of the obtained materials are presented. Nanostructured composite films were used to create an actuating element of the microshear type.

Key words: nanocomposite, porous matrices, polymer films, triboconverter.

*Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П.Бровки, 6, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by*

Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик микроэлектромеханических преобразователей сенсорного и актуаторного типа является разработка новых функциональных и интеллектуальных материалов, с использованием основы (подложки), структурированной на наномасштабном уровне. Это открывает перспективы управления физико-механическими свойствами материалов путем создания упорядоченных микро- и наномасштабных поверхностных и объемных кластеров.

В настоящей работе предложен оригинальный подход создания интеллектуальных материалов для исполнительных элементов (актуаторов) систем управления нанообъектами на основе наноструктурированных пленок, представляющих собой пористые диэлектрические матрицы, поры которых заполнены танталовыми столбиками и покрыты сверху металлосодержащим полимером [1]. Такие материалы способны реагировать на изменения окружающей среды, информировать о том, в каком состоянии находится объект, каковы предельно допустимые деформации, в зависимости от условий эксплуатации менять пространственное расположение объекта.

В качестве матриц для нанесения функциональных покрытий использовали анодированные в 0,4 М растворе винной кислоты при $j = 6 \text{ mA/cm}^2$ тонкопленочные системы Ta/Al. Электрохимическое анодирование образцов осуществляли в две стадии в гальваностатическом режиме. Напряжения стационарного роста пор составляло 210 В, напряжение реанодирования 410 В. В результате в порах сформировались металлоксидные столбики Ta₂O₅. Верхняя часть матрицы АОА, незаполненная столбиками, была удалена в селективном травителе. В результате была сформирована планарная композитная система из пористой матрицы АОА, поры которой заполнены наноструктурами Ta₂O₅, частично выходящими из матрицы. Толщина всей структуры составляла около 900 нм (см. рис. 1, а).

В качестве импрегнирующего наполнителя использовали пленки поливиниленфторида (ПВДФ), нанесенные методом ПХО на поверхность подготовленной структуры. Процесс формирования полимерного покрытия проводили при давлении остаточного газа в камере 8 Па; напуск газовой смеси осуществляли при давлении 90 Па; для создания плазмы использовали СВЧ-разряд 5,47 МГц. За 12 минут на поверхности выросла

пленка полимерная пленка толщиной 1,5 мкм. На рис. 1,б представлено изображение поверхности металлполимерного покрытия на матрице АОА/ Ta_2O_5 .

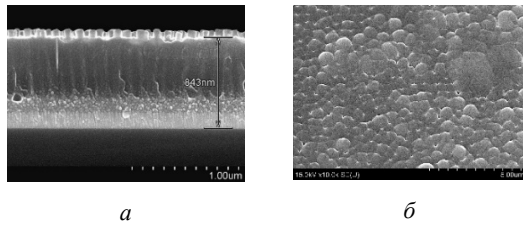


Рисунок 1 – СЭМ изображения скола матрицы АОА со столбиками Ta_2O_5 и поверхность структуры после нанесения ПВДФ

Трибологические и механические свойства полимерсодержащих анодных оксидных композитных пленок проводили с использованием Nano Scratch Tester (NST) и Ultra Nano Hardness Tester (UNHT) CSM Instruments. Скретч-тестером путем линейного царапания кантилевером ST-322 с алмазным наконечником радиусом 2 мкм, двигающимся вдоль поверхности структуры со скоростью 0,01 мм/с, при возрастающей нагрузке на конце кантилевера от 0,1 до 50 мН со скоростью 1 мН/с проводили измерения силы трения, коэффициента трения, устойчивости поверхности, глубины проникновения кантилевера относительно исходной толщины пленки от нагрузки.

Полученные зависимости силы трения, коэффициента трения и глубины проникновения кантилевера от приложенной нагрузки приведены на рис. 2.

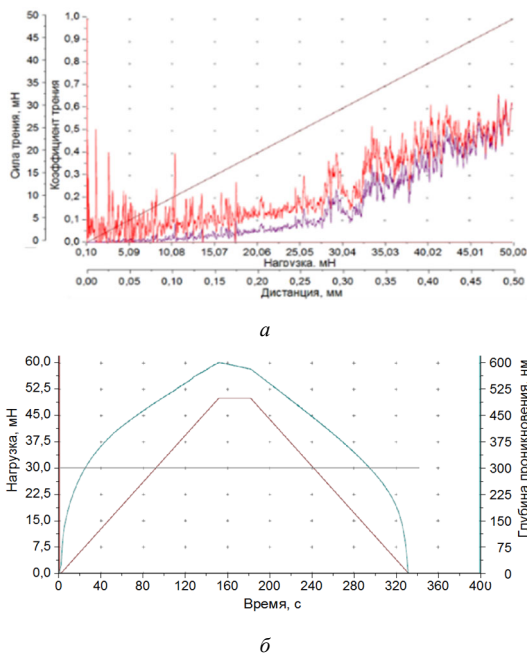


Рисунок 2 – Зависимости силы трения, коэффициента трения (а) и глубины проникновения кантилевера (б) от приложенной нагрузки

Результаты исследований показали высокую механическую прочность композитных матрично-столбиковых анодных оксидных пленок: при максимальной нагрузке 50 мН глубина проникновения алмазной иглы диаметром 2 мкм не превысила 20 % от 1,5 мкм пленки после первого прохода и 50 % после шестого прохода. Показана нелинейная зависимость силы трения, коэффициента трения, глубины проникновения кантилевера от прикладываемой нагрузки, при этом коэффициент трения слабо изменяется при нагрузках до 20 мН.

Наноиндентирование осуществлялось с применением трехгранных алмазных инденторов Берковича. Опыты проводились при максимальных нагрузках P_{max} – 10, 30 и 50 мН. Процедура заключалась в нагружении индентора до P_{max} со скоростью 20 мН/мин и выдержке в течение 30 с и последующей разгрузке. Для каждого значения P_{max} для исследуемого образца выполнялось по 5 уколов для определения среднего значения микротвердости и модуля упругости. Анализ диаграмм наноиндентирования проводили по методике Оливера-Фарра. Данные по средним значениям микротвердости и модуля упругости представлены в табл. 1.

Таблица 1. Микротвердость (H) и модуль упругости (E_p)

P_{max}	Глубина, h	H , МПа	E_p , ГПа
50 мН	610 нм	7056,2	93,5
30 мН	460 нм	4983,2	84,9
10 мН	330 нм	4630,7	87,0

Из приведенных данных видно, что средние значения модуля упругости и микротвердости практически не менялись при нагрузках 10 и 30 мН, но при нагрузке 50 мН значительно выросло.

На основе созданных композитных пленок был создан пьезопреобразователь, как исполнительный элемент типа «микродвиг», представляющий собой кремниевую подложку с двойной диэлектрической мембраной, на которой была сформирована каркасная матрица с пьезоэлектрическим слоем и системой управления в виде встречно-штыревых электродов. В результате был получен исполнительный элемент на основе пьезокомпозита, обладающего структурой со связностью 1–3. В конструкции пьезопреобразователя, содержащей множество электродов и чередующихся слоев «электрод – ПВДФ – электрод», слои пьезоэлектрика электрически соединяются в параллельную цепь, а механически – в последовательную. Это позволяет увеличить действующую силу и снизить напряжение, подаваемое на электроды. Достоинствами таких актуаторов является низкий уровень электромагнитных помех, высокая плотность энергии и возможность управления при помощи напряжения, что позволит

реализовать совместное решение измерительных и исполнительных задач в подобных системах.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф21УЗБГ-003).

УДК 617.57-77+674

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ В ПРОТЕЗОСТРОЕНИИ

Грузд Н.А., Филонова М.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. С появлением новых средств и способов обработки лесоматериалов, значительно упростился процесс получения сложных геометрических форм и размеров, что обеспечивает возможность внедрения деталей из древесины в конструкции современных бионических протезов.

Ключевые слова: лесоматериалы, протезостроение, бионические протезы.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF WOOD MATERIALS IN PROSTHESIS

Gruzd N., Filonova M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. With the advent of new means and methods of processing timber, the process of obtaining complex geometric shapes and sizes has been greatly simplified, which makes it possible to introduce wood parts into the designs of modern bionic prostheses.

Key words: timber, prosthetics, bionic prostheses.

*Адрес для переписки: Филонова М.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: filonovami@bntu.by*

Развитие технологий послойного наращивания и синтеза изделий из пластмасс во многом способствовало популяризации полимеров в качестве основного материала корпусных деталей бионических и тяговых протезов. Приемлемая себестоимость и отсутствие необходимости в дальнейшей обработке изделия являются решающими факторами при выборе 3D-печати, вместе с тем низкая производительность аддитивного производства наряду с отрицательными свойствами пластмасс заставляет задуматься о рентабельности существующих решений.

Пластмассы обладают относительной легкостью, устойчивостью к механическим и химическим воздействиям. К неоспоримым преимуществам пластмасс также следует отнести низкую теплопроводность и водопоглощение. Несмотря на это, все больше всемирно известных брендов и производителей отдают предпочтение деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности. Мероприятия по урегулированию производства пластиковой продукции направлены прежде всего на минимизацию негативного влияния токсичных химических веществ, выделяемых из фрагментированного пластика, на естественные экосистемы и здоровье человека в частности [1].

Древнейший известный протез, обнаруженный в фиванском некрополе на западном берегу Нила, представлял собой большой палец ноги, из-

Литература

1. Полимерсодержащие нанокompозитные покрытия для изделий машиностроения / Г. Г. Горох [и др.] // Труды междунар. научн.-технич. конфер. «Машиностроение и техносфера XXI века». – 2020. – Р. 45–49.

готовленный из древесины [2]. Образец дотирован 950–710 гг. до нашей эры, тем не менее, найдшийся в составе мумии, сохранился до наших дней практически в первозданном виде.

Известны и другие задокументированные прототипы деревянных протезов конечностей, пользовавшиеся популярностью вплоть до распространения бронзовых, а затем и пластмассовых моделей. В первую очередь, выбор материала определялся развитием технической составляющей устройств, функциональность которых в последующем уже не ограничивалась сугубо косметическим назначением. Металлические элементы конструкции протеза отвечали требованиям прочности, в то время как корпусные детали дешевле и удобнее оказалось изготавливать из синтетических полимеров.

С появлением новых средств и способов обработки лесоматериалов, значительно упростился процесс получения сложных геометрических форм и размеров, что обеспечивает возможность внедрения деталей из древесины в конструкции современных бионических протезов.

Древесина состоит из органических полимеров (лигнин) с длинными цепными молекулами. Изучение механических свойств полимеров осуществляется в соответствии с общими законами деформирования материалов под нагрузкой с учетом времени действия.

Механические свойства деревянных деталей в общем случае определяются строением и сортом древесины, видом и способом пропитки, условиями эксплуатации и действующей нагрузкой. К основным относят прочность, твердость, жесткость, ударную вязкость, износостойкость и др. [3].

Прочность – способность древесины сопротивляться разрушению под воздействием механических воздействий. Прочность зависит от направления приложения нагрузки, породы дерева, плотности, влажности материала, наличия пороков. Значительное влияние оказывает содержащаяся в клеточных оболочках связанная влага: при повышенном содержании в 20–25 % прочность древесины заметно снижается, превышение предела гигроскопичности не влияет на показатели прочности.

Состояние на грани разрушения называют пределом прочности древесины. Средняя величина предела прочности при растяжении вдоль волокон для всех пород составляет 1300 кгс/см². Прочность древесины на растяжение поперек волокон составляет 65 кгс/см² и учитывается лишь при разработке режимов резания и сушки. Сжатие вдоль волокон характеризуется в незначительном укорочении детали. При сжатии поперек волокон прочность ниже, чем вдоль примерно в 8 раз. Обработка древесины сжатием позволяет улучшить прочностные характеристики изделия и повысить твердость его поверхности [4].

Твердость – свойство древесины сопротивляться внедрению более твердого объекта. Твердость позволяет судить о применимости деревянной детали в конструкции протеза. Учитывается также при обработке материала режущими инструментами. По твердости древесные породы можно разделить на: мягкие (сосна, ель, липа, осина, ольха, каштан, кедр, тополь, пихта, можжевельник); твердые (береза, бук, дуб, вяз, лиственница, рябина, клен, лещина, орех грецкий, хурма, яблоня, ясень, ильм, карагач, платан.); очень твердые (кизил, фисташки, тис, акация белая, береза железная, граб, самшит) [3].

Древесина твердых пород обладает лучшей способностью к изгибанию. Данное свойство характеризует возможность обработки гнутьем: нагретую влажную древесину подвергают сушке под нагрузкой с целью придания новой формы детали.

Получение заданной формы и размеров изделия достигается преимущественно механической обработкой древесины [5]. Перед обработкой резанием заготовки проходят стадию сушки, при которой влажность материала доводят до установленной нормы в сушильных цехах. При термической обработке из древесины удаляются природные экстракты, вследствие чего материал становится легче, а теплоизоляционная способность возрастает втрое [4, 5]. Заготовки полу-

чают путем раскроя досок и плит, причем последовательность стадий сушки и раскроя допускается изменять.

Механическая обработка с образованием стружки может производиться как вручную, так и с привлечением технологического оборудования. Ручным инструментом выполняют пиление, строгание, долбление долотами, резание стамесками, шлифование шкурками и т.д. [5]. Как правило заготовки предварительно размечают. На деревообрабатывающих станках осуществляют пиление, фрезерование, сверление, долбление, точение и шлифование. В массовом и крупносерийном производстве древесину обрабатывают без разметки на предварительно настроенных станках или же с помощью специальных приспособлений. В условиях индивидуального производства, характерного для протезостроения, разметка заготовок необходима.

На сегодняшний день обработка древесины осуществляется преимущественно на фрезерных станках с ЧПУ. Фрезерование выполняется в два этапа: черновая резка, при которой удаляется основная часть материала; чистовая обработка фрезой со сферическим концом [6]. Качество обработанной поверхности определяется параметрами шага и боковой скорости. Шаг – расстояние между проходами инструмента во время операции. Чем больше шаг, тем выше производительность процесса, но меньше детализация.

Обработанную древесину защищают от биологического разрушения и повреждений нанесением химического покрытия. Средства, наносимые кистью или путем распыления, проникают всего на 1–2 мм, поэтому их защитные свойства невелики. Пропитка способом погружения обладает большей эффективностью, проникая в толщу изделия на 5 мм. Под давлением вещество пропитывает изделие насквозь. Химические покрытия, такие как смесь глицерина и ангидрида малеиновой кислоты, позволяют повысить устойчивость древесины к влажности, возгоранию, исключить процессы гниения [4].

Новейшие подходы к изучению свойств лесоматериалов, позволяют создавать альтернативы стали и терморезистивным пластикам. Так исследователи из Стокгольмского университета получили материал с высокими литейными и прочностными характеристиками на основе лигнина и этиленгликоля [7]. В свою очередь, кипячение в растворе гидроксида натрия и сульфата натрия с последующим сжатием и сушкой под прессом повышает плотность древесины в 11 раз с сохранением натуральной структуры волокон [8].

Таким образом производство деталей из древесины не требует уникального оборудования и дорогостоящих компонентов, обеспечивая тем самым сравнительно низкие затраты на производ-

ство. В большинстве своем деревообрабатывающая промышленность является экологически чистой и, что немаловажно, соответствует специфике отечественной экономики.

Деревянные элементы при должной обработке обладают повышенной прочностью, легкостью, не вызывают аллергических реакций при контакте с кожей. Кроме того, природная фактура древесины позволяет создать уникальный дизайн протеза, заметно выделяющий устройство среди аналогов современных производителей, что, в свою очередь, обеспечивает конкурентное преимущество на мировом рынке биотехнических изделий.

Литература

1. Chiba, Sanae. Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris / Sanae Chiba // *Marine Policy*. – 2018. – № 96. – P. 204–212.
2. История протезов в фотографиях // BBC News русская служба, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: История протезов в фотографиях – BBC News Русская служба. – Дата доступа: 01.10.2022.

3. Механические свойства древесины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://novosibdom.ru>. – Дата доступа: 04.10.2022.

4. Способы улучшения свойств древесины // [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: [Puuinfo](http://Puuinfo.ru). – Дата доступа: 04.10.2022.

5. Бобиков, П. Д. Изготовление художественной мебели / П. Д. Бобиков. – Москва: Высшая школа, 1978 – с. 256.

6. Обработка дерева на фрезерном станке с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: stankoff.ru. – Дата доступа: 08.10.2022.

7. Catalyst-Free Synthesis of Lignin Vitrimers with Tunable Mechanical Properties: Circular Polymers and Recoverable Adhesives / Adrian Moreno [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2021. – Vol. 13. – P. 57952–57961.

8. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material / Jianwei Song [et al.] // *Nature*. – 2018. – Vol. 554. – P. 224–228.

УДК 617.57-77+611.8

ИНВАЗИВНЫЙ ИНТЕРФЕЙС БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА

Грузд Н.А., Мониц С.Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Современные модели бионических протезов способны обеспечить необходимое число степеней подвижности, часть из которых приводится в движение сервоприводами.

Ключевые слова: бионические протезы, инвазивный интерфейс, методы передачи энергии.

INVASIVE BIONIC PROSTHESIS INTERFACE

Gruzd N., Monich S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. Modern models of bionic prostheses are able to provide the required number of degrees of mobility, some of which are driven by servos.

Key words: bionic prostheses, invasive interface, energy transfer methods.

*Адрес для переписки: Мониц С.Г., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by*

Современные модели бионических протезов способны обеспечить необходимое число степеней подвижности, часть из которых приводится в движение сервоприводами. Основное же ограничение на функциональность устройства накладывает двухканальный интерфейс, обусловленный методами считывания миоэлектрических импульсов мышц культи, и отсутствие обратной связи при взаимодействии с внешними объектами.

Выбор методов протезирования и последующая реабилитация во многом закладывается процедурой ампутации. При стандартной фасциопластической ампутации мышцы пересекают до кости, после чего фиксируют рубцом к опилу, обеспечивая умеренно коническую форму культи [1]. Фиксация ограничивает способность механорецепторов в каждой мышце передавать информацию в центральную нервную систему, что ли-

шает пациента возможности получения проприоцептивной обратной связи от искусственной конечности [2].

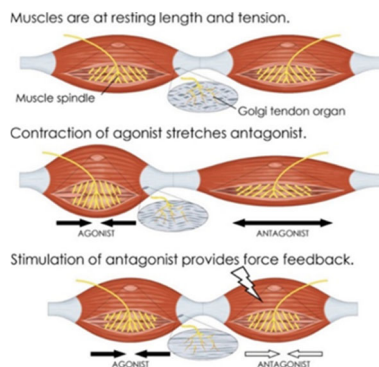


Рисунок 1 – Мионевральный интерфейс агонист-антагонист

Восстановить естественные отношения иннервируемых мышц позволяет мионевральный интерфейс агонист-антагонист (AMI) за счет обеспечения механической связи между ними, в результате чего пассивное растяжение мышцы антагониста при сокращении агониста интерпретируется центральной нервной системой как изменение положения фантомного сустава (рис. 1).

Регистрация миоэлектрических сигналов при этом осуществляется парой электромиографических сенсоров, закрепляемых неинвазивно на поверхности культи или в гильзе протеза. Каждый из датчиков выполнен на основе миниатюрной печатной платы, на которой смонтированы два гладких электрода [3]. Для чистоты считывания электроды приводятся в непосредственный контакт с кожей, что зачастую приводит к травмированию тканей, вызывая у пациента дискомфорт при использовании устройства. Кроме того, неинвазивный метод не позволяет обеспечить точное базирование датчика на теле ввиду произвольных микродвижений культи.

В качестве альтернативы ведутся разработки сетей внутримышечных беспроводных микросенсоров и микростимуляторов, осуществляющих анализ нервно-мышечной активности и управление внешними устройствами [4]. Система состоит из внешнего блока, плавающих электродов, имплантируемых в тело, и протокола связи, обеспечивающего двунаправленный обмен данными между человеком и бионическим устройством. Контроллер верхнего уровня взаимодействует с блоками управления нижнего уровня, которые подают импульсы тока через текстильные электроды. Имплантируемые элементы имеют нитевидную форму, что позволяет их устанавливать путем инъекций без проведения хирургических вмешательств (рис. 2).

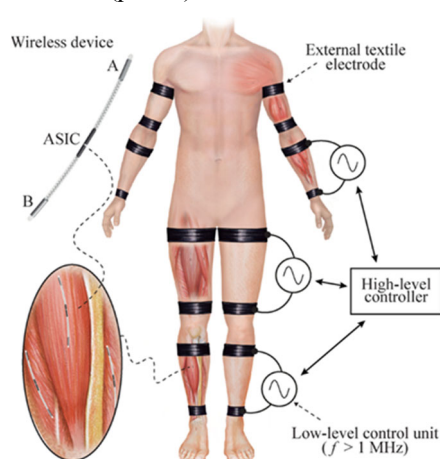


Рисунок 2 – Двунаправленная нейронная система BHNS

Компактный форм-фактор электродов достигается путем беспроводной передачи энергии (WPT).

Стандартные элементы питания имеют ограниченный срок службы и крупные габариты, что исключает их использование в качестве основных источников энергии в миниатюрных электронных имплантатах. Методы беспроводной передачи энергии в подобных системах подразделяются на индуктивные, ультразвуковые и емкостные. Тело при этом является проводником безвредных всплесков высокочастотного тока, посылаемых системой через внешние текстильные электроды, неинвазивно размещенные на теле человека.

Часть электроэнергии, получаемой имплантируемым элементом, используется для генерирования электрических импульсов, что обеспечивает обратную связь бионического протеза. Подобные системы способны передавать проприоцептивную и сенсорную информацию посредством двухфазной нейростимуляции, воздействующей на группы нервов и мышечную ткань [5]. Таким образом пациенты, утратившие тактильные ощущения, смогут получать представления о форме, размерах, температуре объекта.

Инвазивная нейростимуляция решает также другую немаловажную задачу как купирование нейропатических болей, возникающих при ампутации конечности. В процессе заживления нервных волокон может происходить разрастание ткани, в результате чего образуется неврома, раздражающая окружающие рецепторы [6]. В более тяжелых случаях возникает фантомный болевой синдром, проявляющийся в перевозбуждении нервных структур, дезорганизации естественных механизмов контроля боли и неэффективности традиционных анальгетических средств [7]. Процедура лечения заключается в размещении электродов на уровне выше источника боли, таким образом, чтобы электрический импульс, возникающий при включении системы блокировал путь для прохождения болевого сигнала [8]. В зависимости от интенсивности боли количество имплантируемых электродов может варьироваться.

Основное достоинство инвазивного считывания миоэлектрических импульсов заключается в возможности объединения функционала нескольких обособленных устройств в компактной системе нитевидных элементов. Скорость передачи сигналов при этом выше, чем у неинвазивных датчиков, и может достигать до 1 ksp/s при частоте тока 3 МГц. Кроме того, метод внутримышечной стимуляции периферической нервной системы открывает новые возможности разработки бионических протезов с двунаправленной нейронной связью, что позволит компенсировать отсутствие сомоторного восприятия у пациента и обеспечить простое интуитивное управление устройством.

Следует учитывать, что миоэлектрический интерфейс не обладает высокой точностью считывания сигналов, поэтому данный метод необходимо

дополнять устройствами, способными фиксировать мелкие сокращения кожи, давление в сосудах и т.д., позволяя системе регистрировать полную картину изменений в теле и проектировать комплексные движения утраченной конечности на основе алгоритмов машинного обучения.

Литература

1. Сонголов, Г. И. Ампутации и экзартикуляции: учебное пособие / Г. И. Сонголов, О. П. Галеева. – Иркутск: ИГМУ, 2013. – с. 60.
2. The Ewing Amputation: The First Human Implementation of the Agonist-Antagonist Myoneural Interface / Hugh Herr [и др.] // *Plast Reconstr Surg Glob Open*. – 2018. – № 6 (11).
3. Грузд, Н. А. Электромиографический сенсор и его применение в области протезирования конечностей / Н. А. Грузд, Ю. В. Суходолов // Новые направления развития приборостроения : материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 20–22 апреля 2022 г. / Белорусский национальный технический университет ;

редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 11–12.

4. Floating EMG sensors and stimulators wirelessly powered and operated by volume conduction for networked neuroprosthetics / Laura Becerra-Fajardo [и др.] // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. – 2022. – Vol. 19, № 57.

5. Synthetic nervous system: neuromuscular feedback mechanism [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://everettlawson.com/synthetic-nervous-system-2/>. – Дата доступа: 14.09.2022.

6. Фантомные боли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://motorica.org/prosthetics/adults/tpost/1mbkjh0fme-fantomnie-boli>. – Дата доступа: 13.09.2022.

7. Способ профилактики фантомного болевого синдрома при ампутации конечности по онкологическим показаниям / Н. А. Осипова [и др.] // *Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи*. – 2013. – № 3. – С. 51 – 55.

8. Фантомная боль, роль и место различных методов лечения фантомно-болевого синдрома / А. Т. Давыдов [и др.] // *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. – 2014. – №12. – С. 35–58.

УДК 51

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ИНЖЕНЕРИИ

Гундина М.А., Юхновская О.В., Каменко Д.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье рассматривается реализация некоторых статистических алгоритмов выявления аномальных значений выборки, реализованных в компьютерной системе Wolfram Mathematica. Описываются различные подходы к процессу выявления аномалии выборки и специфика их использования. Обнаружение аномалий относится к поиску непредвиденных значений в потоках данных.

Ключевые слова: аномальное значение, выборка, компьютерная система Wolfram Mathematica.

IMPLEMENTATION OF MATRIX METHOD OF DETERMINING ANOMALIES IN ENGINEERING

Hundzina M., Yuhnovskaya O., Kamenka D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article discusses the implementation of some statistical algorithms for detecting anomalous sample values, implemented in a computer system Wolfram Mathematica. Various approaches to the process of anomaly detection and the specifics of their use are described. Anomaly detection refers to finding unexpected values in data streams.

Key words: anomalous value, sample, computer system.

*Адрес для переписки: Гундина М.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by*

При автоматическом сборе показаний прибора необходимо автоматическое определение значений, которые сильно отличаются от всей совокупности исследуемых данных. Сейчас в современных компьютерных пакетах инженерных расчетов появилась возможность реализовать алгоритмы обнаружения аномальных значений выборки. Часто это осуществляется с помощью поиска и анализа закономерностей исходных эмпирических данных. Например, в компьютерной системе Wolfram Mathematica используется функция Find-

Formula. Она позволяет найти аппроксимирующую функцию, которая достаточно хорошо описывает исходный набор данных.

Исходные данные могут быть различной природы. Известно, что случайная величина погрешности измерения прибора является нормально распределенной величиной. Однако предположение о нормальном распределении выборки может и не выполняться. На данный момент существует множество подходов для определения аномалий и подходов к автоматизации процесса их выявления.

Одни требуют привлечения сложного математического аппарата, другие достаточно просты в реализации, третьи должны учитывать особенности природы исходного анализируемого процесса.

Целью данной статьи является анализ определений аномалий в различных отраслях науки и реализация алгоритма выявления аномальных значений матричным методом в компьютерной системе Wolfram Mathematica.

Процессом поиска аномальных значений несколько десятилетий интересуются физики, математики, социологи, педагоги, астрономы, медики и другие ученые. В каждой науке свой подход к определению таких значений.

В инженерии своевременное обнаружение аномалий является основой предотвращения нештатных ситуаций и преждевременных отказов приборов. Например, в анализе многомерных технологических сигналах аномалия представляет собой отклонение поведения системы от заранее описанного стандартного ее поведения [1].

В философском смысле под аномалией понимается научный дискурс (совокупность научных текстов, связанных содержательными и функциональными отношениями), обозначающий познавательную ситуацию, при которой результаты наблюдений и экспериментов противоречат принятым теоретическим представлениям или не совпадают с предсказаниями, сделанными на основе таких представлений [2].

В медицине аномальным значением является результат отклонения от нормального развития, т.е. возникновения нетипичного строения и деятельности органов или всего организма [3].

В биологии исследователи определяют аномалию как отклонение от структуры и (или) функции, присущей данному биологическому виду, возникшее вследствие нарушения развития организма [4].

Педагогический термин девиация является синонимом понятия аномалии. Оно может быть рассмотрено как отклонение разной степени от нормы поведения [5].

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, под аномалией можно понимать отклонение поведения анализируемой системы от некоторого стандартного ожидаемого поведения системы.

Рассмотрим реализацию одного метода обнаружения аномалий, основанного на сингулярном разложении матриц.

Основная идея метода обнаружения аномальных значений, основанного на разложении матриц, состоит в том, чтобы использовать сингулярное разложение исходной матрицы исследуемых данных.

Предположим, что исходный набор данных выглядит следующим образом, как это представлено на рис. 1.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 3 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 4 & 1 & 4 \\ 5 & 1 & 1 & 7 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 6 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 4 & 12 & 2 & 1 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

Рисунок 1 – Исходная выборка

Рассмотрим сингулярное разложение матрицы M по формуле

$$M = ULV^T, \quad (1)$$

где L – матрица размера $m \times n$ с неотрицательными элементами, у которой элементы, лежащие на главной диагонали – это сингулярные числа (все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми), а матрицы U и V – это две унитарные матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно.

В компьютерной системе Wolfram Mathematica сингулярное разложение может быть получено с помощью следующей формулы:

$$\{u, l, v\} = \text{SingularValueDecomposition}[M1];$$

Приближенная матрица

$$M_k = U_k L_k V_k^T, \quad (2)$$

где U_k, L_k, V_k получаются из матриц сингулярного разложения отсечением до k первых столбцов.

Рассмотрим случай $k = 1$;

$$\text{For}[u1 = \text{Table}[0, \{i, 1, m\}, \{j, 1, n\}]; \\ j = 1, j \leq k, j++, \text{For}[i = 1, i \leq m, i++, u1[[i, j]] = u[[i, j]]]]$$

$$\text{For}[v1 = \text{Table}[0, \{i, 1, m\}, \{j, 1, n\}]; \\ j = 1, j \leq k, j++, \text{For}[i = 1, i \leq m, i++, v1[[i, j]] = v[[i, j]]]]$$

$$\text{For}[l1 = \text{Table}[0, \{i, 1, m\}, \{j, 1, n\}]; \\ j = 1, j \leq k, j++, l1[[j, j]] = l[[j, j]]]$$

Команда `ArrayPlot[Abs[M1-M2]/Chop]` позволяет графически выделить аномальные значения матрицы (рис. 2).



Рисунок 2 – Аномальные значения, выделенные темным цветом

Элементы, которые сильно отличаются от соответствующих элементов матрицы небольшого ранга, будут считаться аномальными.

Процесс выявления аномалий является очень важным вопросом в задачах предсказания поломок оборудования, выявления аномального спроса на потребляемую продукцию, выявления нестандартного поведения информационно-измерительной системы. В компьютерной системе Mathematica имеются встроенные функции анализа аномальных значений выборки, также существует возможность реализации пользовательских алгоритмов для обрабатывать массивы большого объема.

Литература

1. Шкодырев, В. П. Обзор методов обнаружения аномалий в потоках данных / В. П. Шкодырев // Second Conference on Software Engineering and Information Management. – 2017. – С. 50.
2. Большая советская энциклопедия: [В 30 т.] ; гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е. изд. – М.: Сов. энцикл., 1969–1978.
3. Вайнер, Э. Н. Краткий энциклопедический словарь: Адаптивная физическая культура : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям "Адаптивная физическая культура" и " Физическая культура" / Э. Н. Вайнер, С. А. Кастионин. – Москва : Флинта, 2003. – 144 с.
4. Коджаспирова, Г. М. Для студ. высш. и сред. пед. учеб. заведений // Г. М. Коджаспирова, А. Ю. Коджаспиров. – М.: Издательский центр «Академия», 2000. – 176 с.
5. Дрешин, М. Г. Норма и аномалия в социальном развитии : дис. ... канд. Филос. наук : 09.00.11 / М. Г. Дрешин. – Ростов-на-Дону, 2010. – 151 с.

УДК 004+51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РАССТОЯНИЯ МАХАЛАНОВИСА

Гундина М.А.¹, Жданович М.Н.², Каменко Д.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²«Отраслевая лаборатория новых технологий и материалов»

ОАО "ИНТЕГРАЛ" – управляющая компания холдинга "ИНТЕГРАЛ"

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматривается реализация алгоритма выявления аномальных значений выборки с помощью расстояния Махалановиса, реализованных в компьютерной системе Wolfram Mathematica.

Ключевые слова: аномальное значение, выборка, расстояние Махалановиса, компьютерная система Wolfram Mathematica.

DETERMINATION OF ANOMALOUS SAMPLE VALUES USING THE MAHALANOBIS DISTANCE

Hundzina M.¹, Zhdanovich M.², Kamenka D.¹

¹Belarusian National Technical University

²«Branch laboratory of technologies and materials»

JSC "INTEGRAL" – the management company of the holding "INTEGRAL"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article discusses the implementation of some statistical algorithms for detecting anomalous sample values by Mahalanobis distance, implemented in a computer system Wolfram Mathematica.

Key words: anomalous value, sample, Mahalanobis distance, computer system.

Адрес для переписки: Гундина М.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by

Известно, что единицы статистической совокупности, у которых значения анализируемого признака существенно отклоняются от основного набора данных, называются аномальными значениями.

Причины возникновения аномальных значений могут быть разной природы: сбои при измерениях и регистрации данных, резкие отклонения условий наблюдений и др. Наличие аномальных результатов может привести к недостоверным результатам при оценивании и контроле соответствия характеристик системы предъявляемым

требованиям. Поэтому необходимо выявлять и устранять аномальные результаты измерений [1].

Степень аномальности значения может определяться по значению расстояния Махалановиса. Эта величина в математической статистике является мерой расстояния между векторами случайных величин, обобщает понятие евклидова расстояния.

В задаче определения принадлежности точки одному из классов необходимо найти матрицы ковариации всех классов, что, обычно, делается на основе известных выборок из каждого класса.

При вычислении расстояния Махаланобиса до каждого класса выбирается тот класс, для которого это расстояние оказалось минимальным, что эквивалентно методу максимального правдоподобия.

Примем в рассмотрение предположение о нормальном законе распределения исходной выборки.

Для векторизации вычисления расстояний Расстояние Махаланобиса между двумя точками – это мера расстояния между двумя случайными точками U и V , одна из которых может принадлежать некоторому классу с матрицей ковариации COV :

$$d_m(U, V, COV) = \sqrt{(U - V)COV^{-1}(U - V)^T},$$

где символ T обозначает операцию транспонирования, а под COV^{-1} подразумевается матрица, обратная ковариационной матрице.

Элементы ковариационной матрицы вычисляются следующим образом:

$$cov_{a,b} = \frac{1}{|C|-1} \sum_{x \in C} (X_1 - \mu_1)(X_2 - \mu_2), \quad (1)$$

где μ_1, μ_2 – математические ожидания по признакам, $|C|$ – количество точек в классе.

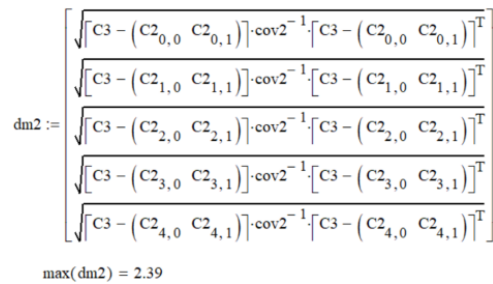


Рисунок 1 – Значение расстояния от фиксированной точки C_3 до некоторого множества точек C_2

Расстояние Махаланобиса широко применяется в задачах кластеризации и классификации в задачах определения соответствия точки известному классу. Оно отличается от расстояния Евклида тем, что учитывает корреляции между переменными и инвариантно масштабу [1, 2].

Точка, имеющая наибольшее расстояние Махаланобиса до остального множества точек, считается аномалией. Такая точка имеет наибольшее влияние на кривизну и на коэффициенты уравнения регрессии. Также расстояние Махаланобиса может быть использовано в задаче определения многомерных выбросов.

В системе Wolfram Mathematica определяем расстояние следующим образом [3]:

```

Dm=Compile[{{u,_Real,1},{[Mu],_Real,1},
{s,_Real,2}},First@
[Sqrt]((u-[Mu]).Inverse[s].
Transpose[{u-[Mu]}]),CompilationOptions-
->{"ExpressionOptimization"->True},
RuntimeOptions->"Quality",RuntimeAttributes-
->Listable,CompilationTarget->"C"]
    
```

Пусть исходная выборка имеет вид:

```

cohort={{5.04,14.22},{5.50,5.83},{5.19,4.61},
{4.78,4.12},{5.08,5.99},{4.29,4.18},{5.08,6.90}};
[Mu]=Mean@cohort;s=Covariance@cohort;
    
```

На экран характеристики выборки могут быть выведены с помощью следующей команды:

```

Print["[Mu] = ",{[Mu]}[Transpose]
//MatrixForm," S = ",s//MatrixForm];
    
```

$$\mu = \begin{pmatrix} 4.99865 \\ 6.554 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0.141418 & 0.289131 \\ 0.289131 & 12.5033 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2 – Значения характеристик выборки $points = \{[Mu]\} \sim Join \sim cohort$

Функция `ListPlot` позволяет представить точки в декартовой системе координат, дополнительно указать значения расстояния Махаланобиса для каждой точки выборки:

```

ListPlot[{cohort,Labeled[#,Round[Dm[#],
[Mu],s],.01]}&/@points},PlotRange-
->All,AspectRatio->1,PlotStyle-
->{Darker@LightBlue,{Red,PointSize[.01]}}].
    
```

Результат работы алгоритма представлен на рис.3.

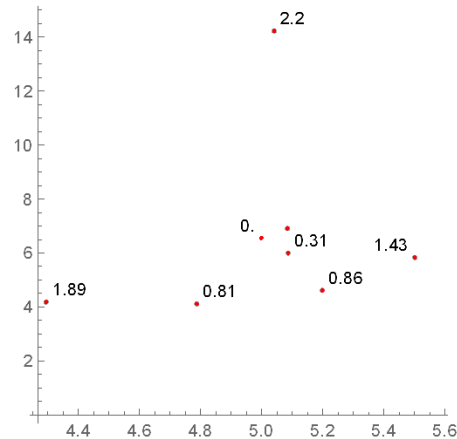


Рисунок 3 – Графическое представление исходной выборки

Анализируя полученные значения расстояний, было выявлено одно аномальное значение, величина расстояния для этого значения значительно превышает эти же расстояния для других значений выборки.

Литература

1. Лукин, В. Л. Статистический метод выявления аномальных результатов измерений характеристик технических систем / В. Л. Лукин, Б. И. Сухорученков, В. И. Кузнецов // Двойные технологии. – 2010. – № 2 (51). – С. 32–40.
2. Демяненко, Я. М. Компьютерное зрение и обработка изображений. Лекция 12. Детекторы и дескрипторы / Южнофедеральный университет, 2019 [Электронный ресурс] – Режим доступа: edu.mmsc.sfedu.ru. – Дата доступа. – 1.02.2022.

3. Гороховатский, В. А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении / В. А. Гороховатский. – Харьков: Компания СМІТ, 2014. – 316 с.

4. Жданович, М. Н. Обработка изображений. Расстояние Махаланобиса / М. Н. Жданович, М. А. Гундина //

Новые направления развития приборостроения : материалы 15-й Междунар. научн.-технич. конфер. мол. учен. и студ., Минск, 20–22 апреля 2022 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 205–206.

УДК 51

РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБОРКИ В WOLFRAM MATHEMATICA

Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Каменко Д.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье рассматривается реализация некоторых статистических алгоритмов выявления аномальных значений выборки, реализованных в компьютерной системе Wolfram Mathematica.

Ключевые слова: аномальное значение, выборка, компьютерная система Wolfram Mathematica.

IMPLEMENTATION OF STATISTICAL ALGORITHMS FOR DETERMINATION ANOMALOUS SAMPLE VALUES IN WOLFRAM MATHEMATICA

Hundzina M., Kondratyeva N., Kamenko D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article discusses the implementation of some statistical algorithms for detecting anomalous sample values, implemented in a computer system Wolfram Mathematica.

Key words: anomalous value, sample, computer system.

*Адрес для переписки: Гундина М.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: hundzina@bntu.by*

Задача автоматизации процесса выявления аномальных значений выборки решалась в инженерной практике и математической статистике и не теряет свою актуальность несколько десятилетий [1–4]. Известно, что аномальные значения способны существенно исказить функционирование математических моделей анализа данных, что может привести к снижению надежности и некорректной работе всей системы [5, 6].

Единицы статистической совокупности, у которых значения анализируемого признака существенно отклоняются от основного массива, называются аномальными явлениями, «грубыми ошибками» или выбросами. Возможны и аномальные результаты, обусловленные сбоями при измерениях и регистрации данных, резкими отклонениями условий наблюдений, нештатной работой оборудования, ошибками операторов и др. Наличие аномальных результатов может привести к недостоверным результатам при оценивании и контроле соответствия характеристик системы предъявляемым требованиям. Поэтому необходимо выявлять и устранять аномальные результаты измерений [7].

Аномальные значения определяются исходя из их характеристики по отношению ко всей совокупности. Эти значения можно разделить на три группы:

- 1) значения, отражающие объективное развитие процесса, но сильно отклоняющиеся от общей тенденции;
- 2) значения, возникающие вследствие изменения методики расчетов;
- 3) значения, возникающие из-за ошибок при измерении показателя, при записи, передаче информации и т.д.

Поэтому процесс выявления и затем удаления этих значений состоит из нескольких этапов [8]. Вначале выявляются значения, которые выходят за границы интервала возможного варьирования характеристики признака.

Исходя из физического смысла исследуемой величины, могут рассматриваться как аномальные значения те, которые не соответствуют монотонному характеру изменения величины при последовательных наблюдениях, а также значения, приращение которых превышают предельно возможную скорость изменения величины.

Одной из групп методов выявления аномальных значений является группа статистических методов [2, 4].

Реализация метода поиска аномалий с помощью правила сигм. С помощью этого метода можно осуществлять контроль за нахождением параметра в допустимых границах, что удобно в производственных процессах. Анализ выбросов в

данных позволяет определить аномальные значения в нестационарных рядах с распределением близким к нормальному закону распределения. Основу данного метода анализа составляет расчет среднего значения ряда и среднеквадратичного отклонения.

Формула для вычисления среднего значения ряда:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где n – количество элементов выборки, x_i – i -й элемент выборки.

Формула для вычисления среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2)$$

Суть данного метода сводится к тому, что любые значения ряда, отличающиеся от среднего больше, чем на два σ , являются потенциальными аномалиями. Порог определения аномалий задается формулой:

$$T = x_i \pm 2\sigma. \quad (3)$$

Алгоритм. Строим гистограмму. Из графика распределения видно, что в исходных данных присутствуют значения явно отстоящее от остальных.

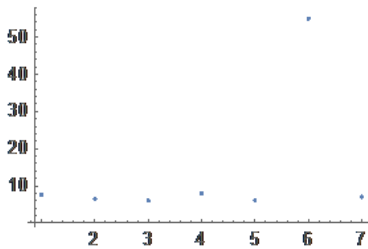


Рисунок 1 – Значения исходной выборки

Определяем пороги T_1 и T_2 следующим образом:
 $T_1 = \text{Mean}[v[[\text{All}, 2]]] - 2 \text{StandardDeviation}[v[[\text{All}, 2]]];$
 $T_2 = \text{Mean}[v[[\text{All}, 2]]] + 2 \text{StandardDeviation}[v[[\text{All}, 2]]]$

Эти значения являются порогами классификации значения как аномалии. Замети, что если аномалий оказалось много, имеет смысл увеличить порог – задать его равным $3 \times \sigma$, $4 \times \sigma$ и более.

В цикле проверяем весь массив значений на наличие аномальных и заносим эти значения в новый массив s :

```
For[s={};i=1,i<=Length[v],i++,If[Or[v[[i,2]]<=T1,v[[i,2]]>=T2],s=Append[s,v[[i]]]]
```

Кроме метода сигм простым методом обнаружения грубых ошибок считается метод, на основании T – Критерия Граббса. Критерий Граббса определен для следующих гипотез:

H_0 : В наборе данных нет выбросов.

H_1 : В наборе данных присутствует как минимум один выброс.

$$T_k = \frac{|x - \bar{x}|}{s}. \quad (4)$$

Значение критерия Граббса показывает максимальное абсолютное отклонение от выборочного среднего в единицах среднеквадратичного отклонения.

```
For[s1={};i=1,i<=Length[v],i++,If[Abs[v[[i,2]]-Mean[v[[All,2]]]]/(StandardDeviation[v[[All,2]]]/Length[v]-1)==Max[s],s1=Append[s1,v[[i]]]]
```

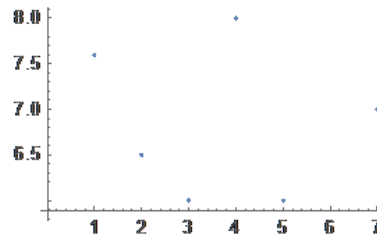


Рисунок 2 – Результат удаления значения из массива

Данный критерий можно использовать для выделения аномальных результатов измерений только в случае нормального закона.

Критерий Граббса определяет один выброс за одну итерацию. Этот выброс исключается из набора данных и тест повторяется до тех пор, пока не будут обнаружены все выбросы.

Литература

1. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия / под ред. Ю. В. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – 911 с.
2. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М.: Физматгиз, 1962. – 352 с.
3. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
4. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, Дунин-Барковский В. М. – Наука, 1965. – 552 с.
5. Богатырев, В. А. Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов / В. А. Богатырев, С. В. Богатырев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 171–177.
6. Контроль и безопасность функционирования дублированных компьютерных систем / В. А. Богатырев [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 368–372.
7. Лукин, В. Л. Статистический метод выявления аномальных результатов измерений характеристик технических систем / В. Л. Лукин, Б. И. Сухорученков, В. И. Кузнецов // Двойные технологии. – 2010. – № 2 (51). – С. 32–40.
8. Сухорученков, Б. И. Методы анализа характеристик летательных аппаратов / Б. И. Сухорученков, В. А. Меньшиков. – М.: Машиностроение, 1995. – 475 с.

УДК. 539.216; 539.22

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СИЛУМИНОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ

Гусакова О.В.¹, Шепелевич В.Г.², Гусакова С.В.²

¹Международный государственный экологический институт имени А.Д.Сахарова БГУ

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования микроструктуры силуминов, полученных высокоскоростным затвердеванием при скоростях охлаждения расплава 10^5 – 10^7 К/с. Установлено изменение механизма затвердевания при увеличении концентрации кремния от доэвтектической (5 мас.%) до эвтектической (12,6 мас.%) концентрации. Определена зависимость микротвердости силумина от концентрации кремния, легирующих металлов, и скорости охлаждения расплава при высокоскоростном затвердевании.

Ключевые слова: алюминий, кремний, эвтектика, высокоскоростное затвердевание

INFLUENCE OF SILICON CONCENTRATION ON MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF QUICKLY HARDENED SILUMINS ALLOYED WITH METALS

Gusakova O.¹, Shepelevich V.², Husakova S.²

¹International Sakharov Environmental Institute BSU

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of a study of the microstructure of silumins obtained by high-speed solidification at melt cooling rates of 10^5 – 10^7 K/s are presented. A change in the mechanism of solidification with an increase in silicon concentration from hypoeutectic (5 wt.%) to eutectic (12.6 wt.%) concentration has been established. The dependence of the microhardness of silumin on the concentration of silicon, alloying agents, and the cooling rate of the melt during high-speed solidification has been determined.

Key words: aluminum, silicon, eutectic, high speed solidification.

Адрес для переписки: Гусакова С.В., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь

e-mail: husakova@bsu.by

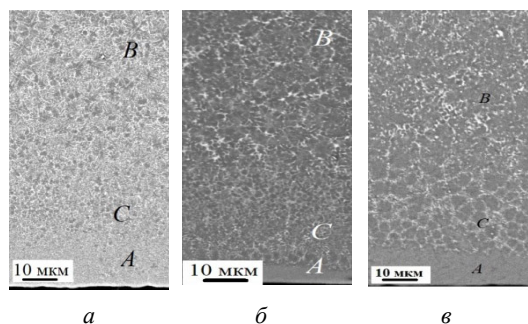
Силумины находят применение в электронной промышленности, так как обладают высокой прочностью при низкой удельной плотности, низким коэффициентом линейного расширения, паяемостью. Поскольку в силуминах Si основной легирующий элемент, то его концентрация и форма включений являются определяющими для эксплуатационных характеристик изделий. Наличие крупных пластин кремния в литых силуминах приводит к трещинообразованию при деформации. Измельчение и подавление роста пластин фазы кремния достигается увеличением скорости затвердевания при производстве фольги сплава методом сверхбыстрой закалки из расплава. Цель настоящей работы исследование влияния концентрации кремния на микроструктуру и механические свойства фольги силуминов, легированных металлами.

В этом методе сверхбыстрой закалки из расплава расплав выливался на внутреннюю поверхность вращающегося медного барабана, растекался и застывал в виде фольги. Толщина фольги находилась в пределах 40–150 мкм. В работе представлены результаты исследования микроструктуры фольги толщиной 90–100 мкм. Составы исследуемых сплавов приведены в таблице 1. Согласно равновесной диаграмме состояния системы Al-Si сплавы 1 и 2 относятся к доэвтектическим, сплав 3 близок к эвтектическому.

Таблица 1. Концентрация элементов в сплавах

Номер сплава	Концентрация, мас. %						
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Ni	Cu
1	91,0	5,1	0,5	0,3	0,9	0,4	1,8
2	84,5	10,4	0,8	0,6	0,9	0,8	1,9
3	83,1	12,4	0,8	0,4	0,7	0,9	1,8

Общий вид микроструктуры сплавов приведен на рис. 1.



а – сплав 1; б – сплав 2; в – сплав 3

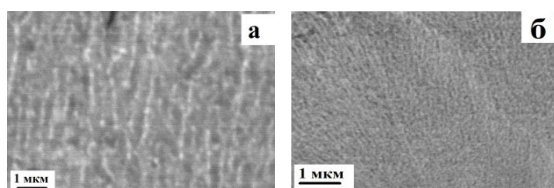
Рисунок 1 – Микроструктура фольги сплавов силумина различного состава

В поперечном сечении фольги всех исследуемых сплавов выявляется неоднородность микроструктуры, выражающаяся в наличии слоев различного строения. Такая неоднородность обнаруживается в фольге аномальных эвтектик [1]. Было

показано, что в быстрозатвердевшей фольге доэвтектического силумина, легированном металлами, концентрация элементов в слоях постоянна и соответствует концентрации в исходном сплаве [2].

Причиной слоистой микроструктуры является изменение скорости охлаждения расплава. В слое фольги, прилегающем к кристаллизатору затвердевание начинается при максимально достижимом переохлаждении расплава и коэффициенте теплопередачи. Это обеспечивает безразделительную кристаллизацию с образованием пересыщенного твердого раствора на основе Al. В решетке алюминия в процессе охлаждения выделяются наноразмерные глобулярные частицы кремния и легирующих металлов, в том числе их интерметаллические соединения. В процессе затвердевания переохлаждение расплава уменьшается из-за выделения скрытой теплоты кристаллизации, а также ухудшаются условия теплоотвода, что приводит к ячеистому механизму затвердевания, а затем к образованию первичных дендритов Al и эвтектического кремния в междендритном пространстве.

На рис. 2 приведена микроструктура ячеистого слоя и распределение элементов в ячейках для сплава 2 и 3. Практически важным результатом оказывается образование в ячеистом слое субмикронных частиц с размером не более 300 нм. С повышением концентрации кремния расстояние между ячейками уменьшается



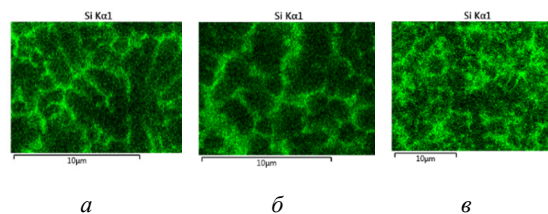
а – сплав 2; б – сплав 3

Рисунок 2 – Микроструктура в ячеистом слое фольги сплавов 2 и 3

Для всех сплавов основной объем фольги занимает слой, прилегающий к свободно затвердевающей стороне. Микроструктура слоя состоит из микронных дендритов. В зависимости от концентрации кремния изменяются соотношения объемной доли первичных дендритов α -Al и объема смеси алюминия и эвтектического кремния в междендритном пространстве. На рис. 2 приведены карты распределения Si в слое фольги, прилегающем в свободно затвердевающей стороне.

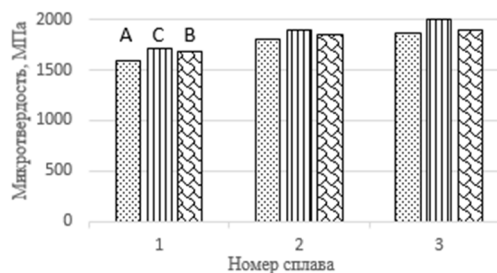
Результаты измерения микротвердости фольги исследуемых сплавов представлены на рис. 4.

Установлено, что микротвердость быстрозатвердевшей фольги в 3,5–4 раза выше микротвердости литого силумина того же состава и увеличивается с ростом концентрации кремния. Легирование металлами приводит к повышению микротвердости на 100 % по сравнению с нелегированной фольгой.



а – сплав 1, б – сплав 2, в – сплав 3

Рисунок 3 – Карта распределения кремния в слое фольги, прилегающем к кристаллизатору.



А – нижний слой фольги; С – средний слой; В – слой у свободно затвердевающей поверхности

Рисунок 4 – Микротвердость сплавов 1, 2 и 3

В результате проведенных исследований установлено, что в доэвтектических и эвтектическом силумине, легированном металлами, реализуется сходный механизм формирования неоднородной по толщине микроструктуры. Неоднородность микроструктуры обусловлена изменением термодинамических условий затвердевания. Дисперсность микроструктуры фольги и легирование металлами обеспечивает высокую микротвердость сплавов.

Литература

- Zuo, M. Effect of rapid solidification on the microstructure and refining performance of an Al-Si-P master alloy / M. Zuo, X. F. Liua, Q. Q. Sun // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – V. 209. – P. 5504–5508.
- Гусакова, О. В. / Влияние скорости охлаждения расплава на микроструктуру сплава Al-Si, легированного Mg, Mn, Fe, Ni и Cu / О. В. Гусакова, С. В. Гусакова, В. Г. Шепелевич // Физика металлов и металлургия. – 2022. – Т. 123. – № 5. – С. 533–540.

УДК 535-34, 539.1.06

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ SI – ФЭУ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Ермакович О.Л.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Экспериментальная проверка возможности применения кремниевых фотоумножителей в качестве детекторов рассеянного рентгеновского излучения в датчиках системы контроля поверхностной плотности листовых материалов.

Ключевые слова: контроль качества, листовой материал, рентгеновское излучение, Si-фэу.

THE POSSIBILITY USING SI - PM FOR DETEKTING DIFFUSED X-RAY RADIATION IN SYSTEM OF THE CHECKING SURRFACE DENSITY OF THE SHEET MATERIAL.

Yermakovich O.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Experimental checking the possibility of the using the silicon photomultipliers as detector diffused x-ray radiation in sensor of the system of the checking to surrface density sheet material.

Key words: checking quality, sheet material, x-ray radiation, Si-pm.

*Адрес для переписки: Ермакович О.Л., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ermakovichol@tut.by*

Посредством регистрации рассеянного рентгеновского излучения возможно проводить измерение поверхностной плотности листовых материалов разного элементного состава [1]. Данная возможность основана на том факте, что, процесс некогерентного рассеяния рентгеновских фотонов происходит на электронах атома вещества. В следствии чего интенсивность некогерентного рассеяния в первом приближении пропорциональна массе рассеивающего материала.

Требуемая точность измерений для применяемых датчиков в системах контроля качества ~ 0,1 %. При времени измерения 1 секунда. Следовательно, детектор должен регистрировать поток порядка 10^6 частиц в секунду. Типичное расстояние в датчиках системы контроля бумажного полотна рассеивающий материал – детектор порядка одного сантиметра. В случае суммарной площади детектора около 1 см^2 обеспечивается сбор примерно 1/10 количества рассеиваемых частиц. При этом угол регистрации рассеянного излучения будет близок к оптимальному – рассеяние в обратном направлении.

Следовательно желательное применение детектора обеспечивающего регистрацию 10^6 частиц на см^2 в секунду.

Подходящим устройством для детектирования в данном случае является сборка сцинтиллятор + кремниевый фотоумножитель. Быстродействие кремниевых фотоумножителей достигает несколько десятков пикосекунд [2, 3]. От воздействия ионизирующего излучения кремниевый фотоумножитель защищен слоем сцинтиллятора. Основную дозовую нагрузку получит сцинтиллятор.

Например для рентгеновского излучения с энергией 30 кэВ за год работы поглощенная доза составит около 100 Гр. Поток ионизирующего излучения, в случае применения сцинтиллятора CzI(Tl) толщиной 2 мм, на поверхности Si-фэу будет меньше в 3000 раз.

Одним из недостатков кремниевых фотоумножителей является сильная зависимость пробивного напряжения от температуры, что приводит к влиянию температуры на амплитуду регистрируемых импульсов. В случае регистрации излучения посредством пересчета возникающих импульсов зависимость от температуры может быть существенно снижена, особенно в случае если регистрируемое излучение имеет четкую нижнюю границу.

Для отделения жесткой части генерируемого рентгеновского излучения применяется фильтрация посредством фильтров из алюминия. Отделять жесткую часть излучения необходимо для работы в нужном диапазоне энергии фотонов, то есть в диапазоне где основным фактором является некогерентное рассеяние [1].

На рис. 1 приведен рассчитанный спектр излучения рентгеновской трубки с напряжением на аноде 28 кВ после алюминиевого фильтра толщиной 1 мм. (без учета характеристического излучения анода).

Экспериментальная проверка работы системы регистрации рассеянного излучения проведена с использованием сборки CzI(Tl)+Si-фэу. Применялся кремниевый фотоумножитель S14160- 9681 НАМАМАТСУ. Светочувствительная площадь 6×6 мм. Пробивное напряжение 38 В. Темпера-

турный коэффициент 34 мВ на 1° С. Размер сцинтиллятора 6×6×2 мм. Светоотражающее покрытие алюминиевая фольга толщиной 12 мк.

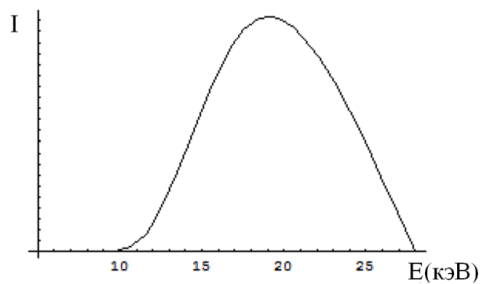


Рисунок 1 – Расчитанный спектр рентгеновской трубки с напряжением на аноде 28 кВ после фильтра 1 мм Al

Источником излучения являлась рентгеновская трубка БСВ-17. Параметры напряжения и тока рентгеновской трубки $U = 28$ кВ, $I = 100$ мкА. Рассеянное излучение проходило через алюминиевый фильтр толщиной 1 мм.

Выходной сигнал снимался с резистора 1 кОм подключенного к катоду Si-фэу усиливался в 200 раз операционным усилителем. Затем после формирования на RC цепочке поступал на многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024.

В качестве рассеивающего материала использовались листы картона с поверхностной плотностью 100 г/м². На рис. 2 приведен типичный спектр рассеянного излучения.

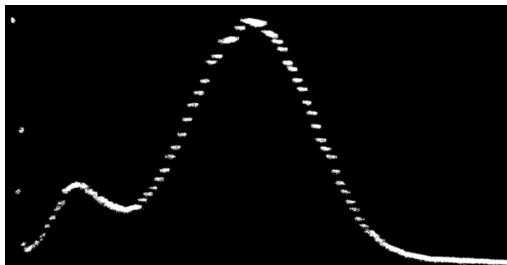


Рисунок 2 – Амплитудный спектр импульсов рассеянного рентгеновского излучения с экрана АИ-1024

Спектры снимались при двух разных напряжениях смещения: $U_{пр} + 2,1$ В, $U_{пр} + 3,1$ В. Что равносильно работе при постоянном смещении, но при разной в 30°С температуре. Затем производилось суммирование по всем каналам выше порога шумов Si-фэу. Порог выше которого производилось суммирование выбирался так, чтобы был выше собственных шумов Si-фэу при максимальном смещении.

Результат проделанных измерений. При изменении напряжения смещения на 1 В максимальная амплитуда регистрируемых импульсов увеличилась ~ в два раза. Суммарное количество регистрируемых импульсов выше постоянного порога изменилось на 2 %.

Заключение. Таким образом, при температурной стабилизации Si-фэу около 1° С возможно проводить регистрацию суммарных рассеянных рентгеновских фотонов с точность выше 0,1 %. Следовательно, с аналогичной точностью возможно измерение поверхностной плотности листового материала посредством сборки сцинтиллятор+ Si-фэу.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» подпрограммы «Техническая диагностика».

Литература

1. Василевич, Л. Н. Методика определения массы и зольности бумажного полотна посредством рассеянного и транзитного рентгеновского излучения. / Л. Н. Василевич, О. Л. Ермакович, Г. А. Лисовский / Приборостроение–2021: материалы 14 Международной науч.–техн. конф., 17–19 ноября 2021 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / Минск: БНТУ, 2021 – С. 276–277.
2. Дворников, О. В. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности / О. В. Дворников, В. А. Чеховский, В. Л. Дятлов / Приборы и методы измерений. – 2012. – Т. 5, № 2.
3. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин [и др.] // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2007. – № 8. – С. 80–86.

УДК 535-34, 539.1.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ И ЗОЛЬНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО И ПРОХОДЯЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ермакович О.Л.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Приводятся экспериментальные данные по обоснованию методики определения поверхностной плотности и зольности бумаги, картона и других листовых материалов, которая основывается на измерении интенсивности рассеянного и проходящего рентгеновского излучения.

Ключевые слова: контроль качества бумаги, рентгеновское излучение.

DETERMINATION OF THE AREAL WEIGHT AND ASH CONTENT OF PAPER SHEET USING THE INTENSITY MEASUREMENTS OF SCATTERED AND TRANSMITTED X-RAY RADIATION

Yermakovich O.

*The Research institution "Institute of Applied Physical Problems named by A. N. Sevchenko"
of Belarusian state university.
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The experimental data are presented in order to substantiate a technique for determining the areal weight and ash content of paper, cardboard and other sheet materials. This technique is based on the measurement of intensity of scattered and transmitted X-ray radiation.

Key words: testing of paper materials, X-ray radiation.

*Адрес для переписки: Ермакович О.Л., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ermakovichol@tut.by*

Приборы, измеряющие поверхностную плотность, являются необходимым элементом систем контроля качества при производстве бумаги, картона и других листовых материалов [1]. Обычно для этой цели используется β -излучение изотопов, по степени ослабления которого оценивается масса просвечиваемого материала. Однако возможно использование для этой цели не изотопных источников, а рентгеновского излучения [2]. Некогерентное рассеяние такого излучения происходит на электронах атомов и оказывается пропорциональным отношению атомного номера к атомному весу, что позволяет применять данное явление для измерения поверхностной массы различных листовых материалов. Диапазон энергии фотонов, при котором в основном происходит некогерентное рассеяние – от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ. Применение рентгеновского излучения в более низком диапазоне облегчает устройство защиты и несет меньшую опасность для персонала. Однако в низком диапазоне рентгеновского излучения существенную роль начинают играть фотоэффект и когерентное рассеяние.

В работе [2] проводилась оценка возможных диапазонов энергии рентгеновского излучения для получения точности измерения выше 1 % поверхностной плотности бумаги с различным минеральным наполнением. Оценка проводилась на основе имеющихся данных по коэффициентам взаимодействия и коэффициентам поглощения рентгеновского излучения для различных веществ [3].

В данной работе приведены результаты экспериментальной проверки возможности проведения

измерений поверхностной плотности и одновременно зольности реальных типов бумаг с точностью выше одного процента посредством измерения рассеянного и прошедшего рентгеновского излучения с помощью рентгеновского аппарата с напряжением на трубке ниже 30 кэВ.

Источником излучения являлась рентгеновская трубка БСВ-17. Для регистрации рассеянного излучения проводились измерения посредством дозиметра ДКР – АТ1103М в счетном режиме, детектором излучения в котором является ФЭУ со сцинтиллятором NaJ(Tl). Для регистрации транзитного излучения измерения проводились с помощью ионизационной камеры с бериллиевым окном LND 52016.

В качестве образцов использовались листы писчей бумаги с поверхностной плотностью 80 г/м² с процентным содержанием мела 26 %, а также листы бумаги для гофрирования с поверхностной плотностью 100 г/м² с зольностью 6 %. Для получения характеристики зависимости рассеянного и прошедшего излучения от величины поверхностной плотности листы бумаги складывались. Измерения проводились по несколько раз в различных точках образца (для устранения влияния неоднородностей), затем данные усреднялись. Параметры напряжения и тока рентгеновской трубки $U = 28$ кВ, $I = 120$ мкА. Проходящее излучение не фильтровалось, но ограничивалось отверстием диаметром 1 мм в свинцовой пластине толщиной 2 мм для избегания выхода ионизационной камеры из линейного режима. Схема установки приведена на рис. 1.

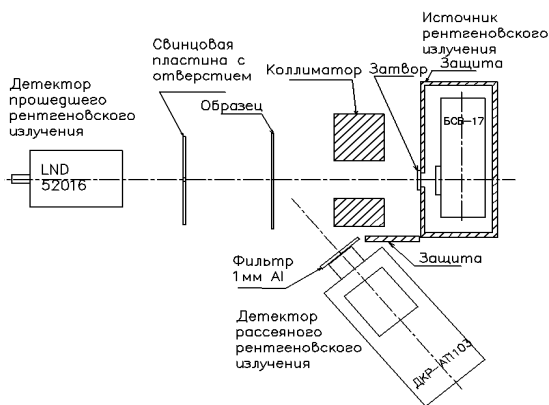


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

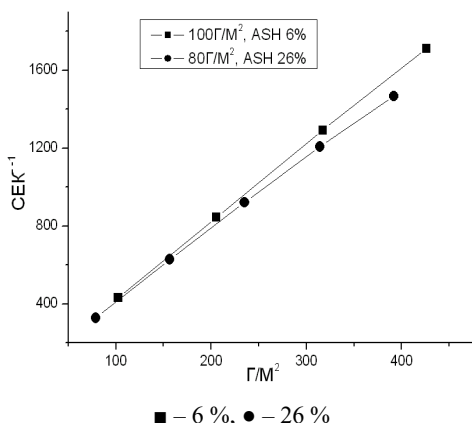


Рисунок 2 – Зависимость скорости счета (импульсы в секунду) рассеянных рентгеновских фотонов от величины поверхностной плотности для бумаг с различной зольностью по мелу

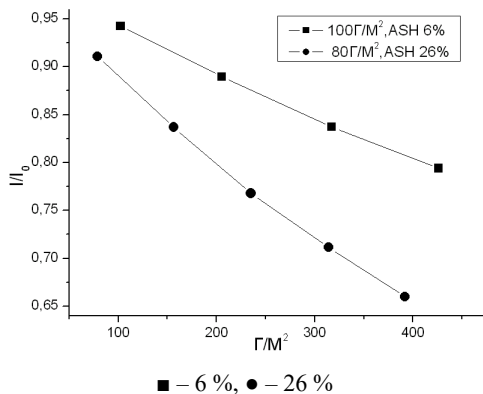


Рисунок 3 – Зависимость ослабления потока прошедшего рентгеновского излучения от величины поверхностной плотности для бумаг с различной зольностью по мелу

Рассеянное излучение проходило через алюминевый фильтр толщиной 1 мм. Дозиметр осуществлял измерения в диапазоне энергий от 20 кэВ. Полученные результаты по ослаблению интенсивности рассеянного излучения приведены на рис. 2, проходящего излучения на рис. 3.

Алгоритм вычисления поверхностной плотности с одновременным вычислением зольности следующий. По эталонным образцам методом наименьших квадратов строятся две функции:

$$M = \varphi_1(N, Z) \quad (1)$$

$$M = \varphi_2(I/I_0, Z) \quad (2)$$

где M – поверхностная плотность; N – скорость счета рассеянных рентгеновских квантов; I – интенсивность прошедшего излучения; I_0 – интенсивность не ослабленного излучения; Z – зольность. В процессе измерения определялись значения величин N и I . Подставляя эти значения в уравнения (1) и (2) для φ_1 и φ_2 , получим уравнение для зольности Z :

$$\varphi_1(N, Z) = \varphi_2(I/I_0, Z) \quad (3)$$

Определив отсюда Z из (1) или (2), можно вычислить массу M единицу площади материала.

Заключение. Таким образом, можно производить измерение поверхностной плотности бумаги и картона с помощью рентгеновского излучения с точностью выше процента, используя в качестве источника рентгеновскую трубку с напряжением на аноде меньше 30 кэВ.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» подпрограммы «Техническая диагностика».

Литература

1. Machine Quality Control Systems. / K. Figel [et al.] // Technical Association of the Pulp & Paper: Measurement Systems and Product Variability – 2010. – Vol. 1. – 120 p.
2. Василевич, Л. Н. Методика определения массы и зольности бумажного полотна посредством рассеянного и транзитного рентгеновского излучения. / Л. Н. Василевич, О. Л. Ермакович, Г. А. Лисовский / Приборостроение–2021: материалы 14 Международной науч.–техн. конф., 17–19 ноября 2021 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / Минск: БНТУ, 2021 – С. 276–277.
3. NIST: Standard reference database 126 (Last Update: July 2004) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCof/f/tab3.html>.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВЛИЯНИЯ РАССЕЙЯНИЯ НА ФОНОНАХ И ИОНАХ ПРИМЕСИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О.Г.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На основе метода Монте-Карло проведено моделирование электронного переноса в элементах флеш-памяти на основе МОП-транзисторов с плавающим затвором с учетом и без учета рассеяния на фононах и ионах примеси. Полученные результаты показывают, что в этих структурах на подвижность электронов наиболее существенное влияние оказывают фононные механизмы рассеяния.

Ключевые слова: элемент флеш-памяти, МОП-транзистор с плавающим затвором, подвижность электронов, метод Монте-Карло.

MONTE CARLO SIMULATION OF EFFECT OF PHONON'S AND ION'S SCATTERINGS ON ELECTRON MOBILITY IN FLASH MEMORY ELEMENTS

Zhevnyak O.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Electron transport in silicon flash memory elements based on MOSFETs with floating gate is simulated by Monte Carlo method with including of phonon's and ion's scatterings and without it. Obtained results show to the phonon scattering mechanisms produce the most significant effect on electron mobility in simulated structures.

Key words: flash memory cell, MOS-transistor with floating gate, electron mobility, Monte Carlo simulation.

Адрес для переписки: Жевняк О. Г., ул. Коржа, 1, 39, Минск 220036, Республика Беларусь
e-mail: zhevnyakog@mail.ru

Введение. Надежная работа современных элементов флеш-памяти, созданных на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов с плавающим затвором, во многом обусловлена деградацией подвижности электронов в режиме считывания информации [1, 2]. Эта деградация вызывается разогревом электронов при их дрейфе в проводящем канале МОП-транзисторов и определяется механизмами рассеяния электронов.

Цель настоящей работы заключалась в моделировании влияния рассеяний электронов на фононах и ионах примеси на подвижность электронов в проводящем канале элементов флеш-памяти в режиме считывания информации.

Приборная структура. На рис. 1 приведена структурная схема моделируемого транзистора.

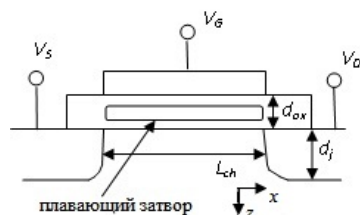


Рисунок 1 – Структурная схема моделируемого элемента флеш-памяти на основе МОП-транзистора с плавающим затвором

Рассматривался прибор со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0,2$ мкм, толщина подзатворного окисла $d_{ox} = 6$ нм, толщина туннельного окисла $d_{tun} = 2$ нм, толщина плавающего затвора

$d_{float} = 2$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$, концентрация акцепторной примеси в подложке $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, глубина залегания истоковой и стоковой областей в подложку $d_j = 100$ нм. Значения напряжения на затворе V_G и на стоке V_D равнялись 2 В (стандартные значения для режима считывания информации).

Используемая модель. Влияние рассеяния на фононах и ионах примеси в рассматриваемых элементах флеш-памяти изучалось с помощью численного моделирования электронного переноса в них методом Монте-Карло. Алгоритмы и самосогласованные процедуры данного моделирования аналогичны тем, что приведены в наших работах [3, 4].

В результате моделирования рассчитывались средние значения электронной концентрации N_e , энергии E_{av} и подвижности μ в зависимости от координат вдоль проводящего канала (по x) и в глубину подложки (по z). Процедура самосогласования заключалась в том, что значения $N_e(x, z)$ на каждом ее этапе использовались для решения уравнения Пуассона и расчета напряженностей электрического поля в различных участках проводящего канала, а также для вычисления интенсивности рассеяния на ионах примеси. Учитывались рассеяния на низкотемпературных акустических фононах, на высокоэнергетических фононах, приводящих к междолинным переходам, а также участвующих в актах ударной ионизации и на ионах примеси.

Интенсивности соответствующих механизмов рассеяния рассчитывались с помощью следующих соотношений.

На акустическом фоне:

$$W_{ac} = \frac{D_{ac}^2 \sqrt{m^* k_B T}}{\pi \hbar^4 u_l^2 \rho} \sqrt{E(1 + \alpha E)(1 + 2\alpha E)}, \quad (1)$$

где $D_{ac} = 2 \cdot 10^{-18}$ – деформационный потенциал при рассеянии на акустических фонах; m^* – эффективная масса электронов для соответствующей долины; $u_l = 6000$ м/с – продольная скорость звука в кремнии; $\rho = 2650$ кг/м³ – плотность кремния; $\alpha = 3,1 \cdot 10^{18}$ – коэффициент непараболичности.

На междолинном фоне:

$$W_{ij} = \frac{D_{ij}^2 \sqrt{m^* k_B T} Z_{ij} (N_{ij})}{\sqrt{2\pi \rho \hbar^3 \omega_{ij}} (N_{ij} + 1)} \sqrt{E \pm \hbar \omega_{ij} - \Delta E_{ij}} \times \\ \times (1 + 2\alpha(E \pm \hbar \omega_{ij} - \Delta E_{ij})), \quad (2)$$

где $D_{ij} = 10^{-8}$, Z_{ij} – число конечных долин при переходе; ω_{ij} и N_{ij} – частота и Бозе-Эйнштейна число фононов, приводящих к переходу; ΔE_{ij} – энергетический зазор между минимумами энергии рассматриваемых долин (переходы между одноосными долинами в кремнии $Z_{ij}=1$, $\Delta E_{ij}=0$, $T_{ij}=537$ К и между неодносными долинами $Z_{ij}=4$, $\Delta E_{ij}=0$, $T_{ij}=686$ К и $T_{ij}=733$ К).

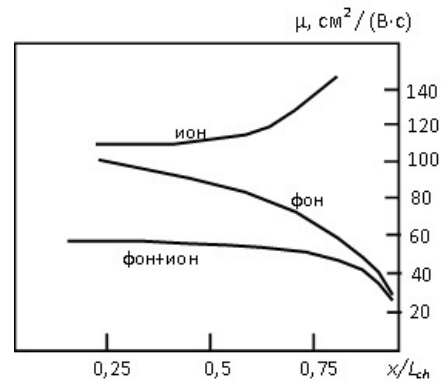
На ионах примеси:

$$[W_I]_t = \frac{N_A^t \sqrt{2} e^4}{(\epsilon_0 \epsilon_{si})^2 4\pi \sqrt{m^*} B_t^2} \frac{\sqrt{E_\alpha(1+2\alpha E)}}{1+4\left(\frac{E_\alpha}{B_t}\right)}. \quad (3)$$

Здесь N_A^t – значение концентрации акцепторной примеси для t -го участка канала, $E_\alpha = E(1 + \alpha E)$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, $\epsilon_{si} = 12$, $L_D^t = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} \epsilon_0 E_{av}^t}{N_e^t e^2}}$ – длина экранирования Дебая для электронов с характерными значениями электронной концентрации N_e^t и средней энергии электронов E_{av}^t , $B_t = \hbar^2 / (2(L_D^t)^2 m^*)$, $E_b^t = \sqrt[3]{0,75 / \pi N_A^t}$.

Результаты моделирования и их обсуждение. На рис. 2 приведены полученные зависимости средних значений подвижности электронов вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти с учетом всех рассматриваемых механизмов рассеяния и отдельно с учетом

только фононных механизмов или на ионах примеси.



Фон+ион – учитываются оба механизма рассеяния, фон – учет только фононного рассеяния, ион – учет только рассеяния на ионах примеси

Рисунок 2 – Зависимости вдоль проводящего канала средней подвижности электронов

Как можно видеть, фононные механизмы рассеяния оказывают основное влияние на величину подвижности электронов, а на участке проводящего канала вблизи стока это влияние следует признать подавляющим.

Заключение. Таким образом, результаты моделирования показывают, что в современных элементах флеш-памяти деградация подвижности электронов обусловлена их рассеянием на фонах.

Литература

1. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. – 256 p
2. Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm: Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna [et al.] // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, № 6. – P.941–951.
3. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]. – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование влияния глубины залегания стока на паразитные туннельные токи в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В. Борздов // Евразийский Союз ученых. Серия: техн. и физ.-мат. науки. 2021. – Том. 1, № 12. – С. 58–61.

УДК 621.38

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОБРАЗЦА АВТОМОБИЛЬНОГО РАДАРА
Журавлёв В.И., Наумович Н.М., Корневский С.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Тепловые режимы работы автомобильных радаров играют важную роль в обеспечении их надежности и функциональности. В работе рассматривается использование численной тепловой модели радара при проектировании конструкции и ее дальнейшей оптимизации.

Ключевые слова: автомобильный радар, тепловое моделирование, электронные компоненты, температура.

MODELING OF THE THERMAL REGIME OF THE CAR RADAR PROTOTYPE
Zhuravliov V., Naumovich N., Korenevsky S.

Belarus State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Thermal behaviour of automotive radars plays an important role in providing their reliability and functionality. The paper considers the use of a numerical radar thermal model in the design and its further optimization.

Key words: automotive radar, thermal modelling, electronic components, temperature.

Адрес для переписки: Журавлёв В.И., ул. П. Бровки, 6, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: vadzh@bsuir.by

Современные радары для автомобиля широко используются в системах оказания помощи водителю для предотвращения столкновений, обнаружения препятствий в условиях ограниченной видимости, измерения расстояний и скорости транспортных средств. Производители стараются использовать более компактные печатные модули радаров, чтобы снизить общую себестоимость и улучшить масс-габаритные характеристики всего прибора [1]. Активно используется гибридная технология «антенна в плате» в качестве основного варианта интеграции антенны и приемопередатчика для автомобильных радаров [2]. Наряду с уменьшением размеров электронных компонентов, их рассеиваемая мощность не уменьшается в том числе и из-за увеличения функциональности. Управление тепловым режимом и терморегулирование являются одними из важных составляющих концепции обеспечения надежности автомобильных приборов. Для определения оптимальных конструктивных параметров и улучшения характеристик в данной работе используется численная тепловая модель и дальнейшее макетирование прототипа автомобильного радара.

Модель. В проектируемом образце рассмотрены два печатных модуля: плата обработки сигнала (цифровая плата) и приемопередающий модуль (плата СВЧ). В обоих модулях имеются источники повышенной рассеиваемой мощности, которая ведет к увеличению температуры как самих электронных компонентов, так и к неравномерному распределению температуры вдоль плат. В дальнейшем действие этих факторов может привести к нарушению работоспособности всего образца. Поэтому на данном этапе проводится оценочное тепловое моделирование конструкции,

чтобы предусмотреть возможные схемы отвода избыточной тепловой мощности.

Анализ элементной базы, электрической схемы и режимов работы макета на начальном этапе позволили определить основные источники повышенной рассеиваемой мощности: микросхема интегрированного однокристалльного FMCW приемопередатчика на СВЧ плате и микросхема процессора на цифровой плате. Работоспособность печатных модулей макета определяется в основном тепловым режимом подобных микросхем.

Наиболее информативным параметром оценки нагрева электронного компонента является температура его самой нагретой части – температура перехода T_j . Для этого используются различные методы расчета в зависимости от режимов нагрева, условий эксплуатации и получаемой точности [3]. На данном этапе использованы хорошо зарекомендовавшие себя двухрезисторные модели тепловых сопротивлений, так как рассматривается только стационарный тепловой поток. Оценить температуру перехода (самой нагретой зоны кристалла) каждой из микросхем можно из функциональных уравнений, связывающих температуру окружающей среды, тепловое сопротивление «переход – окружающая среда» $R_{\theta JA}$, тепловое сопротивление «переход – печатная плата» (основание) $R_{\theta JB}$. При проектировании платы с различным количеством слоев и процентным содержанием меди эти значения должны быть интерполированы для оценки температуры перехода.

Значения тепловых сопротивлений для микросхем указываются производителем на основе расчетных и экспериментальных данных. Рассмотрим использование теплофизических характеристик на примере корпусов подходящих

микросхем в соответствии со стандартом JEDEC серии JESD5 (табл. 1).

Таблица 1. Тепловые характеристики микросхем

	Параметр, °C/Вт	FCBGA (AWR2243)	257MAPBGA (S32R274)
1.	$R_{\theta JC}$	5	5,2
2.	$R_{\theta JB}$	5,9	7,6
3.	$R_{\theta JA}$	21,6	22,3
4.	P_{siJC}	0,69	0,2
5.	P_{siJB}	5,8	–

Тепловые динамические характеристики семейства P_{si} на текущем этапе моделирования не использовались, но в дальнейшем могут быть полезны для уточнения тепловой модели при экспериментальном исследовании. Проведено упрощение первоначальной модели с целью уменьшения количества конечных элементов за счет удаления мелких твердотельных элементов, не оказывающих значительно вклада в общий процесс теплопереноса.

Результаты. Моделирование теплового режима макета в сборе выполнялось с применением численных методов с открытыми граничными условиями второго рода для нормальных условий эксплуатации, но при температуре окружающей среды (воздух) 35 °C. Однотипные материалы заменялись аналогичными, но с отличающимися нетепловыми свойствами во избежание пропуска границ тепловых сопротивлений при однородной сетке. Общее количество сгенерированных ячеек конформной сетки – 437732, из них для газа 241434, для твердотельных компонентов 196298.

Модель показала хорошую сходимость, получены значения для температур рассматриваемых микросхем. Температуры переходов в данных условиях имеют запас по температуре разогрева: для приемопередатчика – 111,47 °C (при допустимой $T_j \max = 140$ °C), процессора – 88 °C ($T_j \max = 150$ °C). Однако имеются риски перегрева при значительном повышении температуры среды.

Наиболее важны результаты моделирования для платы СВЧ, так как возникновение больших перепадов температуры в ней наиболее критично. Результаты моделирования ее теплового профиля в составе корпуса приведен на рис. 1.

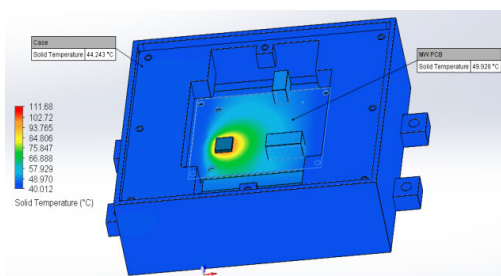


Рисунок 1 – Тепловые профили платы СВЧ (внешние крышки корпуса не показаны)

Распределение температуры вдоль теплоотводящего слоя металлизации платы СВЧ указывает на возникновение градиента температуры, так как в данной области создается локальный тепловой поток (рис. 2). Это следует учитывать в дальнейшем при проектировании теплоотвода.

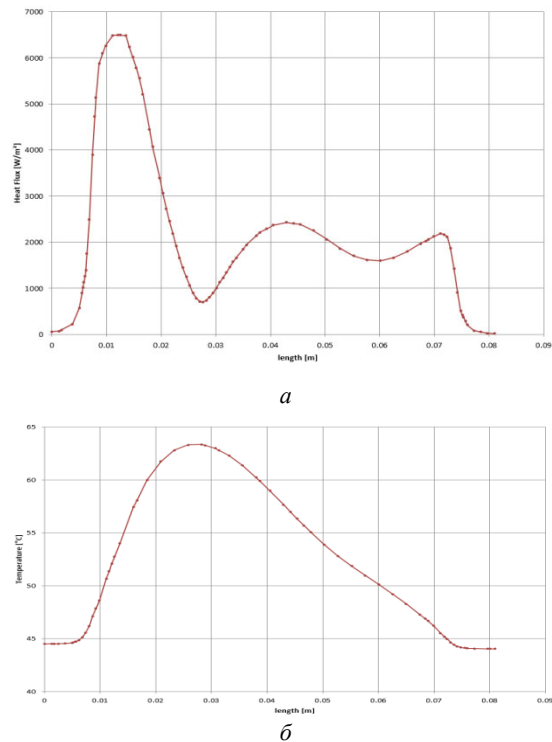


Рисунок 2 – Распределение теплового потока (а) и соответствующие градиенты температуры (б)

Заключение. Таким образом, результаты моделирования показывают на применимость используемого корпуса, компоновки и топологии печатных модулей для обеспечения нормального теплового режима проектируемого образца. Однако при более высоких температурах окружающей среды или необходимости увеличения токовой нагрузки на электронные компоненты потребуются использование дополнительных средств охлаждения с учетом оптимизационной тепловой модели.

Литература

1. Saponara, S. Radar-on-Chip/in-Package in Autonomous Driving Vehicles and Intelligent Transport Systems: Opportunities and Challenges / S. Saponara, M. S. Greco and F. Gini // IEEE Signal Processing Magazine. – 2019. – Vol. 36, no. 5. – P. 71–84.
2. Han, Y. AiP Component and Board Level Heat Dissipation Analysis for Automotive Radar / Y. Han, T. C. Chai and S. S. H. Lim // 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – 2021. – P. 1850–1857.
3. Evely, V. Prediction of electronic component-board transient conjugate heat transfer / V. Evely, P. Rodgers // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2005. – Vol. 28, № 4. – P.817–829.

УДК-617-7

ЮВЕЛИРНАЯ ПРОДУКЦИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ГРАФИКЕ

Запольская К.В., Коляда Е.А., Монич С.Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы создания моделей ювелирных изделий с помощью программ для 3D моделирования. На примере разработки модели кольца с логотипом авторы анализируют доступность программ ZBrush, Matrix для начинающих пользователей.

Ключевые слова: ювелирные украшения, модель, 3D программа, ZBrush, Matrix.

3D JEWELERY

Zapolskaya K., Kolyada E., Monich S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article deals with topical issues of creating jewelry models using 3D modeling programs. The authors analyze the opportunities of ZBrush, Matrix for novice users, using the example of developing a ring model with a logo.

Keywords: Jewelry, Model, 3D program, ZBrush, Matrix.

Адресс для переписки: Монич С.Г., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by

Сейчас существует множество различных видов ювелирных украшений: кольца, серьги, браслеты, цепочки, тиары и т.д. Они стали не просто дополнением к образу человека, но красноречивой характеристикой его статуса, уровня доходов, вкуса.

Все ювелирные украшения создаются из различных материалов. Самыми дорогими и классическими украшениями считаются изготовленные из благородных металлов, с использованием драгоценных камней, а самыми оригинальными и модными – созданные из компакт-дисков, видеокассет, пластмассы и других альтернативных материалов [1].

Дизайнер может заранее понимать, из какого материала он хочет создать украшение, но в некоторых случаях выбор материала осуществляется после разработки эскиза, который должен быть визуализирован и перенесен в 3D-программу. Это необходимо для создания объемной модели в цифровом пространстве и последующей 3D-печати модели.

На современном этапе развития разработано большое количество программ для 3D-моделирования, но не все из них подходят для создания украшений. Из-за особенностей интерфейса и программного обеспечения, каждое приложение имеет свои особенности и не всегда может быть универсально в использовании.

Именно поэтому в ряде программ имеются свои отличные характеристики, с помощью которых возможный пользователь может определиться с выбором необходимой лично ему программы. Один из самых главных факторов, влияющий на выбор программы – спектр ее возможностей.

Одними из самых популярных программных сред для создания компьютерных моделей ювелирных изделий являются:

- Matrix;
- ZBrush & Sculpttris;
- Blender;
- Rhinoceros;
- Tinkercad.

Программная среда Matrix создана как специальный плагин Rhinoceros для ускоренного и упрощенного создания 3D-моделей ювелирных украшений, а также их высокореалистичной визуализации – рендеринга. Matrix – это мощная 3D-составляющая из трех компонентов: Rhinoceros – базовой программы для трехмерного моделирования, V-Ray – узла фотореалистичной визуализации трехмерных объектов и, собственно, Matrix – модуля, включающего в себя все необходимые компоненты и библиотеки ювелирных инструментов, материалов для моделинга украшений, расстановки драгоценных камней и ювелирных вставок всех известных типов огранок и форм [3]. Компьютерное проектирование ювелирных украшений в Matrix – интерактивный и увлекательный процесс, который меняется и зависит только от воображения и мастерства пользователя.

На рабочей зоне 1 создаются модели изделий, которые редактируются с помощью панели инструментов 2, также есть строка для команд 3, которая помогает создать модель без использования панели инструментов.

Программная среда ZBrush от компании Pixologic – это мощный профессиональный инструмент для создания и редактирования трехмерной графики. Для того, чтобы лучше подгото-

вить новичков к работе в приложении, мы подготовили обзор программной среды ZBrush. В первую очередь программа направлена на работу с так называемой «цифровой глиной», из которой можно буквально вылепливать объекты при помощи разнообразных инструментов. Аналогов такому подходу в других пакетах для 3D-моделирования практически нет, хотя некоторые приложения предлагают специальные инструменты для скульптинга [2].

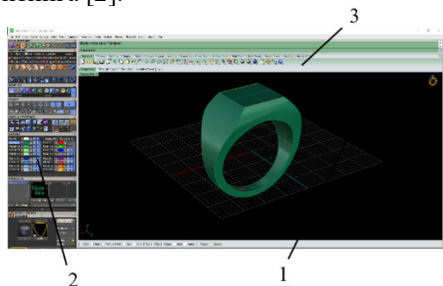


Рисунок 1 – Интерфейс программной среды Matrix с указанием его рабочих панелей и зон

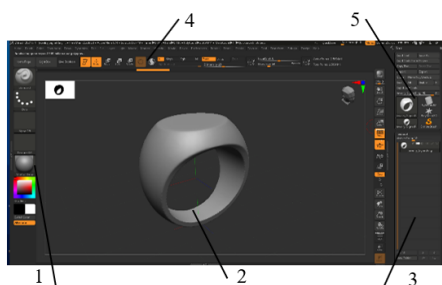


Рисунок 2 – Интерфейс программной среды Zbrush с указанием его рабочих панелей и зон.

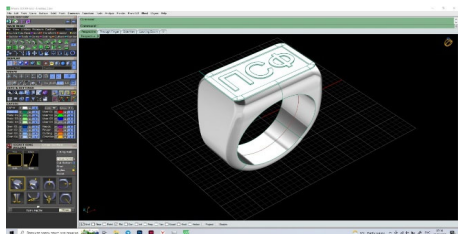


Рисунок 3 – Кольцо, созданное в программной среде Matrix

На рис. 2 показано рабочее пространство, которое состоит из пяти основных окон: 1 – панель инструментов, 2 – рабочая зона, 3 – окно материалов, 4 – строка команд, 5 – каталог моделей.

Для пользователей, желающих работать с 3D-моделями, Matrix имеет ряд преимуществ по сравнению с другими программами. К достоинствам данного приложения можно отнести большую библиотеку с готовыми заготовками и ювелирными камнями с уже готовой огранкой, очень удобный интерфейс для начинающих и продвинутых пользователей (все функции и действия можно найти в одном месте), возможность писать команды в отдельном окне.

В ходе изучения программы было создано кольцо с печаткой «ПСФ», оно представлено на рис. 3.

При создании кольца возникли проблемы с созданием надписи «ПСФ», что было связано с недостатком знаний функциональной части программы и сложным интерфейсом для новичка. Перед пользователем, который впервые использует эту программу, может возникнуть ряд трудностей: сложный интерфейс, написанный на английском языке, много новых команд и терминов, функционал которых пока еще непонятен.

Время, затраченное на то, чтобы сделать кольцо по эскизу, заняло около 10 минут. Но для понимания интерфейса и нахождения нужных функций ушло около 1 часа.

ZBrush – достаточно доступная программная среда для освоения, так как есть много обучающих уроков в интернете на русском языке.

Нет необходимости в глубоких познаниях по функциям программы, чтобы на начальном этапе сделать любое, не слишком замысловатое изделие, потому что многие команды понятны интуитивно, либо просты в использовании и результат от их применения заметен сразу на модели.



Рисунок 4 – Печатка, созданная в программной среде Zbrush

Разработка кольца в программной среде Zbrush была облегчена тем, что в самой программе есть библиотека с готовыми заготовками. Создание надписи не вызвало трудностей, поэтому на изготовление модели кольца ушло около 8 минут.

Сравнивая полученные 3D-модели, можно заметить, что в Matrix кольцо получилась более геометрически правильным и с четкими контурами, так как оно было создано при помощи мастер модели из встроенной библиотеки, с изменением общей формы и добавлением надписи «ПСФ». В программной среде Zbrush модель выглядит несколько иначе: ее форма плавная, надпись без резких граней, так как она создавалась с помощью лепки.

Возможность печати на 3D-принтере присутствует в обеих программах, но в Matrix эти мастер модели будут выглядеть более аутентично. Стоит обратить внимание, что в Zbrush на моделях с мелкими деталями нужно повышать резкость и контуры граней, в противном случае, при печати на 3D-принтере все детали смажутся.

Таким образом, указанные приложения можно использовать для создания различных моделей украшений.

Литература

1. Проектирование и изготовление ювелирных изделий : учеб. пособие / И. А. Груздева [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 124 с.

2. ZBrush [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://media.contented.ru/glossary/zbrush/>. – Дата одо-
ступа: 10.09.2022.

3. Matrix 8.0 Manual Rus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.academia.edu/19806714/Matrix_8_0_Manual_Rus. – Дата доступа: 10.09.2022.

УДК 557.226.4-546.65.641

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В СОЕДИНЕНИЯХ $M_3Ln(EO_4)_2$ и $M_2MLn(EO_4)_2$
Ибрагимов Ш.Б., Бабажанов Б.А., Номозова Н.З.

Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова
Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В данной работе изучен механизм проводимости поликристаллических образцов на основе ванадатов редкоземельных элементов. Были изучены температурные зависимости электропроводности в интервале температур 250–850 К, на постоянном. Как показали исследования, проводимость данных соединений осуществляется прыжковым механизмом по Мотту, с участием разновалентных ионов ванадия. Показано что замещая ванадий на фосфор в данных структурах приводит к исчезновению прыжкового механизма электропроводности.

Ключевые слова: постоянный сигнал, ванадат, редкоземельный элемент, фосфат, подвижность, электропроводность, температура, электронная оболочка, моноклинный, тетрагональный.

HOP CONDUCTIVITY IN COMPOUNDS $M_3Ln(EO_4)_2$ and $M_2MLn(EO_4)_2$
Ibragimov Sh., Babazhanov B., Nomozova N.

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Tashkent, Uzbekistan

Annotation. In this work, the mechanism of conductivity of polycrystalline samples based on vanadates of rare earth elements. The temperature dependences of the electrical conductivity in temperature range 250–850 K, at a constant. Studies have shown that the conductivity of these compounds is carried out by the Mott hopping mechanism, with the participation of vanadium ions of different valence. It is shown that substituting vanadium for phosphorus in these structures leads to the disappearance of the hopping mechanism of electrical conductivity.

Key words: constant signal, vanadate, rare earth element, phosphate, mobility, electrical conductivity, temperature, electron shell, monoclinic, tetragonal.

Адрес для переписки: Ибрагимов Ш.Б., ул. Университетская №2, Ташкент, Узбекистан
e-mail: mr.bahromovich@inox.ru

Известно, что переходные металлы, особенно d-элементы, вследствие специфического расположения достраивающихся электронных уровней, характеризуются переменной валентностью и образованием оксидов различного состава. В этом отношении характерными металлами являются 3d элементы (Ti, V) и 4f элементы (РЗЭ). В связи с этим детальное изучение механизма взаимодействия элементов с достраивающимися d- и f-оболочками представляется актуальным. Это достигается посредством изменения состава соединений, с помощью двойных и тройных соединений ванадия с РЗЭ, имеющих структуру глазерита и замена некоторых элементов в составе приводит только к моноклинному или тригональному искажению структуры глазерита.

Для выявления характера проводимости поликристаллических образцов на основе ванадатов РЗЭ были изучены температурные зависимости электропроводности в интервале температур 250–850 К на постоянном сигнале ($E = 100$ В/см). Результаты исследований для соединений типа $M_3Ln(EO_4)_2$ и $M_2MLn(EO_4)_2$ ($M = K, Rb$) с

свидетельствуют о полупроводниковом характере проводимости, и обнаруживается ряд электрических переходов, проявляющихся в измерении наклона кривых $\lg\sigma = f(T-1)$ к оси абсцисс. По этим данным были рассчитаны энергии активации ΔEa (0,75–1,25 Эв), для областей, в которых выполняется экспоненциальный закон $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta Ea/kT)$. Оказалось, что в области низких температур (<550К) зависимость $\lg\sigma = f(T-1)$ является нелинейной.

Только в координатах $\lg\sigma = f(T-1/4)$ можно получить линейную зависимость, что отвечает концепции Мотта, характеризующую прыжковую проводимость. В случае проводимости путем прыжка носителя заряда в пределах уровня Ферми полевая зависимость проводимости может быть выражена следующим соотношением [1, 4].

$$\Sigma = \exp(eFr/kT), \quad (1)$$

где r – характерная длина прыжка; F – приложенное поле. Зависимость $\lg\sigma = f(F)$ линейна при комнатной температуре для соединений $K_3Ln(VO_4)_2$ и $Rb_2Ln(VO_4)_2$, что хорошо согласуется с урав-

нением (1). Величина длины прыжка ($r = 60-65 \text{ \AA}$), вычисленная из наклона прямой $\ln \sigma$ от (F), в зависимости от порядкового номера лантаноидов и от вида щелочного металла, входящего в состав соединений. Величина длины прыжка слабо зависит от вида редкоземельного иона в соединениях $K_3Ln(VO_4)_2$, и имеется некоторая корреляция этого параметра в соединениях $Rb_2Ln(VO_4)_2$. Показательно то, что основной разброс этого параметра наблюдается в начале лантаноидного ряда.

Результаты измерений температурных зависимостей коэффициента термо-ЭДС показали, что он имеет отрицательную величину и почти не зависит от температуры вплоть до 650К, как для $K_3Ln(VO_4)_2$, так и $Rb_2Ln(VO_4)_2$, что подтверждает тот факт, что в ванадатах редкоземельных элементов вне зависимости от щелочного металла при температурах ниже 550К механизм электропроводности является термически активированным перемещением «малых поляронов». Расчет подвижности носителей заряда, вычисленная для соединений $M_3Ln(VO_4)_2$ при 300К, равна $\mu = 10^{-7} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ сек}^{-1}$, что свидетельствует об образовании поляронов малого радиуса [1]. Если носителями заряда являются поляроны, проводимости можно представить как процесс активированной диффузии поляронов. Коэффициент диффузии равен [2, 3].

$$D = \gamma a^2 N \gamma_0 e^{-Ea/kT}, \quad (2)$$

где γ – геометрический фактор, зависящий от типа рассматриваемой кристаллической структуры; a – постоянная решетки; N – число ближайших соседних катионов, на место которых может быть совершен перескок; γ_0 – частота перескока при $T = \infty$. Применяя соотношение Эйнштейна между коэффициентом диффузии и электропроводностью, можно получить выражение для σ . Согласно последнему, зависимость $\lg(\sigma T)$ от $1/T$ должна быть линейной. Что практически во всем исследованном температурном интервале для $Rb_3Ln(VO_4)_2$ экспериментальные точки удовлетворительно укладываются на прямые, и это является подтверждением поляронного механизма проводимости.

Наблюдаемая периодичность полученных параметров связана с электронным строением, в частности с изменением числа электронов на 4*f*-оболочке редкоземельных ионов. Элементы ряда La-Lu характеризуются постепенным заполнением внутренних 5*d* и 4*f* оболочек, прикрытых слоем внешних 5*s*, 5*p*, 6*s*-электронов. Стремление электронных оболочек к образованию конфигурации f^c, f^f и f^{14} приводит к тому, что наряду с наиболее характерной для лантаноидов степенью окисления 3+ встречаются также степени окисления более высокие (Ce^{4+} , Tb^{4+}) и более низкие (Ea). Сжатие 4*f* орбиталей, вследствие спин-орбитального взаимодействия, и расширение внешних 5*s* и 5*p* орбиталей должны подчиняться следующему

предположению: что максимально сжатыми за счет *L-S* взаимодействия должны быть 4*f*-орбитали ионов Nd^{3+} , Pr^{3+} , Sm^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , а максимальное расширение 5*s* и 5*p*-орбиталей этих же элементов. Таким образом, заполнение 4*f*-оболочки приводит к «разрыхлению» атомной системе, в особенности ее внешние оболочки. 4*f*-электроны взаимодействуют со всеми другими электронами и экранируют внешние электроны от действия положительного заряда ядра. Это приводит к тому, что любое изменение 4*f*-оболочки немедленно сказывается на энергетике и геометрических размерах других, особенно верхних оболочек.

Для ванадатов с калием значения параметров ($\rho = 10^{-9}-10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, Ea) находятся примерно на одном уровне. В случае $Rb_3Ln(VO_4)_2$ наблюдается скачкообразное изменение удельного сопротивления и энергии активации. Этот разброс связан с некоторой структурной нестехиометрией рубидиевых соединений, за счет размещения рубидия в двух различных кристаллографических позициях [4]. Эта разупорядоченность по разному проявляется в соединениях редкоземельных элементах. Что же касается заметной разницы в длине прыжка, то ее увеличение можно объяснить различным типом кристаллической решетки (соответственно моноклинная для K и тригональная для Rb).

Таким образом, проводимость керамики на основе двойных и тройных ванадатов редкоземельных элементов на переменном сигнале хорошо описывается моделью прыжковой проводимости. Частотная зависимость электропроводности образцов наблюдается до температур 550–600К, а в области температур 600К проводимость не зависит от частоты. Анализ температурной зависимости проводимости на постоянном сигнале показал, что в области 300–500К проводимость слабо зависит от температуры и при дальнейшем увеличении температуры она имеет активационный характер с энергией активации 0,7–1,2 эВ в зависимости от щелочного металла и редкоземельных элементов.

Для того чтобы понять природу прыжкового механизма, следует рассмотреть структуру $M_3Ln(VO_4)_2$. Структура соединений состоит из октаэдров с Ln и окруженных шестью тетраэдрами VO_4 . Не исключено, что метод «жесткого» керамического синтеза является фактором, ответственным за формирование не эталонных кристаллических решеток. Эта не эталонность связана с появлением кислородной вакансии в VO_4 , что приводит к появлению ванадия в четырехвалентном состоянии (V^{4+}). Из этого вытекает, что прыжковый перенос обусловлен разновалентными ионами ванадия, присутствующих в равноценных кристаллографических узлах и в энергетически эквивалентных позициях.

Для подтверждения вышеуказанного предположения был поставлен следующий эксперимент. В процессе синтеза в соединениях $M_3Ln(VO_4)_2$ было постепенно замещен в ЭО₄ группировку ион

фосфора являющимся стабильным р-элементом. Были получены соединения типа $M_3Ln(VO_4)_{2-x}$ где $0,1 < x < 1$. Были проведены температурно-частотные исследования. Как показали результаты исследований при $x = 0,8-0,9$ на зависимости $\lg\sigma = f(T^{-1})$ два участка: первый участок при температурах $>450K$ σ не зависит от температуры; второй высокотемпературный участок ток имеет энергию активации $\sim 0,9$ эВ. Также исследования на переменном сигнале показали, что в этих соединениях электропроводность не зависит от частоты при $x < 0,8$. Это показывает на то, что с увеличением доли в соединениях $M_3Ln(VO_4)_{2-x}(PO_4)$ все механизмы проводимости, которые наблюдались в $M_3Ln(VO_4)_2$ и $M_2MLn(VO_4)_2$ постепенно исчезают.

Литература

1. Dougier, P. Properties cristallographiques, magnetiques et electriques de l'orthovanatite de lanthane $LaVO_3$ / P. Dougier, P. Hagenmuller // I. Solid. State Chem. – 1974. – № 3. – P. 177–183.
2. Хайкс, Р. Механизм электропроводности в окислах переходных металлов с примесью лития / Р. Хайкс, У. Джонстон. – В кн.: Диэлектрическая спектроскопия. – М.: Мир, 1974.
3. Elliot, S. R. A theory of a.c. conduction in chalcogenide glasses / S. R. Elliot. – Phil. Mag. – 1977. – Vol. 36, № 6. – P. 129.
4. Электрофизические свойства и строение двойных ванадатов лантаноидов / Ш. Б. Ибрагимов // Узб. физ. журн. – 1993. – №1. – С. 79–81.

УДК 535.317

ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫМ МЕТОДОМ

Бокуть Л.В., Каменко Д.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе рассматривается приближенное решение задач нелинейного программирования градиентным методом. Для решения задачи безусловной оптимизации с несколькими переменными расчет шага осуществлялся методом дихотомии. Для реализации метода использован компьютерный пакет MatLab.

Ключевые слова: нелинейное программирование, градиентный метод, компьютерный пакет MatLab.

APPROXIMATE SOLUTION OF NONLINEAR PROGRAMMING PROBLEMS BY THE GRADIENT METHOD

Bokut L., Kamenko D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In work the approximate solution of problems of nonlinear programming is considered by a gradient method. To solve the problem of unconditional optimization with several variables, the step calculation was carried out by the dichotomy method. For realization of a method the computer MatLab package is used.

Key words: nonlinear programming, gradient method, computer package MathLab.

*Адрес для переписки: Каменко Д.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: dimakamenko.2000@gmail.com*

В отечественной и зарубежной литературе подробно описаны градиентные и неградиентные методы оптимизации [1]. В статье [2] наглядно проиллюстрирован метод наискорейшего спуска с подробными доказательствами вспомогательных теорем. Существуют известные реализации алгоритма, например, на языке программирования Python [3, 4].

Целью данной работы является рассмотрение алгоритмов и их реализация в мощной компьютерной системе MatLab.

MatLab – одна из тщательно проработанных систем автоматизации математических и научно-технических расчетов. Она включает в себя:

– программные средства математических вычислений;

- специальные массивы;
- программные средства обработки данных;
- программные средства графики и др.

В основе градиентных методов лежит свойство градиента функции в точке. Он позволяет указать направление наибольшего роста функции в окрестности точки.

Необходимость решения задач нелинейного программирования связана с тем, что при исследовании реальных процессов не всегда можно использовать линейные функции для адекватной построенной математической модели.

Одной из разновидностей градиентного метода является метод наискорейшего спуска. Он предполагает выбор некоторой точки X_k и начального шага h_k .

Затем вычисляется градиент исходной функции $grad(X_k)$ и осуществляется переход к этому градиенту с выбранным шагом. Если значение функции F в последующей точке больше предыдущего значения, новая точка принимается за исходную точку, и повторяется предыдущий шаг.

Идея метода может быть проиллюстрирована примером спуска с горы, когда на каждом этапе спуска, будет выбираться направление самого крутого склона.

Пусть исходная задача формулируется следующим образом. Необходимо найти минимум функции:

$$y(x_1, x_2) = 21x_1^2 - 420x_1 \cdot x_2 + 21x_2^2 - 192x_1 + 50x_2 - 25.$$

Для вычисления значения вектора градиента находим частные производные:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 422x_1 - 420x_2 - 192.$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = 422x_2 - 420x_1 + 50.$$

Данная задача является задачей безусловной оптимизации с несколькими переменными. Для расчета шага выбран метод дихотомии. При использовании метода дихотомии считается, что исходная функция непрерывна и имеет на концах интервала разный знак. После вычисления значения функции в середине интервала одна часть интервала отбрасывается так, чтобы функция имела разный знак на концах оставшейся части.

Рассмотрим реализацию этого подхода в системе MatLab. Данная система оснащена графической составляющей, дополнена средствами компьютерной алгебры и библиотеками команд, предназначенных для эффективной работы со специальными классами задач.

Данная система позволяет представлять исходные данные в виде матриц и обрабатывать большие массивы данных.

Пусть исходная функция имеет вид:

$$\gg y = @(x) 211 * x(1).^2 - 420 * x(1) * x(2) + 211 * x(2).^2 - 192 * x(1) + 50 * x(2) - 25;$$

И заданы условия:

$$\gg \text{d}y_1 = @(x) 422 * x(1) - 420 * x(2) - 192;$$

$$\gg \text{d}y_2 = @(x) 422 * x(2) - 420 * x(1) + 50;$$

При задании функции использована операция поэлементного умножения. Она задана с помощью символов «*». А поэлементное возведение в степень с помощью символов «^».

Отсутствие «.» приводит к ошибке в выполнении программы, что связано с тем, что поэлементной операции требуются в компьютерном пакете MatLab дополнительные уточнения.

Зададим априорную погрешность алгоритма:

$$\gg E = 0.0001$$

Пусть параметр

$$\gg h = 1$$

Начальное значение вектора x :

$$\gg x = [0, 0];$$

$$\gg k = 0;$$

Организуем цикл:

```
>> while (sqrt(dyx1(x)^2+dyx2(x)^2)>E)
f=@(h)y(x-h*[dyx1(x),dyx2(x)])
local_min=dichotomy(f,0,3,E);
h=local_min(1);
x=x-h*[dyx1(x),dyx2(x)];
k=k+1;
end
```

Длина шага h вычислялась в этом случае следующим образом:

```
function [ret] = dichotomy (cb,a,b,eps)
d2=eps/10;
n=0;
x_min=h;
while (b-a)>eps
x_min=(b+a)/2;
fb=cb(x_min+d2);
fm=cb(x_min-d2);
if fb<fm
h=x_min-d2;
else
b=x_min+d2;
end
n=n+1;
end
ret = [x_min,n];
end
```

Результат работы алгоритма может быть представлен в виде графика

```
[x1, x2] = meshgrid(-200:1:200);
z=211*x1.^2-420*x1.*x2+211*x2.^2-192*x1+50*x2-25;
surf(x1,x2,z)
shading interp;
text(x(1),x(2),'Минимум','color','r');
k
x
y(x)
```

Функция $[X, Y] = \text{meshgrid}(x, y)$ формирует массивы X и Y , которые определяют координаты узлов прямоугольника, задаваемого векторами x и y .

Функция $\text{surf}(X, Y, Z)$ создает 3D объемную поверхностную диаграмму, которая является 3D поверхностью с твердыми цветами обводки и точными цветами поверхности.

Описанный алгоритм позволяет находить минимальное значение сходимости многомерной функции в определенной точке.

На рис. 1 представлена поверхность решения.

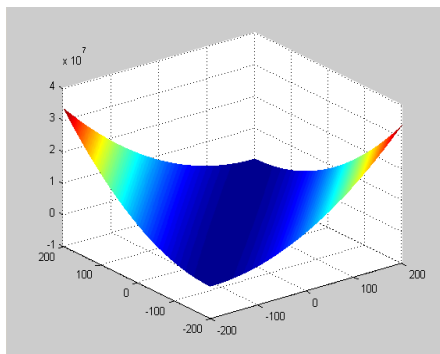


Рисунок 1 – Поверхность решения

Таким образом, входными параметрами описанного алгоритма являлись целевая функция,

начальная точка и погрешность, позволяющая завершить цикл.

Отметим, что скорость сходимости метода снижается при приближении к минимальному значению.

Литература

1. Iusem, A. N. A proximal regularization of the steepest descent method / A. N. Iusem, B. F. Svaiter. – 1995.
2. Ryan Tibshirani. Convex Optimization: Lecture 5: Gradient Descent [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stat.cmu.edu>. – Дата доступа : 29.09.2022.
3. Linge, S. Programming for Computations Python: A Gentle Introduction to Numerical Simulations with Python / S. Linge, Hans Petter Langtangen. – 2016.
4. Guttag, J. V / Introduction to Computation and Programming using Python / J. V. Guttag, J. Sussman. – 2016.

УДК 535.317

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ПЛАНА ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ

Бокуть Л.В., Климович Т.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Работа посвящена проблеме формирования опорного плана транспортной задачи. Представлена сравнительная характеристика методов ее решения. Проведен также анализ формирования оптимального опорного плана различными методами.

Ключевые слова: транспортная задача, опорный план, оптимальный план, граф.

ANALYSIS OF METHODS FOR FORMING A REFERENCE PLAN FOR A TRANSPORT TASK

Bokut L., Klimovich T.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The work is devoted to a problem of formation of the basic plan of a transport task. Comparative characteristic of methods of its decision is presented. Also the analysis of formation of the optimum basic plan is carried out by various methods.

Key words: transport task, basic plan, optimum plan, graph.

*Адрес для переписки: Климович Т.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tanya.tatina.klimovich@mail.ru*

Одной из главных задач математического моделирования транспортных перевозок является построение оптимального плана перевозок. Для решения транспортных задач можно применить симплексный метод. Так как матрица системы ограничений транспортной задачи очень своеобразна, то для нахождения ее решения применяют специфические методы. Они, как и симплексный метод, позволяют находить начальное опорное решение, а затем, улучшая его, получить оптимальное решение. В зависимости от способа постановки условий данной задачи, транспортная задача может быть представлена в сетевой и матричной (табличной) форме. Математическая модель сбалансированной транспортной задачи имеет следующий вид:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \rightarrow \min;$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = a_i, \quad i \in \overline{1, m};$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j} = b_j, \quad j \in \overline{1, n};$$

$$x_{i,j} \geq 0, \quad i \in \overline{1, m}; j \in \overline{1, n}.$$

Транспортная задача является канонической задачей линейного программирования с переменными x_{ij} и m n ограничениями. Транспортная задача может быть представлена в сетевой (графовой) форме [1]. На примере одной и той же задачи

можно показать преимущество метода нахождения опорного плана транспортной задачи. Для данной задачи есть исходные данные (запасы / потребности / тарифы перевозок), они внесены в табл. 1. Нахождение опорного плана по методу северо-западного угла представлено на рис. 1.

Таблица 1. Исходные данные

Пункты отправления A_i	Пункты потребления, B_j				Запасы, усл. ед.
	B_1	B_2	B_3	B_4	
A_1	5	8	1	2	210
A_2	2	5	4	9	170
A_3	9	2	3	1	65
Потребность, усл. ед.	125	90	130	100	

Пункты отправления A_i	Пункты потребления, B_j				Запасы, усл. ед.
	B_1	B_2	B_3	B_4	
A_1	5	8	1	2	210/85/0
A_2	2	5	4	9	170/165/35/0
A_3	9	2	3	1	65/0
Потребность, усл. ед.	125/0	90/5/0	130/0	100/0	

Рисунок 1 – Метод северо-западного угла

Первым шагом, для нахождения опорного плана, является проверка задачи на сбалансированность:

$$210 + 170 + 65 = 445;$$

$$125 + 90 + 130 + 100 = 445.$$

Запасы равны потребностям, задача является сбалансированной. Получаем опорный план X_{ij}

$$X_{i,j} = \begin{matrix} 125 & 85 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 130 & 35 \\ 0 & 0 & 0 & 65 \end{matrix}$$

Вычислим значение целевой функции, то есть общие затраты на перевозку:

$$L(X) = 125 \cdot 5 + 85 \cdot 8 + 5 \cdot 5 + 130 \cdot 4 + 35 \cdot 9 + 65 \cdot 1 = 2230.$$

Нахождение опорного плана методом минимального элемента представлено на рис. 2.

Пункты отправления A_i	Пункты потребления, B_j				Запасы, усл. ед.
	B_1	B_2	B_3	B_4	
A_1	5	8	1	2	210
A_2	2	5	4	9	170
A_3	9	2	3	1	65
Потребность, усл. ед.	125	90	130	100	

Рисунок 2 – Метод минимального элемента

Получаем опорный план X_{ij}

$$X_{i,j} = \begin{matrix} 0 & 45 & 130 & 35 \\ 125 & 45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 65 \end{matrix}$$

$$L(X) = 125 \cdot 2 + 45 \cdot 8 + 45 \cdot 5 + 130 \cdot 1 + 35 \cdot 2 + 65 \cdot 1 = 1100.$$



Рисунок 3 – Несбалансированная задача



Рисунок 4 – Характеристика методов



Рисунок 5 – Сравнение методов

Сравнивая полученные значения целевых функций, можно сказать, что метод минимального элемента предпочтительнее для получения оптимального плана.

На рис. 3 представлена последовательность решения несбалансированной задачи.

На рис. 4 представлено сравнение методов поиска опорного плана транспортной задачи. Каждый из методов имеет свои преимущества и минусы. Для поиска первоначального опорного плана рекомендуется применять метод двойного предпочтения. Этот метод находит более близкое к оптимальному решение транспортной задачи, метод двойного предпочтения учитывает стоимость и по столбцу и по строке матрицы. На рис. 5 показана сравнительная характеристика методов нахождения оптимального опорного плана.

Можно заметить, что применение дельта-метода вместе с методом потенциалов предполагает в более кратчайшие сроки найти оптимальный план [3], к тому же, чем больше параметры таблицы, тем это ощутимее.

Литература

1. Тюхтина, А. А. Математические модели логистики. Транспортная задача: Учебно-методическое пособие / А. А. Тюхтина. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 66 с.
2. Болотникова, О. В. Линейное программирование: транспортные и сетевые модели: учеб. пособие / О. В. Болотникова, Д. В. Трасов, Р. В. Тарасов. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – 88с.
3. Лебедева, Г. И. Прикладная математика. Математические модели в транспортной системе / Г.И. Лебедева, Н.А. Микулик. – Мн.: «АСАР», 2009. – 496 с.

УДК 530.182

НЕЛИНЕЙНОЕ УРАВНЕНИЕ, ДОПУСКАЮЩЕЕ РАЗЛИЧНЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

Князев М.А., Климович Т.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрено нелинейное уравнение, описывающее распространение нервных импульсов в биологических системах, допускающее решения, относящиеся к различным топологическим классам.

Ключевые слова: Солитон, кинк, прямой метод Хироты.

NONLINEAR EQUATION WITH DIFFERENT TOPOLOGICALLY NONTRIVIAL SOLUTIONS

Knyazev M., Klimovich T.

*Belarussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Nonlinear equation for propagation of the nerve impulse in biological systems is considered. For this equation the solutions of different topological classes are constructed.

Key words: Soliton, kink, Hirota direct method.

*Адрес для переписки: Князев М.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: maknyazev@bntu.by*

Как правило, нелинейное уравнение в частных производных имеет топологически нетривиальное решение определенного вида. Это может быть солитон или кинк и их разные комбинации. Случаи, когда нелинейное уравнение имеет решение обоих видов, достаточно редки. В данной работе представлен пример такого уравнения.

Уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[B(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] - \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}, \quad (1)$$

где $B(u) = 1 + B_1(u) + B_2 u^2$. Здесь B_1 и B_2 – некоторые константы. Данное уравнение получено в работе [1] при разработке новой теории распространения локальной плотности нервного импульса в мембране аксона (нервного тела).

До недавнего времени для описания распространения нервных импульсов использовалась теория Ходжкина-Хаксли [2]. В этой теории для описания распространения импульсов применялось допущение о равновесии ионных градиентов поперек нервной мембраны. Такое равновесие достигалось благодаря наличию особых белков, переносящих ионы. В свою очередь это приводило к быстрому изменению электрического напряжения. Теория Ходжкина-Хаксли использует диссипативные процессы, вследствие чего является неадиабатической. По сути, она описывает распространение нервных импульсов подобно распространению электрических токов, которые текут по цепям, содержащим конденсаторы (нервные мембраны) и активные сопротивления (ионные каналы).

В качестве альтернативы теории Ходжкина-Хаксли была предложена новая теория распространения нервных импульсов [3]. В математической модели теории используются опытные данные, полученные при фазовых переходах в жидких средах, находящихся при температурах ниже физиологических температур тела. В отличие от теории Ходжкина-Хаксли новая теория объясняет наличие обратимой температуры и изменения тепла, наблюдаемые при распространении нервного импульса. Она верно предсказывает скорости распространения нервных импульсов. В работах [1, 3] константы $B_1 = -16,6$ и $B_2 = 79,5$ определялись из результатов экспериментов. Теперь в уравнении (1) $u(x, t)$ – безразмерная величина, представляющая собой отношение разности поперечной плотности мембраны и ее равновесного эмпирического значения к величине этого равновесного значения.

Уравнение (1) представляет некоторое обобщение известного уравнения Буссинеска [4]. Решение этого уравнения в виде солитона, распространяющегося без дилатации, при некоторых значениях скорости, меньших скорости звука, может быть получено в аналитическом виде:

$$u(x - \beta t) = 2a_+ a_- \quad (2)$$

$$\left\{ (a_+ + a_-) + (a_+ - a_-) \cosh \left[(x - \beta t) \sqrt{1 - \beta^2} \right] \right\},$$

$$\text{где } a_{\pm} = -\frac{B_1}{B_2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{\beta^2 - \beta_0^2}{1 - \beta_0^2}} \right), \quad \beta_0 = \sqrt{1 - \frac{B_1^2}{6B_2^2}},$$

β – скорость распространения солитона; $|\beta| > \beta_0$.

Решение (2) описывает обычный режим распространения солитона. Первоначально в некоторой точке системы возбуждение отсутствует. Затем в эту точку приходит солитон и система переходит в возбужденное состояние. После того как солитон прошел эту точку, система возвращается в исходное состояние. Такое поведение общепринято для описания распространения нервных импульсов в биологических системах.

Однако уравнение (1) допускает и другое решение. Это решение типа кинка. Чтобы найти такое решение мы использовали прямой метод Хироты решения нелинейных уравнений в частных производных [5], который был определенным образом модифицирован [6]. Обычно в методе Хироты проводят замену зависимой переменной типа преобразования Коула-Хопфа

$$u(x, t) = \sigma \frac{F_x}{F}, \quad (3)$$

где $F = F(x, t)$ – новая неизвестная функция, σ – параметр, который определяют по ходу решения, $F_x = \partial F / \partial x$. Если метод Хироты применим к нелинейному уравнению, то подстановка соотношения (3) в это уравнение, как правило, приводит его

к так называемой билинейной форме (все члены этого уравнения будут квадратными функциями от F или ее производных).

Для уравнения (1) это сделать не удастся, и преобразованное уравнение принимает трилинейный вид (каждый член нового уравнения является функцией третьего порядка от F и ее производных). Однако, применение метода Хироты позволяет построить точное решение в виде кинка, если учесть зависимость между параметрами решения, которая вытекает из вида функции F для одиночного кинка. В итоге можно записать новое решение

$$u(x, t) = \frac{\sigma k}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{kx - \omega t + \eta^0}{2} \right) \right], \quad (4)$$

где k , ω и η^0 – параметры решения. Параметр η^0 описывает положение кинка в начальный момент времени и, без потери общности, может быть принят равным нулю.

Хотя уравнение (1) не удастся записать в билинейном виде, предложенная модификация позволяет точно определить σ , k и ω :

$$\sigma = \sqrt{\frac{6}{B_2}}, \quad k = -\frac{B_1}{6B_2},$$

ω находим из дисперсионного соотношения

$$\omega^2 = k^2 - k^4.$$

То, что параметр ω допускает неоднозначное определение, дополнительно позволяет получать новые решения. Особенно интересны случаи движения кинка (или антикинка) в сторону, противоположную направлению их движения согласно определениям этих состояний.

Решение (4) описывает новый возможный тип распространяющегося нервного импульса. Теперь профиль возмущения имеет не форму колокола, а определяется гиперболическим тангенсом, сдвинутым по оси ординат на постоянную величину. Теперь после прохождения возмущения через некоторую точку в системе, последняя не возвращается в первоначальное состояние, в котором она находилась до прихода возмущения. Достаточно долгое время система остается в новом состоянии, которое было вызвано приходом импульса возмущения. Формально, казалось бы, что это состояние будет сохраняться бесконечно долго. Это не так. В такой сложной системе, как нервная сеть биологического объекта, всегда спонтанно появляются факторы, которые вносят дополнительные возмущения, и новое состояние со временем разрушится, а система может или вернуться в исходное состояние, или перейти в некоторое другое возмущенное состояние.

Расчет топологических зарядов [7], соответствующих решениям (2) и (4), показывает, что состояния, описываемые этими решениями, относятся к различным топологическим классам, т.е.

нельзя перейти от одного решения к другому путем непрерывной деформации профиля графика функции. Например, в случае решений (2) и (4) потребовался бы переход от функции секанса к функции гиперболического тангенса, что сделать не удастся, т.к. эти функции по-разному ведут себя на пространственной бесконечности.

То, что решения (2) и (4) принадлежат к различным топологическим классам, указывает что, соответствующие нервные импульсы в биологической системе существуют по-отдельности и не могут встречаться одновременно.

Литература

1. Lautrup, B. The stability of solitons in biomembranes and nerves / B. Lautrup, A. D. Jackson and T. Heim

burg [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://xxx.lanl.gov> (arXiv: physics/05101[physics.bio-ph]).

2. Hodgkin, A. L. Quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A. L. Hodgkin and A. F. Huxley // J. Physiol. – 1952. – Vol. 117. – P. 500–544.

3. Heimburg, T. On soliton propagation in biomembranes and nerves / T. Heimburg and A. D. Jackson // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2005. – Vol. 102. – P. 9790–9795.

4. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. – Москва: Мир, 1977. – 624 с.

5. Солитоны и нелинейные уравнения / Р. Додд [и др.]. – Москва: Мир, 1988. – 694 с.

6. Князев, М. А. Кинки в скалярной модели с затуханием / М. А. Князев. – Минск: Тэхналогія, 2003. – 115 с.

7. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – Москва: Мир, 1985. – 416 с.

УДК 538.915

ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕГО ОКСИДНОГО СЛОЯ В ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Пархоменко И.Н.¹, Власукова Л.А.¹, Комаров Ф.Ф.², Романов И.А.¹, Альжанова А.Е.³
Демидович С.А.⁴, Ковальчук Н.С.⁴

¹Белорусский государственный университет

²НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

³Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

⁴ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Структуры $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ и $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ были изготовлены на кремниевых подложках методами химического осаждения (PECVD, LPCVD). Показано, что верхний слой оксида кремния защищает нижележащий нитридный слой от непреднамеренного окисления во время быстрого термического отжига в инертной среде (1100 °C, 3 мин). Кроме того, верхний слой оксида кремния увеличивает выход фотолюминесценции от слоя нитрида кремния в три раза. Обсуждается различие слоев оксида кремния, образующегося при высокотемпературном отжиге SiN_x и слоя SiO_2 , нанесенного на слой нитрида кремния методом PECVD.

Ключевые слова: нитрид кремния, оксид кремния, быстрый термический отжиг, ИК-спектроскопия, фотолюминесценция.

THE EFFECT OF UPPER OXIDE LAYER IN OPTICAL CAPACITOR BASED ON SILICON NITRIDE

Vlasukova L.¹, Parkhomenko I.¹, Komarov F.², Romanov I.¹, Alzhanova A.³, Demidovich S.⁴, Kovalchuk N.⁴

¹Belarusian State University

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University

³L.N. Gumilev Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhtan

⁴Joint Stock Company "Integral"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ and $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ structures were fabricated on silicon substrates by chemical vapour deposition (PECVD, LPCVD). It was shown that top silicon oxide layer protects underlying nitride layer from unintended oxidation during rapid thermal annealing in inert ambient (1100 °C, 3 min). Furthermore, upper silicon oxide layer enhances photoluminescence yield from silicon nitride layer in three times. The difference of silicon oxide layer unintentionally formed on SiN_x film during high-temperature annealing siliucon oxide layer deposited on SiN_x by PECVD has been discussed.

Key words: silicon nitride, silicon oxide, rapid thermal annealing, IR spectroscopy, photoluminescence.

Адрес для переписки: Власукова Л.А., ул. Курчатова, 5, Минск 220045, Республика Беларусь

e-mail: vlasukova@bsu.by

Введение. Нитрид кремния является основным материалом для создания пассивирующих и барьерных слоев в интегральных микросхемах.

Благодаря широкому спектральному диапазону прозрачности, светоизлучающим свойствам, сверхвысокой добротности нитрид кремния

также применяется в качестве волновода, просветляющего покрытия солнечных элементов, активного слоя лазеров и устройств энергонезависимой памяти [1, 2]. В основном, для этих приложений используются слоистые структуры типа $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$, что позволяет улучшить термическую стабильность, пассивацию поверхности, устойчивость к потенциальной деградации и др.

Известно, что естественное окисление нитридных пленок может приводить к резкому ухудшению их диэлектрических свойств. В работе предлагается использовать пленку PECVD-оксида кремния в качестве защитного слоя для предотвращения непреднамеренного окисления нитрида кремния при термообработках. С этой целью обсуждается влияние отжига на свойства двухслойных структур «нитрид/оксид» и трехслойных структур «оксид/нитрид/оксид».

Материалы и методы исследования. Двухслойные $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ и трехслойные $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ пленки суммарной толщиной 79 и 147 нм соответственно были нанесены на Si подложку методами LPCVD и PECVD. После нанесения часть образцов отжигалась в установке быстрого термического отжига (БТО) (1200 °С, 3 мин) в Ar.

Структурный и элементный анализ, оптические свойства сформированных структур изучались методами резерфордского обратного рассеяния (РОР), растровой электронной микроскопии (РЭМ), инфракрасной (ИК) и оптической спектроскопии, и фотолюминесценции (ФЛ).

Результаты и обсуждение. Анализ методом РОР показал, что элементный состав слоев оксида и нитрида кремния близок к стехиометрическому: $\text{SiO}_{1.9}$ и $\text{SiN}_{1.3}$ соответственно.

На рис. 1 представлены ИК-спектры поглощения двухслойной и трехслойной структур до и после БТО. Во всех спектрах наблюдаются полосы при $\sim 850 \text{ см}^{-1}$ и $1050\text{--}1070 \text{ см}^{-1}$, обусловленные соответственно валентными колебаниями связей Si–N и Si–O [3]. В случае структуры $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ БТО приводит к увеличению оптической плотности в области колебаний связи Si–O. С учетом рассчитанного значения коэффициента поглощения для оксида кремния данное возрастание интенсивности полосы объясняется увеличением толщины SiO_x примерно на 25 нм. В случае структуры $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ наблюдается незначительное увеличение и высокочастотный сдвиг данной полосы, свидетельствующий об увеличении содержания кислорода в пленке (от $\text{SiO}_{1.9}$ до SiO_2). Таким образом, при высокотемпературном БТО происходит непреднамеренное окисление не защищенного оксидом слоя нитрида кремния, вероятнее всего, из-за наличия примесей кислорода и воды в используемом аргоне.

Для подтверждения окисления слоя SiN_x в двухслойной структуре были промоделированы спектры отражения двухслойной структуры до и

после БТО (рис. 2). Хорошее совпадение экспериментального и модельного спектров для неотожженного образца было получено при использовании в качестве модельного материала структуры $\text{Si}_3\text{N}_4(63 \text{ нм})/\text{SiO}_2(16 \text{ нм})/\text{Si}$, что согласуется с данным РЭМ. Для структуры после отжига результаты моделирования и эксперимента совпадают при соотношении толщин $\text{SiO}_2(23 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(58 \text{ нм})/\text{SiO}_2(18 \text{ нм})/\text{Si}$. Таким образом, спектры оптического отражения указывают на уменьшение толщины пленки SiN_x и общее увеличение верхнего и нижнего слоев оксида кремния на 25 нм, что согласуется с данными ИК-спектроскопии.

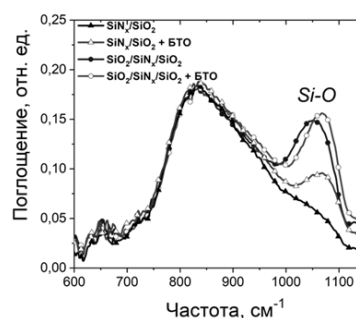


Рисунок 1 – Спектры ИК-поглощения структур $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ до и после БТО

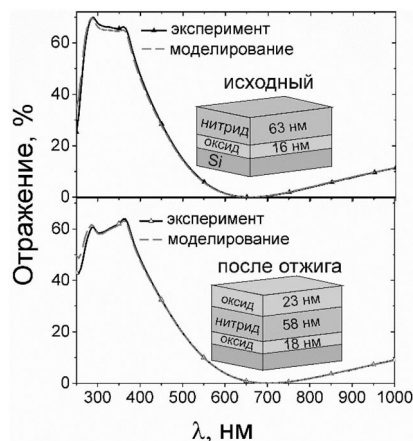


Рисунок 2 – Экспериментальные (сплошные кривые) и моделированные (пунктирные кривые) спектры отражения структуры $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ после осаждения и БТО. На вставках показаны соответствующие структуры, используемые при моделировании

Методом ФЛ показано, что при одинаковой толщине светоизлучающего слоя нитрида кремния сигнал свечения от трехслойной структуры $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ в 3 раза интенсивнее по сравнению с двухслойной структурой $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ благодаря интерференционным эффектам. Тем не менее, БТО приводит к уменьшению сигнала ФЛ для обеих структур $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ (в 2,6 раза) и $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ (в 1,9 раза) за счет аннигиляции дефектных состояний в нитриде кремния.

Заключение. На основе данных РЭМ, ИК- и оптической спектроскопии показано, что БТО при

1200 °С приводит к окислению нитридного слоя в случае двухслойной структуры $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ в то время, как нитридный слой в трехслойной структуре $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ не подвержен окислению. Продемонстрировано, что трехслойная структура характеризуется более сильным (в ~3 раза) сигналом фотолюминесценции от нитридного слоя, чем двухслойная.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.8.1), а также гранта молодых ученых по

проекту «Жас галым» на 2022-2024 гг. МОН РК, ИРН объекта: AP14972733.

Литература

1. Low-temperature and low-pressure silicon nitride deposition by ecr-pecvd for optical waveguides / D. B. Bonneville [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – P. 2110.

2. Hegedüs, N. Silicon nitride and hydrogenated silicon nitride thin films: A review of fabrication methods and applications / N. Hegedüs, K. Balázs, C. Balázs // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 5658.

УДК 681.322

ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ATMEL STUDIO И ARDUINO IDE

Кондратьева Н.А., Линкевич С.В., Плиско Р.Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье рассматривается пример практической реализации программирования микроконтроллеров в ATMEL STUDIO. Описаны некоторые алгоритмы, предназначенные для создания и загрузки программ на ARDUINO-совместимые платы микроконтроллера.

Ключевые слова: микроконтроллер, микросхема, системы автоматического управления, программирование, печатная плата.

PROGRAMMING MICROCONTROLLERS IN ATMEL STUDIO AND ARDUINO IDE. CREATING

Kondratieva N., Linkevich S., Plisko R.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article discusses an example of the practical implementation of micro-controller programming in ATMEL STUDIO. Some algorithms designed to create and load programs on ARDUINO-compatible microcontroller boards are described.

Key words: microcontroller, microchip, automatic control systems, programming, printed circuit board.

*Адрес для переписки: Кондратьева Н.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: kondratyeva@bntu.by*

В настоящее время микроконтроллеры используются во всех сферах жизнедеятельности человека, во многих современных устройствах. Они отличаются простотой подключения и большими функциональными возможностями. С помощью программирования микроконтроллера можно решить многие практические задачи аппаратной техники. Микроконтроллер представляет собой компьютер, размещившийся в одной микросхеме. Его основные достоинства: малые габариты, высокая производительность, надежность, способность быть адаптированным для выполнения разнообразных задач. Основное назначение микроконтроллера – использование в системах автоматического управления, встроенных в самые различные устройства: кредитные карточки, сотовые телефоны, фотоаппараты, музыкальные центры, телевизоры, видеокамеры, стиральные машины, микроволновые печи, системы охранной сигнализации, холодильники, новогодние гирлянды, компьютеры, системы зажигания бензиновых двигателей, электроприводы локомоти-

вов, ядерные реакторы и др. Применение микроконтроллеров можно разделить на два этапа: первый - программирование, когда пользователь разрабатывает программу и прошивает ее непосредственно в кристалл, и второй – согласование спроектированных исполнительных устройств с программируемым микроконтроллером. На первом этапе отладки программы значительно облегчает действия симулятор, который наглядно моделирует работу микропроцессора [1].

Для программирования AVR микроконтроллеров существует немало средств разработки, однако, наиболее популярным считается пакет Atmel Studio. Это бесплатный пакет, который объединяет в себе текстовый редактор, ассемблер и симулятор, используется совместно с аппаратными средствами отладки. Atmel Studio является интегрированной платформой разработки, которая предоставляет возможность проектировать и отлаживать приложения, разработанные для микроконтроллеров Atmel на базе архитектуры ARM процессоров серии Cortex-M. Atmel Studio предоставляет воз-

возможность отладки и компоновки приложений, созданных на языке C/C++, либо на ассемблере. В платформу встроена объемная библиотека абсолютно бесплатного исходного кода Atmel Software Framework, в составе которой есть более 1600 проектов для ARM и AVR архитектур. Данную IDE можно применять для программирования разнообразных микроконтроллеров на основе AVR, а также флеш-микроконтроллеров на базе Atmel SAM3, в которых используются ядра Cortex-M3, Cortex-M4 [2]. Программирование микроконтроллера начинается в меню File New Project, где проводятся предварительные настройки проекта, например: тип файла: C/C++; компилятор: GCC; название проекта; путь хранения проекта. Далее выбирается интересующий микроконтроллер, например – ATmega32U2. При открытии окна разработки проекта добавляются строки кода. Подключаются необходимые библиотеки. Компиляция проекта в меню Build командой Rebuild Solution дает отчет в окне состояния. Приведем фрагмент программы (рис. 1) работы светодиода.

```

main.c ×
main.c → c:\users\wropa\documents\atmel studio
// подключаем необходимые библиотеки
#include <avr/io.h>
#define F_CPU 16000000
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

int main(void)
{
    // порт B в режим выхода
    DDRB = 0xFF;
    // устанавливаем нули на выходе
    PORTB = 0x00;
    while (1)
    {
        // зажигаем светодиод
        PORTB |= (1 << PB0);
        // ждем 1 секунду
        _delay_ms(1000);
        // гасим светодиод
        PORTB &= ~(1 << PB0);
        // ждем 1 секунду
        _delay_ms(1000);
    }
}

```

Рисунок 1 – Фрагмент программы в Atmel Studio

Arduino IDE – это инструмент для проектирования электронных устройств более плотно взаимодействующих с окружающей физической средой, чем стандартные персональные компьютеры, которые фактически не выходят за рамки виртуальности. Это платформа, предназначенная для «physical computing» с открытым программным кодом, построенная на печатной плате с современной средой для написания программного обеспечения. Arduino применяется для создания электронных устройств с возможностью приема сигналов от различных цифровых и аналоговых датчиков, которые могут быть подключены к нему, и управления различными исполнительными устройствами. Проекты устройств, основанные на Arduino, могут работать самостоятельно или взаимодействовать с программным обеспечением на компьютере (напр.: Flash, Processing, MaxMSP). Платы могут быть собраны пользователем самостоятельно или куплены в сборе. Среда разработки программ с открытым

исходным текстом доступна для бесплатного скачивания.

Результаты работы в среде Arduino IDE могут быть получены в разнообразном виде. Это может быть как простой скетч (имя, которое Arduino использует для программы или единица кода, которая загружается и запускается на плате Arduino) который выполняет простейшие функции, так и сложный многоуровневый скетч, позволяющий создать систему автоматического контроля, регулирования и(или) сигнализации. Кроме того, Arduino предоставляет пользователю возможности, которые позволяют создавать свои «конструкторы». В среде Arduino существуют стандартные библиотеки, которые устанавливаются вместе с Arduino IDE. Некоторые из них автоматически подключаются в скетч (Serial – библиотека для обмена данными через последовательный порт (UART). Servo – библиотека для легкого и точного управления сервоприводами. Wire – библиотека для работы с интерфейсами связи TWI/I2C. Упрощает обмен данными с устройствами, датчиками и сенсорами. И др.).

Arduino IDE отлично подходит для программирования микроконтроллеров. Можно создать устройства для удобства в быту, к примеру, сделать поддержку комфортной температуры в помещении, умную подсветку, электронные замки дверей, светомузыку и т.п.

Опишем алгоритм создания скетча в микроконтроллер и подключение к нему светодиодной ленты через электронный замок в виде транзистора. При запуске Arduino IDE появляется рабочая область. Все что находится под void setup () будет выполнено один раз при включении микроконтроллера. Все что находится под void loop () будет выполняться по порядку, а затем будет заново запускаться сверху вниз до момента пока микроконтроллер будет включен. Прописывается тип данных, название и значение (в данном случае номер пина с поддержкой ШИМ сигналов). Указывается «pinMode(№ пина, режим работы);», т.е. отмечается, какие выводы контроллера будут использоваться в качестве входа сигнала или его вывода. Далее записывается первое состояние выходов с помощью функции «analogWrite(pin, duty);», где pin номер вывода на который подается ШИМ, duty значение от 0 до 255 подающееся на выход. При значении 0 duty светодиод не будет гореть. Создается задержка в миллисекундах перед выполнением следующей операции с помощью функции «delay ()». Далее задается новое значение выхода для создания эффекта постепенного разгорания светодиода. Затем снова ставится задержка. Повторяется процесс с разными выходами, обеспечивая разгорание разноцветных светодиодов. Появляется постепенное потухание светодиодов для возвращения в исходное состоя-

ние, т.к. программа начнет заново воспроизводиться. В начале алгоритма задаются значения для всех выходов равные 0, в конце кода светодиод одного из цветов не обнуляется для запуска алгоритма по кругу. Далее проверяется верность написания скетча и он загружается в микроконтроллер, к нему подключается светодиодная лента через электронный замок в виде транзистора. Таким образом Arduino предоставляет

пользователю возможности, которые позволяют создавать свои «конструкторы».

Литература

1. Евстифеев, А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы "Atmel". / А. В. Евстифеев. – М : Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 560 с.
2. Ревич, Ю. В. Практическое программирование микроконтроллеров AtmelAVR на языке ассемблера / Ю. В. Ревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 384 с.

УДК 678.057.9

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ СРЕДСТВ РЕАБИЛИТАЦИИ ИЗ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Ксенофонтов М.А., Васильева В.С., Выдумчик С.В., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлено современное импортозамещающее производство колес для инвалидных колясок, каталок и медицинских тележек, пользующиеся повышенным спросом в медицинских учреждениях. Для достижения указанной цели разработаны специализированное автоматизированное оборудование и вспомогательная оснастка для реализации технологического процесса производства колес с заданным комплексом эксплуатационных характеристик. Освоение технологии производства колес с полиуретановыми шинами позволяет расширять номенклатуру изделий (размеры колес по ширине, высоте, цветовой гамме и т. д.) для улучшения потребительских свойств выпускаемых и разрабатываемых инвалидных колясок и других технических средств социальной реабилитации.

Ключевые слова: наукоемкое производство, шины из пенополиуретана, импортозамещающие изделия для технических средств реабилитации инвалидов.

AUTOMATED EQUIPMENT FOR MANUFACTURING MEDICAL REHABILITATION PRODUCTS FROM POLYURETHANE ELASTOMERS FOAM

Ksenofontov M., Vasilyeva V., Vy dumchik S., Pavlyukevich T., Ponaryadov V.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The work presents the modern import-substituting production of wheels for wheelchairs, gurneys and medical carts, which are in high demand in medical institutions. To achieve this goal, specialized automated equipment and auxiliary equipment have been developed to implement the technological process of producing wheels with a given set of operational characteristics. Mastering the technology of producing wheels with polyurethane tires allows expanding the range of products (wheel sizes by width, you-cell, color scheme, etc.) to improve the consumer properties of wheelchairs produced and developed and other technical means of social rehabilitation.

Key words: science-intensive production, polyurethane foam tires, import-substituting products for technical means of rehabilitation of disabled people.

*Адрес для переписки: Ксенофонтов М.А., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: lab_do zator@mail.ru*

Колеса кресел-колясок, каталок и медицинских тележек являются наукоемким конструктивно сложным изделием, так как к ним предъявляется широкий комплекс противоречивых технических требований: механическая прочность, конструктивная жесткость в сочетании с хорошей амортизирующей способностью, высокой износостойкостью. Реализация приемлемого компромисса свойств колес требует усложнения конструкции и использование сложных ресурсоемких технологий и специализированных материалов.

Полиуретановые эластомеры, обладающие уникальным комплексом физико-механических и

технологических свойств, являются наиболее подходящими для получения формованных изделий [1].

Новизна разработки заключается в создании современного импортозамещающего производства колес для инвалидных колясок, каталок и медицинских тележек, пользующиеся повышенным спросом в медицинских учреждениях. Созданный инновационный продукт представляет собой колесо, состоящее из интегральной пенополиуретановой шины, обода из термопластичного композита, оборудованного подшипниками скольжения (рис. 1).

Для реализации технологического процесса производства шин из пенополиуретановых

эластомеров используется разработанный и изготовленный нами автоматизированный комплекс оборудования, состоящий из заливочно-смесительной установки низкого давления; пресс-форм для литья шин; термошкафа для предварительного разогрева компонентов (полиол и изоцианат) в транспортной таре до температуры 60 °С.



Рисунок 1 – Колесо из интегральной пенополиуретановой шины со ступицей

Данное оборудование и изделия, получаемые на нем, являются собственной разработкой. Автоматизированное оборудование основано на современных конструкторских, инженерных и технических решениях, обеспечивающих переработку материалов в соответствии с технологическими регламентами и паспортными характеристиками.

Стабильность свойств и качество изделий достигается постоянством свойств компонентов, воспроизводимостью технологических параметров в каждом цикле, точным поддержанием заданного соотношения и интенсивности смешения компонентов.

Основной составляющей автоматизированного комплекса является универсальная заливочно-смесительная установка низкого давления для производства изделий из двухкомпонентных полиуретанов серии ТЛ 1 (рис. 2).



Рисунок 2 – Заливочно-смесительная установка низкого давления

Установка предназначена для переработки (дозирования, смешения, заливки) всех типов жестких, эластичных, интегральных пено- и полиуретановых систем и полиуретановых клеев с вязкостью исходных компонентов от 10 до 70 000 мПа*с.

В состав заливочно-смесительной установки входят следующие основные функциональные

узлы: узлы: емкости для компонентов и очистителя, дозирующие узлы компонентов, поворотной стойки с закрепленным на ней смесительным устройством, системы автоматической промывки смесительной камеры, комплекта пневмооборудования, системы управления и комплекта электрооборудования. Система управления имеет ЖК-дисплей для визуализации параметров работы установки и клавиатуру для ввода параметров работы, интерфейс на русском языке, энергонезависимую память для хранения технологических настроек, а также обеспечивает световую и звуковую индикацию при выходе установленных параметров от заданных значений.

Все узлы автоматизированного заливочно-смесительного оборудования для производства шин смонтированы на общей раме, обеспечивая компактный дизайн и возможность размещения в небольшом помещении. Открытая конструкция обеспечивает доступ со всех сторон для технического обслуживания узлов. Установка легко транспортируется и поставляется готовой к запуску по принципу “подключай и работай”.

Созданное авторами наукоемкое автоматизированное оборудование по своим производственно-технологическим параметрам соответствуют лучшим мировым аналогам благодаря использованию принципиально новых идей, современной электронной компонентной базы и оригинального системного программного обеспечения [2].

Освоение технологии производства колес с полиуретановыми шинами позволяет расширять номенклатуру изделий (размеры колес по ширине, высоте, цветовой гамме и т. д.) для улучшения потребительских свойств выпускаемых и разрабатываемых инвалидных колясок и других технических средств социальной реабилитации.

Технические средства реабилитации инвалидов позволяют улучшить качество их жизни, содействовать их занятости в определенных сферах производства потребительских товаров, что обеспечивает достойную оплату их труда.

Представленная продукция также может быть использована и в других отраслях, например для изготовления колес для тележек объектов торговли, промышленных предприятий, оснащения медицинской мебели и т. д. Данные шины повсеместно используются производителями аналогичных инвалидных колясок практически во всем мире.

Литература

1. Ксенофонов, М. А. Создание эффективных наукоемких машин для производства различных изделий из полимерных композитов / М. А. Ксенофонов // Доклады НАН Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 7–12.
2. От земных проблем до космических / П. В. Кучинский [и др.] // Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ. – Минск: РИВШ, 2021. – 364 с.

УДК 621.396.6

МОНТАЖ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПО ТЕХНОЛОГИИ FLIP-CHIP С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Хацкевич А.Д., Ланин В.Л.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен процесс монтажа интегральных схем по технологии FLIP-CHIP с применением индукционного нагрева. Для локализации нагрева применен медный концентратор и ферритовые кольца. Инвертор построен по энергоэффективной схеме на основе ZVS-генератора. Установлено, что концентраторы вихревых токов и ферритовые кольца повышают скорость и равномерность нагрева. Скорость нагрева составила 3.7 °C/с при мощности 30 Вт.

Ключевые слова: индукционный нагрев, ZVS-генератор, пайка, термопрофиль.

MOUNTING OF INTEGRATED CIRCUITS BY FLIP-CHIP TECHNOLOGY USING INDUCTION HEATING

Khatskevich A., Lanin V.

*Belarusian state university of informatics and radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The process of mounting an integrated circuit using FLIP-CHIP technology using induction heating is considered. A copper concentrator and ferrite rings are used to localize the heating. The inverter is built according to an energy-efficient scheme based on a ZVS-generator. It has been established that eddy current concentrators and ferrite rings increase rate and uniformity of heating. The heating rate was 3.7 °C/s at a power of 30 W.

Key words: induction heating, ZVS-generator, soldering, thermal profile.

*Адрес для переписки: Ланин В.Л., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: vlanin@bsuir.by*

Введение. Создание межсоединений между многослойными структурами 2,5 и 3D электронных модулей посредством объемных припоечных шариковых выводов в современной микроэлектронике является сложной технологической задачей. Для формирования массива шариковых выводов на печатной плате необходимо правильно выбрать материалы и способ нагрева. Несоблюдение термического профиля нагрева приводит к увеличению риска теплового повреждения компонентов и значительно увеличивает количество дефектов. Бампы припоя на плате можно формировать индукционным нагревом, который создает вихревые токи и пондеромоторные силы в расплаве припоя, которые перемешивают многофазные структуры в жидких средах. Преимуществами индукционного нагрева является локальность нагрева, скорость нагрева, пониженные затраты энергии [1].

Практическая часть. Индуктор выполнен по схеме ZVS (Zero Voltage Switch)-генератора, работающего в импульсном режиме. Импульсный режим обладает высоким КПД, низким уровнем потерь, что важно для преобразователей среднего высокого диапазона мощностей [2].

Структурная схема прототипа инвертора на ZVS-генераторе представлена на рис. 1. При бесконечно коротком времени переключения динамические потери мощности отсутствуют, и все напряжение падает непосредственно на индуктивности коммутируемой цепи. В реальных схемах размыкание ключа, пропускающего ток, невозможно без преобразования энергии, запасенной в индукторе. Преобразование не происходит только в том случае, когда ток равен нулю. Такое состояние называется пассивным выключением,

так как момент перехода через ноль зависит от характера протекания тока в конкретной цепи, а участвующий в нем транзистор является коммутатором нулевого тока ZCS (Zero Current Switch).

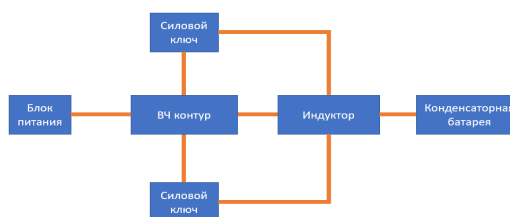


Рисунок 1 – Структурная схема ZVS генератора

При нулевом напряжении включение происходит в «идеальном» режиме без рассеяния мощности. Как и в предыдущем случае, оно является пассивным, поскольку форма напряжения на транзисторе определяется конкретной схемой, и оно принимает нулевое значение только в определенные моменты времени. Работающий таким образом ключ, соответственно, называется коммутатором нулевого напряжения ZVS. Ключи с коммутацией при нулевом напряжении (ZVS) разрабатываются исходя из возможности активного выключения и пассивного включения при спаде напряжения до нуля. Активное запаривание с малыми потерями достигается благодаря установке параллельно ключу достаточно высокой емкости. По сравнению с режимом HS снижение потерь здесь обеспечивается только при одном способе управления, как и в предыдущем случае: это PSM. Меньший уровень рассеиваемой мощности, однако, позволяет работать на более высоких частотах, чем при «жестком» переключении. Они также могут быть использованы в устройствах с

циклическим переключением, примером которых является параллельный резонансный конвертер с форсированным напряжением. Сопротивление R_{load} определяет активную составляющую нагрузки, включенную последовательно резонансной цепи.

Частота генератора была выбрана 630 кГц. Для локализации магнитного поля в схеме использованы ферритовые кольца марки 2000НМ. Под платой расположены концентраторы вихревых токов, выполненные из меди, которые позволяют добиться локализации электромагнитной энергии в зоне пайки. В качестве испытуемого образца выбран чип оперативной памяти (рис. 2).

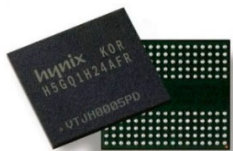


Рисунок 2 – Чип оперативной памяти

При помощи BGA-трафарета, подобранного под чип, на контактные площадки печатной платы была нанесена паяльная паста Mechanic XGSP80.



Рисунок 4 – ТРМ-210

Контроль температуры проводился при помощи измерителя ТРМ-210 и подключенного к нему термодатчика, данные с которого передаются на компьютер по шине RS-485 (рис. 4) для последующей обработки данных. Ток составил 2,6 А при напряжении 10,5 В. Сформированные шарики припоя соответствуют размерам контактной площадки и имеют правильную форму и блестящую

УДК 621.789

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ В МЕДИЦИНЕ

Храмкова А.С., Филонова М.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье проводится исследование в области технологии изготовления и обработки титана и его сплавов, а также их применение для изготовления изделий медицинского назначения.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы.

FEATURES OF MANUFACTURING AND APPLICATION OF TITANIUM AND ITS ALLOYS IN MEDICINE

Khramkova A., Filonova M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article conducts research in the field of technology for the manufacture and processing of titanium and its alloys, as well as their application for the manufacture of medical products.

Key words: titanium, titanium alloys.

Адрес для переписки: Храмкова А.С., ул. Балтийская, 4, Минск 220028, Республика Беларусь
e-mail: alinahramkova.com@gmail.com

поверхность, что свидетельствует об отсутствии перегрева (рис. 6). Термопрофиль пайки представлен на рис. 5.

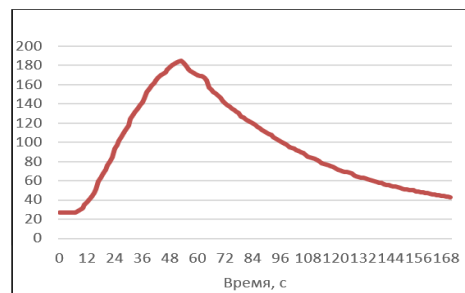


Рисунок 5 – Термопрофиль пайки

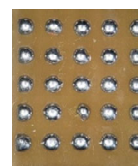


Рисунок 6 – Внешний вид сформированных шариков припоя на печатной плате

Таким образом, использование медных концентраторов вихревых токов и ферритовых колец позволяет повысить эффективность нагрева за счет концентрации электромагнитного поля в зазоре между катушкой индуктора и замкнутым магнитопроводом. Скорость нагрева 3.7 °C/с при мощности индуктора 30 Вт.

Литература

1. Ланин, В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. 2007. – № 5. – С. 162–167.
2. Основы силовой электроники: импульсные режимы работы / А. Колпаков [и др.] // Силовая электроника. – 2013. – № 2. – С. 46–52.

Титан является переходным металлом. Он присутствует в нескольких минералах, включая рутил и ильменит, которые хорошо распределены по земной коре. Несмотря на то, что титан такой же прочный, как некоторые стали, его плотность составляет лишь половину плотности стали. Титан широко используется в ряде областей, включая аэрокосмическую, энергетическую, автомобильную, химическую и нефтехимическую, производство спортивных товаров, стоматологическую и медицинскую промышленность. Большое разнообразие применений обусловлено его свойствами, в основном относительно высокой прочностью в сочетании с низкой плотностью и повышенной коррозионной стойкостью.

Что касается механических свойств, биомедицинские титановые сплавы, применяемые в качестве биоматериала в основном для замены твердых тканей, должны демонстрировать низкий модуль упругости в сочетании с повышенной прочностью, хорошей усталостной прочностью и хорошей обрабатываемостью. Механическое поведение титановых сплавов напрямую связано с составом и, главным образом, с термомеханической обработкой.

Коррозионная стойкость является одним из основных свойств металлического материала, применяемого в среде человеческого тела, и успех имплантата зависит от тщательного изучения этого явления. Эффективность имплантата напрямую связана с его способностью функционировать в агрессивных жидкостях организма. Как правило, эти жидкости состоят из ряда кислот и некоторого количества NaCl. В нормальных условиях его pH равен 7, однако он может быть изменен из-за реакции иммунной системы, например, в случае инфекции или воспаления. В случае процесса коррозии компонент имплантата может потерять свою целостность, что приведет к выходу из строя. Кроме того, выделение продуктов коррозии может привести к нежелательным биологическим реакциям. Безусловно, это будет зависеть от характера химических реакций на поверхности имплантата ввиду того, что коррозия по своей сути является химическим процессом.

Титан демонстрирует превосходную коррозионную стойкость, которая напрямую связана с образованием стабильного и защитного оксидного слоя, главным образом TiO_2 . Реакционную способность титана можно измерить по его стандартному электродному потенциалу (ряд стандартной электродвижущей силы (ЭДС)), который составляет $-1,63$ В. Такое значение указывает на то, что титан имеет высокую химическую активность и легко окисляется, образуя очень прочный и тонкий оксидный слой на поверхности титана. Этот оксидный слой пассивирует титан, что обеспечивает защиту от дальнейшего процесса коррозии, пока сохраняется этот слой. На самом

деле образование пассивирующих пленок на титане не означает прекращения коррозионных процессов. Это означает, что скорость коррозии будет значительно снижена. Поэтому титан устойчив к коррозии в окислительных средах, но не стоек в восстановительных средах.

Геометрия, шероховатость и другие характеристики поверхности имплантата также существенно влияют на взаимодействие поверхности и ткани, которое считается динамическим. Благодаря этим явлениям со временем могут развиваться новые этапы биохимических образований.

В первые несколько секунд после контакта в непосредственной близости от поверхности находятся только вода, растворенные ионы и свободные биомолекулы, но не клетки. Состав жидкости организма непрерывно меняется по мере того, как продолжают протекать воспалительные и заживляющие процессы, вызывая изменения в составе адсорбированного слоя биомолекул на поверхности имплантата до тех пор, пока он не уравнивается. Клетки и ткани в конечном итоге контактируют с поверхностью и, в зависимости от природы адсорбированного слоя, реагируют определенным образом, что может дополнительно модифицировать адсорбированные биомолекулы.

Шероховатость поверхности также играет важную роль в остеоинтеграции. Клетки остеобластов с большей вероятностью прикрепляются к шероховатым поверхностям, подвергнутым пескоструйной очистке, что означает меньшее количество клеток на более шероховатых поверхностях, снижение скорости клеточной пролиферации и увеличение продукции матрикса по сравнению с гладкой поверхностью [1].

Процессы механической обработки титановых сплавов включают в себя традиционные операции механической обработки (токарная обработка, торцевое фрезерование, высокоскоростная резка (ВСС), фрезерование, сверление), операции формообразования (холодная и горячая штамповка, гидроформовка, ковка) и альтернативные операции механической обработки (лазерная резка, гидроабразивная резка), прямое лазерное спекание металла). Механическая обработка титановых сплавов считается сложной из-за их относительно высокой прочности на растяжение, низкого предела пластичности, на 50 % более низкого модуля упругости (104 ГПа) и примерно на 80 % более низкой теплопроводности, чем у стали. Меньший модуль упругости может привести к большему эффекту «отпружинивания» и деформации заготовки. Поэтому требуются более жесткие настройки и большие зазоры для инструментов. В зонах контакта инструмента возникают высокие давления и температуры (граница инструмент-заготовка). Количество тепла, отводимого пластинчатой стружкой, составляет всего около 25 %, остальное отводится через инструмент. Благодаря

этому явлению титановые сплавы можно обрабатывать при сравнительно низких скоростях резания. При более высоких температурах, вызванных трением, титан становится более химически активным, и титан имеет тенденцию «привариваться» к наконечникам инструментов во время операций механической обработки. Перегрев поверхности может привести к поглощению кислорода и азота в междоузлиях, что приведет к образованию твердого и хрупкого альфа-корпуса. Твердые сплавы с высоким содержанием WC-Co (марки К) и быстрорежущие стали с высоким содержанием кобальта пригодны для использования в качестве режущих материалов при механической обработке титана [2].

Применение титана и титановых сплавов широко используется в изготовлении изделий медицинского назначения. Так, например, для лечения переломов костей, их фиксируют с помощью штифтов, вставленных через кожу в скелет, структурно поддерживаемых внешними стержнями. При внутренней фиксации фрагменты кости удерживаются спицами, винтами и пластинами «рис. 1».



Рисунок 1 – Фиксирующие устройства из титана для лечения переломов кости

Также, помимо вспомогательных элементов для лечения переломов, титан и его сплавы используются для изготовления цельных протезов. Конструкция имплантата для замены сустава должна основываться на характеристиках кинематики и передачи динамической нагрузки сустава. Свойства материала, форма и методы, используемые для фиксации имплантата к пациенту, определяют характеристики передачи нагрузки. Это один из наиболее важных элементов, определяющих долговременную выживаемость имплантата, поскольку кость реагирует на изменения в передаче нагрузки процессом ремоделирования, известным как закон Вольфа. Перегрузка интерфейса имплантат-кость или защита его от передачи нагрузки может привести к резорбции кости и последующему расшатыванию имплантата.

Медицинские устройства, изготовленные из материалов с памятью формы, используют другой физический подход и могут стягивать, расширять, сужать, раздвигать и делать сложные или проблематичные задачи в хирургии выполнимыми. Поэтому уникальные свойства материалов с памятью формы широко используются в медицинской сфере. Из них изготавливаются стенты, фильтры, системы перегородочной окклюзии, охватывающие фиксаторы, компрессионные скобы, стоматологические боры, сверхэластичные дуги и многое другое «рис. 2» [3].

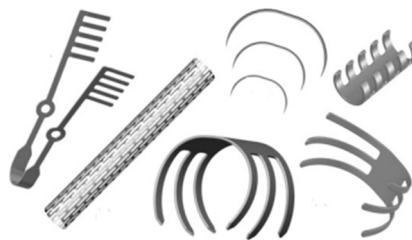


Рисунок 2 – Медицинские изделия, изготовленные из материалов с памятью формы

Использование титановых сплавов в качестве биоматериалов растет из-за их пониженного модуля упругости, хорошей биосовместимости, высокого отношения прочности к весу и повышенной коррозионной стойкости по сравнению с более традиционными сплавами из нержавеющей стали. В настоящее время ведутся исследования по разработке композитных материалов, содержащих материалы с памятью формы, которые окажутся экономически эффективными, и пористых материалов с памятью формы, которые позволят транспортировать жидкости организма снаружи внутрь кости.

Литература

1. ScienceDirect: Mechanical and corrosion behavior of titanium alloys additively manufactured by selective laser melting – A comparison between nearly β titanium, α titanium and $\alpha + \beta$ titanium [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399218313227>. – Date of access: 01.10.2022.
2. ScienceDirect: Machining of Titanium Alloys [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/machining-titanium-alloy>. – Date of access: 01.10.2022.
3. Электровек сталь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://evk.org/reference/titan-v-medicine.html>. – Дата доступа: 05.10.2022.

УДК 621.923.9

УСТРОЙСТВО ДЛЯ МНОГОДИСКОВОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ

Холов Ф.Б.¹, Луговой В.П.², Мирзоалиев И.¹

¹Таджикский технический университет имени М.С. Осими
Душанбе, Республика Таджикистан

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье приводится анализ конструкции и принципа работы станков для центробежной абразивной обработки. На основе анализа предложена новая конструкция устройства для многодисковой центробежной абразивной обработки шариков из самоцветных камней.

Ключевые слова: абразивная обработка, самоцветные камни, многодисковая устройства, производительность, формообразование.

DEVICE FOR MULTI-DISK CENTRIFUGAL ABRASIVE PROCESSING OF BALLS

Kholov F.¹, Lugovoi V.², Mirzoaliev I.¹

¹Tajik Technical University named after M.S. Osimi Dushanbe
Republic of Tajikistan

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article provides an analysis of the design and principle of operation of machines for centrifugal abrasive processing. Based on the analysis, a new design of a device for multi-disk centrifugal abrasive processing of semi-precious stone balls is proposed.

Key words: abrasive processing, semi-precious stones, multi-disc device, performance, shaping.

Адрес для переписки: Луговой В.П., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lyhavuyv@mail.ru

Используемые в ювелирной промышленности устройства для обработки отделочных, полудрагоценных и драгоценных камней малопроизводительны и в основном рассчитаны для условий единичного и мелкосерийного производства. В нынешних условиях имеется потребность в изготовлении изделий большими партиями, для чего потребуются высокопроизводительные станки. Поэтому разработки, направленные на повышение производительности обработки самоцветных камней, являются весьма актуальными.

Имеется множество устройств работающих по принципу центробежной абразивной обработки и имеющие высокую производительность. Рассмотрим некоторые из них.

Например, устройство для центробежно-абразивной обработки деталей, которое имеет вращающееся дно [1]. В данном устройстве при вращении дна, под действием центробежных сил, загрузочная масса, перемещаясь по криволинейному профилю дна и поднимается вверх. Взаимодействуя с неподвижной цилиндрической чашей контейнера снабженного вертикальными пластинами криволинейного профиля, установленными в крышке, заготовки замедляют ход и падают обратно в контейнер. За счет относительного движения заготовок и абразивной массы происходит объемная обработка заготовок. Недостатком данного устройства является невозможность управления формой обрабатываемых заготовок. Данное устройство в основном используется для удаления заусенцев и округления острых кромок заготовок.

Известно устройство для центробежной объемной обработки деталей [2]. В данном устройстве, дно снабжено группой перегородок, выполненных в виде ломаных поверхностей расходящихся от центра к его периферии. В этом случае рабочей среде сообщается дополнительное перемещение по дну рабочей емкости в радиальном направлении. Рабочая среда получает линейную скорость равную скорости вращения дна и под действием центробежных сил подается вверх к неподвижной образующей части барабана, теряет скорость и падают обратно на дно контейнера.

Недостатком данного устройства является недостаточная относительная скорость скольжения абразив-заготовки и большие ударные нагрузки. Поэтому использование данного устройства для обработки хрупких заготовок, какими являются самоцветные камни, приведет к поломкам заготовок и появлению трещины, что снижает качество обработки.

Имеется также устройство для абразивной обработки [3] которое снабжено абразивным кольцом, размещенным на границе между частями дна на его верхней части. Каждая часть дна снабжена индивидуальным приводом. Такое конструктивное выполнение устройства позволяет повысить интенсивность обработки за счет разных скоростей вращения частей дна. Наличие абразивного кольца между частями дна приводит к дополнительному съему материала и повышает производительность обработки.

Недостатком данного устройства является неравномерный износ абразивного кольца и быстрая потеря работоспособности. Другое устройство используемое для центробежно-абразивной обработки деталей имеет барабан с вращающимся дном и неподвижной верхней частью [4]. Вращающееся дно изготовлено из абразивного материала, а стенки образующие барабан расположены перпендикулярно к его вращающему дну. Дополнительно к этому в неподвижной верхней части смонтированы пластины, перемещающие заготовки от центра к периферии и из периферии к центру.

Недостатком данного устройства является наличие одного абразивного инструмента с неизменной зернистостью, что ограничивает функциональные возможности устройства.

Целью нашей разработки является повышение производительности деталей типа шаров, повышение функциональной возможности устройства, выражающееся в возможности одновременного формообразования и чистовой обработки.

Поставленная цель достигается тем, что абразивные диски установлены на вращающейся вертикальной оси совпадающей с осью симметрии цилиндрической части барабана, расстояние между дисками больше размера наибольшей из обрабатываемых заготовок. Дополнительно к этому диски имеют различную зернистость и расположены в порядке убывания зернистости снизу вверх.

Конструкция устройства приведена на рис. 1. Устройство состоит из корпуса 1, электродвигателя 2, ременной передачи 3, шпинделя 4, абразивных дисков 5, барабана 6, резинового покрытия 7, крышки 8, электронного устройства регулирования частоты вращения электродвигателя 9.

Электродвигатель 2 установлен в корпусе 1. На валу электродвигателя и шпинделе станка установлены шкивы связанные ремнем. Диски 5 установлены на шпинделе 4. Крышка 8 устанавливается сверху барабана 6 и предохраняет заготовку от выпадения.

Производится одновременно обработка несколькими дисками. В качестве заготовок для загрузки первого диска служат кубики из самоцветных камней, а в качестве заготовок второго диск, заготовки обработанные в первом диске, в качестве заготовок для загрузки третьего диска, заготовки обработанные во втором диске и т. д. Абра-

зивные диски 5 приводятся во вращательное движение шпинделем 4, который получает вращение от электродвигателя 2 посредством ременной передачи. Необходимая частота вращения устанавливается электронным регулятором 9.

При вращении абразивного диска заготовки, вращаясь вместе с диском, под действием центробежных сил перемещаются от центра к периферии. Соприкасаясь с резиновым покрытием барабана, замедляют скорость перемещения относительно барабана, но при этом возрастает скорость относительного движения заготовка-абразивный диск за счет чего возрастает интенсивность обработки.

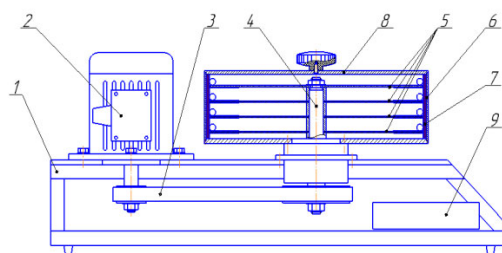


Рисунок – Схема устройства для многодисковой центробежной абразивной обработки шариков

Данное устройство позволяет существенно повысить производительность и точность обработки деталей типа шариков из самоцветных камней, повышает функциональную возможность выражающееся в возможности одновременного выполнения, формообразование, черновой и чистовой обработки. При необходимости, используя абразивные диски одинаковой зернистости, при помощи данного устройства можно выполнять только одну операцию, но с большой производительности.

Литература

1. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей : авт. свид. СССР 1093507 / А. А. Серегин, В. В. Рябов и Л. Ф. Борзина. – Оpubл. 23.05.1984.
2. Центробежная установка для объемной обработки деталей : авт. свид. СССР 1549728 / С. С. Фасатуров. – Оpubл. 15.03.1990.
3. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей : авт. свид. СССР 1093508 / Л. Ф. Косухин, Н. С. Федотва – Оpubл. 23.05.1984.
4. Устройства для центробежной абразивной обработки шариков : пат. ТЖ 1199 / Н. Б. Имомов, И. Мирзоалиев, А. И. Мирзоалиев, М. С. Мамадназарова, С. Т. Амонов, Н. М. Назарзода. – Оpubл. 08.07.2021.

УДК 621

СИСТЕМА ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРОВ

Чикичев А.Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описано пагубное влияние трехмерной печати на организм человека. Предложены предполагаемые пути решения проблемы. Приведена конструкция фильтрующего устройства.

Ключевые слова: трехмерная печать, ABS-пластик, PLA-пластик, выброс вредных веществ, ультрадисперсные частицы.

AIR FILTRATION SYSTEM FOR 3D PRINTERS

Chikichev A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The detrimental effect of three-dimensional printing on the human body was described. Suggested ways of solving the problem are proposed. The construction of the air filtration system was described.

Key words: 3D-printing, ABS-plastic, PLA-plastic, emission of harmful substances, ultrafine particles.

Адрес для переписки: Чикичев А.Д., пр. Рокоссовского, 41, 95, Минск 220094, Республика Беларусь
e-mail: alexandr.chikichev@yandex.ru

Трехосевые принтеры все больше набирают популярность в качестве компактных инструментов быстрого прототипирования для различных нужд производства. В особенности это касается сегмента недорогих 3D-принтеров, использующих аддитивную производственную технологию, также известной, как технология термопластичного полимерного наслаивания.

Большинство домашних 3D-принтеров в настоящее время используют акрилонитрил бутадиен стирол (АБС (ABS) пластик) или полилактид (ПЛА (PLA) пластик) в качестве филамента для 3D-печати. PLA-пластик биоразлагаем, поскольку произведен на основе кукурузы, печать им производится при температуре примерно равной 180 °C сопла и комнатной температуре печатного стола соответственно. ABS более термостоек нежели предыдущий полимер – 220 °C сопла и примерно 80 °C стола.

При обычной комнатной температуре пластики не являются опасными, но исследования, проводимые в США, Канаде, Германии и многих других странах показывают, что трехмерная печать может быть опасна за счет выделения вредных веществ при нагреве филамента, и угрозу несут не только микрочастицы, выделяемые при нагреве различных пластиков, но еще летучие органические соединения, так называемые ЛОС, и мельчайшие частицы нанометровых размеров (ультрадисперсные частицы) [1].

В ходе исследований было выяснено, что в процессе 3D-печати при температуре в промежутке от 170 °C до 240 °C выделяются как газы, так и мелкодисперсные частицы. Первичные газовые продукты термического разложения ABS-пластика при очень высоких температурах включают в себя ряд таких веществ, как монооксид углерода и гидрид цианида, а также ряд других летучих соединений.

Эффективность существующих недорогих приборов быстрого прототипирования, основанных на умеренном или же высокотемпературном плавлении и экструзии в настоящий момент не вызывает каких-либо сомнений, однако мы не имеем никакого представления о действии мелкодисперсных выделений из этих 3D-принтеров. Ситуацию ухудшает и тот факт, что недорогие 3D-принтеры выпускаются без какой-либо вентиляции или же фильтрующего устройства. В связи со всем вышеизложенным, можно сделать вывод о чрезвычайно пагубном влиянии мелкодисперсной пыли, выделяемой при термопластичном экструдировании пластиков.

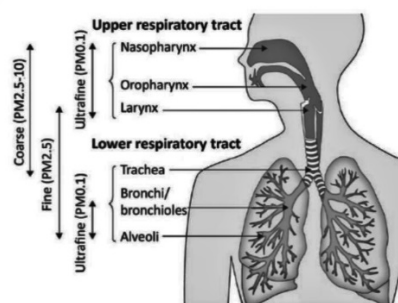


Рисунок 1 – Компонентное распределение частиц в организме [1]

На рис. 1 показаны основные органы, на которых могут оседать мелкодисперсные частицы разных диаметров (PM 5, 2,5 и 0,1): крупные частицы с диаметром 2,5–10 мкм осаждаются преимущественно в верхних дыхательных путях и крупных проводящих дыхательных путях. Мелкие частицы с диаметром 0,1–2,5 мкм осаждаются по всему дыхательному тракту, особенно в мелких дыхательных путях и альвеолах. Ультрадисперсные фракции PM0.1 могут осаждаться в альвеолярной области [1].

Для того чтобы минимизировать, а в лучшем случае исключить вредные выбросы веществ со стороны 3D-принтера, применим технологию фильтрации воздуха средствами HEPA фильтров.

Для того, чтобы проводить очистку воздуха во время работы, будем использовать самый эффективный из доступных HEPA фильтров – класс H12. Его эффективности (99,5 %) и способности фильтровать частицы размером более 0,4 мкм, вполне достаточно для фильтрации 80 процентов частиц, образующихся при работе принтера.

Для того, чтобы удерживать наибольшее количество частиц в объеме принтера спроектируем короб, покрывающий весь принтер целиком. Конструкция в сборе представлена на рис. 2.

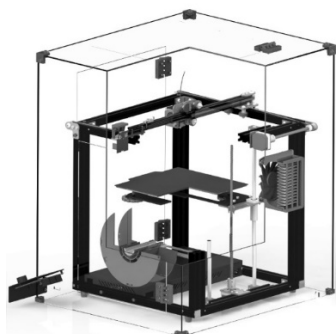


Рисунок 2 – Конструкция кожуха 3D-принтера с системой фильтрации воздуха

В качестве нагнетающего воздух устройства будем использовать два вентилятора, диаметром

120 миллиметров каждый. В технических характеристиках вентиляторов указано, что каждый из них обладает производительностью в 25 литров в секунду, что при внутреннем объеме кожуха принтера в 175 литров, позволит пропустить через фильтр весь объем воздуха примерно за 3 секунды.

Данный метод – самая простая и дешевая мера защиты от вредных выбросов 3D-принтера, которая должна быть предусмотрена изготовителем в каждом выпускаемом принтере.

Так же, могут быть использованы и другие методы фильтрации воздуха, например: ионнообменный, плазмохимический или плазмокаталитический. Однако технологии этих методов тяжело применимы для категории принтеров базового уровня из-за их сложности, габаритов, либо высокой стоимости.

В заключение, можно сделать вывод о необходимости более детального изучения данной темы, обязательном использовании различных систем местной и общеобменной вентиляции в помещениях 3D-печати, использовании фильтрующих систем, а также о необходимости создания стандартов безопасности в сфере аддитивных технологий.

Литература

1. Aika Davis. VOC Emissions from FDM Desktop 3D Printers / Aika Davis // Underwriters Laboratories Inc. – Atlanta, GA: Safety Science of 3D Printing Summit. – 2017.
2. Guarnieri, M. Outdoor air pollution and asthma / M. Guarnieri, J. R. Balmes // The Lancet. – 2014. – Vol. 383 (9928). – P. 1581–1592.

УДК 539.216;539.22

ТЕКСТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ ОЛОВА, ИНДИЯ, ВИСМУТА И ИХ СПЛАВОВ Шепелевич В.Г.¹, Гольцев М.В.², Гусакова О.В.³, Гусакова С.В.¹

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский государственный медицинский университет

³Международный государственный экологический институт имени А.Д.Сахарова БГУ,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования состава и ориентации зерен в фольге олова, индия, висмута и их сплавов. Установлено формирование текстуры при высокоскоростном затвердевании, предложен механизм преимущественного роста зерен в фольге в зависимости от типа кристаллической решетки и сил связей в ней.

Ключевые слова: Высокоскоростное затвердевание, олово, индий, висмут, сплавы, текстура.

TEXTURE OF RAPIDLY HARDENED TIN, INDIUM, BISMUTH FOILS AND THEIR ALLOYS Shepelevich V.¹, Goltsev M.², Gusakova O.³, Husakova S.¹

¹Belarusian State University

²Belarusian State Medical University

³International Sakharov Environmental Institute BSU,
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of studying the composition and orientation of grains in the foil of tin, indium, bismuth and their alloys are presented. The formation of texture during high-speed solidification has been established, and a mechanism for preferential grain growth in foil has been proposed depending on the type of crystal lattice and bond strengths in it.

Key words: high speed solidification, tin, indium, bismuth, alloys, texture.

Адрес для переписки: Гусакова С.В., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: husakova@bsu.by

Сплавы на основе олова, индия и висмута, не содержащие свинец и кадмий, используются в качестве легкоплавких припоев, безопасных для человека и окружающей среды. Используемые металлы являются анизотропными и их свойства, и свойства сплавов на их основе зависят от текстуры (преимущественной ориентации зерен). Текстура должна быть учтена при изготовлении припоев и другой продукции. Вопреки большому количеству исследований указанных легкоплавких сплавов, формирование текстуры изучено недостаточно. Поэтому в данном сообщении представлены результаты исследования текстуры олова, индия, висмута и их твердых растворов, эвтектики и промежуточных фаз.

Текстура быстрозатвердевших фольг изучена рентгеновским методом, используя обратные полюсные фигуры. Полюсные плотности p_{hkl} , дифракционных линий рассчитаны методом Харриса. А также методом ДОЭ с помощью дифракционной приставки фазового анали к растровому электронному микроскопу. Анализировалась зеренная структура на поверхность фольги, контактирующей с поверхностью кристаллизатора. Для изготовления фольги кусочек сплава вырезался из

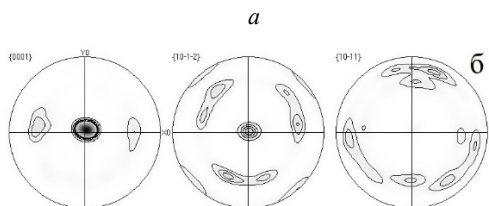
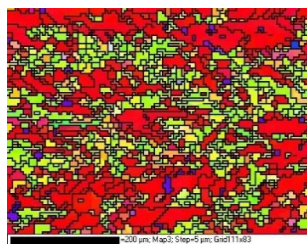
слитка, затем расплавлялся в кварцевой ампуле при температурах 450–600 К и капля расплава инжектировалась на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Толщина быстрозатвердевших фольг 30–80 мкм. Согласно вычислениям [1], скорость охлаждения расплава составила 10^5 – 10^6 К/с.

Быстрозатвердевшие фольги олова имели текстуру (100), индия – (101), висмута – двойную текстуру $(10\bar{1}2) + (0001)$ (табл.1). Плоскости (100) олова и (101) индия и их твердых растворов имеют наибольшую плотность атомов, что и определяет преимущественный рост зерен с такой ориентацией и формирование текстуры [2].

Формирование текстуры $(10\bar{1}2)$ в фольгах висмута и его сплавах вызвано кристаллической структурой и ориентацией ковалентных связей, которые образуют между собой углы $95,5^\circ$. Две ковалентные связи каждого атома располагаются в одной плоскости $(10\bar{1}2)$. Третья ковалентная связь связывает два атома, находящихся в соседних плоскостях $(10\bar{1}2)$. Разорванные ковалентные связи захватывают атомы жидкой фазы, что и ведет к быстрому росту зерен, в которых плоскости $(10\bar{1}2)$ перпендикулярны направлению теплового потока [8].

Таблица 1. Полюсные плотности дифракционных линий олова, индия, висмута и их сплавов

Sn	Sn	In	In	Bi	Bi	Bi- 2ат.%Sn	Bi- 2ат.%In
Дифракц. линии	Полюсные плотн.	Дифракц. линии	Полюсные плотн.	Дифракц. линии	Полюсные плотн.	Полюсные плотн.	Полюсные плотн.
200	5,9	002	0,7	$10\bar{1}2$	4,1	8,9	7,1
101	0,1	110	0,6	$10\bar{1}4$	0,1	0,2	0,1
220	0,0	112	0,7	$11\bar{2}0$	0,2	0,1	0,4
211	0,0	200	0,4	$10\bar{1}5$	0,3	0,2	0,4
301	0,0	103	0,7	$20\bar{2}2$	0,5	0,2	0,5
112	0,0	211	0,7	$10\bar{1}7$	0,1	0,1	0,2
-	-	202	3,5	$20\bar{2}5$	0,3	0,1	0,2
-	-	213	0,6	$21\bar{3}0$	1,0	0,1	0,1
-	-	-	-	$12\bar{3}2$	1,0	0,1	0,3
-	-	-	-	0009	3,2	0,1	1,1



a – зеренная структура, *б* – полюсная фигура

Рисунок 1 – Текстура фольги Bi

На рис. 1 приведена карта ориентации зерен и полюсная плотность висмута, полученная методом ДОЭ.

Индий и олово образуют β -фазу (In_3Sn) и γ -фазу ($InSn_4$). Быстрозатвердевшие фольги β -фазы имеют текстуру (101) и γ -фаза – текстуру (0001). Формирование текстур в этих фазах вызвано наибольшей плотностью атомов в соответствующих плоскостях, что определяет преимущественный рост с такой ориентацией. Текстура быстрозатвердевших фольг эвтектики In-47 ат. % Sn (101) β -фазы и $(10\bar{1}2)$ γ -фазы [3].

Быстрозатвердевшие фольги сплава $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$ состоят из ϵ - ($InBi$) и γ -фазы ($InSn_4$). В табл. 2 приведены значения полюсных линий этих фаз. В ϵ -фазе наблюдается слабовыраженная двойная текстура (211) + (112), а в γ -фазе – четкая текстура (0001). Формирование текстуры в γ -фазе связана с тем, что плоскость (0001) является наиболее плотноупакованной. Исследования быстрозатвердевших фольг

тройных сплавов на основе висмута, индия и олова показали, что наблюдается формирование двойных текстур висмута ($10\bar{1}2$) + (0001), ϵ -фазы (InBi) (102) + (101) и олова (100), соответственно.

Таблица 2. Полусные плотности дифракционных линий ϵ - и γ -фазы фольги сплава $\text{Bi}_{32}\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}$

Дифракц. линии	ϵ -фаза	Дифракц. линии	γ -фаза
111	0,6	$10\bar{1}1$	0,0
200	0,3	$11\bar{2}0$	0,1
002	0,2	0002	5,2
102	0,7	$11\bar{2}1$	0,2
211	2,0	$20\bar{2}0$	0,1
112	2,0	$20\bar{2}1$	0,4
220	1,7	-	-
202	0,8	-	-
212	0,7	-	-

Таким образом, формирование текстуры олова, индия и висмута, а также бинарных и тройных сплавов на их основе определяется плотностью атомов в плоскостях и ориентацией ковалентных связей.

Литература

1. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
2. Гусакова, О. В. Зеренная структура и текстура быстрозатвердевших фольг олова, полученных при различных режимах сверхбыстрого охлаждения / О. В. Гусакова, В. Г. Шепелевич // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 54–57.
3. Шепелевич, В. Г. Текстура быстрозакаленных фольг висмута, сурьмы и их сплавов / В. Г. Шепелевич // *Кристаллография*. – 1991. – Т. 36, № 1. – С. 238–239.

УДК 621.315.592; 539.12.04

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ

Ювченко В.Н., Комаров А.Ф., Мискевич С.А., Ермолаев А.П.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведены расчеты пространственно-временной эволюции концентрации носителей заряда для начальных стадий формирования трека иона (до 10^{-13} с) в кремниевых структурах, облучаемых ионами Fe и Xe с энергиями до 547 МэВ. Рассчитанная максимальная концентрация возбужденных электронов в центральной области трека иона Xe с энергией 547 МэВ составляет $1,6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ и сохраняется равной $5,4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ к моменту времени 100 фс. Получены аналитические приближения рассчитанных зависимостей концентрации электронов от времени и расстояния до центра трека иона.

Ключевые слова: кремниевые приборные структуры, одиночные случайные эффекты, быстрые тяжелые ионы, моделирование, метод Монте-Карло.

THE MODEL OF TIME AND SPACE EVOLUTION OF EXCITED CARRIERS DENSITY IN THE ACTIVE REGION OF ELECTRONICS DEVICES IRRADIATED WITH HIGH-ENERGY IONS

Yuvchenko V., Komarov A., Komarov F., Yermalaeu A.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Time and space evolution of excited carriers density for the initial stages (up to 10^{-13} s) of ion track formation in the silicon structures irradiated with Fe and Xe ions have been simulated. The calculated maximum concentrations of excited electrons in the central region of Xe ion track with an energy of 547 MeV is $1.6 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ and remains as high as $5.4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ by the time of 100 fs. Analytical approximations of calculated dependencies are obtained.

Key words: silicon transistor structures, single event effects, swift heavy ions, simulation, Monte-Carlo method.

*Адрес для переписки: Ювченко В.Н., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: yuvchenko@bsu.by*

Актуальной задачей при производстве интегральных микросхем и дискретных силовых МОП-транзисторов, используемых в космических аппаратах, является повышение их радиационной стойкости к одиночным случайным эффектам (ОСЭ) как непосредственно от тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), входящих в состав

космических лучей, так и от вторичных ионов, создаваемых в результате ядерных столкновений протонов космической радиации с ядрами вещества. Энергии, выделенной такой частицей в приборной структуре, достаточно, чтобы произвести на очень короткое время сверхвысокоплотную электронную плазму вдоль траектории иона. Со-

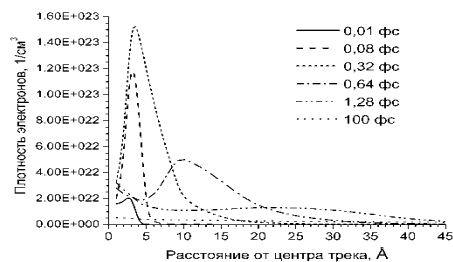
ставляющие ее электронно-дырочные пары увлекаются дрейфом и/или диффузией, образуя дополнительный накопленный заряд, который, в свою очередь, может вызывать ОСЭ, такие как вторичный пробой, связанный с открытием паразитного биполярного транзистора при пролете заряженной частицы (Single-Event Burnout – SEB) и пробойм подзатворного диэлектрика (Single-Event Gate Rupture – SEGR).

Модели ОСЭ, используемые в программных комплексах для моделирования приборов микроэлектроники, (например, Atlas фирмы Silvaco и Sentauros Device фирмы Synopsis) используют величину линейных потерь энергии (ЛПЭ) в качестве основного параметра, характеризующего как налетающую частицу, так и материал чувствительного объема прибора. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что для ионов с одинаковой ЛПЭ, но разной скоростью наблюдаются разные накопленные заряды и сечения ОСЭ как в силовых МОПТ, так и в глубоко субмикронных КНИ-микросхемах памяти [1].

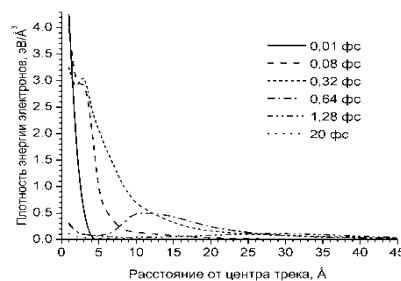
Методы. Для расчета пространственно-временной эволюции концентраций возбужденных электронов, валентных дырок и дырок на глубоких атомных уровнях в кристаллическом кремнии, создаваемых в области трека высокоэнергетического иона, использован программный комплекс TREKIS-3 [2, 3], позволяющий моделировать пролет одиночного иона в невозмущенном материале методом Монте-Карло. Модель учитывает первичную ионизацию материала налетающей ТЗЧ; пространственное распределение создаваемых быстрых электронов и кинетику вызываемых ими ионизационных каскадов; релаксацию дырок глубоких атомных оболочек, созданных ионизацией, включая Оже- и радиационные процессы распада. Учет коллективной реакции электронной подсистемы мишени на вносимое возбуждение проводился с использованием формализма комплексной диэлектрической функции. Эффективные массы электронов и валентных дырок рассчитывались из плотности состояний. Эффективный заряд налетающего иона рассчитывался по формуле Баркаса. Количество итераций при моделировании составляло 1000; толщина слоя кристаллического кремния 10 нм; время – до 1000 фс после пролета иона.

Результаты расчетов. Расчеты проводились для начальных стадий формирования трека иона в кристаллическом Si, облучаемом ионами Fe с энергией 16 МэВ (ЛПЭ 20,3 МэВ·см²/мг) и Хе с энергией 547 МэВ (ЛПЭ 69,1 МэВ·см²/мг). Результаты расчетов для облучения кремния ионами Хе, E = 547 МэВ приведены на рис. 1. Максимальная концентрация возбужденных электронов в области трека иона Хе наблюдается в момент времени 0,32 фс и составляет 1,6·10²³ см⁻³ на расстоянии 3 Å от траектории иона. К моменту

времени 100 фс избыточная концентрация электронов в центральной области трека составляет 5,4·10²¹ см⁻³ и 2,3·10²¹ см⁻³ для ионов Хе, E = 547 МэВ и Fe, E = 16 МэВ, соответственно. Такие сверхвысокие концентрации носителей заряда могут приводить к возникновению ОСЭ – в частности, вторичному пробой, связанному с открытием паразитного биполярного транзистора в активной области МОП-транзистора, а также к аtermическому плавлению трековой области.



а



б

Рисунок 1 – Рассчитанная зависимость плотности возбужденных электронов (а) и плотности энергии в электронной подсистеме Si (б) от радиального расстояния до траектории иона Хе с энергией 547 МэВ для различных моментов времени после пролета иона

Аналитические приближения рассчитанных зависимостей $N_e(r, t)$ получены аналогично приближениям в [4] для плотности энергии в электронной подсистеме, при этом хвост распределения носителей для больших r аппроксимируем распределением Вейбулла с $k = 2$ (см. рис. 2):

$$N_e(r, t) = Ar^k \frac{\left(1 - \frac{r + \theta}{R + \theta}\right)^{\frac{1}{a}}}{r + \theta} (1 + K) + Br \exp\left(-\left(\frac{r}{\lambda}\right)^2\right), \quad (1)$$

где $K = a \left(\frac{r - b}{d} \exp\left(\frac{b - r}{d}\right)\right)$, $\lambda = R / \ln(2)^{1/2}$.

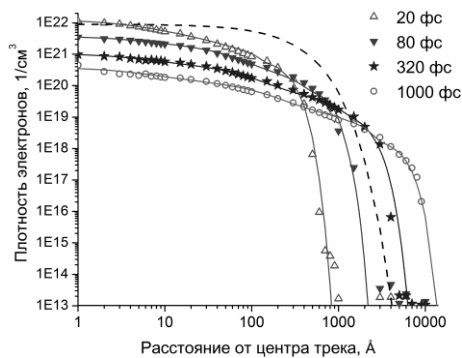
Для иона Fe с энергией 16 МэВ в Si получены следующие значения коэффициентов в (1):

$$\Theta = b = 1 \text{ Å}; k = 0,42; a = 1,5;$$

$$d(t) = 89 - 72 \exp(-t / 4,86 \cdot 10^{-13}),$$

$$R(t) = 5,82 \cdot 10^3 - 5,73 \cdot 10^3 \exp(-t / 1,34 \cdot 10^{-12}).$$

Отметим, что стандартная функция генерации электронно-дырочных пар в треке ТЗЧ ПО Atlas



--- расчет с использованием стандартной функции Atlas (2) с $R_0 = 20$ нм

Рисунок 2 – Аппроксимация рассчитанных зависимостей плотности возбужденных электронов в кристалле Si от радиального расстояния до траектории иона Fe, $E = 16$ МэВ в различные моменты времени

$$G(r, l, t) = L(l) \cdot R(r) \cdot T(t), \quad (2)$$

т. е. форма распределения носителей не меняется со временем, что не согласуется с результатами наших расчетов методом Монте-Карло.

Литература

1. Single-event upsets and multiple-bit upsets on a 45 nm SOI SRAM / D. F. Heidel [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – Vol. 56, № 6. – P. 3499–3504.
2. Medvedev, N. A. Time-resolved electron kinetics in swift heavy ion irradiated solids / N. A. Medvedev, R. R. A. ymzhanov, A. E. Volkov, // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 48. – P. 355303 (1–24).
3. Rymzhanov, R. A. Effects of model approximations for electron, hole, and photon transport in swift heavy ion tracks / R. A. Rymzhanov, N. A. Medvedev, A. E. Volkov // Nucl. Instrum. Methods B. – 2016. – Vol. 388. – P. 41–52.
4. Waligorski, M. P. R. The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water / M.P.R. Waligorski, R. N. Hamm, R. Katz, // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part D. – 1986. – Vol. 11 – P. 309–319.

УДК 621.382.323

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЕВ p-GaN и AlGaN В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ТИПА p-GaN/AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Юник А.Д., Соловьёв Я.А., Шидловский А.Г.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом лазерной интерферометрии и сканирующей электронной микроскопии установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного сигнала, регистрируемого детектором лазерного интерферометра с рабочей частотой 670 нм, в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме в атмосфере $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ слоев p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типа p-GaN/AlGaN/GaN. Установлено, что при переходе границы раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела. Полученные результаты позволяют с помощью лазерной интерферометрии в реальном масштабе времени определять время окончания процесса реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме слоев AlGaN и p-GaN в гетероструктурах типа p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, индуктивно-связанная плазма, лазерный интерферометр, нитрид галлия, гетероструктура

DETERMINATION OF THE END TIME OF THE PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF p-GaN AND AlGaN LAYERS OF THE p-GaN/AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURE WITH TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS USING LASER INTERFEROMETRY

Yunik A, Solovjov J., Shydlovski A.

JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Regularities of the changing in time of the intensity of the reflected signal recorded by the detector of the laser interferometer with an operating frequency of 670 nm during the inductively coupled plasma reactive ion etching in a $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ atmosphere of p-GaN and AlGaN in p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures has been established by laser interferometry and scanning electron microscopy methods. It has been established that during the crossing of the p-GaN/AlGaN and AlGaN/GaN interface, there is an abrupt change in the intensity of the reflected signal within 2,7–9,5 % for 20–40 s, due to changes in the aluminum concentration, refractive indices, and etching rate at the interfaces. The obtained makes it possible to determine the end time of the inductively coupled plasma reactive ion etching of the AlGaN and p-GaN layers using laser interferometry in real time in p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures with two-dimensional electron gas.

Key words: plasma-chemical etching, inductively coupled plasma, laser interferometer, gallium nitride, heterostructure.

Адрес для переписки: Соловьёв Я.А., 20108, Минск, ул. Корженевского, 16, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Филиал «Транзистор»
e-mail: JSolovjov@integral.by

В последнее десятилетие активное развитие получила технология создания устройств на широкозонных полупроводниках, в частности на гетероструктурах (ГС) на основе GaN с двумерным электронным газом (ДЭГ). Слои ГС на основе GaN подвергают плазмохимическому травлению (ПХТ) при формировании изоляции устройств меза-канавками [1]; областей затвора [2]; низкоомных омических контактов [3] и др. Как правило, ПХТ слоев ГС на основе GaN реализуют реактивным ионным травлением в индуктивно-связанной плазме (РИТ ИСП) в хлорсодержащих средах (Cl_2 или BCl_3) с добавлением кислорода (O_2) [4]. Основной особенностью данного процесса является необходимость прецизионного травления слоев ГС толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров.

Наиболее удобным методом для определения времени окончания процесса ПХТ является метод ЛИ. Общий принцип детектирования сигнала лазерным интерферометром при РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN заключается в возникновении интерференции между потоками излучения, возникающими при их отражении от резистивной маски, поверхности слоев ГС и границы между сапфировой подложкой и слоями ГС. Отраженные световые потоки от слоев накладываются при детектировании, что интерпретируется в виде интерферограммы зависимости отражательной способности образца от времени [5].

Настоящая работа посвящена определению времени окончания процесса РИТ ИСП слоев AlGaIn и p-GaN в ГС p-GaN/AlGaIn/GaN с ДЭГ с помощью ЛИ в реальном масштабе времени.

В данной работе использовали ГС на подложке сапфира диаметром 100 мм типа GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN с суммарной толщиной слоев порядка 2600 нм.

РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN выполняли на установке плазмохимического травления типа STE ICR200ES (ЗАО «НТО», Российская Федерация) в смеси $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ с расходами 40/10/5 см³, соответственно. Давление в камере поддерживалось на уровне 2 Па, мощность источника реактивно-ионного травления – 30 Вт, источника индуктивно-связанной плазмы – 300 Вт. Контроль изменения интенсивности световых потоков при травлении образцов и их интерпретацию в виде интерферограмм осуществляли с помощью лазерного интерферометра Horiba LEM G50 с рабочей длиной волны детектора 670 ± 10 нм.

Глубину травления после окончания процесса дополнительно контролировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), типа S-4800 (Hitachi, Япония).

Из полученных в результате травления интерферограмм были установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного

сигнала, регистрируемого детектором ЛИ с рабочей частотой 670 нм, в процессе РИТ ИСП в атмосфере $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ слоев p-GaN и AlGaIn в ГС типа p-GaN/AlGaIn/GaN, обусловленные изменениями их показателей преломления и скоростей травления.

При РИТ ИСП слоев GaN и p-GaN интенсивности отраженного сигнала изменяются по периодическому закону с периодом изменения толщины порядка 144 нм, а для слоев AlGaIn – порядка 148 нм, что обусловлено различиями их показателей преломления и скоростей травления.

При переходе в процессе РИТ ИСП границы раздела p-GaN/AlGaIn и AlGaIn/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела (рис. 1).

Изменение периодичности интерферограммы, сопровождающееся скачком интенсивности при переходе фронта травления через границу раздела p-GaN/AlGaIn и AlGaIn/GaN позволяет с помощью ЛИ в реальном масштабе времени определять время окончания процесса РИТ ИСП слоев AlGaIn и p-GaN в ГС типа p-GaN/AlGaIn/GaN с ДЭГ. В частности, при РИТ ИСП слоя p-GaN на AlGaIn фрагмент синусоиды с последующим скачком в течение 900 с на интерферограмме (рис. 1) соответствует полному удалению слоя p-GaN толщиной порядка 100 нм, что подтверждается результатами СЭМ (рис. 2).

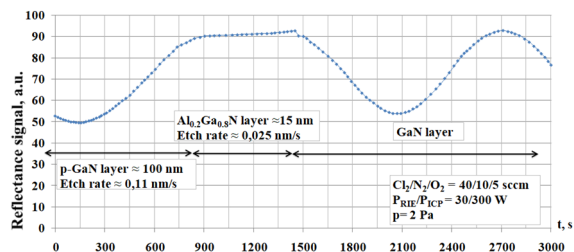


Рисунок 1 – Интерферограмма слоев p-GaN, AlGaIn и GaN гетероструктуры GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN

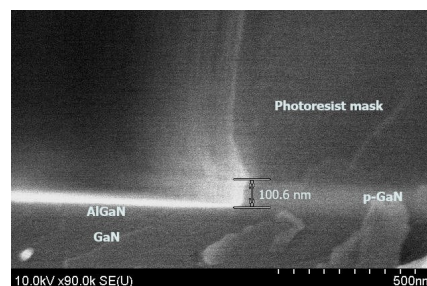


Рисунок 2 – СЭМ-изображение гетероструктуры GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN после травления слоя p-GaN

Полученные результаты могут быть использованы для формирования элементов устройств СВЧ и силовой электроники на основе ГС типа AlGaIn/GaN.

Литература

1. Rüdiger Quay. Gallium Nitride Electronics / Rüdiger Quay. – Springer Series in Materials Science. Springer Berlin, Heidelberg, 2008. – 470 p.
2. p-GaN gate enhancement-mode HEMT through a high tolerance self-terminated etching process / Y. Zhou [et al.] / IEEE J. Electron Devices Soc. – 2017. – Vol. 5, № 5. – P. 340–346.
3. Юник, А. Д. Влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства оми-

ческого контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN / А. Д. Юник, Я. А. Соловьёв, Д. В. Жигулин // Доклады БГУИР. – 2022. – Vol. 20, № 3. – P. 13–19.

4. Highly selective dry etching of GaN over AlGaN using inductively coupled Cl₂/N₂/O₂ plasmas / Y. Han [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 2003. – № 42. – P. L1139–L1141.

5. Yoshio Nishi. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology (2nd Edition) / Yoshio Nishi, Robert Doering. – CRC Press, 2007. – 1720 p.

УДК 53.084

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА DEVI ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ SO₂ Литвинович Г.С., Бручковский И.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены конструктивные изменения инструмента DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument), внесенные по результатам полевых измерений выбросов диоксида серы. Уделено внимание модификации электрической схемы для борьбы с шумом, а также эргономическим особенностям инструмента для удобства проведения измерений.

Ключевые слова: ДОАС, УФ-спектрометр для полевых измерений, вулканические выбросы.

UPGRADE OF DEVI INSTRUMENT FOR SO₂ EMISSIONS MEASUREMENTS Litvinovich H., Bruchkouski I.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The design changes of the DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument) that have been made according to the results of field measurements of sulfur dioxide emissions are presented. Attention is paid to the modification of the electrical circuit for noise reduction, as well as to the ergonomic features of the instrument for the convenience of measurements.

Key words: DOAS, UV-spectrometer for field measurements, volcanic emissions.

*Адрес для переписки: Бручковский И.И., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: bruchkovsky2010@yandex.by*

Одним из способов предсказания извержений является анализ измерений газового состава вулканических выбросов [1]. В зависимости от геологических особенностей породы и близости магмы к поверхности земли, соотношение концентраций вулканических газов в выбросах (SO₂, BrO и др.) может изменяться. Например, увеличение содержания SO₂ в выбросах свидетельствует о близости магмы к поверхности.

Для решения задачи измерения газового состава вулканических выбросов, в 2021 году был разработан портативный инструмент DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument) [2], позволяющий определять содержание газов в вулканических выбросах дистанционным методом DOAS (дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия).

Инструмент DEVI показал свою работоспособность во время экспедиции на Курильские острова в период 31.07.2021–13.08.2021, где одной из задач было получение данных о газовом составе вулканических выбросов.

В то же время, первое использование DEVI в полевых условиях выявило ряд недостатков:

- высокий уровень собственного шума детектора;
- отсутствие фотопривязки спектра к объекту измерения в режиме реального времени.
- отсутствие возможности перезагрузки прибора без выключения питания периферийных модулей (например, GPS);
- нехватка внешних управляющих устройств (кнопок) для переключения режимов измерений.

Поэтому, перед очередной экспедицией на Курильские острова, DEVI подвергся некоторой модернизации (рис. 1) с целью устранить описанные выше недостатки.

Для устранения недостатков 3 и 4 прибор был оснащен дополнительными кнопками 4 на лицевой панели для возможности переключения режимов съемки (одиночный спектр, непрерывная съемка, темновой и опорный спектры) и кнопкой перезагрузки управляющего микроконтроллера 5. Для возможности ручного выбора времени экспо-

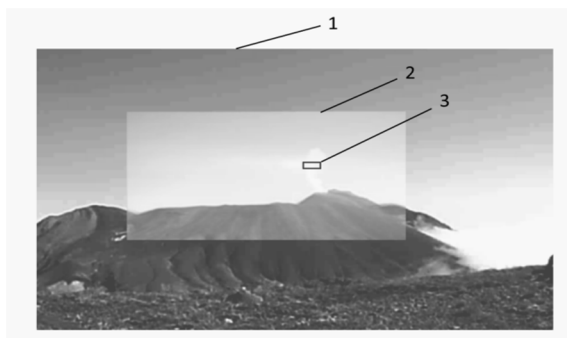
зиции, сбоку корпуса был установлен инкрементный энкодер 7, позволяющий ручной выбор времени экспозиции с шагом в 0.1 мс.



1 – видеокамера; 2 – объектив спектрометра; 3 – радиатор; 4 – кнопки выбора режимов работы; 5 – кнопка перезагрузки; 6 – разъем для подключения внешнего питания; 7 – энкодер; 8 – дополнительный отсек с батареей; 9 – кнопка включения

Рисунок 1 – Внешний вид DEVI на штативе, 2022 г.

Проблема фотопривязки объекта измерений к спектру была решена путем установки дополнительной видеокамеры 1 (тип OV7670, 640×480 пикселей со встроенным буфером памяти). Крепление видеокамеры 1 выполнено при помощи крепления «ласточкин хвост» к корпусу спектрометра, что обеспечивает одинаковую многократную установку и, в свою очередь, жесткую привязку полей зрения спектрометра и видеокамеры. Кадр с видеокамеры 1 передавался на микроконтроллер для последующего отображения на экране DEVI и сохранения на карту памяти. Данные, получаемые при помощи видеорегистратора, по-прежнему сохранялись независимо. Результат наложения всех областей регистрации прибора DEVI представлен на рис. 2.



1 – кадр видеорегистратора; 2 – кадр видеокамеры; 3 – поле зрения спектрометра

Рисунок 2 – Области регистрации DEVI

В результате обработки полученных спектров за экспедицию 2021 года было показано, что отношение сигнал-шум детектора спектрометра

оказалось недостаточным для непосредственного восстановления наклонных толщ диоксида серы и оксида брома. Поэтому был применен адаптивный цифровой фильтр Винера, что позволило уменьшить амплитуду шума в 5 раз и восстановить наклонные толщ диоксида серы из некоторых спектров [3].

С целью уменьшить электронную шумовую компоненту, в схему питания прибора были внесены изменения, а именно: повышающий импульсный преобразователь был заменен на понижающий линейный регулятор, а вместо одного аккумулятора использовались два последовательно соединенных (рис. 3). Тепло, выделяемое линейным регулятором, рассеивалось на радиаторе 3, расположенном на верхней крышке прибора.



ИБП – импульсный блок питания;
Фильтр – фильтрующая LC-цепочка;
ЛР – линейный регулятор

Рисунок 3 – Структурная схема питания DEVI От батареи до модификации (сверху) и после (снизу)

Для уменьшения уровня паразитных засветок, объектив прибора был дополнен синим светофильтром, отсекающим красную часть спектра.

Модернизированный инструмент DEVI принимал участие в экспедиции на Курильские острова в августе 2022 года, в результате чего были проведены измерения вулканических выбросов вулканов Чиккурачки и Эбеко.

Для вычисления эффективности модернизированной электрической схемы питания был проведен ряд измерений при отсутствии света на различных экспозициях. Из анализа шумового сигнала прибора до и после модернизации замечено уменьшение среднеквадратического отклонения шумового сигнала на 13%, что свидетельствует об эффективности измененной схемы питания и, соответственно, повышении отношения сигнал-шум.

Литература

1. Sparks, R.S.J. Forecasting volcanic eruptions / R.S.J. Sparks // Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Vol. 210, iss. 1–2. – P. 1–15.
2. Литвинович, Г.С. Инструмент для измерения содержания SO₂ в вулканических выбросах / Г.С. Литвинович, И.И. Бручковский // Приборостроение-2021 : матер. 14-й Междунар. научн.-техн. конф., 17–19 ноября 2021 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев. [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 186–188.
3. Бручковский, И. И. Определение содержания диоксида серы в газовых выбросах вулканов Курильских островов методом DOAS / И. И. Бручковский, С. И. Гуляева, Г. С. Литвинович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: матер. 19-й Междунар. конфер.. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 314.

УДК 620.10

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА СТЕРЖНЕЙ КОЛЬЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА УПРУГИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Луговой В.П., Денис А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведен анализ перемещений кольцевого инструмента для ультразвуковой обработки, выполненного в виде дуги окружности и двух сопрягающихся стержней. Симметричная форма позволяет получить дополнительные перемещения, вызванные упругими свойствами материала. Рассмотрена расчетная схема, ограниченного углом $\pi/2 < \gamma < \pi$. Приведенная формула для расчета показывает, что на величину упругих перемещений влияет угол наклона сходящихся стержней. Численные расчеты показали что, оптимальной схемой является форма с углом наклона в 45° . Предложенная схема изогнутого тонкого стержня симметричной формы может найти практическое применение в ультразвуковых колебательных системах для обработки отверстий малого диаметра в хрупких материалах, сварки пластмасс и пр. Предложенная форма позволит увеличить интенсивность колебаний инструмента и повысить производительность процесса и точность обработки.

Ключевые слова: упругие элементы, ультразвуковая техника, проволочные инструменты.

INFLUENCE OF TILT ANGLE OF ROD TOOL ON ELASTIC DISPLACEMENTS

Lugovoj V., Denis A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. An analysis of the movements of a ring tool for ultrasonic treatment, made in the form of an arc of a circle and two mating rods, is given. The symmetrical shape allows you to get additional movements caused by the elastic properties of the material. The calculation scheme limited by the angle $\pi/2 < \gamma < \pi$ is considered. The above calculation formula shows that the magnitude of elastic displacements is affected by the angle of inclination of the converging rods. Numerical calculations have shown that the optimal scheme is a shape with a slope of 45° . The proposed scheme of a curved thin rod of a symmetrical shape can find practical application in ultrasonic oscillatory systems for processing holes of small diameter in brittle materials, welding plastics, etc. The proposed shape will increase the intensity of the tool vibrations and increase the productivity of the process and the accuracy of processing.

Key words: elastic elements, ultrasonic technique, wire tools.

Адрес для переписки: Луговой В.П., пр.Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lyhavuypr@mail.ru

Введение. Исследования, проведенные в области ультразвуковой техники, показали целесообразность использования упругих элементов в качестве концентраторов и рабочих инструментов для выполнения технологических задач. Так, например, известна ультразвуковая система, содержащая кольцевой концентратор для осуществления прошивания отверстий в хрупких материалах (камне, стекле, керамике). Однако опыт использования упругих элементов в ультразвуковой технологии изучен еще не в полной мере и требует дальнейших исследований в целях практического применения. Одной из возможных областей применения является сварка пластмасс. В связи с этим в настоящей работе дан анализ влияния угла геометрического параметра – наклона стержней рассматриваемой схемы кольцевых инструментов на величину перемещений.

Расчет перемещений криволинейных стержней. Рассматриваемая схема выполнена в виде симметричной стержневой системы, состоящей из двух частей: криволинейного участка в виде дуги полуокружности и двух примыкающих

к ней наклонных прямолинейных стержней, сходящихся на нижнем конце (рис. 1, а).

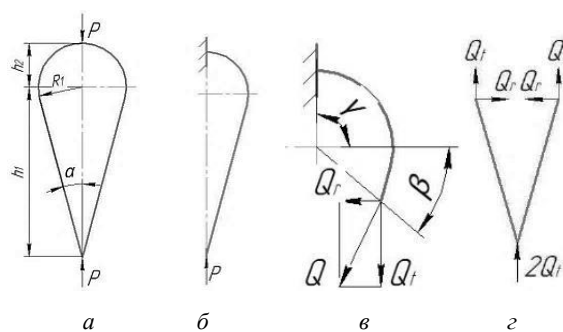


Рисунок 1 – Схемы действия сил на криволинейный стержень

Расчетную схему можно представить как одну из половин этого криволинейного стержня, закрепленного в верхней точке неподвижно (рис. 1, б). Внутреннее усилие в стержне Q , направленное вдоль оси стержня разложим на две составляющие: горизонтальную Q_r и вертикальную Q_t

(рис. 1, в). Первая вызывает изгиб стержня, а вторая – сжатие. Оставшаяся часть сходящихся ветвей, подвержена сжатию удвоенной силы Q (рис. 1, з).

В точке сопряжения радиусной кривой с прямолинейным стержнем при $\gamma > \pi/2$, перемещение будет вызвано действием горизонтальной и вертикальной составляющей силы Q [1, 2]

$$u_r = \frac{Q^3}{EI} (Q_r u_{rr} + Q_t u_{rt}),$$

и

$$u_t = \frac{Q^3}{EI} (Q_r u_{tr} + Q_t u_{tt}). \quad (1)$$

Учитывая, что силы в противоположных стержнях равны между собой и направлены друг против друга $Q'_r = Q''_r$, равными окажутся и горизонтальные перемещения от действия этих сил $u'_r = u''_r$.

Подставив в формулу $Q_t = \frac{1}{2} P \sin \beta$, получим

$$u_{tt} = \int_0^\gamma (1 - \cos \gamma)^2 d\gamma = \frac{1}{2} (3\gamma - 4 \sin \gamma + \sin \gamma \cos \gamma). \quad (2)$$

Таким образом, окончательно уравнение для расчета вертикального перемещения свободного конца криволинейного стержня симметричной формы имеет вид

$$u_t = \frac{R^3}{EI} Q_t u_{tt},$$

или

$$u = \frac{R^3}{2EI} Q_t (3\gamma - 4 \sin \gamma + \sin \gamma \cos \gamma). \quad (3)$$

Полученная формула (3) позволяет произвести численные расчеты перемещений свободного конца стержня криволинейного стержня для различных конструктивных исполнений.

Из рис. 3 видно, что угол $\gamma = \frac{\pi}{2} + \beta$ или

$$\gamma = \frac{\pi}{2} + 2R \sin \beta = \frac{\pi}{2} + \frac{2R}{H}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$U_{tt} = \frac{Q_t R^3}{2EI} * \left[\left(3\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) - 4 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \right) \right]. \quad (5)$$

Численно рассчитаем влияние угла наклона стержней на величину вертикальных перемещений

1) Если $\beta = 0$, $\gamma = \frac{\pi}{2}$ и

$$U_{tt} = \frac{Q_t R^3}{2EI} \left[\begin{array}{l} 3\left(\frac{\pi}{2}\right) - \\ - 4 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \end{array} \right] = 0,7 \frac{Q_t R^3}{2EI}.$$

2) Если $\beta = \frac{\pi}{6}$, $\gamma = \frac{2\pi}{3}$ и $U_{tt} = 7,5 \frac{Q_t R^3}{2EI}$.

3) Если $\beta = \frac{\pi}{4}$, $\gamma = \frac{5\pi}{4}$ и $U_{tt} = 10 \frac{Q_t R^3}{2EI}$.

Выводы. Теоретически показано, что использование тонких криволинейных стержней с конусообразной формой позволяет усилить перемещение свободного конца в условиях колебаний благодаря упругим свойствам изогнутой части.

Конусообразная симметричная форма криволинейного усиливает вертикальную составляющую упругих перемещений, способствуя интенсификации ультразвуковых колебаний.

Наибольшая величина вертикальных перемещений свободного конца достигается при наклоне его ветвей на угол 45° .

Литература

1. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – 2-е изд. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
2. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов. Элементарная теория и задачи / С. П. Тимошенко; пер. с англ. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – 364 с.

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРЫ НА РЕЖИМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЧ РАЗРЯДА

Лушакова М.С., Тихон О.И., Мадвейко С.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены исследования влияния конструктивного исполнения, местоположения и расстояния между торцевыми поверхностями плазменной камеры на условия возбуждения самостоятельного СВЧ разряда.

Ключевые слова: СВЧ-разряд, разрядная камера, плазма.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PLASMA CHAMBER DESIGN CHARACTERISTICS ON THE MW DISCHARGE EXCITATION MODES

Lushakova M., Tsikhan O., Madveika S.

Belarusian state university of informatics and radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents studies of the influence of the design, location and distance between the end surfaces of the plasma chamber on the conditions for excitation of a self-sustained microwave discharge.

Key words: microwave discharge, discharge chamber, plasma.

Адрес для переписки: Лушакова М.С., ул. П. Бровки 6, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lushakova@bsuir.by

Конструкция исследуемого СВЧ разрядного устройства представляет собой замкнутый в кольцо волновод, являющийся цилиндрическим резонатором, с расположенной на его оси реакционной камерой (рис. 1). В объеме камеры осуществляются процессы плазменной обработки. Согнутый в кольцо прямоугольный волновод образует резонаторную камеру. Резонирующая область образуется внутренней поверхностью и торцевыми стенками волновода. Через щелевые излучатели, выполненные на его внутренней стенке, электромагнитная энергия поступает в рабочую область. Место ввода электромагнитной энергии от СВЧ-генератора представляет собой короткую волноводную секцию, соединенную с кольцевой частью волновода. В месте перехода установлен рассекающий СВЧ-волн. Сверхвысокочастотная энергия передается в вакуумируемую реакционную камеру по волноводу от генератора СВЧ-мощности. Реакционная камера располагается на оси резонаторной камеры и представляет собой цилиндрическую трубу из прозрачного для СВЧ волн материала, закрытую с торцов металлическими крышками. На нижнем торце камеры расположен заземленный подложкодержатель.

Расстояние и местоположение торцевых поверхностей, которые совместно с полостью реакционно-разрядной камеры образуют единый резонирующий объем, изменялись за счет их перемещения с шагом 3 мм, что обусловлено конструктивными особенностями держателей. С уменьшением расстояния между торцевыми поверхностями камеры с 97 до 51 мм мощность, требуемая для возбуждения СВЧ-разряда, изменялась на 15–20 Вт. Изменение размера разрядной камеры, в частности объема, а также положение торцевых поверхностей относительно кольцевого резонатора с волноводно-щелевым аппликатором влечет за собой изменение резонансных свойств в камере, выражающееся в перераспределении пространственных максимумов и минимумов электрического поля, возникновении дополнительного отражения [1].

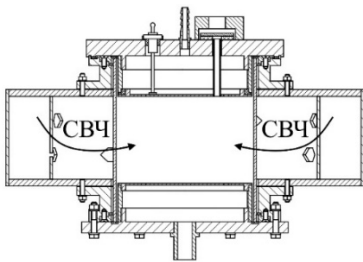


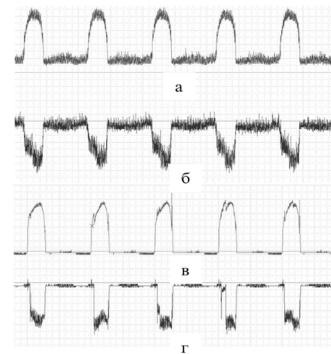
Рисунок 1 – СВЧ разрядное устройство

На характеристики возбуждения СВЧ-разряда большее влияние оказывает давление в камере, рассматривался диапазон от 20 до 150 Па, при котором мощность, необходимая для возбуждения СВЧ-разряда, изменялась на 50 Вт. Изменения расстояний между торцевыми поверхностями плазменной камеры оказывают меньшее влияние

на мощностные характеристики режимов возбуждения СВЧ-разряда, но вносят значительные изменения в резонансные электрофизические явления, происходящие в плазменном объеме.

Влияние местоположения торцевых поверхностей на условия возбуждения СВЧ-разряда оценивалось по величине задержки начала оптического свечения СВЧ-разряда по отношению к переднему фронту пачки СВЧ-импульсов. С целью увеличения интенсивности светового потока, подаваемого на вход ФЭУ, оптическое излучение от плазмы выводилось вдоль оси цилиндрической разрядной камеры.

Экспериментальным путем установлено существенное влияние размера разрядной камеры на процесс формирования плазмы СВЧ-разряда (рис. 2). По критериям минимизации отраженной от плазмы СВЧ мощности и сокращения длительности периода стабилизации разряда определено взаимное расположение торцевых поверхностей относительно кольцевого резонатора с волноводно-щелевым аппликатором, являющегося конструктивным элементом СВЧ-аппликатора. Минимальной задержке импульса оптического свечения плазмы относительно переднего фронта пачки СВЧ-импульсов соответствует расстояние между торцевыми поверхностями 90–96 мм, при этом контактирующие с плазмой плоскости торцов должны симметрично выходить за габариты внутреннего объема свернутого в кольцо волноводного излучателя.



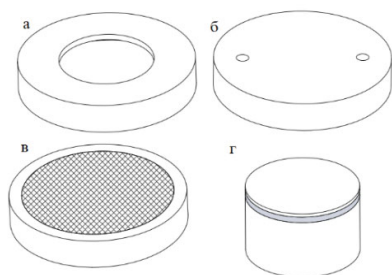
а – падающий СВЧ сигнал, 93 мм; б – отраженный от плазменной нагрузки СВЧ сигнал, 93 мм; в – падающий СВЧ сигнал, 97 мм; г – отраженный от плазменной нагрузки СВЧ сигнал, 97 мм;

Рисунок 2 – Форма протектированных падающего и отраженного от плазменной нагрузки СВЧ-сигналов при расстоянии 93 мм и 97 мм между торцевыми поверхностями плазменной камеры

Изменение конфигурации торцевых поверхностей плазменной камеры (рис. 3), и соответственно, изменение размера разрядного объема приводит к существенным вариациям пространственного распределения интенсивности свечения.

При использовании торцевых поверхностей плазменной камеры с максимальной площадью проводящей поверхности (рис. 3, б) высотой 2 см при 70 Па наблюдается максимальный интеграль-

ный уровень свечения плазменного разряда, регистрируемый фотоэлектронным умножителем. Данная конфигурация позволяет сформировать наибольший плазменный объем. В этом случае взаимосвязь между распределением электромагнитного поля и высотой цилиндрической камеры оптимальна, в результате чего свечение газа является более интенсивным [2]. С увеличением высоты торцевых поверхностей, плазменный объем камеры уменьшается и интенсивность интегрального свечения разряда также уменьшается.



a – диск с полым отверстием; *б* – диск с максимальной площадью проводящей поверхности; *в* – диск с сетчатой горизонтальной поверхностью; *г* – диск с изолированной торцевой поверхностью

Рисунок 3 – Схематичное изображение торцевых поверхностей

Уменьшение площади проводящей поверхности при использовании в качестве торцевой

поверхности металлической сетки и диска с полым отверстием (рис. 3 *a, в*) приводит к уменьшению интенсивности оптических характеристик плазмы СВЧ-разряда. При увеличении высоты торца до 6 см данная тенденция усиливается.

Размещение на торцевой поверхности камеры диэлектрически изолированной от основания проводящей поверхности (рис. 3, *г*) приводит к увеличению интенсивности отдельных линий оптического спектра разряда и увеличению интегрального свечения по сравнению с сетчатой и полый конструкцией. Однако в этом случае оптико-спектроскопические показатели меньше, чем при использовании металлического диска с максимальной площадью проводящей поверхности (рис. 3, *б*).

Полученные характеристики возбуждения самостоятельного СВЧ-разряда связаны со сложными конфигурациями торцов в описанных исполнениях, которые оказывают влияние на распределение электромагнитных волн в плазменном объеме.

Литература

1. Распределение электрического поля в разрядной камере при щелевом вводе СВЧ-энергии / Б. М. Бржозовский [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2020. – № 8(3). – С. 189–198.
2. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / Под. ред. А. П. Достанко. – Мн.: Бестпринт, 2002. – 452 с.

УДК 621.9.22

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Луговой В.П., Луговая И.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Художественная обработка ювелирных украшений является важным этапом работ, обеспечивающим эстетические качества изделий. Художественная обработка ювелирных изделий включает в себя разнообразные дизайнерские приемы и технические приемы. Однако описание методов художественной обработки в технической и учебной литературе приводится как отдельные и разрозненные технологии, не объединенные общими признаками. Цель работы заключается в группировании различных способов художественной обработки ювелирных изделий и представление обобщенной классификации этих технологий, объединенных общими признаками. Результат достигается проведенным анализом и перечислением рассматриваемых технологий обработки драгоценных металлов.

Ключевые слова: jewelry, aesthetic qualities, artistic processing, classification.

CLASSIFICATION OF METHODS OF ARTISTIC PROCESSING OF JEWELRY

Lugovoj V., Lugovaja I.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Artistic processing of jewelry is an important stage of work that ensures the aesthetic qualities of products. Artistic processing of jewelry includes a variety of design techniques and techniques. However, the description of the methods of artistic processing in the technical and educational literature is given as separate and disparate technologies, not united by common features. The aim of the work is to group the various methods of artistic processing of jewelry and to present a generalized classification of these technologies, united by common features. The result is achieved by the analysis and enumeration of the considered precious metal processing technologies.

Key words: jewelry, natural and synthetic stones, aesthetic qualities

Адрес для переписки: Луговой В.П., пр-т Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lyhavyp@mail.ru

Изготовление предметов ювелирного искусства состоит из последовательно выполняемых этапов, включающих:

- художественное проектирование и создание виртуальной модели;
- изготовление металлической модели;
- художественную обработку украшений.

Художественное проектирование ювелирных украшений представляет собой сложный процесс профессиональной творческой деятельности человека, основанной на определенной художественной идее и визуализации этой идеи в форме ювелирного украшения, выполняемый методами изобразительного искусства или компьютерным моделированием виртуальной модели.

Изготовление металлической модели украшений из драгоценных, недрагоценных и декоративных материалов основано на традиционных и современных технологиях обработки, которые достаточно хорошо изложены в учебных пособиях ряда авторов [1–4].

Завершающим этапом создания предметов ювелирного искусства является художественная обработка поверхностей с целью придания эстетической и коммерческой привлекательности изделий. Художественная обработка поверхностей выполняет одну из главных задач в ювелирном искусстве – обеспечить эстетическую и коммерческую привлекательность, защиту поверхностей от окислительного воздействия окружающей среды и повышение эксплуатационной надежности украшений. При этом параллельно решается еще одна задача, заключающаяся в защите их поверхностей от окислительного воздействия окружающей среды и повышении эксплуатационной надежности.

Методы художественной обработки ювелирных украшений излагаются в учебной и справочной литературе как отдельные, порой разрозненные между собой разделы, без представления их систематизации и классификации возможных способов достижения эстетических качеств изделий. В связи с этим попытка объединить эти способы декоративной обработки в единую систему и дать их классификацию по определенным признакам представляет практический интерес в технологии ювелирного производства. Рассматривая с этой точки зрения различные методы художественной обработки предметов декоративно-прикладного искусства, к которому относится и ювелирное искусство, можно представить такую классификацию по следующим основным факторам, по которым влияют на эстетические свойства украшений (рис. 1):

- по материалам;
- по технике исполнения;
- по функциональному назначению;
- по степени механизации.

Перечень используемых в ювелирных украшениях материалов в настоящее время стал до-

вольно разнообразным. Поэтому о виде материалов можно разделить эти технологии на следующие виды, как это показано на рис. 2.



Рисунок 1 – Классификация методов художественной обработки ювелирных изделий



Рисунок 2 – Классификация ювелирных изделий по виду материалов

По степени механизации декоративная обработка может быть ручной, механизированной, машинной. Техника исполнения и технология художественной обработки в ювелирном деле может быть ручной и машинной.

Перечень этих способов графически приведен на рис. 3. Разновидности техники выполнения декоративно-художественной обработки ювелирных изделий включают в себя разнообразные способы обработки материалов давлением, резанием, нанесением декоративных покрытий, химической и термической обработкой и комбинированными способами.

Так, например, способы механической обработки материалов резанием могут быть выполнены лезвийными и абразивными инструментами. Обработка лезвийным инструментом включает в себя ручное декоративное гравирование украшений штихелями, машинная обработка на универсальных металлорежущих станках, в том числе с ЧПУ; на копировальных, гильоширных станках, на станке-патографе. Абразивная обработка, предназначенная для окончательной отделки поверхностей и придания им определенной фактуры, осуществляется на шлифовальных, доводочных и полировальных станках.

Методы пластической деформации включают в себя такие операции как штамповка, чеканка, тиснение, басма, раскатка, прокатка, вальцовка и пр. Выбор этих методов диктуется в первую очередь серийностью производства, а также заданными параметрами качества поверхностей (цветовая окраска фактура, текстура).

Современные методы порошковой металлургии мелкодисперсных материалов прессованием

и спеканием позволяют поучать керамические изделия из металлов и неметаллов. В частности модными и широко распространенными стали керамические кольца из оксидов металлов, особенно белого и черного цветов.

К электрофизическим методам, применяемым в ювелирном деле, следует отнести лазерную, ультразвуковую и электроэрозионную обработку. Лазерная обработка стала использоваться для гравирования, маркировки, вырезания и окрашивания металлов.

Химические и электрохимические методы, основанные на результатах научных исследований последних десятилетий, позволяют получать защитные и декоративные покрытия на поверхности различных металлов, формировать заданную фактуру.

Традиционной в ювелирном деле считается технология нанесения декоративных покрытий на металлические поверхности изделий: эмалирование и чернение. Вместе с тем новые исследования в этой области позволяют расширить возможности этих технологий и добиться более высоких качественных показателей декоративного оформления.

Новым техническим достижением XXI века является нанотехнология в ювелирном производстве. Нанопокрывтия позволяют получать тончайшие износостойкие, защитные и цветные покрытия на драгоценных и недрагоценных металлах.

Пиротехническая обработка – один из интересных видов художественной обработки, известная в ювелирном деле с XIX века, нашла свое новое воплощение благодаря проведенным в последнее время новаторским поискам ювелиров и дизайнеров для создания неповторимых эффектов на поверхности металлов. Использование методов термического воздействия позволяет получить декоративные эффекты гофрированной и

складчатой поверхности на поверхности металлов, произвести их термическое окрашивание.

Современные способы ювелирного литья широко известны, благодаря возможности изготовления и многократного воспроизведения высокоточных копий моделей, разработанных с использованием компьютерных IT-технологий.



Рисунок 3 – Классификация ювелирных изделий по виду технологического процесса

Таким образом, представленная классификация методов декоративной обработки ювелирных изделий позволяет объединить в общую классификационную систему различные традиционные и современные технологии, сгруппировать их по характерным признакам и отразить их общие закономерности процессов этих технологий.

Литература

1. Марченко, В. И. Ювелирное дело / Марченко В. И. – М.: Высшая школа. – 1984, 192 с.
2. Новиков, В. П. Книга начинающего ювелира / В. П. Новиков. – СПб.: Политехника, 2001. – 416 с.
3. Бреполь, Э. Теория и практика ювелирного дела / Э. Бреполь. – СПб.: Соло, 2000. – 528 с.
4. Сидельников, С. Б. Производство ювелирных изделий из драгоценных металлов и их сплавов / С. Б. Сидельников [и др.]. 2-е изд. М. – Инфра-М, 2019. – 374с.

УДК 616.12-008.46:616-77

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИСКУССТВЕННОГО СЕРДЦА И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Монич С.Г., Храмова А.С., Бондаренко В.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье исследованы варианты строения полностью искусственного сердца и их функциональные возможности для решения проблем людей с ишемической болезнью, отказом левого и обоих желудочков.

Ключевые слова: искусственное сердце, конструирование.

FEATURES OF ARTIFICIAL HEART DESIGNS AND ITS CAPABILITIES

Monich S., Khramkova A., Bondarenko V.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article explores the options for the structure of a completely artificial heart and their functionality for solving the problems of people with coronary disease, failure of the left and both ventricles.

Keywords: artificial heart, construction.

Адресс для переписки: Монич С.Г., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by

Целью данной работы является исследование вариантов строения полностью искусственного сердца и следующих из него функциональных возможностей для решения проблем людей с ишемической болезнью, отказом левого и обоих желудочков.

Сердечная недостаточность ежегодно поражает более 23 миллионов человек во всем мире, и части пациентов в конечном итоге требуется пересадка сердца. Однако каждый год доступно только 6000 донорских сердец.

Для тех, кто находится в списке ожидания на пересадку, существуют альтернативные решения, такие как установка вспомогательного устройства для левого желудочка или искусственного сердца.

Искусственное сердце – это устройство, заменяющее оба желудочка и все четыре сердечных клапана и функционирующее как человеческое. Оно имплантируется в тело, подключается к внешнему источнику питания (например, портативным батареям или внешнему настенному источнику питания) через электрический кабель, известный как трансмиссия, и восстанавливает нормальный приток крови к другим органам.

Отказ обоих желудочков менее распространен при далеко зашедшей терминальной стадии сердечной недостаточности: около 85–90 % пациентов имеют отказ только левого желудочка. Однако применение искусственного сердца возможно как при отказе одного, так и при отказе обоих желудочков.

Полностью искусственное сердце SynCardia в настоящее время одобрено в качестве моста для трансплантации пациентов с терминальной стадией сердечной недостаточности, поражающей оба желудочка. Это первое и единственное полностью искусственное сердце, одобренное во всем мире. SynCardia Total Artificial Heart состоит из двух биосовместимых пластиковых желудочков с четырьмя клапанами (рис. 1).

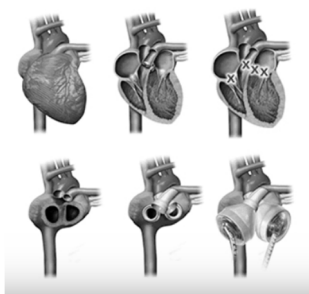


Рисунок 1 – Искусственное сердце SynCardia

Каждый желудочек имеет диафрагму, которая отделяет внутреннюю камеру (где течет кровь) от внешней камеры (где действует пневматический механизм). Желудочки подключены к внешнему источнику питания, называемому «контроллером», двумя маленькими воздушными трубками, называемыми «шлангами», обеспечивающими

пульсирующий поток. Шланги выходят из брюшной стенки пациента прямо под грудной клеткой.

Такая конструкция искусственного сердца позволяет телу пациента автоматически регулировать кровоток в зависимости от уровня активности, и обеспечивает работу сердца без датчиков, моторов или электронных устройств любого типа внутри тела. Все электронные устройства безопасно расположены вне тела во внешнем контроллере, который питает общее искусственное сердце воздухом и импульсами вакуума.

Благодаря больничному контроллеру SynCardia, удерживающему полностью искусственное сердце от имплантации до тех пор, пока состояние пациента не станет стабильным, замена и ремонт электронных устройств теряют актуальность [1].

После достижения стабильности пациенты, отвечающие необходимым требованиям, подключаются к портативному контроллеру Freedom, который позволяет пациенту легче передвигаться по больнице. Пациенты, отвечающие критериям выписки, могут покинуть больницу и ждать совместимого донорского сердца дома или в своем районе. Контроллер Freedom питается от двух литиевых аккумуляторов, которые заряжаются от стандартной электрической мощности или адаптера постоянного тока автомобильного прикуривателя.

Одним из преимуществ данного искусственного сердца является доказанная надежность: за 30 лет использования клапаны полностью искусственного сердца SynCardia ни разу не отказали. Диафрагма, которая отвечает за перекачку крови в желудочки и наружу, показала индекс отказа менее 1 % в более чем 1000 имплантатов. В настоящее время максимальное время, в течение которого пациенту помогало полностью искусственное сердце, составляет 1374 дня (почти четыре года) до успешной пересадки сердца.

К достоинствам сердца SynCardia относят такие параметры, как возможность устранения симптомов и причин терминальной стадии сердечной недостаточности, замена обоих поврежденных желудочков сердца и трикуспидального, легочного, митрального и аортального клапанов. Он снимает осложнения собственного сердца и обеспечивает безопасный поток до 9,5 л/мин через каждый желудочек, немедленно восстанавливает нормальный сердечный индекс, помогает восстановить нормальное центральное венозное давление (ЦВД), решить легочную гипертензию (ЛАП), восстанавливает нормальную гемодинамику и органическую перфузию [2].

Второе рассмотренное искусственное сердце было разработано австралийским ученым Даниелем Тиммсом. Отличительной особенностью модели ViVACORE (рис. 2) является использование электромагнитного привода, вместо пневматического.

Первый прототип был сделан из пластика и переносил воду через имитацию кровеносной

системы, в которой находились небольшого размера красные шарики, представляющие собой клетки крови. Кровь шла в небольшую камеру с вращающейся металлической ступицей в центре. Ступица, как пропеллер, выталкивала кровь наружу – в легкие и другие части тела. Во время испытания обнаружился серьезный недостаток: в месте под вращающейся ступицей застревали шарики и поток останавливался – при такой работе в человеческом организме образуются тромбы, которые могут вызвать инсульт. Для решения данной проблемы была использована технология магнитной левитации, разработанная для высокоскоростных поездов в Японии. Это обеспечило точную и стабильную работу ступицы без механического износа, уменьшило повреждение клеток крови и снизило риск образования тромбов.



Рисунок 2 – Искусственное сердце BiVACORE

В результате система BiVACORE состоит из ротора на магнитной подвеске, расположенного между противоположными корпусами насосов. Ключевой особенностью, которая позволяет этому устройству поддерживать как левую, так и правую стороны сердца, являются левая и правая лопасти рабочего колеса, которые установлены с обеих сторон вращающейся ступицы. Ступица левитирует и вращается с помощью электромагнитного двигателя и подшипникового узла в верхней части корпуса насоса. Специальная гидравлическая конструкция крыльчаток в сочетании с современной технологией магнитной левитации (MAGLEV) позволяет точно регулировать циркуляцию с помощью дифференциального выхода жидкости. В качестве материала используется титан. Внешний контроллер и батареи обеспечивают питание внутреннего устройства через чрескожный привод (рис. 3).

Программное обеспечение BiVACORE позволяет автоматически регулировать скорость вра-

щения ротора, в зависимости от деятельности человека. В обычном режиме он вращается с постоянной скоростью, однако на контроллере можно выбрать режим вращения с переменной скоростью, что позволяет имитировать пульс.

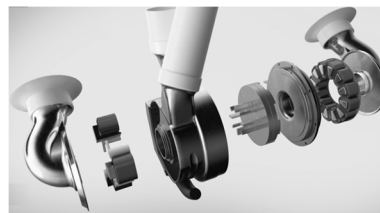


Рисунок 3 – Конструкция искусственного сердца BiVACORE

Искусственное сердце BiVACORE имеет малые габариты, благодаря чему становится доступным для пересадки детям, при этом достаточно мощное (1600–2400 оборотов в минуту), чтобы поддерживать взрослого человека во время физической активности, срок службы до 10 лет. Заряда батареи хватает до 10 часов непрерывной работы [3].

В приведенной статье были рассмотрены 2 модели искусственных сердец: SynCardia Total Artificial Heart и BiVACORE. В результате анализа обеих конструкций были выявлены следующие недостатки: малая надежность, тромбообразование, необходимость носить с собой блок питания, риск занесения инфекций. Однако искусственное сердце BiVACORE имеет ряд преимуществ над моделью SynCardia: меньшие габариты, больший срок службы, выше износостойкость, более универсально и снижен риск тромбообразования. Эти преимущества объясняются отсутствием подражания пульса.

Применение подобной технологии в конструкции может повысить длительность работы искусственных сердец и дать больше времени человеку, ожидающему донорское сердце для трансплантации.

Литература

1. Merce V. Electromedicina [Electronic resource]. – Mode of access: <https://mercev.com/en/heart-failure-syn-cardia/>. – Date of access: 13.09.2022.
2. ScienceDirect [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021929012006355>. – Date of access: 20.09.2022.
3. BiVACORE [Electronic resource]. – Mode of access: <https://bivacor.com>. – Date of access: 24.09.2022.

УДК 621.315.592.2

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ГАЛЛИЙ-ИНДИЙ-МЫШЬЯК

Манего С.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены экспериментальный и теоретические исследования влияния неоднородностей состава на люминесцентные характеристики твердых растворов индий-мышьяк-фосфор. Показано, что структура спектров люминесценции определяется флуктуацией основного и примесного составов. Разработаны программы расчета формы спектров люминесценции неоднородных твердых растворов $InAs_xP_{1-x}$, позволившие рассчитать среднеквадратичную флуктуацию гетерогенного потенциала для тройного твердого раствора $InAs_xP_{1-x}$ и установить связь между характеристическими параметрами краевой полосы люминесценции, концентрацией носителей заряда и величиной гетерогенного потенциала.

Ключевые слова: тройные твердые растворы $InAs_xP_{1-x}$, спектры люминесценции неоднородных твердых растворов, среднеквадратичная флуктуация гетерогенного потенциала.

RADIATIVE RECOMBINATION OF INHOMOGENEOUS SOLIDS SOLUTIONS OF GALLIUM-INDIUM-ARSENIC

Manego S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Experimental and theoretical studies of the effect of inhomogeneities of the composition on the luminescent characteristics of solid solutions of indium-arsenic-phosphorus were carried out. It is shown that the structure of luminescence spectra is determined by the fluctuation of the basic and impurity compositions. Theoretical studies of the effect of inhomogeneities of the composition on the luminescent characteristics of solid solutions of indium-arsenic-phosphorus were carried out. Programs for calculating the shape of the luminescence spectra of inhomogeneous solid solutions $InAs_xP_{1-x}$ have been developed, which made it possible to calculate the root mean square fluctuation of the heterogeneous potential for a triple solid solution $InAs_xP_{1-x}$ and to establish a relationship between the characteristic parameters of the luminescence margin band, the concentration of charge carriers and the value of the heterogeneous potential.

Keywords: triple solid solutions $InAs_xP_{1-x}$, luminescence spectra of heterogeneous solid solutions, mean square fluctuation of heterogeneous potential.

Адресс для переписки: Манего С.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Исследование формы краевой полосы люминесценции (КПЛ) полупроводниковых материалов соединений $A^{III}B^V$ позволяет получать важную информацию о структуре зон и механизмах рекомбинации неравновесных носителей заряда. При анализе экспериментальных спектров КПЛ неоднородных твердых растворов соединений $A^{III}B^V$ предполагалось, что в широких пределах температур и уровней возбуждения форма спектров люминесценции определяется практически только распределением комбинирующих носителей заряда по энергиям и функцией плотности вероятности распределения локальной ширины запрещенной зоны полупроводника. Данный подход обусловлен предположением, что вероятность излучательных переходов через набор уровней локального объема полупроводника не зависит от энергии. Основанием для такого предположения является как относительно слабая энергетическая зависимость матричного элемента перехода, так и не сохранение правила отбора при нарушении дальнего порядка в разупорядоченных полупроводниках. Детальный анализа

спектрального распределения и таких характеристических параметров формы КПЛ как полуширина (ΔE), наклон высоко- и низкоэнергетического фронта (α_1, α_2) и энергетического положения максимума спектра (E_{max}) от степени неоднородности и концентрации основных носителей заряда для неоднородных полупроводников $InAs_xP_{1-x}$ не проводился. Поэтому представляется интересным провести теоретическое исследование изменений характеристических параметров и общей формы КПЛ неоднородных полупроводников для некоторых механизмов рекомбинации, при различной степени неоднородности и концентрации носителей в твердых растворах $InAs_xP_{1-x}$.

Для теоретического описания формы линии краевой полосы люминесценции рассматривают различные модели излучательных переходов для идеального полупроводника с последующим вводом поправок, отражающих неоднородность полупроводника. Это может быть размытие краев зон, либо флуктуация ширины запрещенной зоны. Влияние концентрации примеси, очевидно, должно отражаться на законе дисперсии краев зон

и на изменении матричного элемента $M_{eh}(\hbar\omega)$. Известно, что флуктуации состава и примеси вызывают размытие краев зон неосновных носителей, т. е. в нашем случае это ведет к появлению хвостов плотности состояний V -зоны и размытию акцепторных уровней. Поэтому, в первом приближении как для зоны проводимости, так и для валентной зоны наличием «хвостов» зон будем пренебрегать, а акцепторные уровни будем считать размытыми. Следует также отметить, что в данной работе исследовались нелегированные эпитаксиальные слои твердых растворов $(InAs_xP_{1-x}, n < 10^{17} \text{ см}^{-3})$, поэтому излучательные каналы, связанные с непрямыми переходами, не рассматривались. Таким образом, для неоднородных твердых растворов соединений $InAs_xP_{1-x}$ имеет смысл рассмотреть прямые излучательные переходы зона-зона и донор-акцептор.

Общее выражение для скорости спонтанной рекомбинации имеет вид

$$I(\hbar\omega) = \int d^3r \int dE_e \int dE_h W(E_e, E_h) f_e(r, E_e) \times f_h(r, E_h) \times \rho_e(E_e) \times \rho_h(E_h) \times \delta(\hbar\omega - E_g(r) - E_e - E_h), \quad (1)$$

где $E_e, (E_h)$ – кинетическая энергия свободных носителей либо энергия связи локальных состояний; ρ_e, ρ_h – плотности энергетических состояний в зоне проводимости и в валентной зоне в точке r ; f_e, f_h – функции вероятности заполнения состояний с энергией $E_e (E_h)$ в точке r , $W(E_e, E_h)$ – матричный элемент вероятности перехода, который будем считать не зависящий от E_g ; $\delta(\hbar\omega - E_g(r) - E_e - E_h)$ – дельта функция, выражающая закон сохранения энергии. Так как эксперименты проводились при низких уровнях накачки $\Delta p < n_0$ (n_0 – равновесная концентрация электронов), низких температурах, а неоднородности полупроводника имеют достаточно большие размеры, то можно предположить, что неравновесные носители практически рекомбинируют в тех же областях пространства, где происходит их генерация. Переходя от интегрирования по d^3r к интегрированию по E_g , получаем:

$$I(\hbar\omega) = \int I_{cv}(\hbar\omega) \cdot F(E_g) dE_g, \quad (2)$$

где $F(E_g)$ – функция распределения локальной ширины запрещенной зоны. Таким образом, экспериментально наблюдаемая форма линии люминесценции представляет собой статистическое усреднение по всем наблюдаемым областям неоднородностей, в которых происходят акты рекомбинации. Перераспределения неравновесных носителей между локальными минимумами приводит к добавлению в уравнение $I(\hbar\omega)$ для случая равновесного распределения носителей, $\exp(-E_g/kT)$ и частично равновесного распределения носителей

$(E_g - E_{gm}) \cdot \exp(-(E_g - E_{gm})/kT)$. Спектры люминесценции неоднородных твердых растворов $InAs_xP_{1-x}$ при температурах 4,2 и 78°K, представлены на рисунке. Анализ характеристических параметров кривых показывает, что с ростом уровня легирования и амплитуды флуктуации ширины запрещенной зоны форма КПЛ меняется, т.е. происходит увеличение полуширины краевой полосы и сдвигу его максимума в высокоэнергетическую сторону. При больших величинах амплитуды флуктуации ($Q > 3,5$ мэВ) полуширина краевой полосы начинает возрастать при концентрациях носителей более $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, тогда как изменение полуширины КПЛ при малых концентрациях носителей в твердых растворах ($n < 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) определяется только амплитудой флуктуационного потенциала и имеет линейную зависимость от Q . При низких уровнях легирования уширение КПЛ обусловлено, главным образом, ее высокоэнергетическим фронтом.

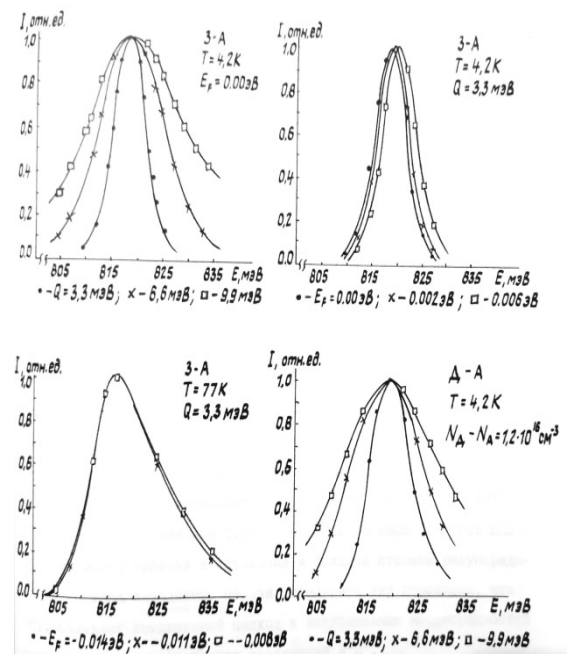


Рисунок 1

Оценка величины амплитуды флуктуации состава в твердых растворах $InAs_xP_{1-x}$ была проведена с помощью подгонки теоретических кривых к экспериментальным данным.

Анализ экспериментальных и теоретических спектров люминесценции эпитаксиальных слоев $InAs_xP_{1-x}$ показывает, что для излучательных переходов зона-зона ($n = 7,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) амплитуда флуктуационного потенциала равна 4,0 мэВ, а для зона-акцепторных переходов – 7,3 мэВ.

УДК 628.51:614.7:613.63

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МАСОК ОТ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Матюшев М.В., Минченя В.Т.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Одним из наиболее эффективных методов улавливания ультрадисперсных аэрозолей в средствах индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) является метод электростатической фильтрации. Однако некоторые категории частиц способны проникать сквозь существующие средства защиты. Обладая высокой проникающей способностью, они несут значительный вред, поражая наиболее удаленные участки дыхательной системы. Новые методы электростатической фильтрации с использованием ультрафиолетового излучения могут стать решением проблемы улавливания неподдающихся существующим методам фильтрации частиц.

Ключевые слова: СИЗОД, ультрадисперсные аэрозоли, электростатическая фильтрация, фотоионизация.

INCREASING THE EFFICIENCY OF FILTERING DEVICES OF MASKS FROM ULTRA-FINE AEROSOLS

Matyushev M., Minchenya V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. One of the most effective methods for capturing ultrafine aerosols in personal respiratory protection equipment (RPE) is the method of electrostatic filtration. However, certain categories of particles are capable of penetrating existing barriers. Because of a high penetrating ability, these particles cause significant harm, affecting the most distal lung regions. New methods of electrostatic filtration using ultraviolet radiation can be a solution to the problem of capturing particles that cannot be filtered by using existing filtration methods.

Keywords: RPE, ultrafine aerosols, electrostatic filtration, photoionization.

*Адрес для переписки: Минченя В.Т., Сурганова 47/1, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.com*

С каждым годом количество мест работы с вредными производственными факторами возрастает, как и необходимость в использовании средств индивидуальной защиты (СИЗ). На фоне сложившейся в 2020–2022 гг. эпидемиологической ситуации особую значимость приобретают СИЗ органов дыхания (СИЗОД).

Актуальность исследования новых методов обеспечения защиты органов дыхания обусловлена тем, что современные методы, даже при соблюдении всех показаний к использованию, не решают следующие проблемы: сильное сопротивление дыханию; появление раздражения, зуда, сыпи при длительном использовании; высокая концентрация углекислого газа в подмасочном пространстве.

Перспективным в решении этих проблем является метод основанный на использовании ультрафиолетового излучения и электростатики.

На сегодняшний день существует множество методов фильтрации воздуха в СИЗОД. Особое место среди них заняли методы электростатической фильтрации. Однако у существующих методов электростатической фильтрации есть ряд существенных недостатков. Сетчатая структура электростатических фильтров создает значимое сопротивление дыханию, которое приводит к избыточному накоплению углекислого газа в подмасочном пространстве и появлению диском-

форта. А регулярное ношение таких фильтрующих устройств может привести к развитию хронических заболеваний дыхательной системы.

Перспективной технологией электростатической фильтрации является технология melt blowing [1]. Технология melt blowing заключается в создании фильтрующего материала на основе волокон, получаемых из природных и синтетических полимеров. Устройства полученные при использовании такой технологии быстро теряют электрический заряд и вследствие эффективности фильтрации. Потеря заряда в материале, полученном таким способом, зависит от множества внешних факторов, в связи с чем период продолжительной эффективной работы такой маски непостоянен и может варьироваться от одного до нескольких часов, что не позволяет использовать ее с полной эффективностью без риска.

И все же одним из наиболее значимых недостатков современных методов электростатической фильтрации является неспособность улавливания ультрадисперсных аэрозолей размером до 0,1 мкм. Опасность ультрадисперсных частиц, согласно последним исследованиям, значительно выше, чем считалась ранее. Такие частицы способны проникать в наиболее удаленные участки дыхательных путей и оседать в них. Еще одним фактором опасности ультрадисперсных частиц является их пло-

щадь поверхности на единицу массы. За счет большей площади поверхности на единицу массы такие частицы несут больший вред, чем частицы большего размера такой же массы [2].

Эффективность фильтрующих масок на основе электростатического метода обусловлена способностью улавливать ультрадисперсные частицы, обладающие электрическим зарядом.

Будь то волокна, как у материалов, созданных при помощи технологии *melt blowing*, или искусственно созданное поддерживаемое электрическое поле, необходимым условием улавливания частицы является наличие у нее достаточного заряда. Если частица не обладает электрическим зарядом, ее заряд слишком мал, либо сумма зарядов в ней равна нулю, электростатический метод фильтрации не сможет ее задержать. Из этого следует, что увеличение процента заряженных частиц и величин их зарядов сможет повысить эффективность фильтрации, а также снизит требования к размеру ячеек сетчатого материала, что позволит уменьшить сопротивление дыханию без потери эффективности.

Наиболее удобным методом повышения процентного содержания заряженных частиц и их зарядов является ионизация. Фотоионизация является наиболее эффективным методом для ионизации распыленных в воздухе аэрозолей.

Основными недостатками фотоионизации являются: возможная опасность для тканей и глаз человека, а также риск образования озона, который может вызывать отравление, и является канцерогеном. Однако при использовании длин волн излучателя более 250 нм эти риски становятся незначительными. Исследования новых методов фотоионизации аэрозолей показали, что использование ультрафиолетового излучения для ионизации может осуществляться и при малом потреблении напряжения. Невысокие требования к энергообеспечению таких систем позволяют эффективно интегрировать их в портативные фильтрующие устройства [3]. А специфика фотоионизации может быть перспективной для повышения эффективности ионизации таргетированных групп частиц и аэрозолей.

Целью настоящего исследования является поиск закономерностей влияния ультрафиолетового излучения на эффективность электростатической фильтрации и определение оптимальных параметров фильтрующей системы, а также области применения групп элементов допустимых к фильтрации.

Ввиду специфики фотоионизации и наличия электростатического поля, различные частицы будут демонстрировать различное поведение в фильтрующей конструкции, что обусловлено их химическим составом, размером, формой, зарядом и множеством других факторов. Это делает

невозможным использование существующих математических моделей поведения частиц в электростатическом поле. А использование таких моделей может дать лишь приблизительные результаты. Все это делает необходимым создание новой математической модели, учитывающей особенности фотоионизации, и проведение экспериментов, подтверждающих, что использование фотоионизации, способно повысить эффективность электростатической фильтрации.

На сегодняшний день проверка эффективности фильтрующих систем проходит с использованием парафинового и солевого аэрозолей размером порядка 0,5 мкм. Так как электростатическая фильтрация, усиленная фотоионизирующим эффектом, может оказаться чувствительной к химическому составу фильтруемых частиц, такой эксперимент не будет соответствовать желаемому разнообразию химических составов.

Для проведения корректного эксперимента, учитывающего химическую специфику фильтруемых частиц, могут использоваться волоконные индикаторные материалы [4]. Такие материалы на основе ионитов показали высокую эффективность в определении химических признаков аэрозолей и могут использоваться в качестве индикаторов в системах глубокой очистки воздуха и СИЗОД.

Исходя из актуальности проблемы вредного воздействия ультрадисперсных аэрозолей на организм человека, недостатков современных способов защиты органов дыхания, в частности электростатических, появления новых малозатратных методов фотоионизации аэрозолей, тема повышения эффективности фильтрующих устройств масок от ультрадисперсных аэрозолей является актуальной. А новые средства индикации делают возможным экспериментально доказать эффективность и специфику таких методов.

Литература

1. Тумилович, М. В. Повышение эффективности очистки воздуха от ультрадисперсных частиц под воздействием электрических полей. – 1-е изд. / М. В. Тумилович, А. Г. Кравцов. – Lambert Academic Publishing, 2021. – 68 с.
2. Hyouk-Soo K. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease / K. Hyouk-Soo, H. R. Min, C. Christopher // *Experimental & Molecular Medicine*. – 2020. – № 52.
3. Robert T. Measuring ultrafine aerosols by direct photoionization and charge capture in continuous flow / Robert T. Nishida, Adam M. Boies & Simone Hochgreb // *Aerosol Science and Technology*. – 2018. – № 5. – P. 546–556 p.
4. Косандрович, Е. Г. Индикаторные материалы на основе волоконистых ионитов для визуализации ресурса фильтров химической очистки воздуха / Е. Г. Косандрович, В. С. Солдатов, Л. Н. Шаченкова. – ИФОХ НАН, 2020. – 143–149 с.

УДК 538.958

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ГИПЕРДОПИРОВАННОГО СЕЛЕНОМ, ДЛЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ ВИДИМОГО И ИК-ДИАПАЗОНОВ

Комаров Ф.Ф.¹, Пархоменко И.Н.², Мильчанин О.В.¹, Моховиков М.А.¹, Ивлев Г.Д.², Власукова Л.А.², Альжанова А.Е.³, Ван Тин²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
Астана, Казахстан

Аннотация. Слои кремния, легированные селеном до концентраций $(4-6) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что на 4 порядка величины превышает предел равновесной растворимости этой примеси, получены ионной имплантацией с последующим импульсным лазерным отжигом (ИЛО) при плотностях энергии в импульсе $W = 0,55; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0$ и $2,5 \text{ Дж/см}^2$. Методом обратного резерфордского рассеяния ионов гелия показано, что до 60–70 % внедренной примеси находится в позиции замещения в решетке кремния. Слои, гипердопированные селеном, проявляют существенное поглощение (36–40 %) в области длин волн 1100–2400 нм.

Ключевые слова: кремний, имплантация селена, лазерный отжиг, примесная подзона, поглощение света.

EFFECT OF PULSED LASER ANNEALING ON OPTICAL PROPERTIES OF SELENIUM-HYPERDOPED SILICON FOR VISIBLE AND IR PHOTODETECTORS

Komarov F. F.¹, Parkhomenko I.², Mil'chanin O.¹, Makhavikou M.¹, Ivlev G.², Vlasukova L.², Alzhanova A.³, Wang Ting²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University

²Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

³Eurasian National University named L.N. Gymbilov
Astana, Kazakhstan

Abstract. Layers of selenium-hyperdoped silicon with dopant concentration of up to $(4-6) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ that exceeds the limit of equilibrium solubility of this impurity by 4 orders of magnitude were obtained using ion implantation followed by pulsed laser annealing (PLA) at pulse energy densities of $W = 0.55, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0$ and 2.5 J/cm^2 . Rutherford back scattering of helium ions demonstrated that up to 60–70 % of introduced impurity occupied silicon lattice sites. Selenium-hyperdoped layers exhibited substantial absorption (36–40 %) in the wavelength range of 1100–2400 nm.

Key words: silicon, selenium implantation, laser annealing, impurity subband, light absorption.

Адрес для переписки: Комаров Ф.Ф., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: Komarovf@bsu.by

Введение. В интегрированных приборах кремниевой фотоники для телекоммуникационных систем детекторы должны обладать способностью регистрировать фотоны с длиной волны более, чем 1,1 мкм, которые могут распространяться с минимумом потерь внутри оптоволокна или иных волноводных сред. Для таких фотонов кремний является прозрачным материалом.

В данной работе исследовались структурные и оптические свойства кремния, гипердопированного селеном методом ионной имплантации с последующим импульсным лазерным отжигом (ИЛО). На выявлении оптимальных условий лазерного отжига и сфокусированы рассматриваемые исследования.

Методика эксперимента. Образцы, вырезанные из пластин Si *p*-типа с удельным сопротивлением $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ с термически выращенным слоем SiO₂ толщиной 60 нм, имплантировались ионами Se⁺ при комнатной температуре в полиэнергетическом режиме. Энергия и флюенс ионов

на первом и втором этапах имплантации составляли соответственно 220 кэВ и $1,45 \cdot 10^{16}$ ион/см² и 100 кэВ, $5,12 \cdot 10^{15}$ ион/см². ИЛО исследуемых образцов SiO₂/Si:Se⁺ проводился при значениях плотности энергии $W = 0,55; 0,8; 1,0; 1,5; 2$ и $2,5 \text{ Дж/см}^2$ в наносекундном (75 нс) импульсе излучения рубинового лазера ($\lambda = 694 \text{ нм}$).

Анализ распределения концентрации атомов внедренной примеси по глубине, доли атомов селена в узлах кристаллической решетки кремния и степени кристалличности имплантированных слоев проводился методом регистрации спектров РОР ионов He⁺ с энергией 1,5 МэВ в режиме каналирования (channeling) и без него (random). Информация о распределении концентрации атомов селена по глубине получена путем обработки спектров РОР с использованием программного комплекса SIMNRA [1].

Результаты и обсуждение. Оптическая диагностика процессов, происходящих в приповерхностной области кремния при воздействии ИЛО,

производилась *in situ*. Толщина расплавленного слоя (глубина проплавления d_m) увеличивается с ростом плотности поглощенной энергии. Последующий эпитаксиальный процесс $l\text{-Si} \rightarrow c\text{-Si}$ в ситуации с ИЛО системы $\text{SiO}_2/\text{Si}:\text{Se}^+$ реализуется, если d_m превышает исходную толщину d_a ионно-аморфизированного слоя подложки.

Последовательное уменьшение задаваемого значения W приводит к сокращению времени существования жидкой фазы τ_m до 0,6 мкс (2 Дж/см^2), 0,4 мкс ($1,5 \text{ Дж/см}^2$) и 0,35 мкс (1 Дж/см^2). Понижение W до 0,8 и $0,55 \text{ Дж/см}^2$ приводит к сокращению длительности фазовых переходов до 0,2 и 0,1 мкс, соответственно, и их локализации в имплантированном слое ($d_m < d_a$).

После ИЛО наблюдается заметное перераспределение атомов примеси на глубины $d > 300 \text{ нм}$ с резким экспоненциальным спадом концентрации (рис. 1). В случае ИЛО с плотностями энергии $1,5\text{--}2,5 \text{ Дж/см}^2$ на глубинах $30\text{--}150 \text{ нм}$ формируется платообразное распределение селена в диапазоне концентраций $(9\text{--}8) \cdot 10^{20} \text{ ат./см}^3$.

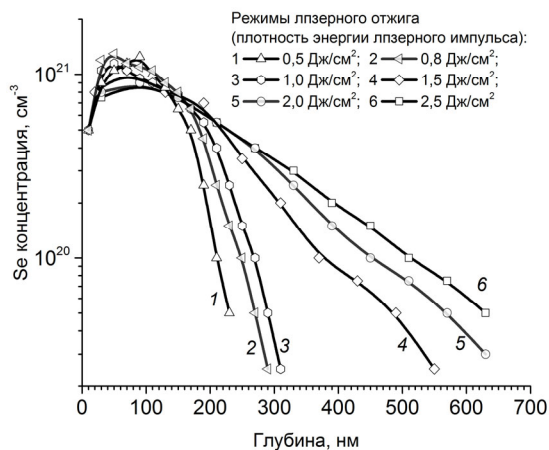
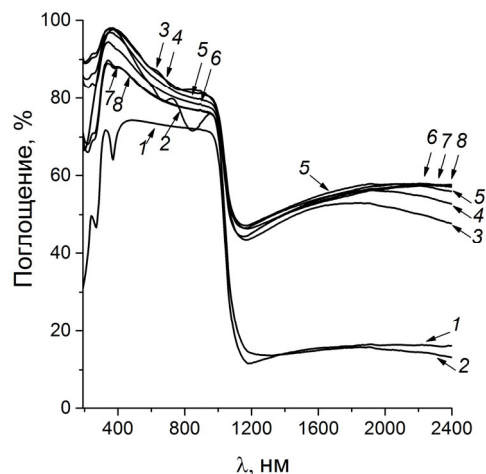


Рисунок 1 – Концентрационные профили атомов селена в слоях кремния после двойной ионной имплантации и лазерного отжига

Для оценки степени кристалличности легированного слоя кремния и определения доли атомов Se в узлах кристаллической решетки Si использованы величины χ^{Si} и χ^{Se} , извлекаемые из спектров РОР, снятых в режиме каналирования [2]. Данные величины представляют собой интегральные отношения отсчетов каналированного к случайному спектру в каналах, связанных со слоем имплантированного Si и Se соответственно. Как следует из полученных данных, только при плотностях энергии ИЛО $\geq 0,8 \text{ Дж/см}^2$ наблюдается заметное восстановление кристаллической решетки и достаточно высокая неравновесная растворимость атомов селена в кремнии (44,6 %). Оптимальной с позиции структурного совершенства (91,6 %) и

максимальной концентрации Se в замещающем положении в решетке Si (65,6 %) является плотность энергии $W = 2 \text{ Дж/см}^2$. Высокая концентрация примесных атомов, занимающих узловые положения, играет ключевую роль в оптическом поглощении как в видимом, так и ИК-диапазонах.

На рис. 2 представлены спектры поглощения до и после ИЛО. Как видно на рис. 2, а, лазерный отжиг приводит к увеличению ИК поглощения имплантированного слоя на 36–40 %. Наибольшим поглощением характеризуется образец после ИЛО при $W = 1 \text{ Дж/см}^2$.



1 – SiO_2/Si , 2 – $\text{SiO}_2/\text{Si}:\text{Se}^+$, 3 – $0,55 \text{ Дж/см}^2$, 4 – $0,8 \text{ Дж/см}^2$, 5 – $1,0 \text{ Дж/см}^2$, 6 – $1,5 \text{ Дж/см}^2$, 7 – $2,0 \text{ Дж/см}^2$, 8 – $2,5 \text{ Дж/см}^2$.

Рисунок 2 – Спектры поглощения до и после имплантации и ИЛО при разных плотностях энергии импульса

Наибольшим коэффициентом поглощения характеризуются слои, отожженные при плотностях энергии $0,55\text{--}1,5 \text{ Дж/см}^2$.

Закключение. Таким образом, в случае слоев кремния, гиперпересыщенных атомами селена (до концентраций $10^{21} \text{ атомов/см}^3$), регистрируется поглощение в ИК диапазоне на уровне 45–55 %.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках заданий 3.8.1 и 3.8.2 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», а также гранта молодых ученых по проекту «Жас галым» на 2022–2024 гг. МОН РК и РН объекта: AP14972733.

Литература

1. Mayer, M. SIMNRA User's Guide. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik / M. Mayer. – Garching, 1997. – 62 p.
2. Feldman, L. C. Materials analysis by ion channeling: Submicron crystallography / L. C. Feldman, W. Mayer, S. T. Picraux. – New York: Academic Press, 1982. – 356 p.

УДК 53.082.53

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА НА ВЕЛИЧИНУ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ОТРАЖЕНИЯ

Кочурова Д.Н., Калугин А.И., Алалыкин А.С., Альес М.Ю.

*Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
Ижевск, Российская Федерация*

Аннотация. Для измерения эффективной площади отражения сложных объектов наиболее часто применяется метод сравнения с эталоном. Экспериментально получены значения мощности лазерного излучения, отраженного от модели вертолета, в зависимости от угла рыскания при различных углах тангажа объекта. На величину эффективной площади отражения сильное влияние оказывает наличие у сложного объекта элементов, отражающих зеркально.

Ключевые слова: эффективная площадь отражения, лазерная локация, лазерное излучение.

EFFECT OF THE ORIENTATION OF A COMPLEX OBJECT ON THE VALUE OF THE LASER RADAR CROSS SECTION

Kochurova D., Kalugin A., Alalykin A., Alies M.

*Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russian Federation*

Abstract. To measurement the laser radar cross section of complex objects, the method of comparison with the reference is used. The values of the power of laser radiation reflected from the helicopter model are experimentally obtained depending on the yaw angle, at different pitch angles of the object. The value of the laser radar cross section is strongly influenced by the presence of specular reflecting elements in a complex object.

Key words: laser radar cross section, laser location, laser radiation.

*Адрес для переписки: Кочурова Д.Н., ул. им. Татьяны Барамзиной, Ижевск 34 426067, Российская Федерация
e-mail: darya310898@gmail.com*

В задачах лазерной локации и дальнометрии измеряемой характеристикой, на основе которой выполняется дальнейший анализ, является принятая фотоприемником мощность лазерного излучения. Она содержит в себе информацию о расстоянии до объекта и об эффективной площади отражения (ЭПО) объекта. ЭПО зависит от типа объекта, его пространственного положения. Вычисление ЭПО простых объектов не вызывает трудностей, но объектом исследования в основном являются сложные объекты, состоящие из неплоских поверхностей, которые могут содержать нескольких элементов из различного материала, разнесенных в пространстве. Нахождение величины эффективной площади отражения таких объектов является сложной задачей, и одним из способов нахождения ЭПО является моделирование объекта исследования и его оптических характеристик. Эффективную площадь отражения σ сложного объекта можно записать в следующем виде [1]:

$$\sigma = \int_S f(x, y, z) \rho_t dS,$$

где $f(x, y, z)$ – функция, описывающая пространственное распределение интенсивности лазерного излучения ($I_l = I_0 \cdot f(x, y, z)$ – интенсивность излучения; I_0 – интенсивность на оси пучка); ρ_t – двунаправленная функция отражательной способности (ДФОС) [2]; S – видимая и освещаемая площадь поверхности объекта.

Поверхность сложных объектов часто невозможно описать аналитической функцией. Также для моделирования необходимо знать ДФОС каждого элемента dS объекта, получение которой представляется затруднительным, так как ρ_t содержит много подгоночных параметров, которые подбираются в соответствии с экспериментальными данными. Для экспериментального нахождения величины эффективной площади отражения применяется метод сравнения с эталоном [3]:

$$\sigma = \sigma_3 \frac{P}{P_3},$$

где P – мощность, отраженная от объекта исследования; σ_3 – ЭПО эталона; P_3 – мощность, отраженная от эталона.

Так как отношение σ_3/P_3 является постоянной величиной для всех измерений, достаточно экспериментально измерить принятую после отражения от объекта мощность лазерного излучения. При этом ЭПО объекта будет иметь такую же зависимость, что и отраженная мощность. Поэтому для анализа результатов достаточно рассмотреть зависимость мощности P . Эксперимент проведен с использованием макета измерительного стенда, представленного в работе [4]. Источником лазерного излучения служил DPSS лазерный модуль CPS532 (производства Thorlabs, Inc) с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 4,1 мВт. Передающий объектив формирует на расстоянии

4 м гауссов пучок с радиусом 10 см (по падению интенсивности). В качестве фотоприемного устройства был использован кремниевый фотодиодный детектор PH100-SI-NA-OD1-D0 производства GENTEC-EO, Inc. В качестве зондируемого объекта использовалась модель вертолета, представленная на рис. 1, габаритные размеры ДхШхВ 32х25х14 см.

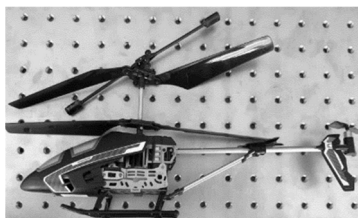
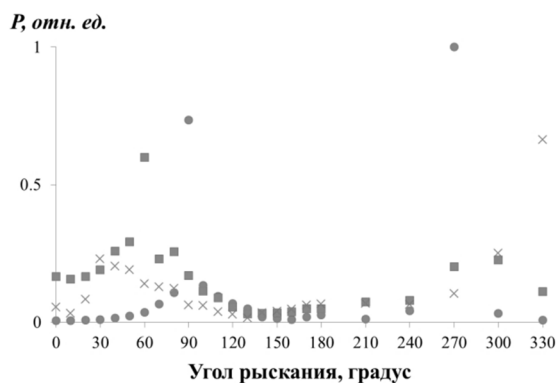


Рисунок 1 – Модель вертолета

Модель имеет сложную форму и состоит из различных материалов: пластик и металл. Вертолет располагался на наклонно-поворотном креплении. Измерения мощности проводились при наклонах вертолета по углу тангажа от -60 до 90° , по углу рыскания от 0 до 360° , по углу крена от 0 до 90° . Начальное положение вертолета: пучок лазерного излучения направлен на носовую часть вертолета.

На рис. 2 представлены результаты измерений мощности лазерного излучения, отраженной от модели вертолета, в зависимости от угла рыскания для углов тангажа: $0, 30, 60^\circ$. Для наглядности каждый график нормирован на единицу по максимально принятому значению – 11.6 нВт, при этом данные для углов тангажа 30 и 60° умножены на 10 .



кружки – 0° , квадрат – 30° , крест – 60°

Рисунок 2 – График зависимости мощности P , отраженной от вертолета, от угла рыскания при различных углах тангажа объекта

Как видно из представленных данных при изменении угла тангажа вертолета изменяется значение угла рыскания, при котором наблюдается максимум принятой мощности. Так при угле тангажа 0° максимум принятой мощности наблюдается при углах рыскания 90 и 270° , при 30° – 60 и 300° , при 60° – 30 и 330° . Такая зависимость объясняется тем, что видимая и освещаемая поверхность вертолета при данных ориентациях максимальна. Наличие резких максимумов связано с тем, что у модели вертолета становятся видны и освещены металлические части, которые отражают зеркально (направлено), тем самым вносят большой вклад в значение принятой мощности, по сравнению с диффузно отражающим пластиком. Асимметричность модели вертолета, неточность ее установки на платформу являются возможными причинами отличия максимальных значений мощности при одном угле тангажа. Максимальное значение принятой мощности (11.6 нВт) среди всех измеренных значений наблюдается, когда модель вертолета ориентирована следующим образом: угол рыскания – 270° , угол тангажа – 0° . В этом случае модель вертолета имеет наибольшую видимую площадь вертолета в целом, в том числе наибольшую часть металлических составляющих.

Таким образом, ориентация объекта сильно влияет на величину эффективной площади отражения, в особенности, когда видны и освещены элементы с зеркальным отражением. Зная тип объекта и его ориентацию, имея данные по его эффективной площади отражения, можно из значения отраженной мощности извлечь информацию о расстоянии до объекта, что возможно применять в системах слежения.

Литература

1. Steinvall, Ove. Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections / Steinvall Ove // Applied optics. – 2000. – Vol. 39.
2. Zhang, H. Three-Dimensional Laser Radar Range Imagery of Complex Target with Rough Surfaces / Hanlu Zhang and Biao Wang // Progress In Electromagnetics Research M. – 2018. – Vol. 73. – P. 17–24.
3. Измерение лазерно-локационных характеристик воздушных объектов / И. М. Хмаров [и др.] // Труды МАИ. – 2020. – № 115. – С. 5.
4. Макет измерительного стенда для определения эффективной площади отражения объектов сложной формы / С.Ю. Барышникова, Д.Н. Кочурова [и др.] // 13-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2020». – Минск: БНТУ. – С. 17–18.

УДК 52621. 373

СОГЛАСОВАНИЕ ВОЛНОВОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МОНТАЖА ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Петухов И.Б., Шепелевич А.В.

ОАО «Планар-СО»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы методы согласования пьезоэлектрического излучателя с конструкцией используемого волновода ультразвукового преобразователя для проволочного монтажа в изделиях электронной техники. Установлено, что рассогласование резонансных частот пьезоэлектрического излучателя и волновода не должно превышать 1–1,4 кГц во избежание появления паразитных мод колебаний, снижающих качество микросварки. Проведенные технологические испытания подтверждают данное утверждение.

Ключевые слова: пьезоэлектрический излучатель, волновод, ультразвуковой преобразователь, проволочный монтаж.

MATCHING ULTRASONIC TRANSDUCER HORN FOR WIRE BONDING WITH PIEZOELECTRIC DRIVER

Petuhov I., Shepelevich A.

OJSC «Planar-SO»

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The methods of matching of the piezoelectric driver with the design of the ultrasonic transducer horn used for wire bonding in the electronic devices are investigated. It is established, that mismatch of resonance frequencies of the piezoelectric driver and the horn should not exceed 1–1,4 kHz in order to avoid appearance of parasitic oscillation modes, reducing the quality of micro bonding. Technological tests carried out confirm this statement.

Key words: piezoelectric driver, horn, ultrasonic transducer, wire bonding.

Адрес для переписки: Петухов И.Б., ОАО «Планар-СО», пр. Партизанский, 2/6, 220033 Минск, Республика Беларусь
e-mail: petuchov@kbtcm.by

В настоящее время в установках монтажа проволочных и ленточных выводов в изделиях электронной техники используется ультразвуковая или термозвуковая микросварка с резонансной частотой ультразвукового преобразователя (УЗП) в широком диапазоне частот – в основном от 60 до 140 кГц. Использование УЗП с резонансной частотой ≥ 100 кГц расширяет технологические возможности оборудования монтажа выводов, обеспечивая гибкие режимы микросварки на контактных площадках кристаллов и внешних выводах корпуса.

Современный УЗП для установок микросварки представляет собой классическую конструкцию, состоящую из соединенных между собой пьезоэлектрического излучателя и волновода, имеющего на конце отверстие для зажима рабочего инструмента (рис. 1). Основной функцией волновода является подвод к рабочему инструменту усиленных по амплитуде продольных механических колебаний от пьезоэлектрического излучателя (пьезодрайвера), который преобразует подводимый электрический сигнал в механические колебания за счет обратного пьезоэффекта.

Такая конструкция позволяет проводить тестирование пьезоэлектрического излучателя по электрическим параметрам независимо от волновода и при необходимости проводить его замену. Параметры пьезоэлектрического излучателя или сборки УЗП (пьезоизлучатель с привинченным волноводом посредством резьбовой шпильки) измеряют анализатором импеданса с вычислением значений элементов известной эквивалентной схемы УЗП, его резонансной частоты F_s , добротности Q и импеданса R_l (рис. 2).



Рисунок 1 – Ультразвуковые преобразователи для микросварки проволочных выводов

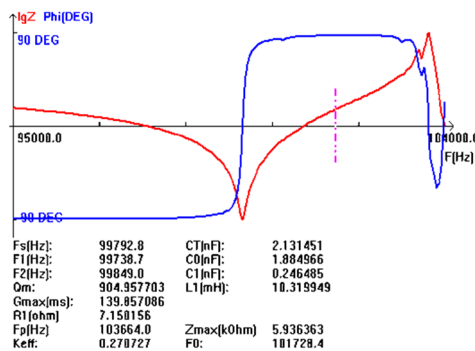


Рисунок 2 – Ультразвуковые преобразователи для микросварки проволочных выводов

Очевидно, что резонансная частота пьезоэлектрического излучателя должна совпадать или быть максимально близка к собственной резонансной частоте волновода, при этом резонансная частота сборки УЗП, измеренная анализатором импеданса будет близка к частоте пьезоэлектрического излучателя. Экспериментально установлено, что отклонение частоты резонанса собранного УЗП более 1,4 кГц от резонанса пьезоэлектрического излучателя приводит к ухудшению качества присоединения.

Для выяснения причины было проведено моделирование волноводов разработанных для УЗП на резонансную частоту ~ 100 кГц в среде САПР Comsol Multiphysics. Результаты моделирования показывают, что при разнице резонансных частот пьезоэлектрического излучателя и собственной частоты волновода более 1,4 кГц возникают различные моды колебаний в районе зажима рабочего инструмента- изгибные, крутильные (рис. 3). При разнице резонансных частот менее 1 кГц мода колебаний- продольная (рис.4). Форма мод колебаний волновода также зависит от геометрии самого волновода. Поэтому, целесообразно в процессе проектирования волновода проводить моделирование в вышеуказанном САПР или аналогичном для анализа спектра собственных колебаний волновода.

Из рис. 3 видно также значительное изменение распределения узлов и пучностей вдоль оси волновода от места стыковки с пьезоэлектрическим излучателем до точки зажима рабочего инструмента в торце волновода по сравнению с рис.4. Эти негативные явления обычно отражаются на диаграмме по рис.2 в виде небольших пиков на кривой импеданса, что может сигнализировать о необходимости более тщательной диагностики и настройке собранного УЗП.

Технологические испытания проводились на установке присоединения выводов ЭМ-4341-1[1] методом «клин-клин» в режиме сборки реальных приборов алюминиевой проволокой диаметром 50 мкм. Текущая прочность выводов составила 21–23 г. При этом использовался волновод с раз-

личными излучателями с резонансными частотами 92,4 кГц, 94 кГц, 99,8 кГц и 100,3 кГц. Наилучшие результаты (по выходу годных изделий) достигнуты с пьезоэлектрическими излучателями 99,8 кГц и 100,3 кГц.

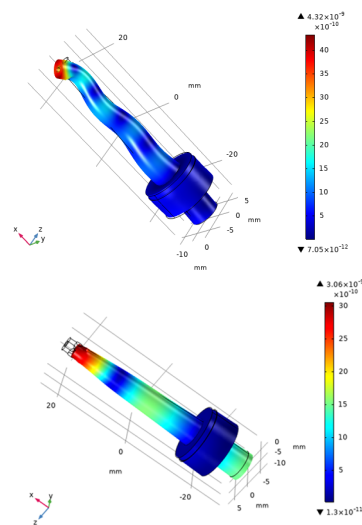


Рисунок 4 – Продольные колебания в разработанном волноводе на частоте резонанса 100,26 кГц

Литература

1. Петухов, И. Б. Автоматическая установка клинового монтажа проволочных межсоединений малого диаметра 2,5D электронных модулей / И. Б. Петухов. – Электроника: наука, технология, бизнес. – 2022. – № 5. – С. 66–72.

УДК 621

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ Nd-СОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Прусова И.В., Прихач Н.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На примере алюмосиликатного неодимового стекла определены параметры интенсивности Ω_2 , Ω_4 и Ω_6 двумя различными методами: путем усреднения по семи основным абсорбционным переходам ионов Nd^{3+} и путем первоначального исключения сверхчувствительного перехода, а затем, используя полученные значения Ω_4 и Ω_6 , определения Ω_2 . Установлено, что различия полученных таким образом значений параметров интенсивности практически не выходят за пределы ошибки эксперимента.

Ключевые слова: абсорбционные переходы, параметры интенсивности, сверхчувствительный переход, неодимовое стекло.

DETERMINATION OF INTENSITY PARAMETERS FOR Nd-CONTAINING GLASSES BASED ON $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Prusova I., Prikhach N.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Using neodymium aluminosilicate glass as an example, the intensity parameters Ω_2 , Ω_4 , and Ω_6 were determined by two different methods: by averaging over seven main absorption transitions of Nd^{3+} ions and by initially eliminating the supersensitive transition and then, using the obtained values of Ω_4 and Ω_6 , determining Ω_2 . It has been established that the differences in the values of the intensity parameters obtained in this way practically do not go beyond the limits of the experimental error.

Key words: absorption transitions, intensity parameters, supersensitive transition, neodymium glass.

Адрес для переписки: Прусова И.В., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

При необходимости ускоренного выяснения пригодности легированных лантаноидами материалов в качестве активных элементов лазеров бывает достаточно определить параметры интенсивности Ω_2 , Ω_4 и Ω_6 (параметры Джадда) [1] и с помощью хорошо известных формул оценить основные люминесцентные характеристики вещества, не проводя его полного спектрально-люминесцентного исследования. При этом, параметр Ω_2 определяет в основном лишь интенсивность «сверхчувствительных» переходов. Поэтому существует определенная неоднозначность в методике определения данного параметра: путем усреднения по всем доступным абсорбционным полосам, либо вначале исключить сверхчувствительные переходы из рассмотрения и определить Ω_4 и Ω_6 , а затем с использованием последних определить Ω_2 . В настоящей работе предпринята попытка оценить, насколько велико расхождение значений параметров интенсивности, полученных обоими способами на примере Nd-содержащих стекол, которые находят достаточно широкое использование в лазерной технике [2].

Стекла для исследования были синтезированы методом плавления, шихта готовилась по технологии, аналогичной описанной в [3] из реактивов квалификации не хуже ЧДА. Плотность ρ определялась методом гидростатического взвешивания, а показатель преломления n_D – иммерсионным. Концентрация ингредиентов в стеклах определялась с помощью нейтронно-активационного анализа с ошибкой $\pm 3\%$. Объемная концентрация ионов Nd^{3+} вычислялась по формуле:

$$N = 0,02 N_A \rho C_n / M, \quad (1)$$

где N_A – число Авогадро; C , n_x и M – масс % оксида, количество искоемых элементов в формуле оксида и его молярная масса, соответственно.

Спектры поглощения исследованных стекол регистрировались на спектрофотометре Cary-500. Поглощение активатора, обусловленное соответствующим электронным переходом, определялось как разность измеренных значений $k(\lambda)$ в области полосы поглощения и на ближайшем участке, где поглощение активатора отсутствует.

Ω_t – параметры интенсивности оптических переходов РЗИ внутри 4f-оболочки (параметры Джадда), определялись методом сингулярного разложения [4] системы уравнений, описывающих спектры поглощения:

$$\int k_{ji}(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi^3 e^2 \bar{\lambda}_{ji} N_{Ln}}{3ch(2J+1)} \frac{(n^2 + 2)^2}{9n} \times \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \left| \left\langle (S, L) J \left\| U^{(t)} \right\| (S', L') J' \right\rangle \right|^2$$

Здесь e – заряд электрона; h – постоянная Планка; c – скорость света; $\bar{\lambda}$ – длина волны,

соответствующая барицентру спектральной полосы; n полагалось равным n_D ; $\langle (S, L) J \left\| U^{(t)} \right\| (S', L') J' \rangle$ – матричные элементы тензорного оператора ранга t для переходов из состояния с квантовыми числами S, L, J в состояние S', L', J' , которые почти не зависят от вида основы, взяты из [5]. Для расчета удельных интенсивностей поглощения ионов Nd^{3+} использовались следующие полосы:

$${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}, {}^4I_{15/2}, {}^4F_{3/2}, {}^4F_{5/2} + {}^2H_{9/2}, {}^4F_{7/2} + {}^4S_{3/2}, {}^4G_{5/2} + {}^2G_{7/2}, {}^2K_{15/2} + {}^4G_{7/2} + {}^4G_{9/2}.$$

Состав, плотность, показатель преломления, абсорбционные характеристики стекол и параметры интенсивности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Состав, плотность, показатель преломления, абсорбционные характеристики стекол и параметры интенсивности

№	1	2	3	4	
$\rho, \frac{g}{cm^3}$	3,81	3,88	3,49	3,89	
$N, 10^{20}$ ионов/ cm^3 $\delta = \pm 3\%$	Si	61	74	72	56
	Al	112	90	125	120
	La	80	81	50	58
	Nd	1,25	5,95	10,5	26
n_D	1,69 (0)	1,69 (2)	1,69 (6)	1,69 (2)	
	I_{Nd}	10^{-19}	360±13	389±9	338±8
\bar{I}_{Nd}	см	157±4	178±4	169±3	151±4
Ω_2	10^{-20} cm^2	4,0±0,2	4,7±0,2	4,4±0,1	3,6±0,2
		3,8±0,2	4,4±0,2	4,3±0,1	3,7±0,2
		3,2±0,2	3,7±0,1	3,5±0,1	3,3±0,1
		3,3±0,2	3,8±0,1	3,6±0,1	3,4±0,1
Ω_4	10^{-20} cm^2	4,4±0,2	4,5±0,1	3,9±0,1	3,7±0,1
		4,5±0,2	4,7±0,1	3,9±0,1	3,6±0,1
		4,4±0,2	4,5±0,1	3,9±0,1	3,7±0,1
		4,5±0,2	4,7±0,1	3,9±0,1	3,6±0,1
Ω_6	10^{-20} cm^2	4,4±0,2	4,5±0,1	3,9±0,1	3,7±0,1
		4,5±0,2	4,7±0,1	3,9±0,1	3,6±0,1
		4,4±0,2	4,5±0,1	3,9±0,1	3,7±0,1
		4,5±0,2	4,7±0,1	3,9±0,1	3,6±0,1

Здесь I_{Nd} – удельное поглощение ионов Nd^{3+} , \bar{I}_{Nd} – парциальное удельное поглощение, обусловленное переходом ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4G_{5/2} + {}^2G_{7/2}$; верхнее значение параметров интенсивности получено при первоначальном исключении из расчета сверхчувствительного перехода ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4G_{5/2} + {}^2G_{7/2}$, нижнее – без исключения последнего. Относительная ошибка эксперимента определялась в соответствии с [6].

Как видно, в случае ионов Nd^{3+} различия полученных значений параметров интенсивности практически не выходят за пределы ошибки эксперимента, однако это не означает, что для других ионов, например Er^{3+} , ситуация будет аналогичной.

Благодарности. Авторы выражают признательность Малашкевичу Г.Е. за любезно предоставленные для выполнения этой работы образцы стекол.

Литература

1. Judd B. R. Optical absorption intensities of rare-earth ions / B. R. Judd // *Phys. Rev.* – 1962. – Vol. 127, № 3. – С. 750–761.
2. Справочник по лазерам / Под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советское радио, 1978. – Т. 1. – С. 259–282.
3. Черчес, Х. А. О взаимодействии хлорида неодима с силикатом натрия / Х. А. Черчес, Н. И. Ближнюк, Л. Г. Дашинский // *Стекло, ситаллы и силикатные*

- материалы: Сб. ст. / – Минск: Вышэйшая школа, 1980. – № 9. – С. 99–102.
4. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. – М.: Мир, 1980. – С. 810–821.
 5. Carnal, W. T. Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions / W. T. Carnal, P. R. Fields, K. Rajnak // *J. Chem. Phys.* – 1968. – V. 49, №. 10. – P. 4424–4442.
 6. Zaidel, A. N. Errors of Measurements of Physical Quantities / A.N. Zaidel // *Nauka, Leningrad.* – 1985.

УДК 517.958

ЗАДАЧА О ПРОДОЛЬНОМ УДАРЕ ПО УПРУГОМУ СТЕРЖНЮ С УПРУГИМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ ОДНОГО ИЗ КОНЦОВ

Корзюк В.И.^{1,2}, Рудзько Я.В.³

¹*Институт математики Национальной академии наук Беларуси*

²*Белорусский государственный университет,*

³*ООО «Открытые информационные системы»,
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Настоящая работа посвящена решению краевой задачи о продольном ударе по однородному упругому стержню постоянного поперечного сечения в случае, когда один из их концов жестко закреплен, а второй конец соединен пружиной с неподвижной опорой и подвергся удару некоторым грузом.

Ключевые слова: продольный удар, волновое уравнение, смешанная задача, метод контурного интеграла, обобщенное решение.

THE PROBLEM OF A LONGITUDINAL IMPACT ON AN ELASTIC BAR WITH AN ELASTIC ATTACHMENT OF ONE OF ITS ENDS

Korzyuk V.^{1,2}, Rudzko J.³

¹*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus*

²*Belarusian State University,*

³*Open Information Systems LLC,
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The present work is devoted to solving the boundary value problem of longitudinal impact on a homogeneous elastic bar of a constant cross-section. One of the bar's ends is rigidly fixed, and the other end is connected by a spring to a fixed support and was subjected to an impact by some load.

Key words: longitudinal impact, wave equation, mixed problem, method of contour integral, generalized solution.

Адрес для переписки: Рудзько Я.В., ул. В. Гастинец, 143Б, к. 579, Молодечно 222310, Республика Беларусь
e-mail: janucz@yahoo.com

Постановка задачи. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ однородный упругий стержень $0 \leq x \leq l$ постоянного поперечного сечения, конец которого $x = 0$ жестко закреплен, а конец $x = l$ соединен пружиной с неподвижной опорой, подвергся удару некоторым грузом по концу $x = l$, причем в дальнейшем груз остается в соприкосновении со стержнем. Тогда, пренебрегая весом стержня как силы и его возможными вертикальными отклонениями, для определения смещений $u(t, x)$ сечений стержня нужно найти решение уравнения

$$(\partial_t^2 - a^2 \partial_x^2)u(t, x) = 0, 0 < t < \infty, 0 < x < l, \quad (1)$$

при начальных условиях

$$u(0, x) = 0, 0 \leq x \leq l, \partial_t u(0, x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < l, \\ v, & x = l, \end{cases} \quad (2)$$

и граничных условиях

$$u(t, 0) = 0, (h + k \partial_x + m \partial_t^2)u(t, l) = 0, 0 \leq t < \infty. \quad (3)$$

В задаче (1) – (3) $a^2 = E/\rho$, E – модуль упругости стержня, ρ – плотность материала стержня, $h > 0$, $k > 0$, $m > 0$ – физические постоянные, характеризующие закрепление конца $x = l$ стержня и $v \in \mathbb{R}$ – физическая постоянная, характеризующая скорость ударившего груза.

Отметим, что значения производных в условиях (2) и (3) задачи (1) – (3) следует понимать не в смысле предельного перехода, а в смысле их значений в точках соответствующих отрезков.

Построение формального решения. Применив к задаче (1) – (3) метод контурного интеграла [1], ее формальное решение можно представить в виде

$$u(t, x) = \frac{1}{2\pi i} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Gamma_n} \frac{amv \operatorname{sh}(px/a) \exp(pt)}{\Delta(p)} dp, \quad (4)$$

где $\Delta(p) = kp \operatorname{ch}(pl/a) + a(h + mp^2) \operatorname{sh}(pl/a)$, Γ_n ($n \in \mathbb{N}$) – последовательность расширяющихся замкнутых контуров в виде прямоугольников с вершинами в точках $h + i\pi n$, $-h + i\pi n$, $-h - i\pi n$, $h - i\pi n$ ($0 < h < \infty$) в комплексной p -плоскости.

Вычислим на основании известной теоремы о вычетах интеграл в (4), получим, что

$$u(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2a^{-1}lv \sin(at\omega_n/l) \sin(x\omega_n/l)}{(\omega_n^2 - \alpha - \beta) \cos(\omega_n) + (2 + \alpha)\omega_n \sin(\omega_n)}, \quad (5)$$

где $\alpha = kla^{-2}m^{-1}$, $\beta = hl^2a^{-2}m^{-1}$ и ω_n – положительные корни уравнения $\alpha \omega \operatorname{ctg}(\omega) = \omega^2 - \beta$, занумерованные в порядке возрастания.

Функция (5) представляет собой формальное решение задачи (1) – (3) в виде обобщенного тригонометрического ряда.

Обоснование решения и его свойства. В силу разрыва во втором из начальных условий (2) задача (1) – (3) не имеет классического решения, поэтому речь будет идти об обобщенном решении, которое определим следующим образом: назовем обобщенным решением задачи (1) – (3), функцию u , которая непрерывна на множестве $\bar{Q} = [0, \infty) \times [0, l]$, имеет в \bar{Q} почти всюду непрерывные производные первого порядка, а производные второго порядка представляются в области $Q = (0, \infty) \times (0, l)$ обобщенными тригонометрическими рядами, суммируемыми почти всюду методом Чезаро первого порядка (класс таких функций обозначим через \mathcal{W}) и удовлетворяет почти всюду в Q уравнению (1) и всюду начальным условиям (2) и граничным условиям (3).

Взяв n -ый член ряда (5) в правой части равенств, подставим вместо входящих туда величин их асимптотические представления и, тогда получим, что он в \bar{Q} имеет порядок малости n^{-2} . Следовательно, ряд для u , состоящий из непрерывных функций в \bar{Q} , равномерно сходится в \bar{Q} , и u является непрерывной функцией на том множестве. Поэтому ряд, стоящий справа в (5), можно почленно дифференцировать сколько угодно раз по t и x в смысле обобщенных функций [2], и суммы полученных после дифференцирования рядов будут слабыми обобщенными производными функции u в \bar{Q} .

Обозначим множество лежащих в \bar{Q} отрезков прямых линий $x + at = (2m + 1)l$ и $x - at = -(2m + 1)l$ ($m \in \mathbb{N} \cup \{0\}$) как L .

Для дальнейшего удобно ввести обозначение: пусть функция v терпит конечные разрывы на ле-

жащих в некоторой области дугах некоторых кривых линий, тогда через v^+ и v^- будем обозначать соответственно предельные значения, которые принимает функция при стремлении сверху и снизу к точкам указанных выше дуг по путям, не касательным к этим дугам.

Из свойств сумм рядов для функций $\partial_t u$, $\partial_x u$, $\partial_t^2 u$, $\partial_t \partial_x u$, $\partial_x^2 u$ получаем, что а) частные производные $\partial_t u$ и $\partial_x u$ терпят на отрезках L конечные разрывы, которые соответственно равны $(\partial_t u|^+ + \partial_t u|^-) / 2$ и $(\partial_x u|^+ + \partial_x u|^-) / 2$; б) ряды, представляющие $\partial_t^2 u$, $\partial_t \partial_x u$ и $\partial_x^2 u$, суммируются в \bar{Q} вне отрезков L к непрерывным функциям методом Чезаро первого порядка.

Непосредственной подстановкой ряда (5) в уравнение (1) с учетом свойств б) можно убедиться, что уравнение (1) удовлетворяется в \bar{Q} вне отрезков L , т. е. удовлетворяется почти всюду. Аналогично, учитывая свойства а), можно проверить удовлетворение всюду первого из начальных условий (2) и граничных условий (3), причем ряд для частной производной $\partial_t^2 u$ на полупрямой $x = l$, $t \leq 0$ сходится в обычном смысле и его сумма на этой прямой испытывает разрывы первого рода.

Таким образом, задача (1) – (3) имеет обобщенное в смысле данного в настоящей работе решение u , представимое в виде (5), непрерывное в \bar{Q} и обладающее указанными выше свойствами а) и б).

Единственность решения. Будем говорить, что две функции, разрывные на некотором подмножестве V замкнутого множества \bar{D} , имеют на множестве V одинаковые разрывы (конечные или бесконечные или конечные и бесконечные одновременно), если их разность в \bar{D} является непрерывной функцией. Докажем, что в классе \mathcal{W} задача (1) – (3) не может иметь двух решений u_1 и u_2 , обладающих тем свойством, что частные производные до второго порядка включительно от этих функций имеют одинаковые разрывы.

Предположим, что задача (1) – (3) имеет два непрерывных решения u_1 и u_2 , обладающие указанными выше свойствами. Пусть $u = u_1 - u_2$, а тогда $u \in C^2(\bar{Q})$. Кроме того, функция u будет решением задачи (1), (3) с добавлением однородных начальных условий

$$u(0, x) = \partial_t u(0, x) = 0, 0 \leq x \leq l. \quad (6)$$

Функции u , определяемой как решение задачи (1), (3), (6), сопоставим функцию «энергии» E

$$E(t) = \frac{a^2 m}{2k} (\partial_x u(t, l))^2 + \frac{a^2 h}{2k} (u(t, l))^2 + \frac{1}{2} \int_0^l \left((\partial_t u(t, x))^2 + a^2 (\partial_x u(t, x))^2 \right) dx. \quad (7)$$

Теперь, продифференцируем (7), выполним интегрирование по частям и воспользуемся (1) и (3), чтобы получить $E'(t) = 0$. Значит $E(t) = \text{const}$. Пользуясь начальными условиями (6), вычисляем $E(0) = 0$. А значит, $E \equiv 0$. Отсюда следует, что $\hat{\partial}_x u = \hat{\partial}_x u = 0$ в \bar{Q} , т. е. $u \equiv \text{const}$ в \bar{Q} . Так как $u \in C(\bar{Q})$, то из $u \equiv \text{const}$ (7) следует, что $u \equiv 0$ в \bar{Q} . Из последнего результата и равенства $u = u_1 - u_2$ следует $u_1 = u_2$ в \bar{Q} .

Литература

1. Расулов, М. Л. Метод контурного интеграла и его применение к исследованию задач для дифференциальных уравнений / М. Л. Расулов. – М.: Наука, 1964. – 464 с.
2. Владимиров, В. С. Обобщенные функции в математической физике / В. С. Владимиров. – М.: Наука, 1979. – 320 с.

УДК 621.791.725

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НИТИНОЛА В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ Савченко А.Л.¹, Минченя В.Т.¹, Роговцова А.С.¹, Сатторов С.¹, Августинович А.Л.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены характеристики фазовых переходов в проволоке из никелида титана при различных режимах лазерной сварки. Показано, как нагрев в зоне сварки влияет на характеристики материала и свойства памяти формы. Предложены рекомендации по практическому использованию результатов исследования.

Ключевые слова: нитинол, лазерная сварка, механические характеристики, фазовые переходы.

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF NITINOL IN THE ZONE OF LASER WELDING

Savchenko A.¹, Minchenya V.¹, Rogovtsova A.¹, Sattorov S.¹, Avgustinovich A.²

¹Belarusian National Technical University

²Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The characteristics of phase transitions in a titanium nickelide wire under various laser welding modes are considered. It is shown how heating in the weld zone affects material characteristics and shape memory properties. Recommendations for the practical use of the research results are proposed.

Key words: nitinol, laser welding, mechanical characteristics, phase transitions.

Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

При изготовлении различных изделий из нитиноловой проволоки, например, элементов эндопротезов сосудов, требуется соединение концов проволоки для получения замкнутых структур. Одним из наиболее производительных методов является сварка. При изготовлении изделий медицинского назначения в условиях Научно-технологического парка БНТУ «Политехник» используется лазерная сварка, выполняемая после термообработки элементов на сварочном автомате Rofin Select производства ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co, Германия. Сварка выполняется внахлест.

При испытаниях и эксплуатации сварных соединений возникают две основные проблемы: разрушение проволоки при статическом или циклическом нагружении в непосредственной близости от сварного шва и изменение характера фазовых переходов в нитиноле в сварном шве и непосредственно возле него вследствие нагрева при сварке, хотя по данным [1] сверхупругость и

эффект памяти формы обычно сохраняются в материале после сварки. На рисунке 1 показан стент-элемент, подвергавшийся циклическому нагружению. Усталостное разрушение произошло непосредственно возле сварного шва.

Для оценки влияния режимов сварки на характеристики шва использовалась нитиноловая проволока диаметром 0,43 мм без термообработки, используемая для изготовления каркасов стент-графтов. Были изготовлены образцы, сваренные внахлест точечной лазерной сваркой с различным количеством точек сварки и, следовательно, с разной степенью нагрева в процессе соединения. Образцы имели вид двух сваренных прямолинейных фрагментов проволоки. На рис. 2 показаны примеры сварных швов.

Полученные образцы подвергались статическому нагружению на разрывной машине MTS Systems до разрушения и на специальном приспособлении для циклического нагружения. Кроме того, образцы материала сварного шва и участков

проволоки на различных расстояниях от шва подвергались анализу фазовых переходов на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) Mettler Toledo.

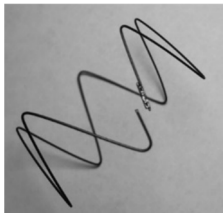


Рисунок 1 – Разрушение сварного стент-элемента

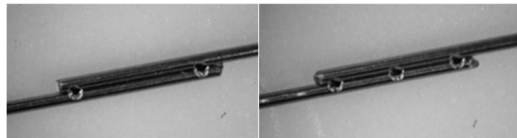


Рисунок 2 – Сварные швы

В ходе эксперимента выяснилось следующее. Разрушение образцов как при статическом, так и при циклическом нагружении происходит в непосредственной близости от сварного шва, сам шов не разрушается даже при минимальном количестве точек сварки (рис. 3). При этом прочность сваренного образца на разрыв ниже, чем у сплошного материала примерно на 30% при использовании сплошного шва и снижается при уменьшении числа точек сварки.

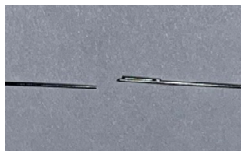


Рисунок 3 – Образец после испытания статическим нагружением

Непосредственно шов имеет прочность основного материала. На рис. 4 видно, что в поперечном разрезе два фрагмента проволоки фактически представляют собой одно целое, то есть выделить зону шва визуально невозможно. Это объясняется тем, что при сварке не используется дополнительный материал, а соединение получается за счет расплавления основного материала.

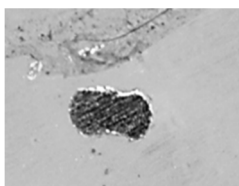
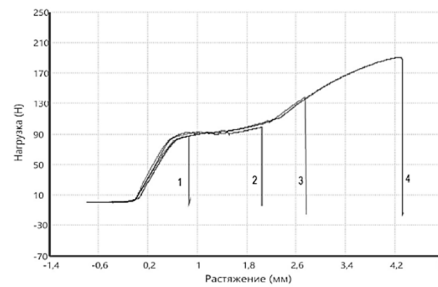


Рисунок 4 – Поперечный разрез сварного шва

На рис. 5 показаны графики нагружения образцов до разрушения, полученные на разрывной машине.

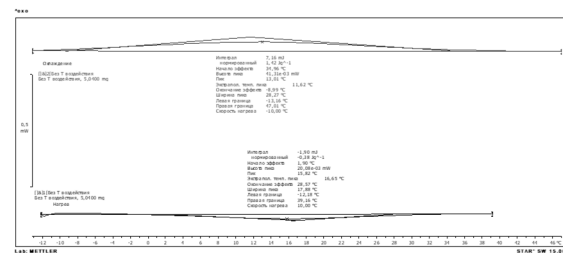


1 – две точки сварки; 2 – три точки; 3 – сплошной шов; 4 – сплошная проволока

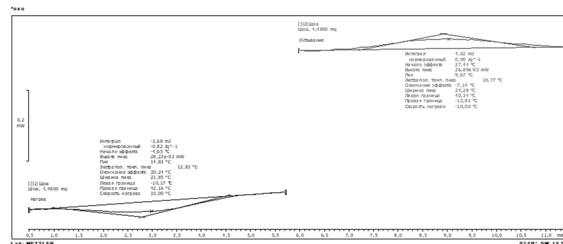
Рисунок 5 – Графики нагружения образцов

Видно, что прочность увеличивается по мере увеличения точек сварки, но не достигает прочности сплошной проволоки. Это можно объяснить концентрацией напряжений в зоне, непосредственно примыкающей к шву.

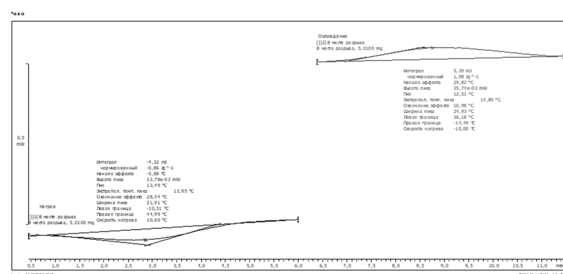
На рис. 6 приведены кривые, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии.



а



б



в

а – исходный материал; б – материал сварного шва;

в – материал в месте разрыва

Рисунок 6 – Графики ДСК

Из анализа кривых ДСК видно, что нагрев при сварке приводит к изменению характеристик фазовых переходов, тем больше, чем ближе участок проволоки к сварному шву. Это может привести к неравномерной жесткости изделия при рабочей температуре и, следовательно, к неравномерной деформации.

Следует сделать вывод, что при разработке новых технологических процессов требуются методы соединения, минимизирующие температурное воздействие на материал. В настоящий момент

ведутся исследования комбинированных методов соединения, использующих одновременно как сварку, так и пластическое деформирование.

Благодарности. Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник»

Литература

1. Ming H. Wu / Fabrication of Nitinol Materials and Components In: Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies / Ming H. Wu. – Kunming, China, 2001. – P. 285–292.

УДК 617.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

Савченко А.Л., Муминбоев А.Д.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием изделий медицинского назначения. Задачей исследования является анализ различных форм поперечного сечения пластин и выбор оптимальной формы с точки зрения обеспечения максимальной прочности и жесткости при минимальной высоте профиля. Показано, что наилучшими параметрами с точки зрения максимальных прочности и жесткости при минимальной высоте профиля обладает трубчатое сегментное сечение, однако оно является недостаточно технологичным, так как для некоторых материалов получение сортамента в виде трубок является затруднительным. Поэтому следует обратить внимание на фрезерованные профили, такие как П-образный и уголкового.

Ключевые слова: остеосинтез, пластины, титан, изгибная жесткость, форма поперечного сечения

OPTIMIZATION OF THE FORM OF PLATES FOR OSTEOSYNTHESIS

Savchenko A., Muminboev A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The research topic is related to the improvement of medical devices. The task of the study is to analyze various forms of the cross-section of the plates and select the optimal form in terms of ensuring maximum strength and rigidity at a minimum profile height. It is shown that the tubular segmental section has the best parameters in terms of maximum strength and rigidity at the minimum profile height, but it is not technologically advanced enough, since for some materials it is difficult to obtain an assortment in the form of tubes. Therefore, it is important to pay attention to milled profiles, such as U-shaped and corner ones.

Key words: osteosynthesis, plates, titanium, flexural rigidity, cross-sectional shape.

*Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by*

Под остеосинтезом подразумевается хирургическое сопоставление и соединение отломков до полного их срастания. Для внутреннего остеосинтеза применяют следующие имплантаты: штифты, пластины, винты, спицы, проволоку, имплантаты с памятью формы. В работе исследуются титановые имплантаты в виде пластин.

Задачей исследования является анализ различных форм поперечного сечения пластин и выбор оптимальной формы с точки зрения обеспечения максимальной прочности и жесткости при минимальной высоте профиля.

При использовании по назначению пластина работает преимущественно на изгиб, поэтому ее можно представить в виде консольно нагруженной балки с заземленной опорой. Тогда прочность пластины без учета концентрации напряжений в местах крепежных отверстий определяется

рабочими напряжениями в материале. Максимальные напряжения в месте заделки и величина прогиба, определяющая жесткость пластины

$$\sigma_{W_{xmax}}^{M_n}; f_{max} = \frac{PL^3}{3EJ_x},$$

где M_n – изгибающий момент; W_x – момент сопротивления поперечного сечения при изгибе; P – изгибающая нагрузка; L – длина деформируемого пролета; E – модуль упругости материала пластины; J_x – момент инерции поперечного сечения.

Из приведенных формул видно, что прочность пластины при изгибе определяется величиной момента сопротивления поперечного сечения при изгибе W_x , жесткость – величиной момента инерции поперечного сечения J_x .

Рассмотрим варианты профилей поперечного сечения, среди которых проанализируем свойства

как используемых в конструкции пластин для остеосинтеза, так и варианты для перспективного использования.

1. Плоское прямоугольное сечение (рис. 1). Классический и наиболее простой вариант. Используется достаточно широко.

2. Трубчатое сечение (рис. 2). С целью увеличения жесткости сечение имеет вид сегмента кольца. Обычно используется 1/3 кольцевого сечения.

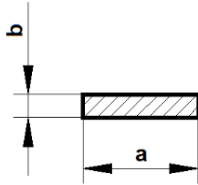


Рисунок 1 – Плоское прямоугольное сечение

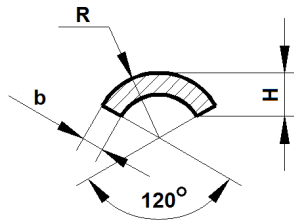


Рисунок 2 – Трубчатое сечение

3. П-образное сечение (рис. 3). Фактически это то же плоское прямоугольное сечение, но с продольными ребрами жесткости.

4. Угловое сечение с произвольным углом α (рис. 4) и его частный случай с углом $\alpha = 90^\circ$.

5. Ортостатические профили. Их используют в случаях, когда требуется получить максимальную жесткость конструкции, например в платформах автомобильных весов. Поперечное сечение описывается различными кривыми – дугами, параболлами и т. д. Они имеют относительно большую высоту, поэтому рассмотрим наименее высокий профиль, сечение которого описано дугами окружностей (рис. 5).

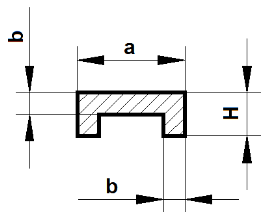


Рисунок 3 – П-образное сечение

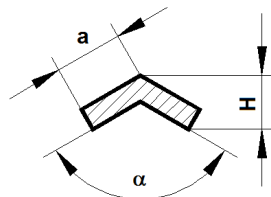


Рисунок 4 – Угловое сечение

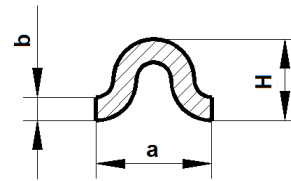


Рисунок 5 – Ортостатические профили

Рассмотрим геометрические характеристики сечений. Везде будем использовать следующие обозначения: W_x – момент сопротивления поперечного сечения при изгибе; J_x – момент инерции поперечного сечения; H – высота профиля; y – координата центра тяжести сечения; a – ширина сечения; b – толщина пластины.

1. Плоское прямоугольное сечение:

$$J_x = \frac{ab^3}{12}; W_x = \frac{ab^2}{6}; H = b.$$

2. Трубчатое сечение.

Здесь угол $\alpha = 120^\circ/2 = 60^\circ$; $r = R - b$.

$$J_x = \frac{R^4 - r^4}{4} \cdot (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha);$$

$$y = \frac{2}{3} \cdot \frac{(R^3 - r^3) \sin \alpha}{(R^2 - r^2) \alpha}; W_x = \frac{J_x}{R - y} 4;$$

$$H = R - b \cos \alpha.$$

3. П-образное сечение.

$$H = 2b;$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{2bH^2 + (a - 2b)b^2}{2bH + (a - 2b)b} J_x =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (a(H - y)^3 - (a - 2b)(H - y) + 2by);$$

$$W_x = \frac{J_x}{H - y}.$$

4. Угловое сечение с углом $\alpha = 90^\circ$.

$$y = \frac{a^2 + ab - b^2}{2bH + (a - 2b)b};$$

$$H = a \cos 45^\circ; W_x = \frac{J_x}{y};$$

$$J_x = \frac{1}{3} \cdot \left(2y^4 \cos^4 45^\circ - 2(y \cos 45^\circ - b) + \right. \\ \left. + b \left(a - 2y \cos 45^\circ + \frac{b}{2} \right)^3 \right).$$

5. Угловое сечение с углом α .

$$y = \frac{\frac{a \cos \alpha}{2} + \frac{b \sin \alpha}{2}}{2}; H = \frac{a \cos \alpha}{2};$$

$$J_x = \frac{ab}{6} \cdot \left(\frac{a^2 \cos^2 \alpha}{2} + \frac{b^2 \sin^2 \alpha}{2} \right); W_x = \frac{J_x}{y}.$$

6. Ортостатический профиль, сечение которого описано дугами окружностей.

$$H = a/2 + b;$$

$$J_x = \frac{b}{4} \cdot \frac{\pi a^3}{16}; W_x = \frac{2J_x}{a + b}.$$

Из результатов расчетов видно, что трубчатое сечение выигрывает и по прочности, и по жесткости. Но требуется получить максимальные прочность и жесткость при минимальной высоте профиля. Поэтому рассчитаны относительные параметры $\frac{J_x}{H}$ и $\frac{W_x}{H}$. Из их анализа видно, что трубчатое сечение действительно является наиболее выгодным. Однако, заслуживают внимания такие более технологически простые сечения, как П-образное и уголковое.

Выводы. Наилучшими параметрами с точки зрения максимальных прочности и жесткости при минимальной высоте профиля обладает трубчатое сегментное сечение.

Трубчатое сегментное сечение является недостаточно технологичным, так как для некоторых

материалов получение сортамента в виде трубок является затруднительным. Поэтому следует обратить внимание на фрезерованные профили, такие как П-образный и уголковый.

Для трубчатого сегментного профиля рост относительных прочности и жесткости при увеличении радиуса несущественен.

Для уголкового профиля оптимальным является диапазон углов $100 \dots 135^\circ$.

Благодарности. Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

Литература

1. Справочник машиностроителя.: в 6 т. / Под ред. С. В. Серенсеня. – М.: Машгиз, 1962. – Т. 3. – 1962. – 652 с.

УДК 681.785.57

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ МАТРИЦЕЙ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Саечников А.В., Чернявская Э.А., Саечников В.А.

*Белорусский Государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика идентификации динамических параметров сложных растворов, полученных в измерительной системе основанной на матрице оптических микрорезонаторов с управляемыми характеристиками. Матрица микрорезонаторов построена как упорядоченный набор полимерных микротороидов изготовленных методом трехмерной стереолитографии, где динамические данные измеряемых соединений анализируются нейронной сетью долговременной памяти из двунаправленных и выпадающих слоев. Экспериментально продемонстрирована возможность идентификации концентраций отдельных компонент сложных растворов с точностью $> 99\%$, за промежуток времени на два порядка меньше, чем требуется для достижения устойчивого состояния.

Ключевые слова: оптический микрорезонатор.

IDENTIFICATION OF THE DYNAMIC FEATURES OF MULTICOMPONENT SOLUTIONS BY A MATRIX OF MICRORESONATORS WITH TUNABLE PARAMETERS

Saetchnikov A., Tcherniavkaia E., Saetchnikov V.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents a technique for identifying dynamic parameters of complex solutions obtained in a measuring system based on a matrix of optical microresonators with controllable characteristics. The matrix of microresonators is constructed as an ordered set of polymeric microtoroids fabricated by three-dimensional stereolithography, where the dynamic data of the measured compounds are analyzed by a neural network of a long-term memory consisting of birefringent and dropout layers. It was experimentally demonstrated that it is possible to identify the concentrations of individual components of complex solutions with an accuracy of $> 99\%$, in a time interval on two order of magnitude shorter than that required to observe equilibrium.

Key words: optical microresonator.

*Адрес для переписки: Саечников А.В., ул. Курчатова 1, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: asaetchnikov@bsu.by*

За последнее десятилетие измерительные системы на основе резонанса в микрополостях стали одной из наиболее чувствительных оптических методик безмаркерной регистрации различных физических и химических параметров. Однако, в отличие от методов спектрального детектирования, например, рамановская спектроскопия, которая обеспечивают молекулярный анализ, для обеспечения анализа сложных растворов необходима

интеграция матриц микрорезонаторов с различной специфичностью связывания. Кроме этого, широкому использованию этого подхода препятствует ограниченная применимость известных конфигураций для количественной оценки изменений окружающей среды вне лабораторных условий и их низкая доступность, где необходимость сбора спектрально-разрешенных данных является одним из основных ограничивающих

факторов. Одним из перспективных методов реализации является датчик в виде матрицы микрорезонаторов, где возможность многократного использования и параллельный опроса до тысячи микрорезонаторов делают эту платформу особенно привлекательной [1–7]. В работе представлена методика идентификации динамических параметров сложных раствором, полученных в измерительной системе основанной на матрице оптических микрорезонаторов с управляемыми характеристиками.

Для изготовления микрорезонаторов был использован золь-гель фоторезист SZ2080, смешанный с фотоинициатором 4,4'-Bis-(diethylamino)-benzophenon и дополнительным мономером ДМАЕМА [2]. Для испарения растворителя и обеспечения стабильной связи полимерной структуры с предварительно силанизированной подложкой, проба нагревалась при 70 °С в течение 4 часов. Схема прямой лазерной печати на основе двухфотонной полимеризации реализована с стандартной схемой облучения материала на основе фемтосекундной импульсной титан-сапфировой лазерной системы.

В рамках исследований была предложена две модели оптического микрорезонатора на основе микротороида. Первая модель предполагает точечную связь кольцевого резонатора с поверхностью стеклянной подложки, вторая – содержит элемент обеспечения зазора между нижней частью кольца и стеклянной подложкой, размеры которого определяются моделью. В качестве управляемых свойств микрорезонатора были выбраны два параметра определяющих предел детектирования: чувствительность и добротность. Параметр чувствительности управлялся путем контроля условий облучения фоторезиста на этапе конструирования микрорезонатора, где меньшая плотность потока фотонов приводила к увеличению соотношению площади поверхности полимера к его объему и наоборот. Параметр нагруженной добротности варьировался зазором между микрорезонатором и подложкой. Для первой модели резонатора предварительно наносился тонкий слой клеевого раствора в диапазоне до длины волны лазерного излучения, для второй – устанавливался в модели. Для обеих моделей при настройке зазора в 400 нм продемонстрирована возможность обеспечения нагруженных добротностей до 10^5 . Было продемонстрировано, что обратимые изменения формы микрорезонатора, вызванные контактом с детектируемыми молекулами, приводят к усилению отклика на изменения объемного показателя преломления более чем в 20 раз по сравнению с численными оценками, основанных на отклике ближнего поля.

Для выделения и идентификации составляющих сложных растворов на матрице формируется до девяти отдельных измерительных каналов с не менее 100 резонаторами в каждом. Для обеспече-

ния инвариантности результатов от долговременных вариаций температуры в методике мультиплексного детектирования предложено покрытие одного измерительного канала полидиметилсилоксаном для изоляции поверхности сенсоров от измеряемых растворов. Оптическая призма использовалась для стабильного переноса энергии в матрицу оптических микрорезонаторов, где испускаемое резонаторами излучение детектируется на фиксированной длине волны [3–5].

Анализ сложных многокомпонентных соединений продемонстрирован на примере регистрации связи антител (иммуноглобулины различной природы: человеческий, кроличий) и соответствующих им антигенов на поверхности микрорезонаторов. Таким образом, динамические отклики микрорезонаторов определяются процессом формирования связи антиген-антитело, для которой наблюдается сложная двухфазная динамика. Первая фаза связана с перемешиванием раствора в измерительной камере и последующим локальным равновесием с точки зрения объемного показателя преломления и соответствующего насыщения спектрального сдвига. Вторая фаза характеризуется долговременными изменениями и описывается спектральный отклик из-за одновременной реакции на осаждение объектов на поверхности сенсора а также сил набухания/сжатия. Динамика в неподвижных измеряемых жидкостях описывается однофазной динамикой с повышенной скоростью спектрального сдвига, демонстрирующей влияние скорости потока на процесс извлечения проникающих молекул. Было продемонстрировано, что путем обучения интеллектуальной системы обработки экспериментальных данных для текучих и неподвижных водных сред можно добиться точной (> 99%) оценки концентрации отдельных составляющих сложных растворов. Интеллектуальный механизм обработки, который обучается на основе сложных нелинейных динамических реакций оптических микрорезонаторов, основан на сети долгой краткосрочной памяти с 15 блоками, двунаправленной архитектурой и 100 эпохами обучения в качестве максимального числа [6–7]. При этом временной набор спектрального сдвига уменьшается от начальной длительности в несколько тысяч до первых десятков секунд после регистрации динамических изменений.

Представленные результаты демонстрируют возможность идентификации динамических параметров сложных раствором на основе интеллектуального матричного сенсора оптических микрорезонаторов. Предложенный подход может быть использован в широком спектре практико-ориентированных задач высокочувствительного безмаркерного детектирования.

Литература

1. Reusable Dispersed Resonators-Based Biochemical Sensor for Parallel Probing / A. V. Saetchnikov

[et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2019. – Vol. 19, № 17. – P. 7644–7651.

2. A Laser Written 4D Optical Microcavity for Advanced Biochemical Sensing in Aqueous Environment / A. V. Saetchnikov [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Vol. 38, № 8. – P. 2530–2538.

3. Multiresonator Imaging Sensor for the Aerial Parameters Detection / A. V. Saetchnikov [et al.] // IEEE Journal on Minia-turization for Air and Space Systems. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 84–91.

4. Deep-learning powered whispering gallery mode sensor based on multiplexed imaging at fixed frequency /

A. V. Saetchnikov [et al.] // Opto-Electronic Advances. – 2020. – Vol. 3. – P. 200048.

5. Self-learning-based detection via multiple microresonator imaging / A. V. Saetchnikov [et al.] // Proc. SPIE. – 2021. – Vol 11782. – P. 117822E.

6. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early stage classification of dynamical variations / A. V. Saetchnikov [et al.] // Advanced Photonics Research. – 2021. – P. 2100242.

7. Machine-learning based analysis of time sequences for multiplexed microresonator sensor / A. V. Saetchnikov [et al.] // Proc. SPIE. – 2022. – Vol 12139. – P. 121390E.

УДК 666.7

**ТЕРМОСТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА**
Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Самсонова А.С.¹, Пантелеенко Ф.И.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Показана возможность получения синтетического волластонита из отечественных сырьевых материалов. Представлены результаты исследований термостойких керамических изделий; установлены закономерности изменения физико-технических, теплофизических характеристик и рентгеноструктурных показателей керамики на основе различного природного сырья, а также отходов химических производств. Результаты исследований могут использоваться для производства теплоизоляционной керамики, электроизоляторов, детали для литейных установок на основе синтетического волластонита.

Ключевые слова: синтетический волластонит, техническая керамика, температурный коэффициент линейного расширения, термостойкость, синтез.

**HEAT-RESISTANT CERAMIC MATERIALS
BASED ON SYNTHETIC WOLLASTONITE**
Popov R.¹, Dyatlova E.¹, Samsonova A.¹, Panteleenko F.²

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of obtaining synthetic wollastonite from domestic raw materials is shown. The results of studies of heat-resistant ceramic products are presented; the regularities of changes in physical-technical, thermophysical characteristics and X-ray diffraction parameters of ceramics based on various natural raw materials, as well as chemical production wastes, have been established. The research results can be used for the production of heat-insulating ceramics, electrical insulators, parts for foundry installations based on synthetic wollastonite.

Key words: synthetic wollastonite, technical ceramics, temperature coefficient of linear expansion, heat resistance, synthesis.

Адрес для переписки: Самсонова А.С., ул. Белорусская, 21, Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: misakamadara@yandex.by

В настоящее время одним из востребованных направлений современной науки является получение синтетического волластонита. Важными технологическими свойствами волластонита являются высокая химическая стойкость в различных средах, небольшая удельная масса, уникальные диэлектрические свойства, игольчатый габитус частиц, а также низкие значения коэффициента термического расширения и теплопроводности [1].

Различные исследования подтвердили принципиальную возможность использования природного и синтетического волластонита в качестве

сырья для получения теплоизоляционной керамики, электро- и теплоизоляторов с чрезвычайно низкими диэлектрическими потерями, специальной радиокерамики, для производства заготовок и слитков в горизонтальных и вертикальных литейных установках, т.е. форсунки, носики, поплавки, стопоры и кольца с горячим верхом [2, 3].

Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики при минимальном содержании спекающей добавки, не снижая термостойкости, а в некоторых случаях

вообще отказаться от применения спекающих добавок [4].

Целью данной работы является изучение возможности применения отечественных сырьевых компонентов для получения волластонитсодержащей керамики.

Разработка керамических материалов на основе синтетического волластонита осуществлялась в двух направлениях при разном соотношении оксидов $\text{CaO}:\text{SiO}_2$. В первом случае использовалось отечественное сырье: карбонатсодержащее (доломитовая мука), в качестве кремнеземсодержащее (трепел, маршалит). Пластификатором выступала огнеупорная глина Веселовского месторождения. Количество компонентов изменялось в пределах: доломитовая мука (32–67 мас. %), трепел (30–53 мас. %), глина (10–15 мас. %), маршалит (18–28 мас. %).

Во втором случае применялось следующее сырье: карбонатсодержащее (отходы в виде циклонной пыли филиала № 4 «Производство извести и мела» ОАО «Белорусский цементный завод» (г. Климовичи)), кремнеземсодержащее (трепел, маршалит (молотый кварцевый песок)). Пластифицирующим компонентом являлась глина Веселовского месторождения.

Изготовление опытных образцов в виде цилиндров диаметром 12 мм осуществлялся методом полусухого прессования при давлении 20–25 МПа. Обжиг материалов проводился в интервале температур 1000–1250 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Результаты измерения физико-химических свойств экспериментальных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства опытных образцов

Номер состава	Свойства образцов при температуре обжига, °С					
	1000	1050	1100	1150	1200	1250
	Водопоглощение, %					
1	34,3	31,4	31,2	28,4	21,5	–
2	–	47,3	45,2	44,2	39,1	23,2
3	21,5	21,3	17,8	11,7	–	–
4	–	35,3	33,3	32,3	31,7	16,4
	Кажущаяся плотность, кг/м ³					
1	1445	1489	1522	1553	1760	–
2	–	1265	1271	1287	1366	1775
3	1695	1712	1788	1970	–	–
4	–	1394	1431	1454	1476	1867
	Открытая пористость, %					
1	49,6	46,7	47,4	44,1	37,9	–
2	–	59,8	57,4	56,9	53,4	41,2
3	36,5	36,4	31,9	23,0	–	–
4	–	49,2	47,7	46,9	46,8	30,6

Визуальные наблюдения за изменениями обожженных образцов в процессе их хранения на воздухе показали, что одни образцы хранились длительное время без изменения целостности, другие уже через несколько недель начинали самопроизвольно разрушаться. Это связано с незавершенно-

стью процесса синтеза волластонита (присутствием в обожженных изделиях нестабильных промежуточных соединений, а также не прореагировавшего оксида кальция, гидратация которого на воздухе является основной причиной разрушения изделий в процессе хранения) [5].

В ходе исследования были установлены зависимости свойств керамики от состава и температуры синтеза.

Исследования свойств позволили сделать выводы о том, что более полное спекание наблюдается в образцах на основе отходов в виде циклонной пыли и трепела при оптимальной температуре обжига 1150 °С и обладают лучшими эксплуатационными характеристиками (водопоглощение – 11,5 %, кажущаяся плотность – 1970 кг/м³, открытая пористость – 23,0 %, механическая прочность – 70,6 МПа, температурный коэффициент линейного расширения – $4,11 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, термостойкость (вода – 800 °С) составляла не менее 50 теплосмен без проявления усадки и разрушения).

Механическая прочность при сжатии материалов, полученных на основе масс, содержащих трепел и обожженных при температуре 1150 °С, которая является оптимальной, находится в пределах 20,1–70,6 МПа. Согласно источникам литературы волластонит имеет вытянутую по длине структуру кристаллов. При раскальвании этих кристаллов образуются зерна игольчатой формы, которые играют роль микроармирования, что повышает механическую прочность керамики.

В интервале температур 1000–1250 °С в образцах на основе отходов в виде циклонной пыли и трепела наблюдается некоторое уменьшение значений температурного коэффициента линейного расширения, что может быть обусловлено увеличением формированием необходимых кристаллических фаз при спекании, растворением в ней кварца, т. е. обогащение стеклофазы кремнеземом, обладающими следующими значениями ТКЛР ($\alpha = (4,11–6,42) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$), а также формированием структуры материала, обеспечивающего релаксацию термомеханических напряжений с увеличением температуры.

Присутствие кремнеземсодержащего материала, а именно трепела, в составе масс способствует активации процессов фазообразования и спекания керамических материалов, а также способствует снижению температуры синтеза, за счет наличия аморфной составляющей, гидратных оболочек, или примесных составляющих в исходных сырьевых материалах.

Исследование фазового состава оптимального состава методом рентгенофазового анализа позволяет сделать выводы о том, что волластонит и кварц представлены основными кристаллическими фазами, в незначительном количестве зафиксированы алюмосиликаты кальция.

В результате проведенных исследований установлена возможность получения теплоизоляционных керамических материалов на основе синтетического волластонита.

Литература

1. Салтевская, Л. М. Синтез волластонита и его применение в керамических массах / Л. М. Салтевская [и др.] // Стекло и керамика. – 1974. – № 2. – С. 22–24.

2. Демиденко, Н. И. Спекание керамических масс на основе природного волластонита / Н. И. Демиденко, Е. С. Конкина // Стекло и керамика. – 2003. – № 1. – С. 15–16.

3. Тихомирова, И. Н. Теплоизоляционные материалы на основе кремнеземсодержащего сырья / И. Н. Тихомирова, Т. В. Скорина // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 58–60.

4. Кулдашева, А. Х. Экспериментальные исследования прочностных свойств бетонов на основе волластонитового сырья / А. Х. Кулдашева // Вестник. – 2011. – № 7. – С. 627–630.

5. Карионова, Н. П. Пористые волластонитсодержащие керамические материалы на основе композиций высококремнеземистого сырья с природными и технологическими компонентами: дис. ... канд. тех. наук : 05.17.11 / Н. П. Карионова. Томский политехнический университет. – Томск, 2013. – 171 с.

УДК 546.26.539

ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭПР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К УФ И ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЯМ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВ НАНОАЛМАЗА

Олешкевич А.Н.¹, Сернов С.П.², Долматов В.Ю.³, Лапчук Т.М.¹, Лапчук Н.М.¹

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³ФГУП «СКТБ «Технолог»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследована чувствительность основных параметров спектров ЭПР к ультрафиолетовому и лазерному излучениям при облучении образцов спеченных при высоких давлениях и температурах порошков детонационного наноалмаза. Сравнительная характеристика результатов показала возможность использования исследуемого сверхтвердого композиционного материала на основе спеченных порошков ДНА для изготовления датчиков ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 200–290 нм и лазерного ИК излучения.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс, детонационные наноалмазы, спеченные порошки наноалмаза, ультрафиолетовое излучение, лазерное излучение.

DIAGNOSTICS BY THE EPR METHOD OF SINTERED NANODIAMOND POWDERS SENSITIVE TO UV AND LASER RADIATIONS

Oleshkevich A.¹, Sernov S.², Dolmatov V.³, Lapchuk T.¹, Lapchuk N.¹

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³FGUP "SKTB" Technologist "

St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The sensitivity of the main parameters of the EPR spectra to ultraviolet and laser radiation under irradiation of samples of detonation nanodiamond powders sintered at high pressures and temperatures has been investigated. Comparative characteristics of the results showed the possibility of using the investigated composite material based on DND powders for the manufacture of ultraviolet radiation sensors in the wavelength range of 200–290 nm and IR laser radiation.

Key words: electron paramagnetic resonance, detonation nanodiamonds, sintered nanodiamond powders, ultraviolet radiation, laser radiation.

Адрес для переписки: Сернов С.П., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ssernov@bntu.by

Детонационные наноалмазы (ДНА) имеют сложную природу, их характеристики и свойства определяются методом получения, способами химической очистки и модификации поверхности. Спекание порошков ДНА осуществляется с целью синтеза новых композиционных материалов для применения в приборостроении, спинтронике и электронике.

Цель работы – установить особенности влияния на парамагнитные свойства спеченных порошков детонационного наноалмаза таких внешних факторов, как ультрафиолетовое и лазерное излучение.

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) исследованы спеченные таблетки на основе порошков ДНА. Спекание образцов

проводили при режиме термобарической обработки в вакууме 10^{-2} – 10^{-3} мм рт.ст. при давлении $P = 8$ ГПа и температуре 1800 °С за 20 секунд. В порошкообразных образцах ЭПР-сигнал имеет лоренцеподобную форму контура линии с g -фактором $2,0025 \pm 0,00005$ и шириной $0,75$ – $0,95$ мТл. Все ПЦ в порошках ДНА являются собственными дефектами, которые возникают в частицах ДНА во время их синтеза [1], природа которых объясняется локализованным неспаренным электроном на оборванных связях sp^3 -гибридизованного углерода [2]. Порошки ДНА обладают сильным парамагнетизмом из-за большой концентрации спинов электронов 10^{18} – 10^{20} спинов/г [3]. Наблюдается существенное изменение формы линии спектра ЭПР при условии спекания: $T = 1800$ °С, $P = 8$ ГПа и времени спекания 20 с. Происходит переход симметричной линии спектра (параметр асимметрии = 1,04) исходного образца в асимметричную линию Дайсона (параметр асимметрии = 2,08), что говорит об образовании в данном образце проводящей структуры в диапазоне СВЧ, при этом $g = 2,00065$, ширина $0,85$ мТл.

Исследовалась чувствительность параметров спектров ЭПР к воздействию ультрафиолетового излучения на спеченные порошки ДНА. Образцы облучались УФ-излучением мощностью в 36 Вт и с длиной волны 254 нм. в течение 5 мин. на каждой стадии облучения. Параметры спектров ЭПР рассчитывались с учетом изменения добротности резонатора при анализе линии ЭПР эталона рубина, закрепленного на стенке резонатора. Из рис. 1 видно, что в исследуемых образцах амплитуда сигнала ЭПР и фактор спектроскопического расщепления при каждом последующем облучении УФ излучением увеличиваются.

Рост этих параметров может быть обусловлен уменьшением омических потерь в резонаторе, вносимых облученным образцом. Это является следствием увеличения сопротивления образцов спеченного ДНА в СВЧ-диапазоне измерений с увеличением времени облучения.

Исследовалась чувствительность параметров спектров ЭПР к воздействию лазерного излучения на спеченные порошки ДНА. Изменения амплитуды сигнала ЭПР от времени облучения образца, как видно из рис. 2, *а*, имеет насыщающийся характер. При этом фактор спектроскопического расщепления линии ЭПР уменьшается в процессе увеличения суммарного времени облучения (рис. 2, *б*). С увеличением суммарного времени облучения лазерным излучением с длиной волны 650 нм и мощностью 200 мВт параметры спектров ЭПР изменялись существенно, что видно из рисунка. Облучение осуществлялось непрерывно по 60 секунд перед каждым измерением. На графиках указывается суммарное время облучения.

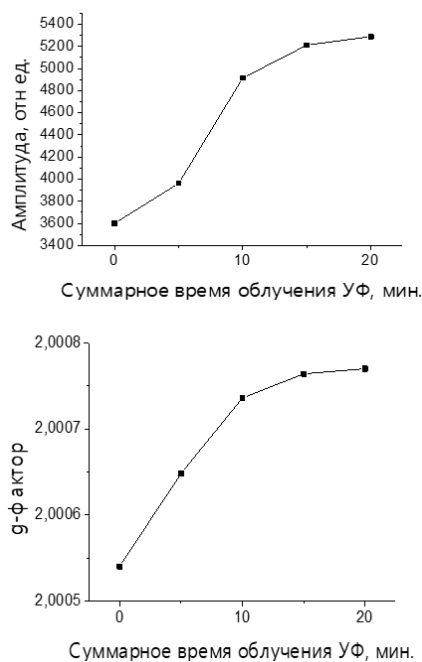


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды (а) и g -фактора (б) сигнала ЭПР от суммарного времени облучения УФ излучением спеченного порошка ДНА

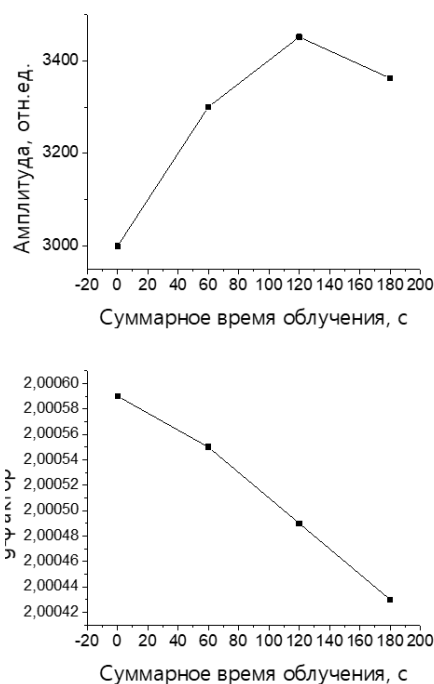


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды (а) и g -фактора (б) линии ЭПР спеченного образца ДНА от суммарного времени воздействия лазерного ИК-излучения

С учетом наблюдаемых изменений в спектрах ЭПР-спеченных порошков ДНА под воздействием слабого лазерного возбуждения и за сравнительно короткое время воздействия на образец, можно сказать, что данный композиционный материал является чувствительным к лазерному ИК-

облучению и может быть также использован для изготовления датчиков.

Показано, что как ультрафиолетовое излучение, так и лазерное излучение влияют на параметры спектров ЭПР-спеченных порошков ДНА, изменяя их сопротивление в СВЧ-диапазоне, что позволит использовать эти материалы для изготовления датчиков УФ-излучения в диапазоне длин волн 200–290 нм и датчиков лазерного ИК-излучения.

УДК 621

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА Колонтаева Т.В., Шабуря М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены результаты синтеза и исследования стеклообразных материалов и стеклокристаллических композитов на их основе. Изучено влияние модифицирующих добавок на свойства материалов. Исследована кристаллизационная способность стекол и механические свойства. Разработана технология получения стеклокристаллического композиционного материала. Выбраны керамические наполнители для стеклокерамики и установлено влияние керамических наполнителей. С помощью комплексного метода определены свойства и структура стекловидных материалов и стеклокерамических композиций на их основе.

Ключевые слова: Стеклообразные материалы, стеклокерамика, спекание, варка стекла, кристаллизационная способность.

OPTIMISATION OF COMPOSITION OF COMPOSITE GLASS CERAMIC MATERIAL Kolontaeva T., Shabura M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The results of synthesis and research of glass-like materials and glass-crystalline composites based on them are presented. The influence of modifying additives on the properties of materials has been studied. Crystallization capacity of glasses and mechanical properties were investigated. A technology for producing a glass crystal composite material has been developed. Ceramic fillers for glass ceramics are selected and influence of ceramic fillers is established. Properties and structure of vitreous materials and glass-ceramic compositions based on them are determined using a complex method.

Key words: glass-like materials, glass ceramics, sintering, glass cooking, crystallization ability.

*Адрес для переписки: Шабуря М.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: marina75800@mail.ru*

Требования микро- и наноэлектроники к современным материалам достаточно высоки. Уровень развития приборостроения в настоящее время предопределяет необходимость постоянной разработки универсальных материалов, которые проявляют надежность в работе и обеспечивают бесперебойную эксплуатацию, как отдельных компонентов, так и приборов в целом. Выбор материалов электронной техники основывается, прежде всего, на конкретной области их использования и вытекающими из этого функциональными параметрами, которыми должны обладать разрабатываемые материалы. Это относится в равной мере, как к полупроводниковым материалам, так и к применяемым в электронике проводникам и диэлектрическим материалам. Неотъемлемым требованием является снижение стоимости и дефицитности этих материалов, а также

Литература

1. Nanodiamond collective electron states and their localization / I. A Denisov [et al.] // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2014. – Vol. 7, № 1. – P. 35–45.
2. Defects localization and nature in bulk and thin film utrananocrystalline diamond / A.I. Shames [et al.] // Diam. Relat. Mater. – 2007. – Vol. 16, № 10. – P. 1806–1812.
3. Paramagnetic Properties of Nanodiamond / P.I. Belobrov [et al.] / Doklady Physics. – 2001. – Vol. 46, № 7. – P. 459–462.

обеспечение возможности переработки без ущерба для окружающей среды.

Современное материаловедение базируется на инжиниринге, который представляет собой комплекс разносторонних мероприятий, обеспечивающих максимально возможное использование новых видов материалов с целью удовлетворения потребностей техники и технологий. Инжиниринг направлен как на изучение свойств и структуры и их зависимость от различных факторов уже разработанных материалов, так и на прогнозирование новых материалов с уникальными свойствами с минимальными технологическими затратами. Инструментарием для инжиниринга являются достижения как фундаментальных знаний в области физики, химии, математики, так и практических технологических дисциплин.

Данная научная работа посвящена синтезу и изучению отдельных видов диэлектрических материалов, используемых в качестве межслойной изоляции, в виде плат или подложек микросхем. Для этих целей необходимы низкотемпературные материалы, к которым относится стеклокерамика с высокими диэлектрическими свойствами, сочетающимися с высокой механической прочностью и химической стойкостью.

Особое внимание в работе уделено изучению влияния ряда добавок на технологические и кристаллизационные свойства стекловидных материалов и стеклокерамики на их основе. Одним из путей повышения прочности стеклокерамики является введение в состав композита порошкообразных добавок минерализаторов кристаллизации, таких как оксид титана, оксид циркония и др., а также готовой тугоплавкой кристаллической фазы, что приводит к образованию прочной многофазной структуры композиционного материала. Альтернативным вариантом получения механически прочной стеклокерамики является введение минерализаторов кристаллизации непосредственно в стекловидный материал на стадии его синтеза (варки). Минерализаторы во время последующего спекания будут оказывать стимулирующее действие на кристаллизацию стекловидной прослойки, и таким образом, способствовать упрочнению композиции. Известно, что составы стеклообразных материалов являются многокомпонентными и представляют собой, чаще всего, алюмоборосиликатные стекла с добавлением оксида кальция, который стабилизирует кристаллическую фазу керамической композиции.

Проведенный критический обзор литературных источников показывает, что получить стеклокерамическую композицию, одновременно удовлетворяющую требованиям по легкоплавкости, высоким диэлектрическим показателям, химической устойчивости и механической прочности является весьма сложной задачей, т.к. стабилизация одних параметров влечет за собой некоторое ухудшение других. При разработке состава стекловидного материала ставилась цель увеличить его кристаллизационную способность на стадии спекания стеклокерамической композиции. В качестве добавок стимуляторов кристаллизации использовали оксиды олова, цинка, титана и циркония, которые вводились в шихту исходного стекла в количестве 5–7,5 %.

Результаты изучения свойств стеклокерамической композиции, изготовленной на основе этих стекол, и спеченной при температуре 900 °С показали, что оксид циркония, введенный на стадии варки стекла, оказывает неблагоприятное действие на механическую прочность материала. Образцы при этом увеличивались в объеме на 5 % и легко разрушались. Это объясняется тем, что оксид циркония в процессе варки стекла при 1250 °С переходит в тетрагональную форму, а затем при охлаждении ниже 1000 °С и спекания керамики

совершает обратный переход в моноклинную модификацию, так как область его полиморфных превращений приходится на температуру около 1000 °С. Введением добавки оксида циркония, несмотря на ее отрицательное действие в исходных стеклах планировалось повысить кристаллизационную способность стекловидной прослойки композиции в процессе ее обжига.

Изучение технологических и кристаллизационных свойств стекол показало, что эквимолекулярная замена оксида бария на оксид кальция привела к интенсификации процесса кристаллизации, протекающего в стеклах во время их повторной термообработки. Только стекла, содержащие минимальное количество оксида кальция, характеризовались высокой устойчивостью к кристаллизации; они оставались прозрачными в течение термообработки длительностью 1 час в интервале температур 300–1000 °С.

Для синтеза исходных стекол использовали сырьевые материалы марок «Ч», «ХЧ», «ЧДА». Оксид кремния вводился кварцевым песком после промывки для удаления растворимых примесей и прокаливания при температуре 800–900 °С. Остальные сырьевые материалы хранились герметично упакованными, поэтому использовались без предварительной подготовки. В связи с тем, что при варке стекла некоторые компоненты улетучиваются, была введена поправка. Материалы взвешивались после расчета шихты, перемешивались для усреднения и достижения гомогенности состава, засыпались в корундизовые тигли. Варка производилась в электрической печи при температуре 1250 °С с выдержкой 30 минут. Стекломасса вырабатывалась путем отливки на металлическую плиту для получения образцов для исследования, часть стекла для получения стеклогранулята, который далее использовался для синтеза стеклокерамического композита, выливалась в холодную воду с последующей сушкой до полного удаления влаги. Тонкий помол проводили в планетарной мельнице в присутствии диспергационной среды (этиловый спирт). Роль жидкости связана с ее расклинивающим действием, понижением прочности твердых тел (эффект Ребиндера) и подавлением процессов агрегации частиц.

В качестве керамического наполнителя использовались материалы, обладающие высокой прочностью и температурой плавления (глинозем, нитрид алюминия). Уплотнение композиционных составов шихты осуществлялось путем прессования. Обжиг проводился по двухстадийной технологии. Первая стадия термообработки проводилась при температуре растекания стеклосвязки (700 °С). Спекшаяся композиция размалывалась, проводилось повторное прессование и термообработка при 900 °С. В результате получен композиционный стеклокерамический материал с улучшенными характеристиками.

УДК 645.43-182.7

СТОЛ МОДУЛЬНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ Афанасьев М.Р., Шик Д.В., Монич С.Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Автоматизированные столы спроектированы для обеспечения наибольшего комфорта при работе, а модульная система позволяет укомплектовать стол в соответствии с рабочей деятельностью.

Ключевые слова: автоматизированный стол, «умная» мебель.

MODULAR AUTOMATED TABLE

Afanasiev M., Shik D., Monich S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Automated tables are designed to provide the greatest comfort when working, and the modular system allows you to complete the table in accordance with the work activity.

Key words: automated table, "smart" furniture.

Адресс для переписки: Монич С.Г., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by

Стол – предмет мебели для письменных работ и аналогичных занятий сидя или стоя.

Автоматизированные столы – относительно новая альтернатива типичным столам. Такие столы спроектированы специально для обеспечения наибольшего комфорта при работе, а модульная система позволяет укомплектовать стол в соответствии с видом рабочей деятельности. В стол в качестве модулей могут быть внесены различные элементы: акустическая система с устойчивостью к влаге, беспроводные зарядки, USB-порты, а также индукционную систему нагрева. Умные столы оснащены телескопическими ножками с электроприводом и профилями с сохранением положений, что позволяет не настраивать стол каждый раз и регулировать высоту стола на свое усмотрение, чтобы работать как стоя, так и сидя. Регулировки функций стола могут осуществляться как со специальной панели, так и с использованием различных гаджетов, через беспроводное подключение. Модульные автоматизированные столы, изготавливаемые на заказ, дают заказчику выбор дизайна, что дополнительно позитивно сказывается в процессе использования.

Немало важное значение имеет положение пользователя за столом: правильно спроектированное рабочее место может облегчить процесс работы и предотвратить будущие проблемы со здоровьем. В этом вопросе автоматизированный стол значительно выигрывает благодаря вариативности настройки своих положений.

Модульная система позволяет укомплектовать рабочее место для различных типов работы: офисный стол, электромонтажный стол, цифровая консоль, измерительный комплекс и т.д.

В настоящее время существуют производители, производящие «умную» мебель, в том числе и автоматизированные (умные) столы. Типовыми решениями являются столы, которые оснащены панелями беспроводной зарядки, зарядными USB

портами, панелью для подогрева кружек, регулировкой по высоте и др. В стандартную комплектацию таких столов входит:

- стерео колонки, работающие по беспроводной Bluetooth-связи;
- беспроводное зарядное устройство для смартфонов и планшетов;
- держатель-док для вертикальной установки мобильного устройства;
- телескопические ножки на газлифте, с электрическим приводом и памятью на четыре степени регулировки;
- три порта USB, два из которых предназначены для подключения внешних устройств, а один – для подзарядки;
- чехол-ресивер для беспроводной зарядки мобильных устройств Apple;
- встроенная подставка с функцией индукционного подогрева и кружка для кофе.

Однако производители такого типа мебели не прибегают к использованию модульной системы, что могло бы расширить список потребителей, а используют типовое решение в виде монолитной столешницы с заранее подобранным функционалом.

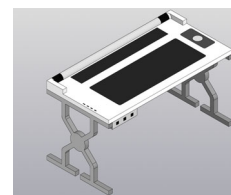


Рисунок 1 – Стол модульный автоматизированный в базовой комплектации

Базовой комплектацией автоматизированного стола является: регулируемое основание стола; столешница, закрывающая контактные площадки подключения модульных частей; беспроводная зарядка; а также направленная акустическая стереосистема. Базовый вариант стола отлично подойдет широкому кругу потребителей в качестве альтернативы домашнего или офисного стола.

Имея большое количество функций модульный стол в минимальной комплектации уже может рекомендовать себя более эффективным и эргономичным, чем обычные столы.

В дополненную комплектацию данного стола могут входить различные модули и столешницы с покрытиями, предназначенные для облегчения выполнения задач, поставленных перед пользователем. Для решения электромонтажных работ лучше всего подойдет столешница с защитным покрытием, прорезиненными зонами, модульным измерительным оборудованием, полками и источником питания для инструмента. Также при увеличении загрязнения воздуха в помещении выше нормы, стол оповещает о том, что необходимо проветрить или покинуть помещение.

Можно отметить еще одну комплектацию данного стола со столешницей, предназначенной для проведения измерительных операций и контроля качества продукции. Так как операций по контролю размеров и качества, может быть, огромное количество реализуется системы быстросменных насадок и оснастки приборов контроля. В столе предусмотрена система цифрового индирования (с симуляцией аналоговой измерительной шкалы) и цифровой записи показаний измеряемой величины. Аналоговая симуляция измерительной шкалы прибора необходима для того, чтобы пользователю было легче определить – находится ли контролируемая величина в области допуска на соответствующее значение измеряемой величины.

Еще одной немаловажной комплектацией модульного стола является цифровая консоль.

Такая технология позволяет большому количеству потребителей решать свои повседневные за-

дачи, узнавать новости, погоду, заниматься искусством и т.д. Данная комплектация оснащена сенсорным широкоформатным OLED дисплеем, позволяющего превратить модульный стол в полноценную рабочую станцию. Такую конструкцию можно реализовать на базе современных операционных систем, превращая стол в персональный компьютер. В данный стол также могут встраиваться датчики для проверки жизненных показателей, таких как содержание кислорода в крови, пульс, сердечное давление. Такую систему можно реализовать посредством беспроводной связи между столом и персональным браслетом. Если какой либо параметр приближается к отличному от нормы, стол может сообщать как поступить в данной ситуации, а в некоторых случаях отправит сигнал на станцию скорой помощи или МЧС. Стол также отлично подойдет для развлечений и хобби, благодаря установленной операционной и акустической системам на нем можно смотреть фильмы, слушать музыку и общаться с друзьями.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что данный стол станет отличным дополнением не только в качестве декора, но и послужит пользователю отличным помощником в повседневной и рабочей жизни.

Литература

1. Стол-трансформер : пат. RU 81625 U1 / А. Н. Каменский. – Оpubл. 27.02.2009.
2. Умный стол: что это такое, зачем он нужен и сколько стоит? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gooosha.ru/umnyj-stol-cto-eto-takoe-zachem-on-nuzhen-i-skolko-stoit/>. – Дата обращения: 04.09.2022.
3. Tabula Sense [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tabulasense.ru/>. – Дата обращения: 06.09.2022.

УДК 621.3.07

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ МНОГОКОординатных перемещений Кузнецов В.В., Марко А.Ф., Карпович С.Е.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрено программно-аппаратное обеспечение для мехатронных систем перемещений, которое позволяет реализовать сквозную платформу автоматизации при выполнении технологических операций в микроэлектронике.

Ключевые слова: системы многокоординатных перемещений, программно-аппаратное обеспечение, программное обеспечение Codesys.

SOFTWARE AND HARDWARE FOR MULTI-AXIS MOVING SYSTEMS Kuzniatsou V., Marko A., Karpovich S.

*Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The hardware and software for mechatronic moving systems is considered, which allows implementing an end-to-end automation platform when performing technological operations in microelectronics.

Key words: multi-axis displacement system, firmware, Codesys software.

*Адрес для переписки: Кузнецов В.В., ул. Гикало, 9, Минск 220005, Республика Беларусь
e-mail: mmts@bsuir.by*

При разработке систем прецизионных перемещений технологического оборудования, а затем и в процессе их эксплуатации используется специализированное программное обеспечение [1–3]. С его помощью решаются такие виды задач, как проектирование цифровых устройств, входящих в состав оборудования, управление ими, тестирование и др. Одной из платформ для научно-исследовательских разработок является LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments, США. Первая версия LabVIEW была выпущена в 1986 году для Apple Macintosh, в настоящее время существуют версии для UNIX, Linux, Mac OS и пр., а наиболее развитыми и популярными являются версии для Microsoft Windows.

Программа LabVIEW называется и является виртуальным прибором (Virtual Instrument) и состоит из двух частей: блочной диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора; лицевой панели, описывающей внешний интерфейс виртуального прибора.

LabVIEW поддерживает огромный спектр оборудования различных производителей и имеет в своем составе (либо позволяет добавлять к базовому пакету) многочисленные библиотеки компонентов: для подключения внешнего оборудования по наиболее распространенным интерфейсам и протоколам (RS-232, GPIB-488, TCP/IP и пр.); для удаленного управления ходом эксперимента; для управления роботами и системами машинного зрения; для генерации и цифровой обработки сигналов; для применения разнообразных математических методов обработки данных; для визуализации данных и результатов их обработки (включая 3D-модели); для моделирования сложных систем; для хранения информации в базах данных и генерации отчетов; для взаимодействия с другими приложениями в рамках концепции COM/DCOM/OLE.

Специальный компонент LabVIEW Application Builder позволяет создавать LabVIEW-программы, пригодные для выполнения на тех компьютерах, на которых не установлена полная среда разработки. Для работы таких программ требуется бесплатно распространяемый компонент «LabVIEW Runtime Engine» и, при необходимости, драйверы используемых внешних устройств.

Одним из наиболее известных и популярных аппаратно независимых комплексов для прикладного программирования ПЛК и встраиваемых контроллеров является Codesys (Controller Development System). Основным его компонентом является среда программирования на языках стандарта МЭК 61131-3. Комплекс работает на компьютере. Программы компилируются в машинный код и загружаются в контроллер. Любую задачу,

которая имеет решение в виде программы, можно реализовать в Codesys.

Изначально Codesys был нацелен на задачи, требующие автономности, надежности и предельного быстродействия при минимизации аппаратных средств. Благодаря этому он вышел далеко за рамки традиционных для МЭК 61131-3 систем ПЛК. Сегодня автомобили, краны, экскаваторы, самосвалы, яхты, печатные машины, деревообрабатывающие станки, литейные и прокатные машины, сборочные автоматы крупнейших мировых брендов включают один или группу встроенных контроллеров с Codesys. Компанией ITQ GmbH в 2011 г. было проведено исследование характеристик и распространенности программных инструментов в областях машиностроения и мобильных применений в Европе. По его результатам, Codesys и инструменты на его базе (Bosh Rexroth IndraWorks, Beckhoff TwinCAT и др.) используют 36% компаний. Конкурирующие с Codesys универсальные инструменты совместно составили 7%. На сегодняшний день Codesys успешно применяется во всех без исключения областях промышленности. В мире более 350 компаний, изготавливают контроллеры с Codesys в качестве штатного инструмента программирования. За 2011 г. продано 500 тыс. лицензий на различные устройства с Codesys. Все конкурирующие системы отстают в разы, что позволяет достаточно говорить о мировом лидерстве.

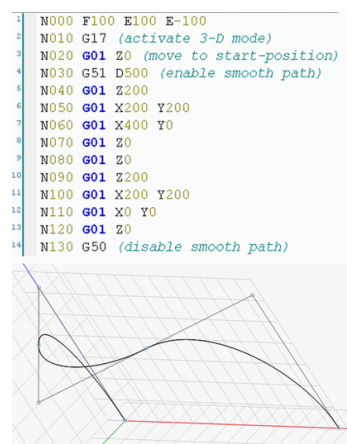


Рисунок 1 – G-код движения в Codesys и его визуальное представление

Как продукт, Codesys ориентирован на изготовителей контроллеров. Разрабатывая новый контроллер, они устанавливают в него систему исполнения Codesys Control. Собирают из ее компонентов требуемую конфигурацию, добавляют собственные ноухау и специфические компоненты и получают собственное инструментальное ПО. Как правило, к пользователю Codesys попадает в коробке вместе с оборудованием. Ему нужно только установить систему и перейти к решению своих практических задач. Все коммерче-

ские и технические вопросы, связанные с поддержкой ядра контроллера, всех типов его аппаратных модулей, библиотек, стеков и конфигураторов сетей его беспокоить не должны. Все это должно быть решено за него разработчиками ПЛК и Codesys совместно.

Типовые области применения Codesys Automation Platform: расширение функциональности Codesys за счет возможности добавления в среду программирования нового редактора программ, инструмента конфигурирования специализированной полевой сети, автоматизация некоторых типовых операций (мастера) и др.; замена составных компонентов (plug-in) Codesys (рисунок 1), если штатный компонент среды программирования не удовлетворяет требованиям пользователей, то возможно заменить его, например, изменить форму отображения программ, вид окон и др.; создание собственного программного комплекса на базе Codesys, например системы SoMachine от Schneider Electric и TwinCAT 3 от Beckhoff.

Как правило, крупные производители микроконтроллеров выпускают программные средства для управления ими и программирования. Пакет программ RMCtools представляет собой мощный набор средства для конфигурирования, настройки, программирования и управления всеми возможностями контроллеров перемещений RMC70 и

RMC150, производимых Delta Computer Systems (США). Взаимодействие с контроллером возможно через USB, Ethernet и RS-232.

Основные возможности программы: наблюдение и регистрация значений регистров всех осей координат, а также возможность их изменения; трассирование всех значений регистров (до 16 на одной диаграмме) с минимальным разрешением, соответствующим управляющему циклу; журнал изменения параметров, отправляемых команд, ошибок и всех передаваемых сообщений; создание пользовательских программ; графические инструменты для создания произвольных профилей движения; изменение параметров и пользовательской программы во время выполнения (отладка); математические функции для гибкого программирования и продвинутого управления мишенным циклом.

Литература

1. Chen, Y. C. Solving robot trajectory planning problems with uniform cubic B splines / Y. C. Chen // Optimal Control Applications and Methods. – 1991. – Vol. 12, № 4. – P. 247–262.
2. Dainiak, I. Forming of Precision Program Motion in Coordinate System / I. Dainiak // Proc. of 54th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau (Germany), September 7–10, 2009 / Technical University of Ilmenau. – P. 105–106.
3. Jorn Linke. Der SPS-Benchmark: Das Ergebnis. Computer Automation. 2011. 9.

УДК 620.179.14

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ В АЛГОРИТМЕ СВЯЗИ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРОМ И ТВЕРДОСТЬЮ СТАЛИ

Сандомирский С.Г.

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для повышения достоверности интерполяции аналитической функцией экспериментально установленной зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в разрабатываемой зависимости предложено использовать логическую функцию «если». Это позволило использовать разные функциональные зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в зависимости от измеренной величины магнитного параметра. Эффективность такого подхода для магнитного структурного анализа проиллюстрирована его использованием для построения функциональной зависимости твердости HRC стали 30 от ее магнитного параметра.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, статистическая зависимость, интерполяция.

USING A LOGICAL FUNCTION IN THE ALGORITHM OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MAGNETIC PARAMETER AND THE HARDNESS OF STEEL

Sandomirski S.

*Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. To increase the reliability of interpolation by the analytical function of the experimentally established dependence between the magnetic parameter and the hardness of steel in the developed dependence, it was proposed to use the logical function "if". This allowed the use of different functional dependences between the magnetic parameter and steel hardness, depending on the measured value of the magnetic parameter. The effectiveness of such an approach for magnetic structural analysis is illustrated by its use to construct a functional dependence of the HRC hardness of steel 30 on its magnetic parameter.

Key words: magnetic structural analysis, statistical dependence, interpolation.

*Адрес для переписки: Сандомирский С.Г., ул. Академическая, 12, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru*

Магнитными параметрами сталей, чувствительными к их структуре, являются коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r , а к фазовому составу чувствительна намагниченность технического насыщения M_s [1]. Благодаря большому диапазону изменения основным магнитным параметрам магнитной структуроскопии сталей стала H_c . Но твердость по Роквеллу HRC и механические свойства сталей с содержанием углерода более 0,3 % однозначно изменяются с увеличением температуры T_0 их отпуска после закалки, а H_c в диапазоне $400 < T_0, ^\circ\text{C} < 600$ – неоднозначно. В качестве примера такой зависимости в табл. 1 приведены данные из [2, табл. 1] о зависимостях твердости HRC и магнитных свойств стали 30 от температуры T_0 отпуска после закалки.

Поэтому H_c оказалась не пригодна для контроля HRC и механических свойств закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 %. В [3] в качестве параметра магнитной структуроскопии предложено использовать отношение $K_{II} = M_r/M_s$, более, чем M_r , селективное к изменениям структуры [4].

Таблица 1. Магнитные свойства и твердость HRC стали 30, отпущенной при разных температурах T_0 отпуска после закалки от температуры $860\text{ }^\circ\text{C}$

$T_0, ^\circ\text{C}$	HRC	H_c , кА/м	K_{II}	HRC (расчет)
300	44	1,22	0,61	43,79
350	41	1,13	0,648	41,27
400	38	0,995	0,697	38,02
450	34	0,873	0,759	33,92
500	32	0,876	0,768	31,6
550	26	0,866	0,779	26,12
600	23	0,834	0,784	22,64

На рис. 1 приведено корреляционное поле зависимости между K_{II} и HRC стали 30, построенное для практически важного диапазона изменения T_0 по данным табл. 1.

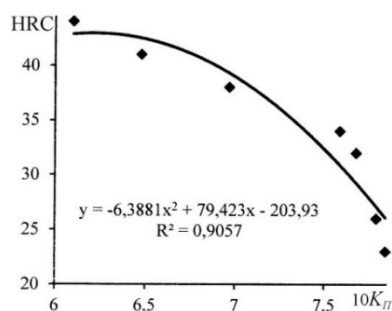


Рисунок 1 – Корреляционное поле зависимости между K_{II} и HRC стали 30, его линия тренда с уравнением и достоверностью R^2 интерполяции

Видно, что зависимость $HRC(K_{II})$ монотонная и однозначная. Но диапазон изменения K_{II} не велик, а использование для описания зависимости $HRC(K_{II})$ квадратичной степенной функции при-

водит к существенной разнице между рассчитанными по результатам измерения K_{II} величинами HRC и их истинными значениями (рис.1). Среднее квадратичное отклонение между ними по данным рис. 1 составило 6,46%. Повышение степени полинома не существенно повышает точность интерполяции, но искажает физически обоснованную монотонность зависимости $HRC(K_{II})$ и увеличивает погрешность расчета.

Цель доклада – повышение точности интерполяции экспериментально установленной зависимости между магнитным параметром и твердостью стали.

Для этого используем в разрабатываемой зависимости логическую функцию «если», которая позволяет использовать разные функциональные зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в зависимости от измеренной величины магнитного параметра. Эффективность такого подхода проиллюстрируем его использованием для построения функциональной зависимости $HRC(K_{II})$ для стали 30, рассмотренной выше.

На рис. 2 корреляционное поле зависимости между K_{II} и HRC стали 30 разбито на два перекрывающихся диапазона изменения K_{II} :

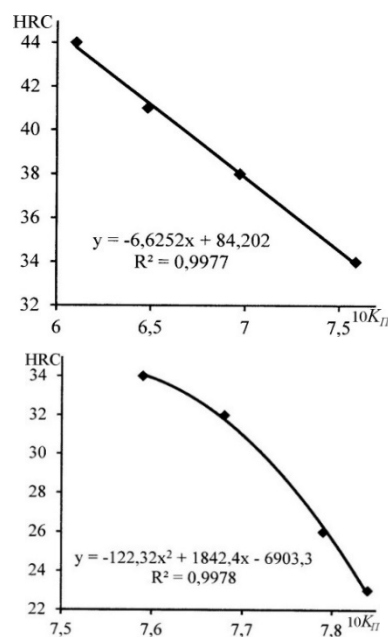


Рисунок 2 – Корреляционное поле зависимости между K_{II} и HRC стали 30 при разбиении на два диапазона ($0,6 \leq K_{II} \leq 0,76$ и $0,75 \leq K_{II} \leq 0,785$) изменения K_{II} , их линии тренда с уравнениями и достоверностями интерполяции

Полученные на рис. 2 линии тренда позволяют рекомендовать следующие формулы для расчета HRC стали 30 по результату измерения параметра K_{II} :
 если $K_{II} \leq 0,756$,
 то $HRC = 84,202 - 66,252 K_{II}$;
 если $K_{II} > 0,756$,
 то $HRC = 18424 K_{II} - 12232 K_{II}^2 - 6903,3$.

Результаты расчета HRC стали 30 по разработанным формулам приведены в таблице, а корреляционное поле между результатами расчета и измерения HRC – на рис. 3.

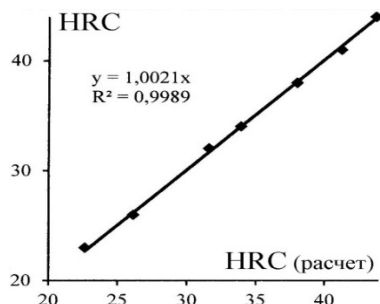


Рисунок 3 – Корреляционное поле зависимости между HRC стали 30 и результатами ее расчета

Представленные на рис. 3 зависимость и результаты ее статистической обработки (среднее квадратичное отклонение между твердостью HRC стали 30 и результатами ее расчета по данным рис. 3 составило 0,67 %) показали, что предложенная методика изменения используемой функциональной зависимости в соответствии с изменен-

ным значением магнитного параметра потенциально позволяет на порядок повысить достоверность функциональной зависимости твердости HRC стали 30 от ее магнитного параметра. Она легко может быть реализована в магнитных структуроскопах программным путем после преобразования результата измерения магнитного параметра в цифровую форму.

Литература

1. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / В. В. Клюев [и др.] // Магнитные методы контроля; под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 6. – Кн.1. – 848 с.
2. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
3. Клюев, В. В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
4. Сандомирский, С. Г. Повышение чувствительности остаточной намагниченности среднеуглеродистой стали к ее твердости / С. Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – 2021. – Вып. 10. – С. 100–104.

УДК 535 012.2 621.373.826.038.82

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ОДНОМОДОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

Свирина Л.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Выявлены свойства инвариантности экспериментально апробированной модели одномодового Nd:YAG лазера с диодной накачкой, обладающего линейной амплитудной и фазовой анизотропией резонатора. Объяснены экспериментально наблюдаемые закономерности и обнаружен ряд не известных ранее эффектов нелинейной динамики, присущих анизотропным лазерам класса В: бистабильность асимметричных периодических и хаотических режимов генерации волн с линейными ортогональными состояниями поляризации, режимы генерации, чувствительные к воздействию случайных флуктуаций, возникающие вследствие стохастизации периодических колебаний при прохождении линии рождения устойчивого предельного цикла вблизи порога генерации, последовательность бифуркаций удвоения периода.

Ключевые слова: Анизотропный твердотельный лазер, регулярные и сложные колебания.

POLARIZATION DYNAMICS OF A SINGLE MODE SOLID STATE LASER

Svirina L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The invariance properties have been elucidated of the experimentally confirmed model of a single-mode diode-pumped Nd:YAG laser, possessing linear amplitude and phase anisotropies of the cavity. The experimentally observed regularities have been elucidated and a series of new dynamical phenomena have been found, among which are: bistability of two-frequency asymmetric periodic and chaotic oscillations of waves with linear orthogonal states of polarization, noise-induced oscillations, arising as a result of stochastization of a periodic solution when the Hopf bifurcation line is passing in the vicinity of the lasing threshold, as well as a period doubling bifurcations cascade.

Key words: vector-field solid state laser, regular and complicated oscillations.

Адрес для переписки: Свирина Л.П., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lpsvirina@bntu.by

В работе [1] при экспериментальном исследовании динамики однододового Nd:YAG лазера с накачкой полупроводниковым диодом с линейной фазовой и амплитудной анизотропией резонатора при наличии линейной связи волн генерации была обнаружена бистабильность одночастотных стационарных режимов генерации с ортогональными циркулярными состояниями поляризации волн. Переключение с одного состояния поляризации на другое осуществлялось изменением знака линейной фазовой анизотропии резонатора.

В данной работе выявлены свойства симметрии уравнений генерации данного лазера [2], что позволило объяснить экспериментальные результаты и обнаружить новые эффекты поляризационно динамики, присущие лазерам класса В.

Для реализуемых в эксперименте [1] параметров Nd:YAG лазера с диодной накачкой на плоскости управляющих (экспериментально регулируемых) параметров, в качестве которых служат превышение накачки над порогом η и разность частот генерируемых волн $\Delta\omega$, задаваемая резонатором, построена бифуркационная диаграмма (см. рис. 1). Область бистабильности обнаруженных экспериментально стационарных одночастотных режимов генерации ортогональных циркулярно поляризованных волн ограничена линией l_0 , на которой имеет место суперкритическая бифуркация Хопфа и рождается устойчивый предельный цикл. Выше этой линии устойчив стационарный одночастотный режим. Как следует из теории, переключение с одного на другой режим может быть осуществлено изменением знака линейной фазовой и амплитудной анизотропии резонатора (поворотом соответствующих элементов резонатора на угол $\pi/2$).

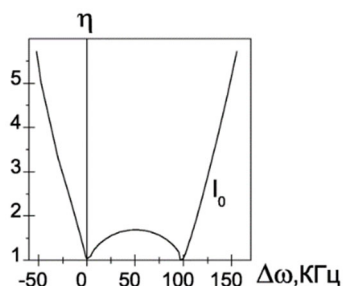


Рисунок 1 – область устойчивости стационарных одночастотных режимов генерации волн с ортогональными циркулярными состояниями поляризации

При увеличении линейной фазовой анизотропии резонатора и постоянном превышении накачки над порогом $\eta = 2$ вначале на линии l_0 возникает асимметричный предельный цикл с колебаниями всех переменных, соответствующий двухчастотному режиму генерации волн с линейными ортогональными состояниями поляриза-

ции, причем в силу свойств симметрии, существуют два асимметричных цикла, связанных друг с другом преобразованием симметрии. Выбор в генерации одного из этих циклов определяется параметрами резонатора.

Далее, асимметричный цикл претерпевает бифуркацию петли сепаратри и рождается асимметричный предельный цикл второго рода с колебаниями интенсивностей, разности населенностей и с вращением разности фаз волн генерации, причем вращение осуществляется в противоположные стороны (по и против часовой стрелки). При дальнейшем увеличении $\Delta\omega$ этот цикл изменяет свою форму, теряет устойчивость, а затем фиксируется асимметричный хаотический режим типа перемежаемости с вращением разности фаз, локализованный в цилиндрическом фазовом пространстве.

Затем следует обратная последовательность бифуркаций удвоения периода для асимметричного предельного цикла II рода. На рис. 2 показаны временные реализации для интенсивности волны, поляризованной вдоль оси x , иллюстрирующие обратную последовательность бифуркаций удвоения периода: $4T \rightarrow 2T \rightarrow T$. Вращение разности фаз происходит в противоположных направлениях.

В области значений линейной фазовой анизотропии $\Delta\omega$, где линия l_0 , на которой рождается устойчивый предельный цикл, проходит вблизи порога генерации $\eta \geq 1$ обнаружены режимы генерации, чувствительные к воздействию внешних случайных флуктуаций.

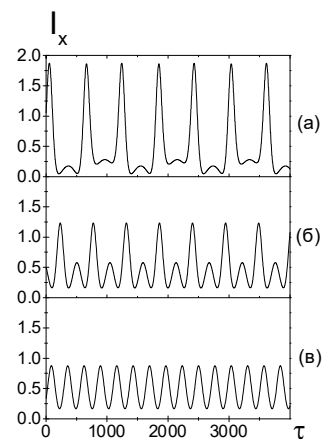


Рисунок 2 – эволюция временных реализаций для интенсивности x -компоненты генерируемого поля, иллюстрирующая обратную последовательность бифуркаций удвоения периода $4T \rightarrow 2T \rightarrow T$: $\Delta\omega = 145,5$ КГц (а), 165 КГц (б), 165,75 КГц (в).

Влияние случайных флуктуаций в припороговой области генерации иллюстрирует рис. 3, на котором для $\eta = 1,12$, $\Delta\omega = 90$ КГц приведены фазовые проекции и временные реализации переменных для устойчивого цикла в отсутствие (а, б) и в присутствии (в, г) шума. Отметим, что сложные (хаотические и стохастические) колебания,

обусловленные стохастизацией периодического режима генерации, обнаружены также в четырехчастотном кольцевом газовом лазере с линейной связью эллиптически поляризованных встречных волн за счет обратного рассеяния [3].

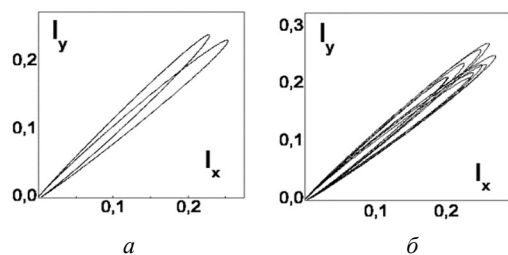


Рисунок 3 – фазовые проекции для интенсивностей ортогональных линейно поляризованных вдоль осей x и y волн в отсутствие (а) и при наличии (б) δ -коррелированного белого шума:
 $\eta = 1,12$, $\Delta\omega = 90$ КГц

При пересечении линии I_0 в нижней части диаграммы возможны как периодические, так и сложные колебания. На рис. 4 приведен фазовый портрет хаотических колебаний при $\eta = 1.2$, $\Delta\omega = 85$ КГц.

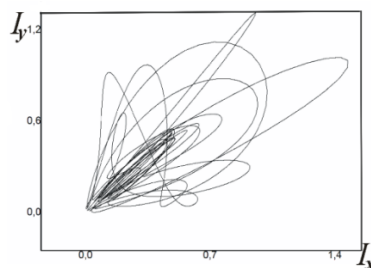


Рисунок 4 – хаотические колебания при $\eta = 1,2$,
 $\Delta\omega = 85$ КГц.

Литература

1. Experimental and theoretical study of longitudinally monomode vectorial solid-state laser / M. Brune [et al.] // Phys. Rev. A. – 1999. – Vol. 59, № 1, – P. 831–840.
2. Свирина, Л. П. Фазовая неустойчивость в одномодовом твердотельном лазере с анизотропным резонатором. / Л. П. Свирина // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т.1. 107, № 2. – P. 207–212.
3. Свирина, Л. П. Фазовая неустойчивость в четырехчастотном кольцевом газовом лазере с анизотропным резонатором / Л. П. Свирина // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 1. – P.1–15.

УДК 666.321

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАОЛИНОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Сергиевич О.А.¹, Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Богдан Е.О.¹, Колонтаева Т.В.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведены результаты исследований, направленные на повышение качественных характеристик каолинов месторождений Республики Беларусь «Ситница» и «Дедовка» путем гидравлического кондиционирования, химической и биологической обработки. Представлены данные об изучении физико-химических и технологических свойств природных и обогащенных каолинов, а также процессов, протекающих при их термической обработке интервале температур 20–1100 °С. Установлена взаимосвязь степени кондиционности, структуры и физико-химических характеристик, что позволило рекомендовать наиболее рациональные методы обогащения исследуемого каолинового сырья.

Ключевые слова: каолиновое сырье, запесоченность, обогащение, химическая обработка, свойства.

INCREASING THE QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF KAOLIN DEPOSITS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Sergievich O.¹, Popov R.¹, Bogdan E.¹, Dyatlova E.¹, Kolontaeva T.²

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. There are presented the results of improving the quality characteristics of kaolins from the deposits of "Sitnitsa" and "Dedovka" (Republic of Belarus) by means of hydraulic conditioning, chemical and biological treatment. Data are presented on the study of the physicochemical and technological properties of natural and enriched kaolins, as well as the processes occurring during their heat treatment in the temperature range of 20–1100 °C. The relationship between the degree of conditionality, structure and physico-chemical characteristics has been established, which made it possible to recommend the most rational methods for enriching the studied kaolin raw materials.

Key words: kaolin raw materials, sandiness, enrichment, chemical processing, properties.

Адрес для переписки: Попов Р.Ю., ул. Свердлова, 13а, Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: rospopov@mail.ru

Каолиновое сырье является весьма востребованным в различных отраслях производства: изготовление строительных и огнеупорных материалов, резин, пластмасс, парфюмерии, медикаментов, пищевых продуктов, бумаги и т. д. В Республике Беларусь оно является предметом импорта, причем ежегодный объем потребления составляет около 60 тыс. т. (на 4,8–5,2 млн. долл. США). Увеличение стоимости этого материала в 3–4 раза приводит к необходимости разработки отечественных месторождений каолинов. Большой интерес вызывают перспективные месторождения и проявления каолинов на территории Республики Беларусь. В качестве объектов исследования выбраны месторождения первичных каолинов «Ситница» Лунинецкого района Брестской области мощностью 2,53 млн. т. и «Дедовка» Житковичского района Гомельской области с общими запасами первичных каолинов – 7,02 млн. т и вторичных каолинов – 1,23 млн. т. [1].

Следует отметить, что данное сырье залегает на большой глубине (8–26 м) и отличается невысокой кондицией ввиду запесоченности и наличия различных примесей, особенно железосодержащих, что ограничивает его применение в промышленности [2]. Повысить качественные показатели каолинов

возможно путем их обогащения с использованием различных методов. В данной работе приводятся результаты повышения качественных характеристик каолинов месторождений «Ситница» и «Дедовка» путем гидравлического кондиционирования, химической и биологической обработки.

Установлено, что гидравлическое обогащение с ситовым кондиционированием природных первичных каолинов месторождений «Ситница» и «Дедовка» обеспечивает максимальный выход обогащенного каолина до 32,5 % и 40,0 %, соответственно, а методом отмучивания – 18–22 % и 12–15 %, при этом его качественные характеристики не в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ 21286–82.

Физико-химические и технологические свойства природных и обогащенных гидравлическим ситовым способом каолинов приведены в табл. 1. Анализ полученных данных позволил установить существенные отличия природных и обогащенных каолинов «Ситница» и «Дедовка» по запесоченности, показателю упругости, пластичности и адсорбции метиленового голубого, связанные с удалением кварцевых и полевошпатовых примесей в процессе их обогащения.

Таблица 1. Физико-химические и технологические свойства проб каолинов

Наименование показателя	Наименование месторождения			
	каолин «Ситница»		каолин «Дедовка»	
	природный	обогащенный	природный	обогащенный
Чувствительность к сушке каолинов	0,13	0,29	0,10	0,16
Воздушная усадка, %	4,1	5,7	3,9	4,8
Запесоченность каолинов, %	65,2	1,8	60,4	2,7
Показатель упругости каолиновой суспензии, кг/м ³	49	1320	60	1440
Порог структурообразования каолиновой суспензии, кг/м ³	1175	1120	1355	1300
Число пластичности каолинов	6,9	18,5	2,9	12,6
Адсорбция метиленового голубого, мг/г	9,5	14,3	6,4	9,0
Водородный показатель каолиновой суспензии	5,7	4,8	6,6	7,9
Огнеупорность, °С	1620	1710	1750	1780
Водопоглощение образцов (Т _{обж} =1400 °С), %	4,17	2,44	4,83	1,52
ТКЛР образцов (Т _{обж} =1400 °С), · 10 ⁻⁶ , К ⁻¹	6,74	6,21	6,51	5,95

Химическая обработка каолинового сырья позволяет уменьшить содержание красящих оксидов и повысить качество сырья, что, в свою очередь, расширяет область его применения [2]. Установлено, что в результате химической обработки каолиновых суспензий «Дедовка» соляной кислотой и гидросульфитом натрия происходит восстановление Fe³⁺ до Fe²⁺. При этом содержание оксида железа (III) снижается в 1,5 раза, что обуславливает повышение показателя белизны изготовленных из каолина образцов от 59 % до 68,3 %. Однако химическое обогащение каолина месторождения «Дедовка», предварительно подвергнувшегося мокрому обогащению, не позволяет в полной мере очистить сырье от железосодержащих примесей, поскольку указанные соединения

находятся в связанном состоянии и входят в состав, а также структуру каолинита и гидрослюды, изоморфно замещая ионы Al³⁺ в октаэдрическом слое глинистого компонента.

Биологическая обработка каолинового сырья силикатными бактериями «*Bacillus mucilaginosus*» оказывает положительное влияние на его технологические характеристики, однако существенных изменений в исходном минеральном и химическом составе не наблюдается: остается значительное содержание кварцевых и полевошпатовых включений. Установлено, что микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности оказывают более активное воздействие на глинистую составляющую каолина, что приводит к увеличению механической прочности материалов, получаемых из обогащенных таким

методом продуктов, в 1,2–1,4 раза за счет диспергирования глинистых частиц, а также способствует увеличению белизны в 1,1 раза за счет частичного перевода Fe_2O_3 в водорастворимое состояние. Таким образом, рекомендуется проводить биологическую обработку природного каолина после гидравлического ситового кондиционирования.

При нагревании каолинового сырья в интервале температур 20–1100 °С наблюдаются два наиболее значимых процесса: образование метакаолинита (сопровождается эндотермическим эффектом в температурном интервале 520–580 °С, причем для каолина «Дедовка» фиксируется небольшое смещение на 5–40 °С в область более высоких температур) и процесс муллитизации (сопровождается экзотермическим эффектом в области температур 970–1010 °С). Для обогащенных каолинов следует отметить отсутствие раздвоения пика в виде ступеньки в температурном интервале 570–580 °С, связанного с полиморфным превращением кварца, по сравнению с природными каолинами «Ситница» и «Дедовка».

В результате исследования существующих способов обогащения каолинового сырья установлено, что для повышения его качественных характеристик возможно использование различных способов обогащения, при этом выбор того или иного способа определяется не только

индивидуальными свойствами каолина, но и возможностью его реального применения.

Природное (необогатненное) каолиновое сырье месторождений «Ситница» и «Дедовка» целесообразно и возможно применять в исходном виде при получении керамики строительного назначения (керамической плитки: для стен, полов, клинкерной плитки, а также керамогранита; керамического кирпича с улучшенными термомеханическими характеристиками, а также клинкерного), а также при производстве полукислых огнеупоров.

Обогащение каолинового сырья мотивировано в случае получения керамики технического назначения, а также шамотных и высокоглиноземистых материалов.

При выборе способа обогащения следует выбирать экономически оправданные технологии, исходя из условий применения каолинов.

Литература

1. О возможности повышения кондиционности каолинового сырья Республики Беларусь различными методами обогащения / Г. Н. Малиновский [и др.] // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4. – С. 7–13.
2. Particulars of the chemical mineralogical composition and properties of kaolins from Belorussian deposits / O. A. Sergievich [et al.] // Glass and Ceramics. – 2012. – Vol. 69. – № 3/4. – P. 94–98.

УДК 621.762

ПСЕВДОСПЛАВЫ: ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД ТРАДИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Псевдосплавы – важное направление порошковой металлургии. Они, за счет своей композиционной микроструктуры, сформировать которую традиционными металлургическими методами невозможно, обладают уникальными свойствами. В докладе рассмотрены два типа псевдосплавов на основе вольфрама: электроконтакты и элементы защиты от радиоактивного излучения.

Ключевые слова: псевдосплавы, тяжелые сплавы, вольфрам.

PSEUDOALLOYS: ADVANTAGES OVER CONVENTIONAL MATERIALS Savich V.

*Institute of Powder Metallurgy named after Academician O.V. Roman
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. Pseudo-alloys are an important branch of powder metallurgy. Due to their compositional microstructure, which cannot be formed by traditional metallurgical methods, they have unique properties. The report considers two types of tungsten-based pseudo-alloys: electrical contacts and radiation protection elements.

Key words: pseudoalloys, heavy alloys, tungsten.

*Адрес для переписки: Савич В.В., ул. Платонова, 41, Минск 220005, Республика Беларусь
e-mail: savich.vadim@gmail.com*

Псевдосплавы – это специфический вид композиционных порошковых материалов, состоящих из взаимно нерастворимых (либо ограниченно растворимых) компонентов с разной температурой плавления. Первыми классическими псевдосплавами стали композиционные материалы системы W–Cu и W–Ag. По традиционной

технологии получения таких псевдосплавов предельно спеченный из порошка вольфрама пористый каркас пропитывают при температуре 1200–1250 °С жидкой металлической составляющей композиции – расплавом меди или серебром.

Свойства псевдосплавов W–Cu и W–Ag можно изменять в широких пределах, варьируя состав

композиций (рис. 1) [1]. Псевдосплавы имеют лучшую тепло- и электропроводность, чем чистый вольфрам. Теплопроводность чистого вольфрама при температуре 1000 °С составляет 120 Вт/(м·К), а псевдосплава W – 20 % Cu – 135 Вт/(м·К).

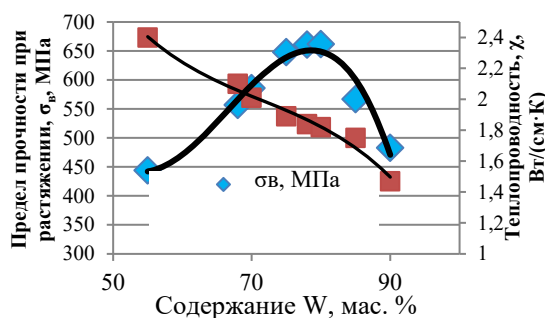


Рисунок 1 – Зависимость физико-механических свойств псевдосплава W–Cu от содержания W [1]

Испарение меди при температурах выше 2000 °С мало изменяет различие эксплуатационных свойств чистого вольфрама и псевдосплава. Затраты тепла на испарение меди и пограничный слой, обогащенный медными парами, существенно снижают тепловой поток и эрозионное воздействие продуктов сгорания топлива на каркас композиционного материала.

Псевдосплавы W–Cu и W–Ag применяли в 60-е – 70-е годы XX века в ракетной технике. Из них изготавливают сопловые вкладыши двигателей, работающих на твердом топливе, и ряд других деталей, эксплуатируемых в условиях воздействия мощных тепловых потоков. Плавление и испарение сравнительно легкоплавкой меди сопровождается значительным поглощением тепла, предупреждающим перегрев тугоплавкого вольфрамового каркаса. Пока в порах содержится жидкий металл, температура псевдосплава не может подняться выше его температуры кипения независимо от величины теплового потока, действующего на материал.

Из псевдосплавов W–Cu и W–Ni–Cu изготавливают контакты для высоковольтных выключателей, работающих в неокислительной среде или масле, электроды контактных сварочных машин для сварки тугоплавких и цветных металлов, газоохладимые сопла и межэлектродные вставки мощных сварочных, плазмохимических и металлургических плазмотронов. Пористые сопла для сварочных плазмотронов из вольфрам-медных псевдосплавов с пористостью 50 % , содержащих 10 % (объёмн.) Cu, при токе 200 А в течение 10 мин работы почти не теряют массу, тогда как масса сопел из одного пористого вольфрама уменьшается на 2,2 %. Повышенная стойкость пористых псевдосплавов связана с образованием на рабочих поверхностях пленки оксида меди, защищающей вольфрам.

Из псевдосплавов W–Ag изготавливают электроконтакты для сварочных машин, световых вы-

ключателей, авиационного оборудования, стартеров, вибраторов, преобразователей тока. Для работы в вакууме можно использовать самосмазывающиеся подшипники, спеченные из вольфрамового порошка и пропитанные серебром, золотом, оловом, сплавом Вуда.

Псевдосплавы на основе меди широко применяются в качестве материалов для электроконтактов и дугостойких электродов благодаря уникальной совокупности физико-механических и электрических свойств – высокой электропроводности, прочности, твердости и высокому сопротивлению эрозии электрической дуги (рис. 2) [2–5]. Они представляют собой композиты несмешивающихся металлов, такие как Cu–Mo, Cu–W, Cu–Cr и др.

На рис. 3 представлены некоторые контакты из псевдосплавов W–Cu, W–Ag, выпускаемые Институтом порошковой металлургии имени академика О.В. Романа.

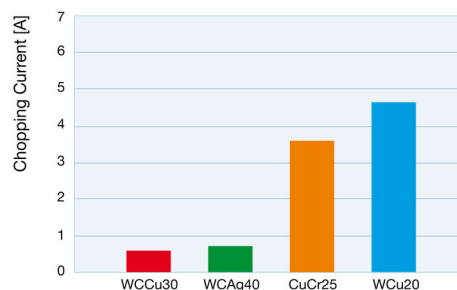


Рисунок 2 – Ток прерывания для различных контактных материалов при испытаниях на вакуумном контакторе 20 кА/24 кВ при максимальном токе 630 А

Тяжелые вольфрамовые сплавы (Tungsten Heavy Alloys) системы W–Ni–Fe или W–Ni–Cu (промышленное обозначение ВНЖ и ВНМ) – материалы с ограниченной взаимной растворимостью, представляющие большой интерес с точки зрения их приложений в ядерной энергетике [6–7]. Их отличительной особенностью кроме высокой плотности более 16 г/см³ и способности к поглощению рентгеновского и γ -излучения, являются высокие механические свойства, хорошая технологическая пластичность и механическая обрабатываемость [8].



Рисунок 3 – Контакты из псевдосплавов W–Cu, W–Ag, выпускаемые Институтом порошковой металлургии имени академика О.В. Романа

В настоящее время наиболее распространенным методом получения таких псевдосплавов является спекание при температурах выше температуры плавления самой легкоплавкой фазы сплава, которой в системе W–Ni–Fe является гамма-твердый раствор Ni–Fe легированный вольфрамом.

Содержание вольфрама в тяжелых сплавах, как правило, составляет от 90 % до 98 % по массе. Медь, никель и железо служат связующим веществом для вольфрамовых зерен, что обеспечивает увеличение пластичности, обрабатываемости и электропроводности. В Институте порошковой металлургии имени академика О.В.Романа разработаны и получены методом прессования, отжига и жидкофазного спекания порошковых смесей на основе вольфрама с добавками Cu, Ni, Fe и оксида меди композиционные радиационно-защитные материалы содержащие:

- 95%W+3%Ni+2%Cu;
- 95%W+3,5%Ni+1,5%Fe (ВНЖ-95);
- 95,5%W+1%Cu+1,5%Fe+2%Ni [7].

Разработанные спеченные композиционные радиационно-защитные материалы в зависимости от химического состава, режимов изготовления и свойств исходной шихты для прессования имеют плотность 17,6–18,2 г/см³, пористость менее 3 % и твердость 24–30 HRC. На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры псевдосплавов ВНЖ-95.

Структура разработанных радиационно-защитных материалов состоит в зависимости от химического состава из тугоплавкой составляющей – зерен вольфрама, твердого раствора железа, никеля в вольфраме, и располагающегося по границам тугоплавкой составляющей твердого раствора Cu, Fe, W в никеле.

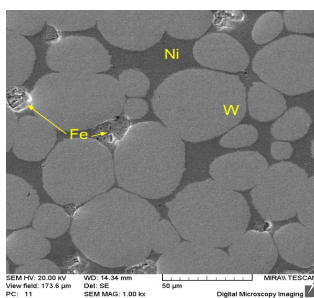


Рисунок 4 – Микроструктура псевдосплавов ВНЖ-95

На рис. 5 приведено качественное сравнение толщины различных материалов равной степени защиты от радиационного излучения, выполненное фирмой Plansee (Австрия).

Как видно из рис. 5, порошковые псевдосплавы – тяжелые сплавы на основе вольфрама Densimet и Inermet обладают высокой степенью защиты от радиационного излучения и позволяют снизить толщину защитной оболочки в 2 раза по сравнению со сталью и в 3 раза – по сравнению с бетоном.

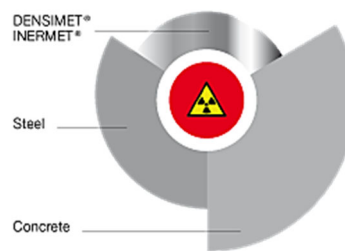


Рисунок 5 – Сравнение толщины различных материалов равной степени защиты от радиационного излучения

На рис. 6 представлены некоторые образцы контейнеров из тяжелого сплава ВНЖ-95, которые выпускаются Институтом порошковой металлургии имени академика О.В.Романа по заказам предприятия «АТОМТЕХ». Предприятие образовано в 1995 году и является ведущим научно-исследовательским и производственным центром Республики Беларусь в области разработки и производства оборудования для ядерных измерений и радиационного контроля. Контейнеры из тяжелого сплава ВНЖ-95 используются для размещения и хранения изотопов и других радиоактивных материалов – компонентов указанных выше приборов.



Рисунок 6 – Контейнеры из тяжелых сплавов ВНЖ-95 для хранения радиоактивных материалов

Литература

1. Wang, Tie Fu. Copper Tungsten Shaped Charge Liner and its Jet / Wang Tie Fu, Zhu He Rong // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – Vol. 21, iss. 4. – 1996. – P. 193–195.
2. Johnson, J. L. Effects of Tungsten Particle Size and Copper Content on Densification of Liquid-Phase-Sintered W-Cu / J. L. Johnson, J. J. Brezovsky, German Randall M. // Metallurgical Transactions. – 2005. – Vol. 36A. – P. 2807–2814.
3. Ghaderi Hamidi A. Tungsten-copper composite production by activated sintering and infiltration / Hamidi A. Ghaderi, H. Arabi, S. Rastegari // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2011. – Vol. 29, Iss. 4. – P. 538–541.
4. Jedamzik, R. Functionally graded materials by electrochemical processing and infiltration: application to tungsten/copper composites / R. Jedamzik, A. Neubrand, J. Rodel. // Journal of material science. – 2000. – Vol. 35, Iss. 2. – P. 477–486.
5. Jancovic Ilic D. Electrical and elastic properties of Cu-W graded material produced by vibro compaction / Ilic D. Jancovic, J. Fiscina, C.J.R. Gonzales-Oliver // Journal of material science. – 2008. – Vol. 43, Iss. 20. – P. 6777–6783.

6. Верховодов, П. А. Изучение кинетики восстановления и сплавообразования в системе W-Ni-Fe / П. А. Верховодов [и др.] // Порошковая металлургия. – 1979. – № 4. – С. 8–13.
7. Горохов, В. М. Порошковые композиционные материалы на основе вольфрама для применения в качестве

- радиационнозащитных материалов / В. М. Горохов, И. Н. Тарусов // Порошковая металлургия. – Вып.36. – 2013. – С.
8. Скороход, В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений [Текст] / В.В. Скороход.– Киев: «Техника», 1982.-166 с.

УДК 534.2; 179.16.05

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ ОГРАНИЧЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Деленковский Н.В., Левкович Н.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. С позиций лучевой акустики проведен теоретический анализ и выполнены экспериментальные исследования распространения поверхностных продольных волн (ППВ), возбуждаемых при падении на поверхность однослойных и двухслойных объектов под первым критическим углом. Используя теневую схему прозвучивания, экспериментально установлены условия, связывающие частоту или длину зондирующей волны, величину акустической базы, толщину контролируемого слоя объекта, нивелирующие влияние шумового фона, вызванного сопутствующими модами, на измеряемые параметры акустического импульса ППВ, включая его фазовую скорость. Рассмотрены особенности и возможности измерения физико-механических свойств однослойных и двухслойных тонкостенных изделий с использованием данных об акустических параметрах ППВ моды, а также волны Рэлея.

Ключевые слова: поверхностные продольные, поперечные волны, скорость упругих мод, лучевая акустика, модуль Юнга, коэффициент Пуассона.

FEATURES OF EXCITATION AND PROPAGATION OF SURFACE LONGITUDINAL WAVES FOR CONTROL OF OBJECTS WITH LIMITED THICKNESS

Baev A., Mayorov A., Asadchaya M., Delenkovsky N.

*The Institute of Applied Physics NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. From the viewpoint of ray acoustics, a theoretical analysis and experimental studies of the propagation of longitudinal surface waves (SSW) excited when falling on the surface of single- and double-layered objects at the first critical angle have been carried out. Using a shadow sounding scheme, the conditions were experimentally established to determine the frequency or length of the ultrasonic wave, the acoustic base value, and the thickness of the controlled object layer, which eliminate the influence of the noise background caused by and accompanying and reflected modes, on the measured parameters of the acoustic impulse of a SLW, including its phase velocity. The features and possibilities of measuring the physical-mechanical properties of single- and Rayleigh wave are considered.

Key words: surface longitudinal, transverse waves, elastic mode velocity, ray acoustics, Young's modulus and Poisson's ratio.

*Адрес для переписки: Баев А.Р., ул. Академическая, 16, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by*

Повышение эффективности и надежности ультразвукового (УЗ) контроля физико-механических свойств и структуры тонкостенных изделий с однослойной и двухслойной структурой является важной производственной задачей. В частности, это касается определения степени поврежденности металла, наличия механических напряжений, определения модуля Юнга E и коэффициент Пуассона μ и др. по данным скорости объемной продольной C_L и поперечной C_T упругих мод [1–3], когда использование традиционных методов затруднено. В работе предложена идея совершенствования методов контроля для решения указанных задач путем одностороннего ввода (приема) в объекты поверхностных продольных

(LS) и поперечных (TS) волн, являющихся неоднородными [3] и возбуждаемых при падении на объект под первым β_1 и вторым β_2 критическими углами соответственно. А их скорости (C_{LS} , C_{TS}) совпадают по величине со скоростью аналогов, измеряемых в объеме материала, что например, позволяет определить E и μ из формулы (1):

$$\{C_{LS}, C_{TS}, C_{R...}\} = (E/\rho)^{-1} f_i(\mu), \quad (1)$$

где $i = 1$ соответствует C_{LS} , $2 - C_{TS}$, $3 -$ скорости волны Рэлея C_R .

На первом этапе исследований с позиции лучевой акустики [4] в двумерном приближении проведен теоретический анализ акустического

тракта применительно к приведенной на рис. 1 схеме прозвучивания. Для случая, когда источник и приемник поверхностных волн имеют апертуру в виде прямой линии, получены зависимости, связывающие безразмерную длину акустической базы $L_\lambda = L/\lambda$, толщину пластинчатого образца $h_\lambda = h/\lambda$ и номер осцилляции импульса n , не искажаемой сопутствующими модами и выбранной для измерения скорости волны. Т.е., для конкретного h_λ существует верхняя граница акустической базы L_λ^* , при которой обеспечивается корректное измерение скорости волны. Согласно расчетам, для продольной SL моды

$$L_\lambda^* = h^2(n\lambda)^{-1} - 0,25 n\lambda. \quad (2)$$

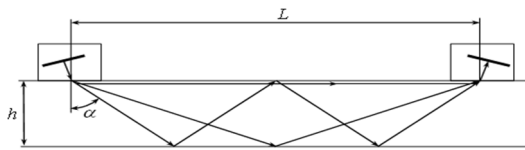


Рисунок 1 – Ход акустических лучей при распространении SL моды в тонкостенном объекте

Как показывает анализ выражения (2), использование его ограничено возникновением при отражении паразитной продольной объемной моды, скорость которой превосходит практически в 2 раза скорость ST моды. Для устранения же наложения на измерительный сигнал сопутствующей волны Рэлея, имеющей на ~10–12 % меньшую скорость, необходимо, чтобы выполнялось соотношение $L_\lambda > 8-10$, где в данном случае λ – длина поперечной волны.

На установке, используемой нами ранее [3], проведен комплекс экспериментальных исследований по влиянию толщины и акустической базы на параметры принимаемого сигнала, включая форму и амплитуду первой осцилляции импульса ($n = 1$), а также величину скорости SL моды на частоте 5 МГц. Для определения C_{LS} использован теневой вариант измерений по методу двух фиксированных акустических баз с погрешностью не более 0,5%. Основной диапазон варьируемых толщин образцов $h_\lambda = 1-10$. Данные по скорости и амплитудным параметрам сопоставлялись с полученными на образце с $h_\lambda = 25$.

В результате исследований экспериментально установлены соотношения, связывающие длину акустической базы прозвучивания, толщину образцов и длину зондирующей волны, при которых отсутствует влияние сопутствующих мод на параметры акустического импульса, включая амплитуду его первой осцилляции и УЗ скорость. (Некоторые данные приведены на рис. 2 и 3). Показано, что при $h_{\lambda, \min} \leq h_\lambda \leq h_{\lambda, \infty}$ величина $\partial A / \partial L_\lambda < 0$, а $v = \text{Abs}(\partial A / \partial L_\lambda)$ возрастает от h_λ . Если же $h_\lambda < h_{\lambda, \min}$, то v уменьшается, что связано с генерацией слабо затухающих пластинчатых волн, включая волну

Лэмба s_0 . Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей $L_\lambda(h_\lambda)$ указывает на их качественное соответствие при численном различии на 10–30 %, что, как показано, вызвано преимущественно размерами апертуры источника и приемника УЗК. Однако, эти данные могут быть использованы в качестве опорных при разработке соответствующих методик УЗ контроля физико-механических свойств однослойных и двухслойных материалов тонкостенных объектов с использованием данных по скорости распространения продольной поверхностной волны.

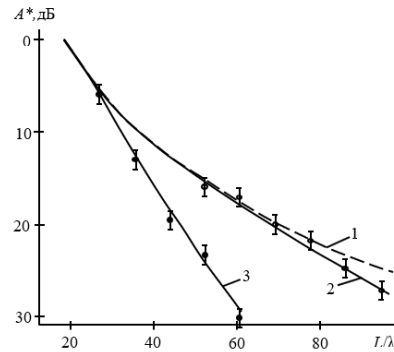


Рисунок 2 – Амплитуда первой осцилляции SL моды импульса в зависимости от акустической базы при разной толщине образца $h/\lambda = \infty$ (1); 4,66 (2); 2,54 (3)

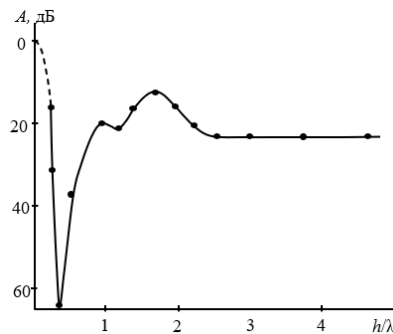


Рисунок 3 – Амплитуда первой осцилляции SL импульса в зависимости от толщины образца при $L_\lambda = 20$

В качестве дополнительного параметра, используемого для определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона в тонкостенных объектах, предлагается использовать скорость волны Рэлея (1).

Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003.
2. Ермолов, И. Н. Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами / И. Н. Ермолов, Н. П. Разыграев // Дефектоскопия. – 2004. – №9. – С.27–37.
3. Баев, А.Р. Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах / М. В. Асадчая, А. Р. Баев // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. – С. 19–43.
4. Бреховских, Л. М. Акустика слоистых сред / О. А. Годин, Л. М. Бреховских. – М.: Наука, 1989. – 247 с.

УДК 62-233.1

СТЕНД ИСПЫТАНИЙ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ Есьман Г.А., Габец В.Л., Карамышев А.Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены способы испытаний шаровых шарниров. Показаны основные достоинства и недостатки существующих методов. Предложен оригинальный стенд для проведения ускоренных испытаний, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: шаровый шарнир, шаровая опора, испытательный стенд, способы испытаний.

BALL JOINT TEST BENCH Yesman G., Habets V., Karamyshau A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. In this paper the authors present ball joint testing methods. Major strengths and weaknesses of existing methods are explained. An original testing bench is introduced, which allows for rapid, close to the real-world environment testing.

Key words: ball joint, ball bearing, test bench, testing methods.

*Адрес для переписки: Габец В.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vgabets@bntu.by*

Шаровые шарниры применяются для кинематической связи элементов машин и механизмов, подвижных относительно друг друга, в режиме скольжения. Шарнирные соединения используются, когда опоры разнесены на значительные расстояния и возможны колебания между валом и корпусом механизма. В настоящее время применяются шаровые шарниры и наконечники различного исполнения с различными поверхностями скольжения [1].

Соединение шарового шарнира, объединяющее элементы шарнира в функциональный узел, должно обладать требуемыми прочностными характеристиками, которых обеспечивает требуемый уровень безопасности эксплуатируемого узла.

В зависимости от конструкции шарового шарнира к сборочному соединению могут предъявляться различные дополнительные требования, такие как обеспечение заданного усилия вырыва шарового пальца, усилия выдавливания шарового пальца и др. [2].

Все известные на данный момент способы испытания шаровых шарниров передней подвески автомобилей на долговечность, можно условно разделить на две группы: дорожные испытания автомобиля и стендовые. Последние в свою очередь можно разделить на испытания автомобиля, испытания передней подвески автомобиля, испытания шаровых шарниров независимо от других элементов подвески и испытания шаровых шарниров совместно с другими элементами подвески [3].

В некоторых случаях получение необходимой информации путем проведения дорожных испытаний на долговечность является наиболее приоритетным, поскольку обеспечивается максимальное подобие испытательных режимов нагружения режимам эксплуатационным. Но этот метод при всей

своей понятности, простоте плана испытаний и сопоставимости результатов отличается сложностью, высокой стоимостью и длительностью реализации.

Преимущества стендовых испытаний перед дорожными:

- меньшие трудоемкость и стоимость испытаний;
- снижение времени испытаний;
- высокая воспроизводимость режима испытаний.

Таким образом, наиболее эффективным способом изучения процесса эксплуатации шаровых шарниров является его воссоздание в лабораторных условиях. И чем более точно воспроизводится процесс, тем более полную и достоверную информацию возможно получить в реальных условиях [4].

При этом стенд, на котором производится испытание шаровых шарниров, должен в полном объеме воспроизводить все движения и силовые нагрузки, воспринимаемые шарнирами в реальных условиях.

Кроме того, что бы иметь возможность в полной мере доверять результатам стендовых испытаний, необходима их проверка данными, полученными в реальных условиях [3, 4].

При планировании испытаний шаровых шарниров на циклическую долговечность необходимо также учитывать, что основными контрольными параметрами испытываемых шарниров являются: для верхних шаровых шарниров осевое перемещение шарового пальца в корпусе и для нижних шаровых шарниров расстояние от наружной поверхности нижнего корпуса до сферической поверхности головки шарового пальца.

Дополнительными контрольными параметрами, показывающими состояние шарнира,

являются моменты сопротивления качанию и вращению шарового пальца в корпусе шарнира, а также плавность хода при их замере.

После того, как на всех испытуемых образцах проведен замер основных и дополнительных контрольных параметров, производится их установка на испытательный стенд, на котором предварительно заданы эксплуатационные параметры.

Количество циклов испытаний соответствует количеству качаний траверсы и составляет в сумме 1 млн. циклов.

В ходе проведения испытаний стенд останавливают через каждые 50 тыс. циклов с целью замера контрольных параметров на испытуемых образцах.

Результатом испытаний являются зависимости изменения состояния испытуемых образцов с увеличением количества циклов испытаний.

Для определения фактического соотношения между количеством циклов испытаний на стенде и пробегом автомобиля в реальных условиях, достаточно, зная значения контрольных параметров шарниров, демонтированных с автомобилей, а также пробег каждого автомобиля, узнать его соотношение с количеством циклов испытаний.

В результате это позволит проводить ускоренные испытания шаровых шарниров на циклическую долговечность с возможностью получения достоверной информации о характере изменения характеристик шарниров в процессе эксплуатации [5].

Предложенная конструкция стенда для испытаний шаровых опор, представлена на рис. 1 и состоит из нагрузочной траверсы 1, которая воздействует на испытуемые шарниры 2, установленные на опорах 3. Воздействия на траверсу 1 обеспечиваются гидравлическими приводами поперечных нагрузок 6 и продольных 9 через тяги 7 и 8 соответственно. Крутильные колебания обеспечиваются гидравлическими приводами 5 через зубчато-реечную передачу 4.

Работа стенда осуществляется следующим образом. Испытуемые шарниры устанавливаются на опорные кронштейны 3 и на них закрепляется траверса 1. Выбирается режим нагружения: продольные, поперечные или крутильные колебания. При крутильных колебаниях приводы 5 нагружают через передачу 4 кронштейны 3, которые скручивают элементы шарниров 2. При поперечных колебаниях привод 6 воздействует на траверсу 1 через тягу 8, при этом траверса 1 нагружает элементы шарниров 2. При поперечных колебаниях привод 9 через тяги 7 нагружает траверсу 1, которая воздействует на испытуемые шарниры 2.

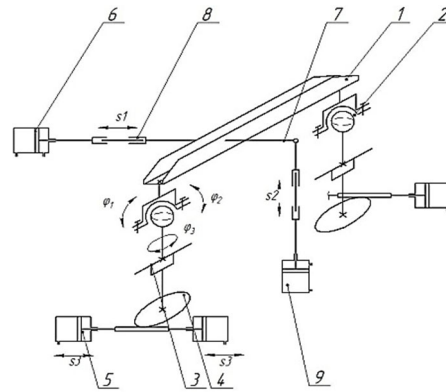


Рисунок 1 – Стенд для испытания шаровых опор

Достоинством предложенной конструкции стенда является возможность нагружения головки шарнира кручением, изгибом и сжатием, что обеспечивает комплексный контроль данного изделия [6].

Литература

1. Шаровые шарниры и шарнирные соединения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.podshipnik.ru/analyst/3829/element_3281.html.
2. Анализ существующих способов формирования соединений и основные требования к качеству при сборке шаровых шарниров передней подвески автомобилей / Ю. В. Калмыков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 4. – С. 47–50.
3. Лапчинский, В. В. Определение закономерности изменения технического состояния шаровых пальцев передней подвески автомобилей: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.22.10 / В.В. Лапчинский; Магнитогорск. гос. Ун-т, 2005. – 18 с.
4. Новиков, А. Н. Современные способы стендовых испытаний шаровых шарниров / А. Н. Новиков, А. А. Катунин, М. Д. Тебекин // Мир транспорта и технологических машин. Эксплуатация, ремонт, восстановление. Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева. – 2010. – №4 (31). – С. 27–34.
5. Гун, И. Г. Методика проведения испытаний шаровых шарниров на циклическую долговечность / Гун И. Г., Михайловский И. А., Лапчинский В. В. // Вестник Оренбургского государственного университета. Приложение «Автотранспортные системы». – 2004. – №5. – С. 18–21.
6. Карамышев, А. Е. Стенд для испытаний шаровых шарниров / А. Е. Карамышев, Д. М. Альмухаметов, В. Л. Габец // Новые направления развития приборостроения : материалы 14-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 14–16 апреля 2021 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 109.

УДК 535:628.373.8,535:548

ПАРАМЕТРЫ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НУЛЕВОГО И ПЕРВОГО ПОРЯДКОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ СРЕДУ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ВО ВРЕМЕНИ ОПТИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Рыжевич А.А.¹, Балыкин И.В.¹, Машенко А.Г.¹, Казак Н.С.^{1,2}

¹Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. После прохождения лазерного пучка через среду с оптическими неоднородностями он претерпевает изменения в поперечных распределениях фазы и амплитуды. У сформированного из него бесселева светового пучка (БСП) 0-го либо 1-го порядка параметры качества становятся хуже, чем были бы при отсутствии в среде оптических неоднородностей. Если неоднородности изменяются во времени, изменяются и параметры качества БСП, что можно использовать для объективной оценки изменений, происходящих в среде. Разные типы параметров качества в разных сечениях БСП отличаются по чувствительности к изменениям среды, поэтому можно выбрать оптимальный тип параметра качества для оценки изменений в среде, исходя из величины этих изменений.

Ключевые слова: Бесселев световой пучок, параметр качества бесселева светового пучка, среда с оптическими неоднородностями.

PARAMETERS OF ZERO AND FIRST ORDER BESSEL LIGHT BEAMS FORMED FROM A LASER BEAM PASSED THROUGH THE MEDIUM WITH TIME-VARING OPTICAL INHOMOGENEITIES

Ryzhevich A.¹, Balykin I.¹, Mashchenko A.¹, Kazak N.^{1,2}

¹*B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus*

²*The State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology"*

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. As a result of the propagation of a laser light beam through a medium with optical inhomogeneities, it undergoes changes of the transverse phase and amplitude distributions. For a Bessel light beam (BLB) of zero or first order formed from it the quality parameters become worse than they would be in the absence of optical inhomogeneities in the medium. If the inhomogeneities of the environment change in time the quality parameters of the BLB also change. This regularity can be used for an objective estimation of changes occurring in the medium. Since different parameters in different cross-sections of BLB differ in sensitivity to environmental changes, it is possible to choose the optimal BLB quality parameter to assess changes in the medium basing on the magnitude of this change.

Key words: Bessel light beam, quality parameter of a Bessel light beam, medium with optical inhomogeneities.

Адрес для переписки: Рыжевич А.А., просп. Независимости, 68-2, Минск 220072, Республика Беларусь; e-mail: tol@dragon.bas-net.by

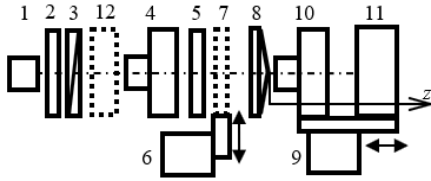
Введение. Бесселевы световые пучки (БСП) 0-го и 1-го порядков являются аксиально симметричными интерференционными световыми полями, радиальное распределение поля в которых описывается функциями Бесселя 1-го рода 0-го и 1-го порядков соответственно. Известно, что на качество БСП влияние оказывает качество исходного светового пучка, падающего на аксикон [1–4], и качество аксикона [2, 4]. Для определения качества БСП в [2–3] были предложены объективные числовые параметры: параметр круглости k_k , параметр постоянства k_{Π} и скорректированный коэффициент детерминации R^2 . Поскольку неоднородности в атмосфере и других прозрачных средах могут приводить к оптической неоднородности, в данной работе было проверено сделанное нами предположение, что параметры качества БСП, сформированного из светового пучка, прошедшего через среду с неоднородностями, будут отличаться от параметров качества БСП, сформированного из пучка, не проходившего через такую среду. Кроме того, исследована зависимость

параметров качества БСП от продольной координаты и порядка БСП.

Экспериментальная установка. Нами была собрана экспериментальная установка для исследования влияния среды с неоднородностями на качество БСП, сформированного из исходного гауссова светового пучка, прошедшего через эту среду (рис. 1). При наличии в схеме опционального универсального преобразователя 12, состоящего из последовательно установленных на оси пучка: широкополосного поляризатора (ШП) [5], ромба Френеля (РФ), двуслоного кристалла, ориентированного вдоль биномали, второго РФ и второго ШП – в световом пучке, падающем на аксикон, формируется винтовая дислокация волнового фронта с целью получения за аксиконом БСП 1-го порядка [6]. При отсутствии имитатора турбулентности атмосферы 7 регистрировался БСП, сформированный без влияния неоднородностей среды. Кроме того, с помощью тепловентилятора мощностью 1 кВт формировался вариант среды с неоднородностями в виде турбулентностей при

частичном поперечном обдуве нагретым воздухом промежутка на месте убранного имитатора 7 (разница температур воздуха в нагретом потоке и промежутке составляла 8 °С).

Результаты и обсуждение. На рис. 2 показаны полученные оценки средних по 100 измерениям значений параметров качества k_K , k_{II} и R^2 БСП 0-го порядка на различных расстояниях за аксиконом. Затененные полосы вдоль кривых обозначают области, в которую при измерении попадет с вероятностью 0,68 параметр качества, в случае, если полагать случайное распределение параметра качества гауссовым.

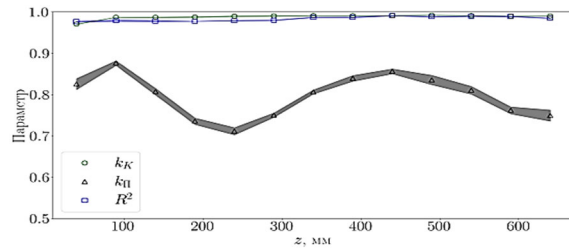


1 – лазер; 2 – полуволновая пластина; 3 – поляризатор;
4 – 20/10/5/2-кратный расширитель пучка/коллиматор;
5 – аттенуатор; 6 – моторизованный держатель;
7 – имитатор неоднородности атмосферы; 8 – аксикон;
9 – моторизованная платформа; 10 – микроскоп;
11 – CCD-камера, 12 – универсальный преобразователь

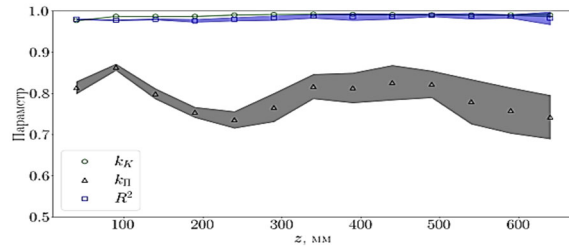
Рисунок 1 – Конструкция экспериментальной установки для исследования влияния среды с неоднородностями на качество бесселева светового пучка

Измерения показали, что оптические неоднородности на имитаторе приводят к ухудшению всех параметров качества БСП, причем наиболее чувствительным является параметр k_{II} , а наименее чувствительным – параметр k_K . При регистрации БСП на большем расстоянии z чувствительность всех параметров увеличивается (рис. 2), что выражается в увеличении их среднеквадратичных отклонений. Кроме того, из рис. 2 видно, что имитатор турбулентности вносит в БСП более сильные искажения, чем слой нагретого воздуха. Зависимости параметров качества БСП 1-го порядка имеют аналогичный вид. Таким образом, параметры качества БСП, сформированного из прошедшего через среду лазерного пучка, можно использовать для объективной численной оценки характера оптической неоднородности среды. При этом для оценки сильных неоднородностей или очень протяженной среды следует использовать наименее чувствительный параметр k_K , а для слабых – наиболее чувствительный k_{II} .

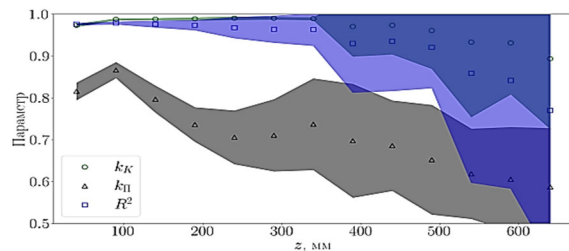
Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.1 «Разработка методов и устройств диагностики материалов, процессов и изделий в оптическом и терагерцовом диапазонах спектра и их применение для оптической связи, микроскопии и определения характеристик различных объектов» (№ гос. рег. 20210300) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (2021–2025 гг.).



а



б



в

а – однородный воздух; б – слой нагретого воздуха; в – имитатор турбулентности атмосферы

Рисунок 2 – Зависимость параметров качества БСП от расстояния z после аксикона

Литература

1. Simple method of laser beam quality analysis / A. A. Ryzhevich [et al.] // Lightmetry: Proc. SPIE, Pultusk, Poland, 5-9 June 2000 / Ed. by M. Pluta. – SPIE, 2000. – Vol. 4517. – P. 16–21.
2. Ryzhevich, A.A. Quality Parameters of Zero-Order Bessel Light Beams / A. A. Ryzhevich, I. V. Balykin, T. A. Zheleznyakova // J. of Appl. Spectr. – 2018. – Vol. 85, № 1. – P. 134–142.
3. Ryzhevich, A. A. Determination of the Quality Parameters of Higher-Order Bessel Light Beams / A. A. Ryzhevich, I. V. Balykin, T. A. Zheleznyakova // J. of Appl. Spectr. – 2021. – Vol. 88, №5 – P. 1020–1034.
4. Рыжевич, А. А. Определение параметра конусности бесселева светового пучка посредством Фурье-анализа диаметрального распределения интенсивности / А. А. Рыжевич, И. В. Балькин // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – №1. – С. 20–34.
5. Broad-band polarizing light beam splitter based on a multilayer thin-film coating / V. E. Agabekov [et al.] // J. of Appl. Spectr. – 2021. – Vol. 88. – №4. – P. 816–824.
6. Ryzhevich, A. A. A new method for forming first-order Bessel light beams and the possibility of using them in nanotechnologies / A. A. Ryzhevich // Journal of Optical Technology – 2001. – V. 68, № 3. – P. 208.

УДК 666.638:651-652

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МАНГАНИТОВ РЗЭ

Бука А.В.¹, Дятлова Е.М.¹, Колонтаева Т.В.², Шевченко А.А.³

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

³Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Получены керамические материалы на основе модифицированного манганита лантана методом высокотемпературного спекания. Исследовано влияние физико-химических и механических характеристик (кажущаяся плотность, открытая пористость, водопоглощение) от вида и количества иона-модификатора.

Ключевые слова: модифицированный манганит лантана, водопоглощение, открытая пористость, кажущаяся плотность.

PHYSICO-CHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMICS BASED ON REE MANGANITES

Buka A.¹, Dyatlova E.¹, Kolontaeva T.², Shevchenok A.³

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

³Belarusian State Agrarian Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Ceramic materials based on modified lanthanum manganite were obtained by high-temperature sintering. Investigation of the influence of physico-chemical and mechanical characteristics (apparent density, open porosity, water absorption) depends on the type and quantity of the modifier ion.

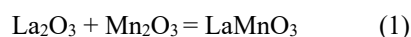
Keywords: modified lanthanum manganite, water absorption, open porosity, apparent density.

Целью исследования является синтез и исследование физико-химических и механических свойств керамических материалов на основе модифицированного LaMnO_3 (ионы-модификаторы – Ba^{2+} , Zn^{2+}), установление зависимости указанных свойств от вида и содержания иона-модификатора, а также их научная интерпретация.

Модификаторы выбраны с учетом их способности к ионному замещению в основном соединении. При этом, замещение может проходить в различные положения.

Для получения опытных образцов синтезирован модифицированный манганит лантана. Для синтеза модифицированного манганита лантана применялись следующие реактивы квалификации «ХЧ»: оксид лантана, оксид марганца (III), оксид цинка, углекислый барий.

При получении стехиометричного манганита лантана применялась следующая химическая реакция:



Манганит лантана получен по классической керамической технологии.

Синтез материалов проводился методом двукратного обжига. При первичном обжиге происходит кристаллизация необходимых фаз, при термической обработке при 1300°C образцов происходит полное спекание материала, опытный образец приобретает необходимую механическую прочность, происходит более полная кристаллизация

фаз, завершаются остаточные термические процессы, происходящие в материале.

Рассчитаны сырьевые композиции на основе манганита лантана с использованием оксидов ионов-модификаторов в количестве от 5 до 15 %, с шагом 5 мас. %.

Для получения модифицированного манганита лантана порошки исходных компонентов смешивались и измельчались в стехиометричном соотношении в вибрационной мельнице, затем полученная смесь обжигалась в электрической печи при температуре 1300°C с выдержкой при максимальной температуре 2 ч.

Для получения опытных образцов синтезированный тонкодисперсный порошок керамики смешивался со связкой, в роли которой применялась карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ). Связка добавлялась в количестве 3–5 % для улучшения формовочных свойств. Формование образцов проводилось на лабораторном гидравлическом прессе. Давление прессования составляет от 30 до 50 МПа, прессование осуществлялось двухступенчатое для предупреждения запрессовки воздуха внутрь образца.

Опытные образцы имели диаметр 12 мм, толщину 2–3 мм. После формования образцы направлялись на повторный обжиг, при температуре 1300°C с выдержкой при максимальной температуре 2 ч, для спекания и получения механической прочности.

Обожженные образцы подвергались механической обработке.

В табл. 1 представлены шихтовые составы исходных смесей.

Таблица 1. Составы исходных композиций

Номер состава	Оксиды и их содержание, мас.%			
	La ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	ZnO	BaO
1	50,0	50,0	–	–
2	45,0	50,0	5,0	–
3	40,0	50,0	10,0	–
4	35,0	50,0	15,0	–
5	45,0	50,0	–	5,0
6	40,0	50,0	–	10,0
7	35,0	50,0	–	15,0

На рис. 1 изображена графическая зависимость водопоглощения опытных образцов от содержания иона-модификатора.

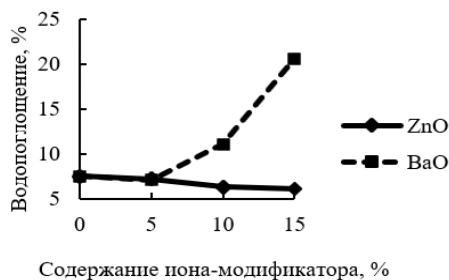


Рисунок 1 – Зависимость водопоглощения от содержания иона-модификатора

На рис. 2 представлена графическая зависимость открытой пористости от содержания иона-модификатора.

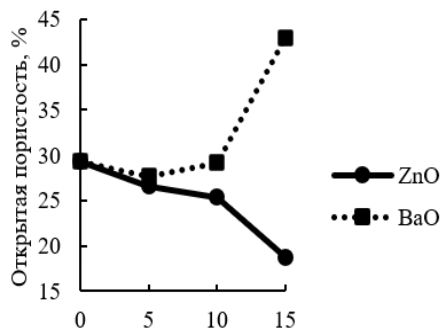


Рисунок 2 – Зависимость открытой пористости от содержания иона-модификатора

Зависимость кажущейся плотности от содержания иона-модификатора представлена на рис. 3.

Как видно из приведенных зависимостей (рис. 1–3) с увеличением содержания оксида цинка возрастает значение кажущейся плотности, открытая пористость и водопоглощение снижаются, вероятно это связано с тем, что оксид цинка образует легкоплавкое соединение, а также ряд твердых растворов смешанной стехиометрии, вследствие этого происходит заполнение порового пространства. С увеличением содержания ионов бария, вводимого с помощью карбоната бария, растут показатели водопоглощения и открытой пористости, что связано

с диссоциацией бариевой соли и выделением углекислого газа, поэтому происходит насыщение пора́ми опытного образца.

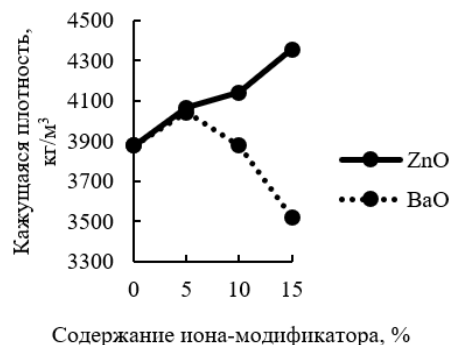


Рисунок 3 – Зависимость кажущейся плотности от содержания иона-модификатора

Определение механической прочности при сжатии проводилось при помощи испытательной машины Galdabini Quasar 100 (Италия). Погрешность составляет не более 0,7 %.

Зависимость предела прочности при сжатии опытных образцов от природы и содержания модифицирующей добавки изображена на рис. 4.

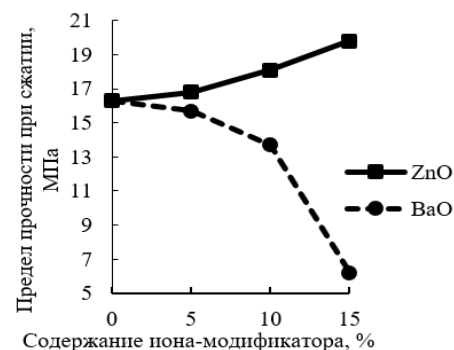


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности при сжатии опытных образцов от содержания иона-модификатора

Как видно из графической зависимости (рис. 4) с увеличением содержания оксида бария механическая прочность при сжатии снижается, это связано с тем, что происходит выделение углекислого газа, что и вызывает поризацию структуры что и снижает механическую прочность при сжатии. Оксид цинка положительно влияет на механическую прочность, так как ZnO образует легкоплавкие соединения смешанного ряда устойчивости и полностью заполняет поровое пространство, соединяя между собой зерна основной фазы, тем самым уменьшая пористость, водопоглощение и увеличивая механическую прочность при сжатии.

Данные материалы могут быть рекомендованы в качестве подложек для напыления тонких пленок, перспективных материалов для создания спинового транзисторов, а также чувствительных элементов в магнитоуправляемых приборах.

УДК 621.315.592

**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСОСУЛЬФИДА И ТИОИОДИДА ВИСМУТА:
СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Свито И.А.¹, Ксеневиц В.К.¹, Бондаренко Е.А.³, Хорошко Л.С.¹,
Кулак А.И.², Стрельцов Е.А.¹, Мазаник А.В.¹**

¹*Белорусский государственный университет*

²*Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси*

Минск, Республика Беларусь

³*Силезский технологический университет*

Гливице, Польша

Аннотация. Методом химического осаждения на стеклянных подложках синтезированы пленки оксосульфидов висмута и тииодида висмута. Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, пленки оксосульфидов висмута сформированы тонкими (несколько десятков нанометров) пластинчатыми кристаллами, а пленки тииодида висмута имеют игольчатую структуру. Это обеспечивает большое соотношение «поверхность/объем» и создает предпосылки к созданию сенсоров газов или влажности на основе данных материалов. Показана зависимость сопротивления резистивной структуры на основе оксосульфидов висмута от относительной влажности, демонстрирующая ее высокую чувствительность и быстродействие.

Ключевые слова: оксосульфид висмута; тииодид висмута; тонкие пленки; сенсор; относительная влажность.

**BISMUTH OXYSULFIDE AND THIOIODIDE THIN FILMS:
STRUCTURE AND POSSIBILITIES OF CREATING SENSING DEVICES**

**Svito I.¹, Ksenevich V.¹, Bondarenko E.³, Khoroshko L.¹,
Kulak A.², Streltsov E.¹, Mazanik A.¹**

¹*Belarusian State University*

²*Institute of General and Inorganic Chemistry of NAS of Belarus,*

Minsk, Republic of Belarus

³*Silesian University of Technology, Faculty of Chemistry,*

Department of Physical Chemistry and Technology of Polymers

Gliwice, Poland

Abstract. Bismuth oxysulfide and thioiodide films were synthesized by the chemical bath deposition on glass substrates. According to the scanning electron microscopy, bismuth oxysulfide films are formed by thin (several tens of nanometers) platelet crystals, whereas bismuth thioiodide films have a needle-shaped structure. This provides a large surface-to-volume ratio and creates prerequisites for the formation of gas or humidity sensors based on these materials. Dependence of the resistance on relative humidity of a resistive structure based on bismuth oxysulfide demonstrates its high sensitivity and fast response.

Key words: bismuth oxysulfide; bismuth thioiodide; thin films; sensor; relative humidity.

*Адрес для переписки: Мазаник А.В., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: mazanikalexander@gmail.com*

Введение. В настоящее время в материаловедении наблюдается повышенный интерес как к сплавам на основе висмута, так и к полупроводниковым соединениям на его основе. Это обусловлено тем, что висмут – сравнительно доступный и недорогой химический элемент. Он существенно менее токсичен по сравнению с другими тяжелыми металлами («зеленый свинец»). Полупроводниковые соединения висмута могут быть синтезированы простыми и недорогими методами химического или электрохимического осаждения. Представляет интерес использование данных материалов в солнечной энергетике, для термоэлектрического преобразования энергии, создания детекторов высокоэнергетических квантов и др. В настоящей работе исследуются пленки оксосульфидов висмута и тииодида висмута, полученные методом

химического осаждения, в контексте возможности создания на их основе сенсоров относительной влажности.

Методика эксперимента. Пленки оксосульфидов висмута были получены методом химического осаждения из раствора на основе нитрата висмута, триэтанолamina и тиомочевины, методика синтеза подробно описана в работах [1–3]. Для получения пленок тииодида висмута также был использован метод химического осаждения из раствора, содержащего нитрат висмута, тиомочевину и иодид калия [4].

Для оценки чувствительности сенсорных структур на поверхности пленок с помощью серебряной пасты формировали два параллельных контакта на расстоянии 0,3 мм. Образец помещали в вакуумируемую камеру с регулируемой

относительной влажностью и подключали к источнику-измерителю Keithley 2450, от которого подавалось постоянное напряжение 20 В. В ходе эксперимента относительная влажность в камере циклически изменялась посредством напуска/откачки паров воды, при этом регистрировалась зависимость силы тока (с погрешностью в пределах ± 110 пА) от времени.

Результаты и их обсуждение. Электронно-микроскопические исследования показали, что пленки оксосульфида висмута сформированы тонкими (несколько десятков нанометров) пластинчатыми кристаллами, а пленки тииодида висмута имеют игольчатую структуру (рис. 1 и 2).

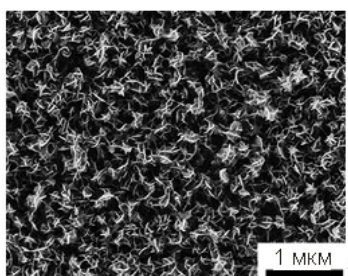


Рисунок 1 – Изображение сканирующей электронной микроскопии поверхности пленки оксосульфида висмута

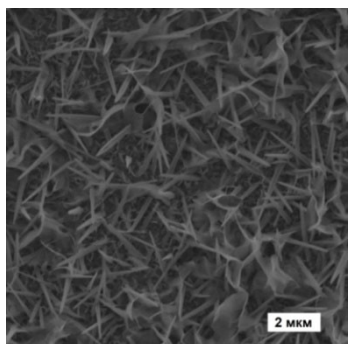


Рисунок 2 – Изображение сканирующей электронной микроскопии поверхности пленки тииодида висмута

В качестве примера реакции исследованных пленок на изменение относительной влажности от 0 до 85 % на рис. 3 приведены участки хроноамперограммы для пленки оксосульфида висмута непосредственно после напуска и откачки паров воды. Как видно, пленки характеризуются быстрым откликом на изменения относительной влаж-

ности и высокой чувствительностью. Установленные механизмы, ответственных за изменение сопротивления пленок при изменении влажности, а также долговременная стабильность характеристик требуют дополнительных исследований.

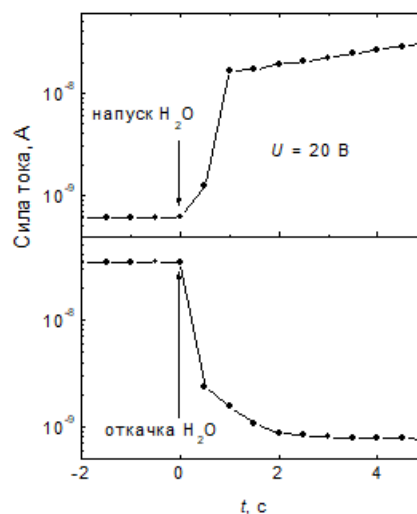


Рисунок 3 – Участки хроноамперограммы для пленки оксосульфида висмута при подаче постоянного напряжения непосредственно после напуска и откачки паров воды

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (подпрограмма «Опто- и СВЧ-электроника»).

Литература

1. Giant incident photon-to-current conversion with photoconductivity gain on nanostructured bismuth oxysulfide photoelectrodes under visible-light illumination / E. A. Bondarenko [et al.] // *Adv. Mater.* – 2017. – Vol. 29 (40). – P. 1702387.
2. EBismuth oxysulfide film electrodes with giant incident photon-to-current conversion efficiency: dynamics of properties with deposition time / E. A. Bondarenko [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2018. – Vol. 20. – P. 20340–20346.
3. Bismuth oxysulfide photoelectrodes with giant incident photon-to-current conversion efficiency: chemical stability in aqueous solutions / E.A. Bondarenko [et al.] // *ChemElectroChem.* – 2019. – Vol. 6. – P. 2474–2481.
4. Синтез и фотоэлектрохимические свойства тииодида висмута / М.Е. Козыревич [и др.] // *Весті НАН Белларусі. Сер. хім. навук.* – 2018. – Т. 54, №4. – С. 413–418.

УДК 539.122.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н., Ермолаев А.П.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана физико-математическая модель для расчета изменения рабочих характеристик $n-p-n$ биполярных транзисторов в условиях облучения нейтронами 1,4 МэВ. Создана управляющая программа и проведены численные расчеты коэффициента усиления (КУ) тока и выходных характеристик прибора.

Ключевые слова: транзисторы, облучение, моделирование, радиационная стойкость.

SIMULATION OF RADIATION CHANGES OF OPERATING CHARACTERISTICS OF BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

Miskiewicz S., Komarov A., Komarov F., Yuvchenko V., Ermolaev A.

Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The model of $n-p-n$ bipolar junction transistor operating under 1.4 MeV neutron irradiation and the software to input initial data and show simulation results were developed. The model allows to calculate the changes in output characteristics and current gain of BJT.

Key words: bipolar junction transistors, irradiation, simulation, radiation hardness.

Адрес для переписки: Мискевич С.А., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: sergei.miskevich@inbox.ru

Биполярные транзисторы (БТ) являются приборами, управляемыми током неосновных носителей заряда (ННЗ). Определяющий параметр их радиационной стойкости это время жизни ННЗ в базе транзистора.

Модель. Модель для расчета радиационных изменений рабочих характеристик БТ основана на том, что основной вклад в этот процесс вносит дефектообразование при прохождении радиационных частиц и электромагнитного излучения через полупроводник и, как следствие, сокращение времени жизни ННЗ ввиду их рекомбинации на радиационных дефектах кристаллической решетки полупроводника. Ионизационные эффекты в БТ при воздействии излучения не так критичны [1], однако они могут вызывать появление каналов утечки у поверхности базы при генерации и накоплении заряда в изолирующих оксидных слоях прибора.

Время жизни ННЗ входит в уравнение непрерывности, задающее их пространственно-временное распределение по базовой области. В случае БТ $n-p-n$ типа оно имеет вид:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = -\frac{\Delta n(x)}{\tau_n(x)} + D_n(x) \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \mu_n E(x) \frac{\partial n(x)}{\partial x} - n(x) \mu_n \frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

где n – концентрация неравновесных электронов, Δn – разница между концентрацией равновесных и неравновесных электронов; τ_n – время жизни; D_n – коэффициент диффузии; μ_n – подвижность;

E – напряженность встроенного электрического поля.

Граничные условия для (1): на эмиттерном переходе:

$$n(0) = n_p(0) e^{\frac{qU}{kT}}, \quad (2)$$

на коллекторном:

$$n(W_A) = 0, \quad (3)$$

где W_A – ширина активной базы; q – заряд электрона; U – напряжение на эмиттерном переходе; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Данные условия соответствуют активному режиму работы БТ, т. е. прямому смещению эмиттерного и обратному смещению коллекторного переходов.

Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от поглощенной дозы излучения задается формулой [2]

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (4)$$

где τ_0 – время жизни до облучения, τ_Φ – после облучения, Φ – поглощенная доза, k_τ – радиационный коэффициент изменения времени жизни. Данный коэффициент зависит от энергии и типа частиц, уровня инжекции и других факторов, а его численное значение в большинстве случаев определяется экспериментально.

В случае облучения нейтронами со средней энергией 1,4 МэВ данный коэффициент для $n-p-n$ БТ имеет вид [1]:

$$\frac{1}{k_{\tau}} = 2,5 \cdot 10^5 + 5,55 \cdot 10^6 \left(\frac{p}{n}\right)^{0,395}$$

(нейтронов·сек/см²),

что при той же степени легирования и инжекции в несколько раз ниже, чем в случае *p-n-p* биполярного транзистора [1–2].

Результаты. Решение (1) в базе БТ представляет собой распределение ННЗ и определяет уровень рекомбинационных потерь. На его основе получаем плотности токов через переходы БТ: через эмиттерный

$$j_{ne} = qD_n \frac{dn(0)}{dx}, \quad (5)$$

через коллекторный

$$j_{nc} = qD_n \frac{dn(W_A)}{dx}, \quad (6)$$

Интегрируя (5) и (6) по площади переходов, получаем значения токов эмиттера и коллектора. Ток базы является разностью между ними. КУ в схеме с общим эмиттером – отношение токов коллектора и базы.

Численное решение уравнения (1) получаем методом прогонки [4, 5] с учетом (4) и (5) после конечно-разностной аппроксимации на сетке.

Управляющая программа предназначена для ввода исходных данных, запуска расчетных модулей и вывода результатов моделирования на экран в графическом виде (рис. 1).

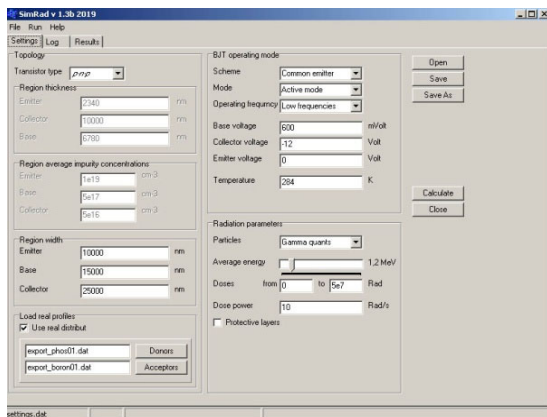


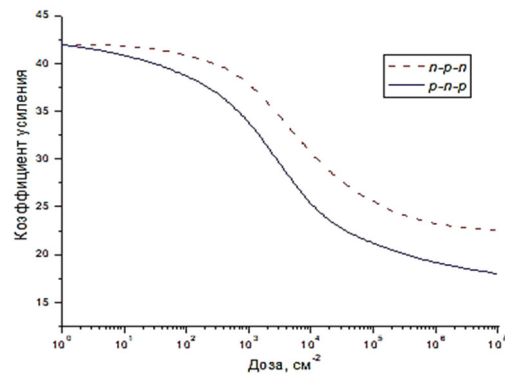
Рисунок 1 – Главное окно управляющей программы

При моделировании режимы работы транзисторов разных типов из-за различия их характеристик выбирались такими, чтобы начальные КУ обоих приборов были равны (рис. 2, а).

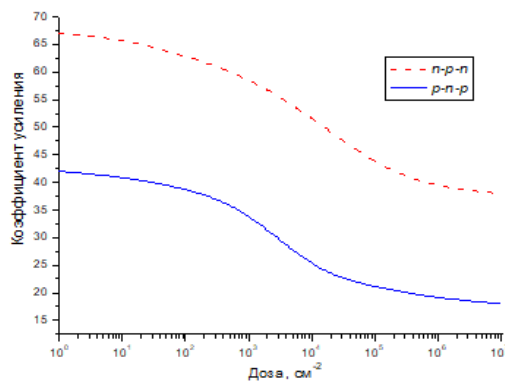
Согласно рис. 2, а, у *n-p-n* транзистора при равных начальных значениях скорость падения КУ при наборе дозы ниже, чем у *p-n-p*. Однако при одинаковых режимах работы (ток базы транзисторов 10 мкА), относительное падение КУ примерно равно (рис. 2, б).

Сравнение результатов моделирования радиационной стойкости разных типов биполярных

транзисторов показывает, что при облучении у приборов обоих типов наблюдается значительное падение КУ тока. Вид зависимости КУ от поглощенной дозы аналогичен, поскольку для описания радиационной деградации использовалась одна и та же модель, но с иными значениями коэффициента диффузии, подвижности, коэффициента радиационного изменения времени жизни.



а



б

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента усиления от дозы нейтронов

Литература

1. Вологдин, Э. Н., Радиационная стойкость биполярных транзисторов. / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 2000. – 101 с.
2. Radiation degradation of bipolar transistor current gain / S. A. Miskiewicz [et al.] // Acta Physica Polonica. – 2017. – Vol. 132 (2). – P. 288–290.
3. Влияние ионизирующего излучения на характеристики полупроводниковых приборов: моделирование и эксперимент / С. А. Мискевич [и др.]. – В кн.: Труды XXIV Международной научной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП-2019) (19–23 августа 2019), г. Москва, 2019. – № 3. – С. 97–100.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский, – М.: Наука, 1989.
5. Моделирование радиационной стойкости биполярных транзисторных структур на кремнии / С. А. Мискевич [и др.] // Материалы VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». (24–28 сентября 2018), Минск. Минск: Издательский центр БГУ, 2018. – С. 208–210.

УДК 620.179.14

АНИЗОТРОПИЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ОЦЕНКА ЕЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследована возможность контроля магнитной анизотропии низколегированных листов ферромагнитной стали разной толщины с использованием измерения градиента поля остаточной намагниченности и коэрцитивной силы приборами ИМА и КИПФ-1. Проведено сравнение результатов контроля. Даны рекомендации по увеличению точности определения магнитной анизотропии, а также уменьшению влияния неоднородности листов и погрешностей используемого оборудования на результаты измерений. **Ключевые слова:** анизотропия, импульсный магнитный метод, неразрушающий контроль, неоднородность, градиент поля остаточной намагниченности.

ANISOTROPY OF SHEETS OF LOW-CARBON STEELS AND THE EVALUATION OF ITS HETEROGENEITY

Kulagin V., Osipov A., Piunov V.

The State Scientific Institution "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of controlling the magnetic anisotropy of low-alloyed ferromagnetic steel sheets of different thicknesses by measuring the residual magnetization field gradient and coercive force with IMA and KIPF-1 devices is studied. Comparison of results of control is carried out. Recommendations are given to increase the accuracy of determining the magnetic anisotropy, as well as to reduce the effect of sheet inhomogeneity and the errors of the equipment used on the measurement results.

Key words: anisotropy, pulsed magnetic method, non-destructive testing, inhomogeneity, residual magnetization field gradient.

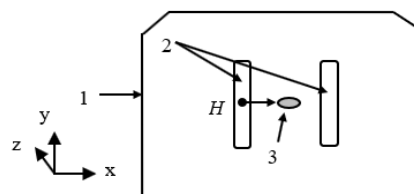
Адрес для переписки: Осипов А.А., ул. Академическая, 16, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: osipov@iapf.bas-net.by

Магнитные методы неразрушающего контроля [1] используются на промышленных предприятиях для решения самых разнообразных задач. Один из них, импульсный магнитный метод [2], основан на чувствительности градиента поля остаточной намагниченности к изменению механических характеристик.

Дополнительно импульсный магнитный метод позволяет оценивать негативное влияние неоднородности материала изделия на результаты контроля механических свойств и качества термообработки. При экспериментальных исследованиях использовались прямоугольные холоднокатаные образцы низкоуглеродистой стали (с одинаковой температурой отжига 200° С и разной толщиной: 0,8; 1,0; 1,2 и 1,5 мм) размерами 1000×1000 мм². Для сравнения проводились измерения также с применением коэрцитиметрического метода [1] (использовался прибор КИПФ-1, внесенный в реестр средств измерений РБ № сертификата 15303). Оба подхода позволяют проводить измерения по прокатке и перпендикулярно прокатке, поскольку используют намагничивание вдоль поверхности листа.

При применении импульсного магнитного метода намагничивание осуществлялось прибором ИМА-5Б [3] с использованием двух прямоугольных катушек, включенных последовательно по

полно, установленных на поверхности образца (рис. 1) и имеющих в плоскости перпендикулярной их оси размеры 100×35 мм², причем расстояние между их центрами было равно 100 мм. Использовался один размагничивающий и один намагничивающий импульсы тока.



1 – прямоугольные образцы, 2 – прямоугольные намагничивающие катушки, 3 – специальный преобразователь, подключенный к прибору ИМА-4М

Рисунок 1 – Схема расположения намагничивающих катушек и специального преобразователя для анализатора ИМА-4М при использовании импульсного магнитного метода и коэрцитиметра

Между прямоугольными катушками (рис. 1) был установлен феррозондовый измерительный преобразователь, выполненный из двух стандартных полузондов приборов типа ИМА [2], но расположенных друг над другом и над поверхностью исследуемого образца [4]. Преобразователь был

подключен к импульсному магнитному анализатору ИМА-4М [5] (внесен в реестр средств измерений РБ № сертификата 13383).

Определение градиента поля остаточной намагниченности после намагничивания выполнялось в центре прямоугольных образцов последовательно на верхней и нижней их поверхностях, а также на углах листов, в каждой области измерений по прокатке и перпендикулярно прокатке (датчики приборов располагались симметрично относительно углов), при этом измерялись попеременно значения градиента поля остаточной намагниченности dH_x/dz .

При использовании коэрцитиметра КИПФ-1 полюса его электромагнита располагались так, чтобы создавать намагничивающее поле по конфигурации и расположению подобное полю, создаваемому при импульсном локальном намагничивании прибором ИМА-5Б. Из экспериментальных данных градиента поля остаточной намагниченности определялась величина магнитной анизотропии как отношение измеренных значений коэрцитивной силы или градиента поля остаточной намагниченности по прокатке к ее соответствующему значению перпендикулярно прокатке: $K_c = H_{c\parallel}/H_{c\perp}$ и $K_{gr} = \nabla H_{\parallel}/\nabla H_{\perp}$.

В идеальном случае (например, при отсутствии неоднородностей, повреждений листа на краях и т.д.) коэффициенты анизотропии K_c и K_{gr} , измеренные на разных поверхностях листа, должны практически совпадать, а отличия должны объясняться точностью используемого оборудования. В действительности было получено, что коэффициенты анизотропии заметно изменялись:

- от 1,11 до 1,44 для листа толщиной $h=0,8$ мм;
- от 1,05 до 1,38 для листа толщиной $h=1,0$ мм;
- от 1,09 до 1,40 для листа толщиной $h=1,2$ мм;
- от 1,04 до 1,41 для листа толщиной $h=1,5$ мм.

Видно, что минимальные и максимальные значения коэффициентов анизотропии отличаются по величине не более нескольких процентов при изменении толщины листов на десятки процентов, как для ИМА, так и для КИПФ-1.

Для уменьшения влияния неоднородности листов и погрешности измерений на выводы по проведенным экспериментам, проводились усреднения полученных данных для каждого из листов по обеим поверхностям. Так усреднение по пяти точкам показало, что для всех листов разной толщины коэффициент анизотропии находится на уровне 1,2 и выше.

Но есть различия в результатах измерения с использованием КИПФ-1 и ИМА. Для ИМА коэффициенты анизотропии, усредненные по поверхностям листов, в центре и на углах обычно

мало различаются. В то время, как для коэрцитиметра измерения в центре заметно ниже (различия могут достигать 10 % и более). Поэтому в последнем случае (для увеличения чувствительности к анизотропии) можно рекомендовать измерения на углах образцов, если они не имеют недопустимых механических дефектов, повреждений и т. д.

Необходимо также отметить, что измерения по направлению прокатки и перпендикулярно прокатке проводились не точно в одной и той же области образцов, а в близких областях при симметричном расположении преобразователей приборов неразрушающего контроля.

При этом результаты измерений на листах различной толщины имеют и свою специфику. Например, для листа толщиной 1,0 мм при измерениях прибором ИМА отношение магнитной анизотропии в каждом из углов листа к ее значению в центре с одной из сторон его поверхности превышает единицу на несколько процентов и выше (вплоть до 10 %).

В то время, как на противоположной стороне данного листа аналогичное отношение для всех углов меньше единицы вплоть до 10 %. Для остальных листов (толщины 0,8; 1,2 и 1,5 мм) такие различия носят по большей части случайный характер, что может быть связано, например, с существенной неоднородностью материала образцов в центре.

Таким образом, была рассмотрена возможность определения магнитной анизотропии листов низкоуглеродистой стали с использованием приборов типа ИМА и коэрцитиметра КИПФ-1 на примере образцов разной толщины (0,8; 1,0; 1,2 и 1,5 мм).

Для увеличения надежности определения анизотропии конкретного листа, рекомендуется проводить измерения в симметричных относительно краев областях контроля, причем с обеих сторон листа.

Литература

1. Михеев, М. Н. магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. – Москва: Наука. – 1993. – 252 с.
2. Мельгуй, М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. / М. А. Мельгуй. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
3. Мельгуй, М. А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М. А. Мельгуй [и др.] // Научно-технические достижения. – 1990. – № 4. – С. 41–44.
4. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М / В. Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 47–53.
5. Счастный, А. С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А. С. Счастный, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.

УДК 534.2; 179.16.05

ОБ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ И ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ

Баев А.Р.¹, Бабук Е.П.², Майоров А.Л.¹, Асадчая М.В.¹, Левкович Н.В.¹

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²ОАО "Минский автомобильный завод"

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Работа посвящена расширению технических возможностей и повышению эффективности контроля физико-механических свойств чугунов (ЧГ), включая твердость по Бринеллю B_r , временное сопротивление σ и др., где в качестве коррелирующих с ними параметров использованы скорости продольной (L), поперечной (T) и поверхностной (R) моды, а также амплитудно-угловые характеристики отраженных или вводимых в металл для прохождения по нему подповерхностных мод. Объектом исследований служили образцы марок СЧ (10–25) и ВЧ 50 с варьируемым содержанием перлитной фазы в диапазоне $Q, \% = 20–80$. Проведенные на рабочей частоте 5 МГц измерения позволили определить коэффициенты Пуассона и модуля Юнга, а также сопоставить с данными по B_r и σ . Проведены исследования по использованию для структуроскопии ЧГ в качестве дополнительного магнитного способа, основанного на измерении остаточного поля H_n и дано заключение о применимости предложенных методик для контроля структуры чугунов.

Ключевые слова: чугун, физико-механические и акустические свойства, ультразвуковой и комбинированный контроль.

ON THE ACOUSTIC PROPERTIES OF CAST IRONS AND THE INCREASE OF THEIR PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES TESTING

Baev A.¹, Babuk E.², Mayorov A.¹, Asadchaya M.¹, Levkovich N.¹

The Institute of Applied Physics NAS of Belarus

OJSC "Minsk Automobile Plant"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This work is devoted to extending the technical capabilities and enhancing the efficiency of control of physico-mechanical properties of cast iron (CI), including Brinell hardness B_r , time resistance σ , etc., where the velocities of longitudinal (L), transverse (T) and surface (R) modes and also the amplitude-angle characteristics of reflected or transmit into the metal to pass through it subsurface modes are used as correlating parameters. The object of studies were samples of grey CI – 15, 20, 25 and ductile CI50 with varying content of pearlite phase varying from $Q = 20$ up to 80 %. Carried out at a working frequency of 5 MHz measurements have allowed to define Poisson's coefficients and Young's modulus, and also to compare with data on B_r and σ . Studies of the of the additional method using based on measurements of the residual field H_n for structure control have been carried out and a conclusion about the applicability of the suggested methods for controlling the structure of cast irons has been given.

Keywords: gray and high-strength cast iron, physical and mechanical properties, ultrasonic and magnetic control, ultrasonic velocity, Poisson's coefficient.

Адрес для переписки: Баев А.Р., ул. Академическая, 16, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

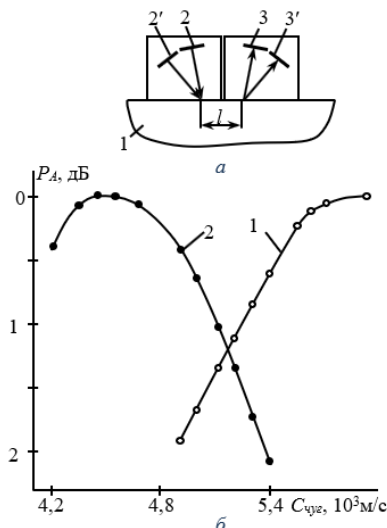
Ультразвуковые методы контроля благодаря тесной корреляционной связи акустических характеристик с физико-механическими свойствами чугунов (ЧГ), автономности и компактности приборов и др. перспективны как при производстве ЧГ изделий, так и эксплуатации [1, 2]. С целью дальнейшего повышения достоверности и расширения возможностей контроля объектов ЧГ разных конфигураций и степени обработки их поверхности, проведены исследования акустических свойств образцов серого чугуна (СЧ15, СЧ20, СЧ25), КВЧ35 и ВЧ50 с содержанием перлита в основе $Q, \% = 20–80$. Исследования направлены, прежде всего, на сопоставление данных по скорости $C_{L,T,R}$ продольных (L), поперечных (T) и поверхностных (R) волн, с временным сопротивлением чугунов σ и их твердостью B_r , где динамический модуль

Юнга E и коэффициент Пуассона μ связаны соотношением: $C_{L,T,R} = (E/\rho) - 1/2f(\mu)L,T,R$.

Предлагаются и исследуются также другие акустические способы структуроскопии ЧГ. Они основаны на определении $C_{L,T,R}$ косвенным способом – по углу экстремума амплитудно-угловых характеристик $A(\beta)$, при отражении луча УЗК от поверхности объекта, а также максимуму амплитуды подповерхностных или поверхностных волн, возбуждаемых при $\beta_{L,T,R} = \arcsin(C1/C_{L,T,R})$.

Для ускорения процесса контроля марок ЧГ предлагается схема (рис. 1), основанная на одновременном измерении и сравнении амплитуд прошедших через объект подповерхностных (A_L и A_T) мод, настройка которых реализуется по образцу свидетелю. Исходя из изменения параметра $\delta = A_L/A_T$, судят о структуре ЧГ.

Для нивелирования влияния на акустический тракт ряда паразитных факторов, вызванных качеством акустического контакта и различия в ослаблении структурой ЧГ зондирующих волн точку выхода акустического луча ПЭП устанавливаются в единую. Выбор рабочей частоты f определяется структурой и затуханием под-поверхностных волн в металле. В ряде случаев рекомендуется ее величину для возбуждаемой в образце T моды уменьшить практически в 2 раза по сравнению с L модой чтобы нивелировать разницу их длин волн.



1 – объект; 2, 2' – излучающий преобразователь; 3, 3' – приемные преобразователи; угол призмы $\beta = 27^\circ$ (1); 37° (2)

Рисунок 1 – Измерительное компенсационное устройство для отбраковки серого чугуна от высокопрочного по результатам измерения скорости звука (а) и зависимости амплитуды возбуждаемой ПВ от скорости звука в чугуне (б)

Проведена также экспериментальная апробация достаточно чувствительного к пластинчатой структуре метода отбраковки чугунов марки ВЧ от СЧ по данным величины структурных шумов $\nu = (АШ)ЧГ / (АШ)ВЧ$, фиксируемых в раздельно-совмещенном режиме. В отличие от известного подхода [1], реализуемого только при наличии опорного сигнала, полученного при отражении от оппозитной стенки, эта необходимость отсутствует. Как впервые установлено, относительная величина ν , характеризующая отражательную способность пластинчатого графита для указанных марок СЧ и ВЧ составляет 4–5 раз.

Обращено внимание на возможность использования дополнительных измеряемых информативных параметров, повышающих достоверность

акустической структуроскопии ЧГ. Это твердость [1], шумы Баркгаузена [2], а также размагничивающее поле компактных объектов ЧГ, создаваемое при перемещении последних через намагничивающий соленоид, включая [3] и др. При разработке комбинированного метода в качестве дополнительного параметра к акустическим использовано остаточное локальное магнитное поле H_n , наведенное при квазистатическом намагничивании локальной области образца полюсным наконечником диаметром 7 мм.

Проведенные исследования показали высокую эффективность комбинированного метода диагностики ЧГ, например, на превышение (по ТУ) твердости, что тесно связано с наличием перлитной фазы в высокопрочном чугуне (рис. 2) и сером. В работе выполнен анализ возможностей и целесообразности совмещения акустических и магнитных методик измерений для повышения чувствительности и производительности структуроскопии чугунов.

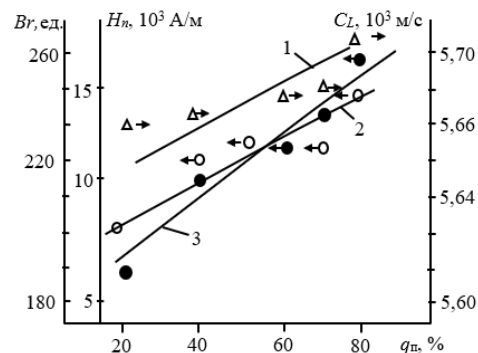


Рисунок 2 – Зависимости скорости продольной моды (Δ), твердости по Бринеллю (2, \bullet), локального остаточного магнитного поля (3, \circ) в образцах чугуна марки ВЧ50 от содержания перлита

Литература

1. Воронкова Л. В. Контроль чугунных отливок ультразвуком / Л. В. Воронкова. – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 25 с.
2. Результаты использования индикаторов структуры высокопрочного типа ИЧ в условиях производства чугуна / А. Р. Баев [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – №2. – С. 102–105.
3. Бусько, В. Н. Неразрушающий контроль изделий из чугуна методом эффекта Баркгаузена / В. Н. Бусько, В. Л. Венгринович, Б. А. Чепыжов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 18–29.
4. Способ сортировки отливок из высокопрочного чугуна по содержанию в их структуре шаровидных графитовых включений и перлита : пат РБ 19548 / С. Г. Сандомирский., Д. М. Цукерман. – Оpubл. 10.30.2015.

УДК 537.534.2

ПРЯМОПОТОЧНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Камышан А.С., Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. С использованием оригинальной геометрии прямонакального катода осуществлены экспериментальные исследования выходного тока новой конструкции источника ионов в широком диапазоне давлений атмосферного воздуха, определены давления, при которых происходит зажигание газового дугового разряда на воздушной смеси. Исследованы различные материалы катодов и комбинации напряжений питания.

Ключевые слова: источник ионов; плазма ионосферы; аэрокосмические материалы.

FORWARD-FLOW ION SOURCE FOR SIMULATION OF IONOSPHERIC PLASMA IMPACTS ON AEROSPACE MATERIALS

Kamyshan A., Pilko V. (S), Pilko V.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Using the original geometry of a directly heated cathode, experimental studies of the output current of a new ion source design were carried out in a wide range of atmospheric air pressures, and the pressures at which a gas arc discharge on an air mixture was ignited were determined. Various materials of cathodes and combinations of supply voltages have been studied.

Key words: ion source; plasma of the ionosphere; aerospace materials.

Адрес для переписки: Пилько В.В., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: pilkow@mail.ru

Создание и исследование параметров прямопоточного источника ионов, работающего при низких давлениях атмосферного газа, является актуальной задачей ионнолучевой техники.

Постоянство формы катода в процессе эксплуатации хорошо обеспечивается в конструкциях источников ионов с холодным катодом [1]. Это позволяет использовать катод в качестве элемента электронно-оптической системы при формировании пучка ионов. Главным недостатком этих устройств является высокое значение давления рабочего газа и большой поток нейтральных атомов газа, проходящих через отверстие для вывода пучка. Дополнительными недостатками являются большой разброс ионов по энергиям и высокое рабочее напряжение.

Наиболее эффективными при низких давлениях рабочего газа являются источники ионов с горячим катодом [2]. Как правило, в их конструкции используется разрядная камера, заполняемая плазмой газового разряда. В отверстии камеры создается плазменный мениск, с поверхности которого осуществляют экстракцию ионов дополнительным электродом, имеющим относительно разрядной камеры высокий отрицательный потенциал. Мениск и экстрактор составляют при этом основу электронно-оптической системы, а фокусирующий электрод, при необходимости, корректирует форму пучка. Форма термокатода и режим разряда оказывают на геометрию мениска

лишь опосредованное влияние, а катод и анод не являются важными компонентами электронно-оптической системы. Именно поэтому в устройствах данного типа, как правило, используется асимметричная форма катода. Разработанный прямопоточный источник ионов предназначен для получения интенсивного пучка ионов с постоянной геометрией.

Методика и обсуждение результатов. Разработан, изготовлен и апробирован источник ионов, общий вид которого приведен на рис. 1.

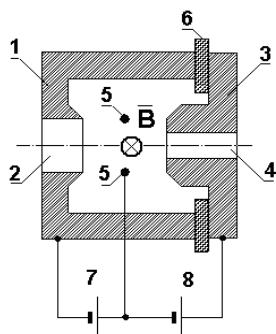


Рисунок 1 – Общий вид прямопоточного источника ионов с горячим катодом

Конструкция и принцип действия источника поясняются схематическим рис. 2.

Как видно из рис. 2, разрядная камера и анодный фланец формируют вокруг катода замкнутый объем с каналами для подачи рабочего газа и вывода пучка. Термокатод симметричен, и состоит из

двух параллельных нитей. Использованная полярность подключения источников напряжения позволяет сконцентрировать на аноде вблизи канала подачи рабочего газа термоэлектроны эмиссии катода и потоки вторичных электронов, генерируемых при столкновении ионов с катодом и краями канала для вывода пучка. Внешнее магнитное поле и поле тока накала катода многократно удлиняют траектории электронов, повышая вероятность ионизации газа. Направление потока ионов совпадает с направлением потока рабочего газа, при этом ионизированная компонента потока приобретает в ускоряющих зазорах дополнительный импульс. Магнитные поля не вносят в поток ионов существенных искажений. Характеристика пучка на выходе ионного источника иллюстрируется рис. 3. Исследования показали, что разработанный тип источника совместим как с аксиальными, так и с ленточными геометриями транспортировки ионов. Рис. 3 иллюстрирует случай вывода пучка сквозь круглое отверстие диаметром 12 мм. Профиль просканирован на расстоянии 36 мм от отверстия линейным зондом диаметром 0,5 мм. Для разработанной системы накала характерно явление автобалансировки тока накала, и при износе одной из нитей, увеличивающем ее электросопротивление, ток через вторую возрастает, увеличивая соответствующую компоненту тока эмиссии. В качестве материала катода в случае атмосферного воздуха работоспособны катоды из окисленного вольфрама.



1 – разрядная камера; 2 – отверстие для вывода пучка; 3 – анод; 4 – канал для подачи рабочего газа; 5 – катод; 6 – изолятор; 7 и 8 – источники напряжения; B – внешнее магнитное поле

Рисунок 2 – Схематическое изображение источника

Лучший результат дает торированный вольфрам, обладающий повышенной стойкостью и

большой плотностью тока эмиссии. В качестве перспективных материалов для изготовления катодов в дальнейшем необходимо рассмотреть оксидные композиции. Время наработки катода на отказ существенно зависело от рабочего давления и значительно превышало срок службы спирального и однопроводного катода. Установлено, что работоспособность источника сохраняется в диапазоне давлений атмосферного воздуха от 1 до $6 \cdot 10^{-5}$ Па, что согласно [3] соответствует слою ионосферы от 80 до 210 км. Диапазон давлений тестирования на данном этапе исследований был ограничен возможностями конвенциональной вакуумной системы, однако во всей области ударной ионизации зависимость тока от давления была близка к линейной. В диапазоне от 1 до 0,1 Па имеет место возникновение дугового газового разряда, сопровождающегося возрастанием тока на 2 порядка величины. Эти режимы являются оптимальными для систем ионной имплантации и получения мощных потоков плазмы.

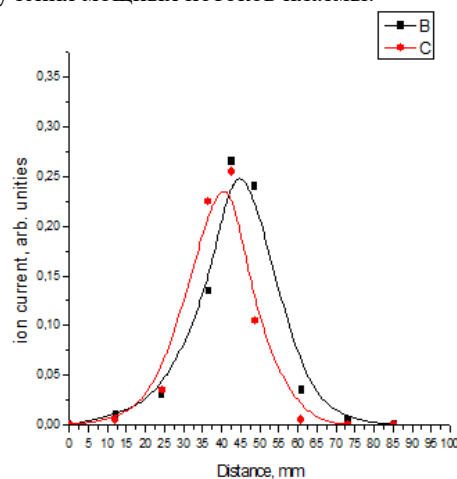


Рисунок 3 – B и C – распределения тока в сечении ионного пучка при сканировании в ортогональных направлениях

Литература

1. Ионнолучевые источники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://plasma-instrument.com/istos/ion-noluchevye-istochniki>.
2. Ионные источники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pvsystems.ru/pfeiffer/mass-spektrometri/istochniki/>.
3. ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры. Часть 1. ИПК Издательство стандартов, Москва, 2004. – 180 с.

УДК 621.38

СОЗДАНИЕ КОСМЕТОЛОГИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО АППАРАТА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

Степаненко А.И.¹, Минченя В.Т.², Матюшко А.В.³, Михневич В.В.⁴

¹ООО «Технология и медицина 2030»

²Белорусский Национальный Технический Университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Создание косметологического импульсного магнитоиндукционного аппарата является перспективным направлением в области косметологии. В статье отражены особенности воздействия магнитного поля на человека, преимущества аппарата по сравнению ультразвуковыми аппаратами. Обращено внимание на особенности проектирования и моделирования с использованием цифровых технологий.

Ключевые слова: косметология, индукционный аппарат, магнитное поле, импульсное воздействие.

CREATION OF A COSMETIC PULSED MAGNETIC INDUCTION APPARATUS AND FEATURES OF ITS IMPACT ON A PERSON

Stepanenko A.¹, Minchenya V.², Matyushko A.³, Mikhnevich V.⁴

¹ООО "Technology and Medicine 2030"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The creation of a cosmetic pulsed magnetic induction devices is a perspective direction in the field of cosmetology. The article reflects the features of the impact of a magnetic field on a person, the advantages of the device in comparison with ultrasonic devices. Attention is drawn to the features of design and modeling using digital technologies.

Key words: cosmetology, induction device, magnetic field, impulse impact.

*Адрес для переписки: Степаненко А.И., пр. Победителей 135, к.197 г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: stepanenko.al3x@mail.ru.*

На сегодняшний день на рынке компактных косметологических аппаратов ведущее положение заняли аппараты ультразвуковой терапии, основная область применения которых – лицо и шея человека. Глубина проникающего воздействия таких аппаратов недостаточно высокая, хотя со своими задачами они в целом справляются (разглаживание морщин, чистка пор лица, снятие напряжения и др.). Ключевым преимуществом данных аппаратов можно назвать относительно небольшую стоимость (до 100\$). В тоже время действующим аппаратам присущи некоторые недостатки: малый заряд батареи, усиление сухости кожи и др.

В сравнении с ультразвуковыми косметологическими приборами менее используемым в настоящее время является другой вид воздействия на человека в косметологии – импульсное магнитоиндукционное воздействие, в основе работы которых лежит другой принцип действия. Главной отличительной особенностью таких устройств является то, что они работают за счет создания магнитного поля. Магнитное поле является особым видом материи, которая осуществляет связь и взаимодействие между движущимися электрическими зарядами, важное свойство которого проявляется в его неограниченности в пространстве. Магнитные поля хорошо проникают в биологические ткани и глубину их проникновения можно регулировать.

Известные магнитные поля можно разделить на постоянные, переменные, импульсные, пульсирующие, бегущие, вращающиеся, шумоподобные и смешанные. Для косметологических целей предпочтительным вариантом использования является импульсное магнитное поле различной частоты и интенсивности, при котором подача энергии фактора чередуется с паузами, то есть осуществляется в определенном ритме. Это приводит к ряду особенностей использования импульсного магнитного поля: возможность более широкого варьирования дозиметрических параметров процедуры, доступность воздействия на более глубоко расположенные органы и ткани по сравнению с ультразвуковыми косметологическими аппаратами. Принцип работы импульсного магнитоиндукционного аппарата следующий: электрический сигнал с платы управления заданной длительности и амплитуды поступает на плоскую металлическую катушку, которая и создает магнитное поле, воздействующее на человека.

Особенностью импульсного косметологического аппарата является то, что максимальное значение выходного сигнала у косметологического аппарата гораздо меньше, чем у медицинского, поэтому косметологический аппарат взаимодействует помимо стандартных областей человеческого тела с более чувствительными (лицо, шея). Импульсное магнитное поле позволяет

снять болевой синдром, мышечные спазмы, влияет на кровеносную систему, расширяет кровеносные сосуды, имеет противовоспалительный эффект и др.

С учетом полезности данного аппарата для повседневного использования человеком разработка недорогой модели является актуальной задачей на сегодняшний день. Такая работа по разработке компактного, простого в эксплуатации и недорого аппарата проводится в настоящее время силами белорусских разработчиков, в том числе с учетом имеющегося у них опыта производства аналогичных медицинских приборов. Реализация данной задачи позволит разработать, внедрить в производство косметологический аппарат, обеспечив имеющиеся запросы и потребности в таком продукте на рынке.

При разработке данного аппарата будет применяться метод компьютерного моделирования. Данный метод позволяет без лишних затрат по времени и финансам (нет необходимости делать физическую копию каждого варианта) создать цифровую модель, проанализировать ее по различным параметрам, необходимых на данный момент и сделать соответствующие выводы: внести определенные изменения или пустить в производство.

После моделирования можно проводить предварительное исследование полученных результатов, связанных с моделированием для выявления критических недочетов и ключевых преимуществ, пока что основанных на субъективных ощущениях.

Преимуществами такого подхода могут стать такие особенности при моделировании как передовой дизайн корпуса устройства, соответствующий современным требованиям, рассчитанный вес аппарата, который покажет, насколько удобным будет эксплуатация аппарата, расчеты на прочность, которые дают понять, будет ли готов аппарат к работе при экстремальных ситуациях.

Прежде всего важным является правильный выбор материала корпуса, внешнего вида, размеров и других параметров, которые позволят уйти от критических ошибок при проектировании.

При этом надо также учитывать, что все обнаруженные после распространения среди населения недостатки можно будет исправить в модернизированной версии.

На сегодняшний день уровень развития технологий позволяет проводить сравнительный анализ предметов, не находящихся в физическом пространстве, а в цифровом с помощью визуального анализа, собственного восприятия и более точных характеристик, полученных в результате компьютерного моделирования.

Процесс сравнения происходит на всех этапах разработки различного оборудования, проектирования и производства. Сравнение позволит показать конструктору или технологу лучшие стороны своего продукта с уже существующими устройствами, аппаратами или другими объектами и даст понять, нет ли нужды привносить какие-либо изменения для улучшения какого-либо параметра.

Переход от цифровой модели к физической проходит в несколько этапов. Сначала с помощью печати на 3d принтере будет получен корпус устройства. Затем на печатном станке будет сформирована печатная плата с нанесенными на нее элементами и выводами. Затем происходит сборка в рабочий прототип, который проходит на предприятии изготовителя предварительную проверку на работоспособность. Также в это время происходит принятие решения по утверждению текущего состояния аппарата или его полного, или частичного переделывания на основании метода сравнения. Сравнительный анализ проводится по нескольким критериям, таким как: максимальная выдаваемая мощность, длина провода питания, обеспечивающий удобство пользования, привлекательность внешнего вида, удобство пользованием рукояткой аппарата и его рабочей частью, безопасность применения аппарата, токсичность материалов, прочностные характеристики, цена, простота использования, ремонтнопригодность, долговечность, утилизация и др.

После утверждения рабочего прототипа проводятся испытания на соответствие различным требованиям в специальных испытательных центрах, в результате чего становится доступна сертификация на разрешение осуществления коммерческой деятельности, связанной с этим устройством.

Финальным этапом, связанным с разработкой аппарата, является масштабирование – создание полноценного производства данного устройства и его распространение на рынке.

С учетом преимуществ магнитоиндукционного косметологического аппарата для повседневного использования человеком разработка недорогой модели является актуальной задачей на сегодняшний день. Реализация данной задачи позволит разработать, внедрить в производство косметологический аппарат, обеспечив имеющиеся запросы и потребности в таком продукте на рынке.

Литература

1. Золотухина, Е. И. Основы импульсной магнитотерапии: справочное пособие / Е. И. Золотухина, В. С. Улащик // Витебская областная типография. – 2008.

УДК 681.327.11, 534.23.

ПРИБОРЫ ДЛЯ РАЗНОМАСШТАБНОЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕНН

Субочев П.В.

*Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород, Российская Федерация*

Аннотация. Методы оптико-акустической (ОА) визуализации основаны на регистрации ультразвуковых волн, возбуждаемых при поглощении лазерных импульсов. Способность ОА прибора осуществлять разномасштабную диагностику определяется частотным диапазоном ультразвуковой антенны. В то время как полоса приема коммерческих пьезопреобразователей ограничена 2–3 октавами, изготавливаемые в нашей лаборатории сверхширокополосные антенны из поливинилиден дифлюорида (ПВДФ) достигают полосы приема в 10 октав, наделяя ОА приборы возможностями по разномасштабной ОА диагностике. Представленная в докладе сверхширокополосная (100 кГц–100 МГц) ультразвуковая антенна позволяет осуществлять ОА микроскопию с протранственным разрешением 30 мкм в объеме 1 см³. Широкополосная 0,3–38 МГц 512-элементная антенна предназначена для так называемой пятимерной ОА томографии (трехмерной мультиспектральной ОА диагностики в режиме реального времени).

Ключевые слова: оптоакустика, фотоакустика, ультразвук, микроскопия, томография.

DEVICES FOR MULTI-SCALE OPTOACOUSTIC VISUALIZATION BASED ON ULTRAWIDE BAND ULTRASONIC ANTENNAS

Pavel Subochev

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Methods of optoacoustic (OA) imaging are based on the registration of ultrasonic waves excited by the absorption of laser pulses. The ability of OA device to carry out multi-scale diagnostics is determined by the frequency range of the ultrasonic antenna. While the receiving bandwidth of commercial piezoelectric transducers is limited to 2–3 octaves, ultra-wideband antennas made of polyvinidylene difluoride (PVDF) manufactured in our laboratory reach a receiving bandwidth of 10 octaves, giving OA devices the capabilities of multi-scale OA diagnostics. The ultra-wideband (100 kHz–100 MHz) ultrasonic antenna presented in the report makes it possible to carry out OA microscopy with a spatial resolution of 30 μm in a volume of 1 cm³. Broadband 0.3–38 MHz 512-element antenna is designed for the so-called five-dimensional OA tomography (volumetric, multispectral OA diagnostics in real time).

Key words: optoacoustics, photoacoustics, ultrasound, microscopy, tomography.

*Адрес для переписки: Субочев П.В., ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород 603140, Российская Федерация.
e-mail: Pavel.Subochev@gmail.com*

Оптоакустическая (ОА) визуализация основана на дистанционной регистрации ультразвуковых сигналов, генерируемых в результате поглощения импульсного лазерного излучения оптическими неоднородностями [1]. Недавние достижения в технологии производства импульсных перестраиваемых лазеров позволили разработать мультиспектральные ОА-томографические системы с видеочастотой [2]. Однако резонансные свойства обычных пьезоэлектрических материалов часто ограничивают возможности регистрации широкополосных ОА-импульсов, и даже при наличии согласующих импедансов полоса пропускания пьезоэлектрических детекторов обычно не превышает центральной частоты [3].

Для расширения полосы ультразвукового детектирования можно использовать чисто оптические технологии [4] или нерезонансные пьезоэлектрические материалы, такие как пленки поливинилиден дифлюорида (ПВДФ) с минимальной частотой, определяемой входным сопротивлением усилительной электроники, и максимальной частота определяемой толщиной пленки [5].

В данной работе мы демонстрируем значительный прогресс в технологии детекторов из ПВДФ, который позволил изготовить одноэлементные и многоэлементные сферические антенны из ПВДФ с рекордной шириной полосы приема 100 кГц – 100 МГц и высокой чувствительностью, характеризующейся низким шумовым эквивалентом давления менее 10 Па.

На рисунке 1 представлен ОА микроскоп (ИПФ РАН, Россия) – прибор, построенный на основе сверхширокополосной сферической ПВДФ антенны с фокусным расстоянием 8 мм и числовой апертурой 0,6. Сигналы с ПВДФ антенны оцифровываются 16-битным АЦП Razor16 (GaGe, США) с частотой 200 МГц.

Антенна имеет отверстие под многомодовое оптическое волокно FG550 (Thorlabs, США) для доставки импульсного лазерного излучения. В качестве источника оптических импульсов используется лазер Wedge HB532 (Bright Solutions, Италия), обладающий энергией импульсов 1 мДж и длительностью импульсов 1,4 нс. Длина волны лазерного излучения выбирается между 532 или

1064 нм при помощи самодельной призмы Глана. В качестве системы растрового зигзагообразного сканирования с шагом 20 мкм в диапазоне 10 мм используется быстрая линейная платформа на основе пьезодвигателя M-640 и медленная линейная платформа на основе шагового двигателя LS-40 (PI, Германия).

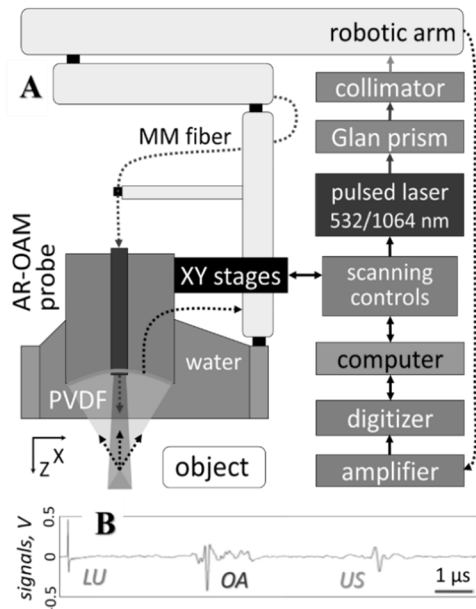


Рисунок 1 – прибор для ОА микроскопии

В качестве объекта сканирования использовалась лабораторная мышь, на левое бедро которой было перевито экспериментальное онкологическое новообразование Colo320 (рак кишечника). Эксперименты по ОА визуализации проводилось на 46 день опухолевого роста по достижению опухолью объема порядка 1 см³. Для сканирования была выбрана длина волны 532 нм, обеспечивающая высокий ОА контраст гемоглобина [1] по сравнению с остальными хромофорами, содержащимися в живых тканях. Мышь наркотизировалась посредством газовой анестезии (98 % кислорода и 2 % изофлуорана) и последовательно укладывалась на правый и левый бок.

На рис. 2 представлены примеры ОА изображений живых тканей в норме и при патологии, полученные при помощи ОА микроскопа. Благодаря широкому диапазону ультразвуковой антенны, на ОА ангиограммах различаются как мельчайшие кровеносные сосуды (капилляры) диаметром порядка 10 мкм, так и более крупные сильно-извитые крупные сосуды диаметром более 1 мм, характерные для развивающихся онкологических

заболеваний и сопровождающие процессы неангиогенеза.

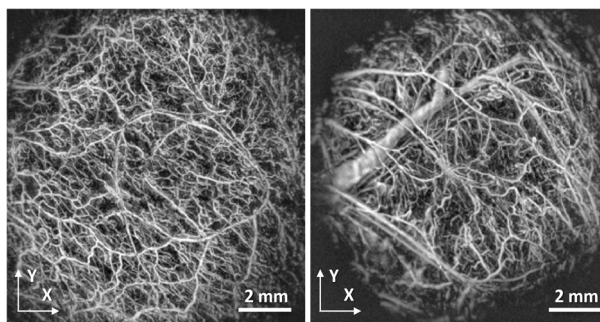


Рисунок 2 – ОА микроскопия биотканей в норме (слева) и при патологии (справа)

В докладе также будет представлена конструкция ОА томографа – прибора на основе 512-элементной сверхширокополосной (0,3–38 МГц) ПВДФ антенны. В рамках коллаборации группы П.Субочева (ИПФ РАН) с группой Проф.Д.Рязанского (ETH Zurich), данный прибор используется для так называемой пятимерной ОА нейроангиографии (трехмерной мультиспектральной ОА визуализации мозга в режиме реального времени).

Наиболее очевидной перспективой практического применения разрабатываемых ОА приборов представляются биомедицина. Тем не менее, разрабатываемые ОА технологии могут быть использованы в качестве преимущественных средств неразрушающей диагностики любых оптически мутных сред.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 19-75-10055).

Литература

1. Wang, L. V. A practical guide to photoacoustic tomography in the life sciences / L. V. Wang, J. Yao // *Nature methods*. – 2016. – Vol. 13, № 8. – С. 627–638.
2. Deán-Ben, X. L. Optoacoustic micro-tomography at 100 volumes per second / X. L. Deán-Ben, H. López-Schier, D. Razansky // *Scientific reports*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – С. 1–8.
3. Omar, M. Optoacoustic mesoscopy for biomedicine / M. Omar, J. Aguirre, V. Ntziachristos // *Nature biomedical engineering*. – 2019. – Vol. 3, № 5. – С. 354–370.
4. Ultrasensitive plano-concave optical microresonators for ultrasound sensing / J. A. Guggenheim [et al.] // *Nature Photonics*. – 2017. – Vol. 11, № 11. – С. 714–719.
5. Optoacoustic imaging of absorbing objects in a turbid medium: ultimate sensitivity and application to breast cancer diagnostics / T. D. Khokhlova [et al.] // *Applied optics*. – 2007. – Vol. 46, № 2. – С. 262–272.

СЕКЦИЯ 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

OPTICAL PROPERTIES OF SPINEL BASED GLASS-CERAMICS
OF THE ZnO-Al₂O₃-Ga₂O₃-SiO₂ SYSTEM DOPED WITH Co²⁺ IONS
Malyarevich A.¹, Yumashev K.¹, Dymshits O.², Alekseeva I.², Zhilin A.²

¹Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²S.I. Vavilov State Optical Institute
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Transparent glass-ceramics containing Co²⁺:Zn(Al,Ga)₂O₄ spinel nanocrystals with sizes of 6–11 nm were studied. Absorption band of the Co²⁺ ions in the material is shifted to longer wavelengths as compared with glass-ceramics with no Ga₂O₃ addition. Absorption saturation at 1.54 μm was observed and its characteristics (absorption recovery time, ground-state and excited-state absorption cross-sections) were measured. The developed glass-ceramics are promising as saturable absorbers for 1.6 μm erbium lasers.

Key words: transparent glass-ceramics; spinel nanocrystals; absorption saturation; cobalt ions; gallium oxide.

Адрес для переписки: Malyarevich A.M., Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, 65/17 Nezavisimosty Ave., Minsk 220013, Belarus
e-mail: malyar@bntu.by

Introduction. Materials doped with cobalt Co²⁺ ions placed in tetrahedral sites are well known as saturable absorbers for lasers emitting in 1.3–1.6 μm spectral region (see e.g. [1]). For this purpose saturation of absorption in the band related to the ⁴A₂(⁴F)→⁴T₁(⁴F) transition of tetrahedrally coordinated Co²⁺ ions is used. Among such materials Co²⁺:MgAl₂O₄ spinel single crystal is the most widely applied for passive Q-switching of erbium glass lasers emitting at 1.54 μm.

Spectral region of 1.5–1.7 μm attracts attention for range-finding, environmental sensing, telecom applications, etc. due to low propagation losses of light in the atmosphere and silica fiber. Several crystalline materials doped with Er³⁺ ions were recently developed as laser ones with emission wavelengths in the 1.6–1.7 μm spectral region (see e.g. [2]). For such lasers passive Q-switching with Co²⁺:MgAl₂O₄ spinel single crystal is not very efficient. This is due to low absorption in the range of the ⁴A₂(⁴F)→⁴T₁(⁴F) transition of Co²⁺ ions and consequently, low saturable absorption contrast at the lasing wavelength. Therefore, new materials containing Co²⁺ ions with high absorption in the range of 1.6–1.7 μm are needed.

Spectral properties of transition metal ions are sensitive to their surrounding, and this is used to adjust position of the absorption bands by designing the proper environment of the transition metal ion. Therefore, if the addition of gallium oxide (in our case) to the composition of the initial zinc aluminosilicate glass results in crystallization of the gallium-containing gahnite spinel, such material will provide a desired spectral shift of the Co²⁺ absorption band to longer wavelengths.

Samples Preparation. Initial glass of the composition 25 ZnO, 23 Al₂O₃, 2 Ga₂O₃, 50 SiO₂, (mol%) nucleated by 7 mol% TiO₂ and doped with 0.1 wt%

CoO, both added above 100 % of the base composition, was prepared from the reagent grade raw materials. The glass was melted in a laboratory furnace with Globar heating elements at temperature T of 1580 °C for 6 h. Then the initial transparent violet-colored glass was cut into pieces and heat-treated in the muffle furnace by two-stage heat-treatments with the first hold at 720 °C and the second hold in the temperature range of 750–1000 °C. The structure of the initial glass and glass-ceramics was studied with X-ray diffraction (XRD) analysis (Fig. 1).

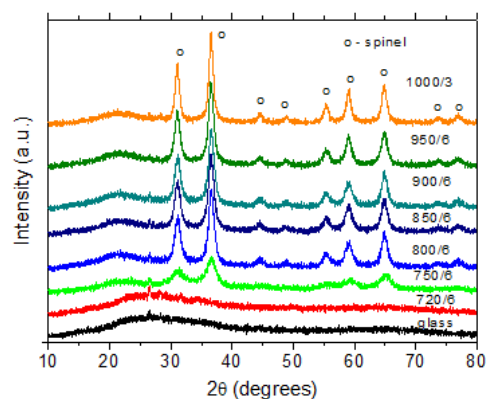


Figure 1 – XRD patterns of the initial glass and transparent glass-ceramics. Labels 750/6 – 1000/3 indicate the heat-treatment temperature, °C, and holding time, h, at the second stage, respectively. The nucleation stage is at 720 °C for 6 h. The patterns are shifted for the convenience of observation. Circles stand for the Zn(Al,Ga)₂O₄ spinel nanocrystals

The mean crystal sizes were estimated from the broadening of the X-ray peaks according to Scherrer's equation (1):

$$D = K\lambda/\Delta\cos\theta, \quad (1)$$

where λ is the wavelength of the X-ray radiation (1.5406 Å), θ is the diffraction angle, Δ is the width of the XRD peak at half of its maximum, and K is the constant assumed to be 1 [30]. The size of spinel crystals was determined using the diffraction peak with the Miller indices (hkl) (440) at $2\theta \approx 65.5^\circ$. The error in the mean crystal size estimation is about 5%.

Transparent glass-ceramics contained crystals of $Zn(Al_xGa_{1-x})_2O_4$ solid solutions with spinel structure with sizes of 6–11 nm and the lattice parameter a ranging from 8.107 to 8.130 Å. The zinc aluminogallate nanocrystals were homogeneously distributed within the highly silicate residual glass.

Luminescence. Luminescence spectra were registered after excitation made by filtered Xe-lamp irradiation at $\lambda = 512$ nm. The relative error in determining the luminescence intensity was about 10 percent. Typical luminescence spectra are presented in Fig. 2.

The luminescence decay kinetics of samples was studied using an experimental setup based on a frequency doubled $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ laser with active Q-switching. The integrated luminescence signal in the range of 0.6–0.75 μm was recorded by photodetectors, the relative error was about 10 percent. Luminescence decay kinetics are presented in Fig. 3.

Absorption Saturation. Typical experimental data on initial absorption recovery after power light excitation demonstrates monoexponential nature with relaxation time $\tau = 790 \pm 10$ ns for the glass-ceramic prepared by heat-treatment at 1000 °C.

The experimental data on dependence of transmission of the glass-ceramics at $\lambda = 1.54 \mu m$ on the input energy fluence was modelled with a slow saturable absorber model. This is due to the characteristic recovery time for Co^{2+} ions is few hundreds of ns (see e.g. [3]) that is much longer than the duration of the excitation pulse (70 ns in our case).

The best fitting curve results for ground-state absorption cross-section, σ_{GSA} are $(2.5-2.6) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ for glass-ceramics prepared by the heat-treatment at 850 and 900 °C. The absorption saturation contrast, $\sigma_{GSA}/\sigma_{ESA}$ increases from 3 (for $T = 800$ °C) to 12.5 (for $T = 1000$ °C).

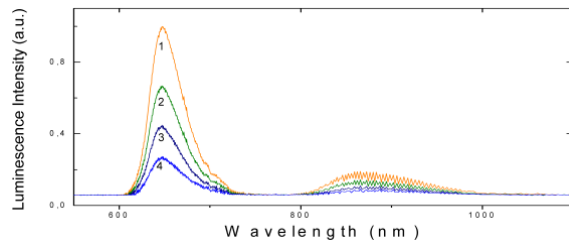


Figure 2 – Luminescence spectra of glass-ceramics prepared by heat-treatments at the second stage at: 1000 °C (1), 950 °C (2), 900 °C (3), 850 °C (4). The first stage is at 720 °C. The holding time at each stage except for 1000 °C is 6 h. The holding time at 1000 °C is 3 h. Excitation wavelength is $\lambda = 532$ nm

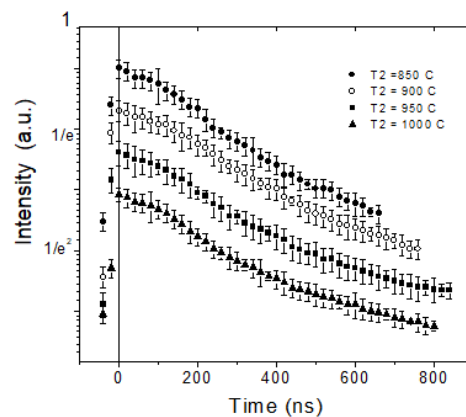


Figure 3 – Decay of the integral luminescence signal for the glass-ceramics. The first stage is at 720 °C. The holding time at each stage except for 1000 °C is 6 h. The holding time at 1000 °C is 3 h

References

1. Camargo, M. B. $Co^{2+}:YSGG$ saturable absorber Q switch for infrared erbium lasers / M. B. Camargo, R. D. Stultz, M. Birbaum // *Opt. Lett.* – 1995. – Vol. 20. – P. 339–341.
2. In-band pumped room-temperature $Er:KY(WO_4)_2$ laser emitting near 1.6 μm / K. N. Gorbachenya [et al.] // *Laser Phys.* – 2013. – Vol. 23. – P. 125005–125009.
3. Linear and nonlinear optical properties of cobalt-doped zinc aluminum glass ceramics / I. A. Denisov [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 93. – P. 3827–3831.

УДК 621.3.038.825.2

CRYSTAL GROWTH AND SPECTROSCOPIC CHARACTERIZATION OF Yb:YMgB₅O₁₀

Gorbachenya K.¹, Yasukevich A.¹, Lazarchuk A.¹, Kisel V.¹, Shishko T.¹, Volkova E.², Maltsev V.², Koporulina E.^{2,3}, Yapaskurt V.⁴, Kuzmin N.^{2,5,6}, Ksenofontov D.², Mitina D.², Jiliaeva A.², Kuleshov N.¹

¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²Department of Crystallography and Crystal Chemistry

³Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the RAS

⁴Laboratory of Local Methods for the Study of Matter, Faculty of Geology, Moscow State University
Moscow, Russian Federation

⁵Institute of Spectroscopy of Russian Academy of Science
Troitsk, Russian Federation

⁶Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
Dolgoprudny, Russian Federation

Abstract. A transparent Yb:YMgB₅O₁₀ single crystal with dimensions up to 25×23×25 mm was grown. Absorption cross-section spectra were produced. The luminescence spectra of the Yb:YMgB₅O₁₀ crystal were measured in the spectral range of 950–1100 nm. The luminescence kinetics of the ²F_{5/2} energy level were investigated and the lifetime was determined.

Key words: ytterbium; pentaborate crystal; growth; spectroscopic properties.

РОСТ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ Yb:YMgB₅O₁₀

Горбаченя К.Н.¹, Ясюкевич А.С.¹, Лазарчук А.И.¹, Кисель В.Э.¹, Шишко Т.А.¹, Волкова Е.А.², Мальцев В.В.², Копорулина Е.В.^{2,3}, Япаскерт В.О.⁴, Кузьмин Н.Н.^{2,5,6}, Ксенофонов Д.А.², Митина Д.Д.², Жилиева А.И.², Кулешов Н.В.¹

¹НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Кафедра кристаллографии и кристаллохимии, геологический факультет МГУ

³Научно-исследовательский институт комплексного освоения полезных ископаемых имени Мельникова
Российской академии наук

⁴Лаборатория локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ
Москва, Российская Федерация

⁵Институт спектроскопии РАН
Троицк, Российская Федерация

⁶Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Российская Федерация

Аннотация. Сообщается об успешном росте кристалла Yb:YMgB₅O₁₀ размерами до 25×23×25 мм с высоким оптическим качеством. Исследованы спектры сечений поглощения. Проведено измерение спектров люминесценции в спектральной области 950–1100 нм. Измерены кинетики люминесценции и определено время жизни уровня ²F_{5/2} ионов иттербия.

Ключевые слова: иттербий, кристалл пентабората, рост, спектроскопические свойства.

Адрес для переписки: Горбаченя К.Н., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Many Yb³⁺-doped crystals have previously been demonstrated. YMgB₅O₁₀ (YMBO) borate crystals are considered as potential materials for the manufacture of laser matrices because they possess high thermal conductivity (6.2 ± 0.3 W/m·K) [1]. Here the growth details and characterization of a Yb:YMBO single crystal, as well as the results of its spectroscopic investigation, are reported.

A Yb:YMBO bulk crystal was grown using a high-temperature solution growth on dipped seeds technique [2]. A complex system, with composition 20 wt.% Yb:YMBO – 80 wt.% K₂Mo₃O₁₀, was used

in the growing experiment. Yb₂O₃ (99.96 %), Y₂O₃ (99.96 %), MgO, B₂O₃ (were used as crystal-forming agents, which were weighed according to a composition of Yb_{0.08}Y_{0.92}MgB₅O₁₀. The solvent K₂Mo₃O₁₀ was a mixture of K₂MoO₄ and MoO₃ which was weighed according to the following equation:



Growth of the Yb:YMBO bulk crystal was performed in a vertical resistively heated furnace, equipped with precision temperature controller and a set of S-thermocouples. The temperature in the

working zone of the furnace was maintained with a stability of ± 0.1 °C. As a result a transparent, colorless Yb-doped $\text{YMgB}_5\text{O}_{10}$ crystal with typical dimensions of about $25 \times 23 \times 25$ mm and $m = 10.337$ g was grown (Fig. 1).

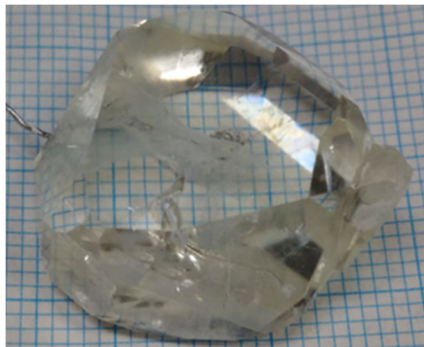


Figure 1 – The Yb:YMBO single crystal

The obtained absorption cross-section spectra of the Yb:YMBO crystal are shown in Fig. 2. There are two intensive absorption lines centered at 937 nm and 975 nm. These wavelengths correspond to the emission spectra of commercially available InGaAs laser diodes. The maximal absorption cross-section was $2.15 \cdot 10^{-20}$ cm² at 975 nm for the $E//N_g$ axis.

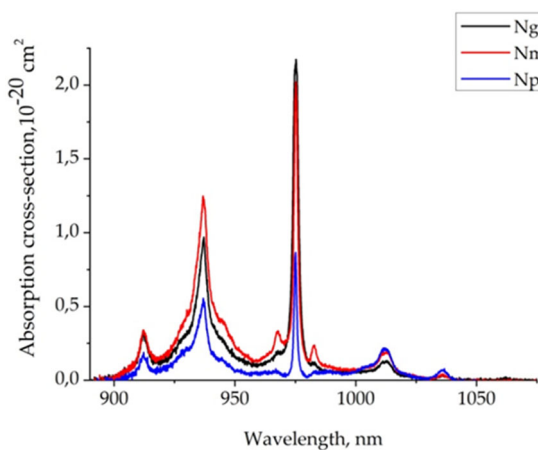


Figure 2 – The absorption cross-section spectra of Yb^{3+} :YMBO crystal

The dependence of the obtained lifetimes of the $^2F_{5/2}$ energy level on different weight content of Yb:YMBO crystalline powders in glycerin suspension is presented in Fig. 3. The inset in Fig. 3 shows that the kinetics of luminescence decay from the $^2F_{5/2}$ energy level of Yb^{3+} ions were single exponential. As a result, the lifetime of the $^2F_{5/2}$ energy level was observed to be about 580 ± 10 μs . Considering the radiative lifetime of the $^2F_{5/2}$ Yb^{3+} , the luminescence quantum yield was estimated to be about 0.87. The difference in the obtained value from 1, that is the usual case for Yb^{3+} -doped materials, can be explained by the large phonon energy in

the borate crystals which promoted an effective non-radiative depletion of the upper Yb^{3+} ion energy level.

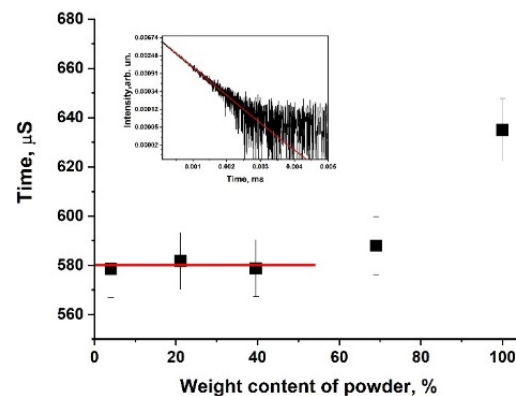


Figure 3 – The $^2F_{5/2}$ energy level lifetimes of Yb: YMBO crystal

There were structured bands in the spectral range 950–1100 nm in the luminescence spectra of the Yb:YMBO crystal (Fig. 4). Two peaks, with maximal intensity at 1010 nm and 1040 nm for $E//N_m$, were observed in the luminescence spectrum of the Yb:YMBO crystal.

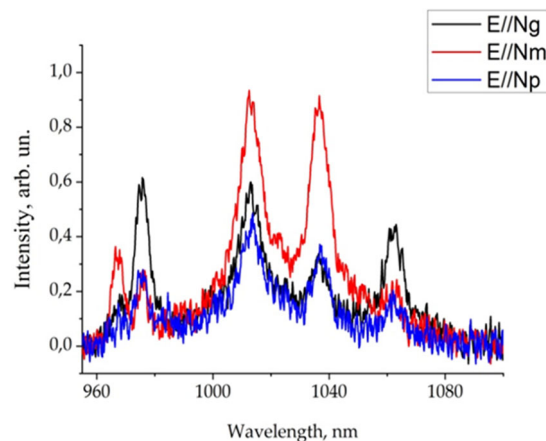


Figure 4 – The luminescence spectra

A transparent Yb:YMgB₅O₁₀ single crystal was grown using a high-temperature solution growth on dipped seeds technique with a K₂Mo₃O₁₀ solvent. An investigation of the spectroscopic properties of the Yb:YMgB₅O₁₀ crystal was performed. Use of the crystal obtained for mode-locking and regenerative amplification will be addressed in future research.

Литература

1. Growth and characterization of $\text{RMgB}_5\text{O}_{10}$ (R=Y, La, Gd) crystals / D. D. Mitina [et al.] // Inorg. Mater. – 2020. – Vol. 56. – P. 211–222.
2. Growth and spectroscopy of Yb:YMgB₅O₁₀ crystal / K. N. Gorbachenya [et al.] // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 986–997.

UDC 535.327, 535.012

THERMAL EXPANSION OF $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ CRYSTALS

Yumashev K.¹, Trusova E.², Guretskii S.³, Karpinsky D.³, Trukhanova K.³, Kuleshov N.¹, Malyarevich A.¹

¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University

²Belarusian State Technological University

³SSPA "Scientific Practical Materials Research Center of NAS of Belarus"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Average and differential linear thermal expansion coefficients of $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ crystals are determined in the directions of the optical indicatrix axes N_p , N_m and N_g using dilatometric technique. Dependence of the average and differential linear thermal expansion coefficients on the temperature in the range of 75–290 °C and ytterbium contains x from 0 to 1.0 are discussed.

Key words: monoclinic crystals, linear thermal expansion coefficients, $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ crystals.

Correspondence address: Yumashev K.V., Nezavisimosti ave., 65/17, Minsk 220113, Republic of Belarus

e-mail: kyumashev@bntu.by

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ КРИСТАЛЛА $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$

Юмашев К.В.¹, Трусова Е.Е.², Гурецкий С.А.³, Карпинский Д.В.³, Труханова Е.Л.³, Кулешов Н.В.¹, Маляревич А.М.¹

¹НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ

²Белорусский государственный технологический университет

³ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Определены средние и дифференциальные термические коэффициенты линейного расширения кристаллов $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ в направлениях осей оптической индикатрисы N_p , N_m и N_g с помощью dilatометрического метода. Обсуждаются зависимости данных коэффициентов от температуры в диапазоне 75–290 °C и содержания иттербия x от 0 до 1,0.

Ключевые слова: моноклинные кристаллы, термические коэффициенты линейного расширения, кристаллы $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$.

Адрес для переписки: Юмашев К.В., пр. Независимости, 65/17, Минск 220113, Беларусь

e-mail: kyumashev@bntu.by

Potassium-yttrium tungstate crystals doped with ytterbium ions [$\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$] belong to the most promising laser materials for generating ultrashort laser pulses of a high average power. The advantages of such media are high absorption and stimulated emission cross sections combined with relatively wide gain bands and intermediate thermal conductivity. Moreover, the Stokes shift between the pump and lasing wavelengths (laser quantum defect) for these Yb-doped crystals is very small, ~ 5 %, which determines the low heat dissipation in an laser active medium. These properties of $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ crystals make it possible to obtain high generation efficiencies in different lasing modes (cw, Q-switching, mode locking, regenerative amplification, planar waveguide lasers). The ionic radii of Y^{3+} and Yb^{3+} are similar (1.019 Å and 0.985 Å, respectively), and the $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystal gives the possibility of continuous Yb-doping reaching the $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ one.

A knowledge of the thermal expansion properties of laser crystals is of great engineering importance, particularly, to estimate thermo-optic coefficient (refractive index change due to temperature change) which is one of the most important parameters governing thermooptical distortions of the laser medium. However, the

thermal expansion properties of the $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ at different Yb-doping level has not been studied in detail to date. In this report, we present the measurements of linear thermal expansion coefficients (LTEC) of $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$) crystals with ytterbium concentration from 0 to 100 at.% ($x = 0-1.0$).

The growth of $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ crystals was carried out by the modified Czochralski method using the dynamic growth regime and the selection of the required temperature gradient at the crystallization front. The $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ are monoclinic crystals with space group $C2/c$, and thus they are optically biaxial ones. Low symmetry of the $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$ lattice results in significant anisotropy of its optical properties. Optical properties of the $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ crystals are described within the frame of the optical indicatrix with orthogonal principal axes N_p , N_m , and N_g . Axis corresponding to the minimum principal refractive index (N_p), coincides with the crystallographic axis b , while two others (N_m and N_g) are positioned in the $a-c$ plane [1, 2].

To characterize the anisotropy of the LTECs in $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ crystals, one sample from each crystal composition (ytterbium content, x) was prepared in a shape of a rectangular parallelepiped along the N_p , N_m , and N_g directions, respectively.

The LTECs α_p , α_m , and α_g (along the axes N_p , N_m , and N_g , respectively) were measured by means of Horizontal pushrod dilatometer Netzsch DIL 402 PC. The measurements were performed over the temperature range 25 °C to 290 °C This temperature range is of interest when the crystals under study are used as active laser media. The error in determining of the LTECs was $\sim 0.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. The values of the LTECs along the principal optical axis are more important in practice because normally the laser elements are cut along one of these axes.

The average LTEC is governed by the slope of the chord between two points on the curve describing dependence of the length on temperature. According to this, the average LTECs along a given direction were calculated for different temperature ranges ($T-T_0$) using: $\bar{\alpha} = \frac{1}{L_0} \frac{(L_T - L_0)}{(T - T_0)}$, where L_0 and L_T are the sample

lengths at initial (room) $T_0 = 25 \text{ °C}$ and terminal T temperatures of the range, respectively. The typical dependence of average LTECs $\bar{\alpha}$ on the terminal temperature T along the principal optical axis N_p , N_m , and N_g is shown in Fig. 1(a) for yttrium content $x = 0.05$. The anisotropy of the average LTEC is characterized by $\bar{\alpha}_g > \bar{\alpha}_m > \bar{\alpha}_p$, which is consistent with the [3] data for KYW and KYbW. The $\bar{\alpha}$ values increase with increasing temperature range which is usually observed for oxide crystals (in particular, [4, 5]). The values of average LTECs $\bar{\alpha}$ for each direction as a function of yttrium content x at temperature 200 °C are presented in Fig. 1 (b). It is seen that an increase in the yttrium content x leads to a decrease in the $\bar{\alpha}_g$ value. This decreasing can be approximated by a linear dependence $\bar{\alpha}_g = (16.4 - 1.17x) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, the linear approximation gives a fairly high rate of the coefficient of determination $R^2 = 0.86$. The difference between the $\bar{\alpha}_g$ values for $x = 0$ (KYW) and $x = 1.0$ (KYbW) is $\sim 1.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, which is four times greater than the LTEC determining accuracy ($\sim 0.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). For the average LTEC along the N_p direction, doping of the KYW crystal with Yb ions (increasing of x) does not results in change in the value of $\bar{\alpha}_p$ (within the experimental error). The linear fitting of this dependence gives the coefficient of determination close to zero ($R^2 = 0.0077$). Increasing the yttrium content x leads to an increase in the value of $\bar{\alpha}_m$, which can be described by a linear relationship dependence $\bar{\alpha}_m = (12.0 - 0.75x) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ with the coefficient of determination $R^2 = 0.63$. The relatively low coefficient R^2 can be explained by a weak dependence of $\bar{\alpha}_m$ on x . The difference between the $\bar{\alpha}_m$ values for $x = 0$ and $x = 1.0$ is $\sim 0.75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, which is only 2.5 times greater than the LTEC measurement error ($\sim 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

There are previous data on LTECs for KYW ($x = 0$) and KYbW ($x = 1.0$) measured along the N_p , N_m and N_g axes which were obtained using dilatometric technique [6] as well the X-ray powder diffraction

analysis [3,7] (the unit cell parameters as a function of temperature were measured for crystallographic directions a , $b = N_p$, c , and $c^* [c^* \cdot L_a]$, the values along the N_g and N_m directions were calculated). The $\bar{\alpha}_g$, $\bar{\alpha}_m$, $\bar{\alpha}_p$ values were reported in the range of (15.9–15.99), (10.3– 10.31), (1.9–2.0) for KYW and (13.7–14.47), (10.83–11.4), (2.0–2.6) for KYbW [10^{-6} K^{-1}], respectively [3, 6, 7]. The average LTEC values obtained in present paper are falling fairly well within the published range. It should be noted that the LTEC values in [3–7] were evaluated from the slopes of the measured expansion curves, and the dependence of $\bar{\alpha}$ on temperature was not analyzed.

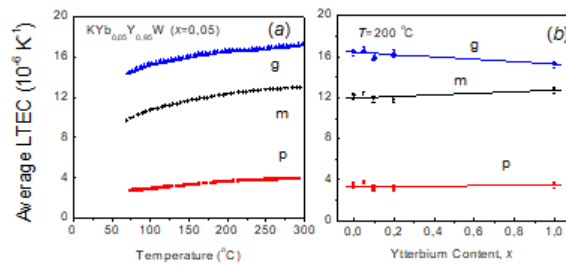


Figure 1 – Average LTEC $\bar{\alpha}$ along the principal optical axis N_p , N_m , and N_g as a function of terminal temperature T (a) and versus yttrium content x (b) for $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ crystals. Symbols – experimental data, lines in (b) – the linear approximations

In Fig. 2 (a) is shown typical differential LTECs α for $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ crystals versus temperatures along the N_p , N_m , and N_g axis for yttrium content $x = 0.05$.

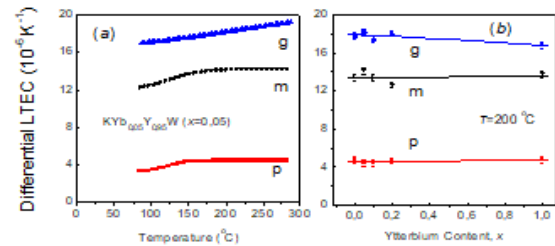


Figure 2 – Differential LTEC $\bar{\alpha}$ along the principal optical axis N_p , N_m , N_g as a function of temperature T (a) and versus yttrium content x (b) for $\text{KYb}_x\text{Y}_{1-x}\text{W}$ crystals. Symbols – experimental data, lines in (b) – the linear approximations

The differential LTEC coefficient is related to the slope of the tangent of the length L versus temperature T plot. The α value for different temperatures thus was obtained using the first derivative of the length with respect to the temperature as $\alpha = \frac{1}{L_T} \left(\frac{dL}{dT} \right)_T$, where L_T and $(dL/dT)_T$ are the sample length and its temperature derivative at a given temperature T , respectively. Because $\bar{\alpha}$ is not constant over the temperature range then $\bar{\alpha} \neq \alpha$. For the same temperature T , the α values are slightly larger than the corresponding $\bar{\alpha}$ ones. The anisotropy of the differential LTEC, like the average ones,

is characterized by the ratio $\alpha_g > \alpha_m > \alpha_p$. With increasing temperature, the value of α increases, but at temperatures exceeding ~ 180 °C it remains practically unchanged. The α values for each direction as a function of ytterbium content x at temperature 200 °C are shown in Fig. 2 (b). An increase in the ytterbium content x leads to an decrease in the α_g value which can be approximated by a linear dependence $\alpha_g = (18.0 - 1.12x) 10^{-6} K^{-1}$, the linear approximation gives a fairly high rate of the coefficient of determination $R^2 = 0.70$. The difference between the α_g values for $x = 0$ (KYW) and $x = 1.0$ (KYbW) is $\sim 1.1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, which is about four times large as the uncertainty in the α determination ($\sim 0.3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Along the N_m and N_p directions, doping with the Yb ions (increasing of x) does not results in change in the values of α_m and α_p (within the experimental error). The linear fitting of this dependences gives low values of R^2 (0.032 and 0.24, respectively). Moreover, the difference between the LTECs values for $x = 0$ and $x = 1.0$ ($\sim 0.2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) is less than the LTEC measurement error ($\sim 0.3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$).

UDC 535.327, 535.012

THERMO-OPTIC COEFFICIENTS OF MONOCLINIC Er³⁺:(GdY)₂SiO₅ CRYSTAL

Yumashev K.¹, Malyarevich A.¹, Hertsova A.¹, Goman V.², Pavlovski L.²

¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University

²Institute of Improvement of Professional Skills and Staff Retraining on New Directions of Engineering Technology and Economy of Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Thermo-optic coefficients of the Er³⁺-doped gadolinium-yttrium oxyorthosilicate crystal Er³⁺:GdYSO are determined at a wavelength of 632.8 nm for light polarizations $E // N_p, N_m$ and N_g . Linear thermal expansion coefficients are estimated for this crystal in the directions of the optical indicatrix axes N_m and N_g .

Key words: monoclinic crystal, thermo-optic coefficient, (GdY)₂SiO₅ crystal, thermal coefficients of the optical path.

ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МОНОКЛИННОГО КРИСТАЛЛА Er³⁺:(GdY)₂SiO₅

Юмашев К.В.¹, Мальяревич А.М.¹, Герцова А.В.¹, Гоман В.И.², Павловский Л.К.²

¹НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ

²Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики Белорусского национального технического университета
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Определены термооптические коэффициенты кристалла оксиортоосиликата гадолиния-иттрия, легированного ионами Er³⁺ (Er³⁺:GdYSO, на длине волны 632,8 нм для поляризаций света $E // N_p, N_m$ и N_g . Произведена оценка термических коэффициентов линейного расширения данного кристалла в направлениях осей оптической индикатрисы N_m и N_g .

Ключевые слова: моноклинный кристалл, термооптический коэффициент, кристалл (GdY)₂SiO₅, термический коэффициент оптического пути.

Адрес для переписки: Юмашев К.В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kuyumashev@bntu.by

Yttrium and gadolinium oxyorthosilicates [Y₂SiO₅ (YSO) and Gd₂SiO₅ (GSO)] are used as laser crystal hosts for doping with trivalent lasing rare-earth ions such as Dy³⁺, Nd³⁺, Yb³⁺, Er³⁺, Tm³⁺. Mixed (Gd_{1-x}Y_x)₂SiO₅ (GYSO) crystals have been introduced to eliminate cleavage of the GSO and to combine the benefits of the ground state splitting of

the GSO with good mechanical properties of YSO (Nd³⁺:GYSO, Yb³⁺:GYSO). A continuous tenability from 1004 to 1110 nm has been realized for a continuous-wave Yb³⁺:GYSO laser. A passively mode-locked Nd³⁺:GYSO laser has been demonstrated using a SESAM with the pulse width of as short as 5 ps. Using Yb:GYSO crystals, mode-locked laser pulses

References

1. Crystal growth, optical and spectroscopic characterization of monoclinic KY(WO₄)₂ co-doped with Er³⁺ and Yb³⁺ / X. Mateos [et al.] // Optical Materials. – 2006. – Vol. 28. – P. 423–431.
2. Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal KYb(WO₄)₂ / M. C. Pujol [et al.] // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65. – P. 165121.
3. Linear thermal expansion tensor in KRE(WO₄)₂ (RE=Gd,Y, Er, Yb) monoclinic crystals / M. C. Pujol [et al.] // Mater. Sci. Forum. – 2001. – P. 710–715.
4. Thermal Properties of Rare-Earth Monosilicates for EBC on Si-Based Ceramic Composites / N. Al. Nasiri [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. – 2016. – Vol. 99 (2). – P. 589–596.
5. Utsu, T. Growth and applications of Gd₂SiO₅: Ce scintillators / T. Utsu and S. Akiyama // Journal of Crystal Growth. – 1991. – Vol. 109. – P. 385–391.
6. Thermo-optical properties of pure and Yb-doped monoclinic KY(WO₄)₂ crystals / P. A. Loiko [et al.] // Appl Phys B. – 2012. – Vol. 106. – P. 663–668.
7. Thermal properties of monoclinic KLu(WO₄)₂ as a promising solid state laser host / Ö. Silvestre [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16 (7). – P. 5022–5034.

as short as 55 fs have been demonstrated by Kerr-Lens mode-locking and 210 fs pulses using a SESAM. However, anisotropy of thermo-optic coefficients of the GYSO gadolinium-yttrium oxyorthosilicates (optically biaxial) crystals has not been studied in detail to date. These parameters are important for application of these crystals as laser crystal hosts. In the present work, we report on the measurements of the thermal coefficients of the optical path (TCOP) and characterizations of anisotropy of thermo-optic coefficients (TOCs, dn/dT) of the gadolinium-yttrium oxyorthosilicate crystal doped with Er^{3+} ions.

A 0.1 at.% Er-doped gadolinium-yttrium oxyorthosilicate crystal (Er:GYSO) was grown by the Czochralski method. Raw materials such as Er_2O_3 , Gd_2O_3 , Y_2O_3 , and SiO_2 were weighed according to the formula $(Er_{0.001}Gd_{0.8995}Y_{0.0995})_2SiO_5$. Thus, in the crystal under study, approximately 10 % of Gd^{3+} ions are replaced by Y^{3+} ions. The growth direction was [100]. The crystal structure was analyzed by X-ray diffraction (XRD). The results reveal the as-grown Er:GYSO crystal has a primitive monoclinic structure with a space group of $P2_1/c$. This agrees with the fact that the space group $P2_1/c$ in the GSO matrix retains at 20 % substitution of Gd^{3+} ions by Y^{3+} ions [1].

Optical properties of the biaxial crystals are described within the frame of the optical indicatrix with orthogonal principal axes N_p , N_m , and N_g . Like the three principal refractive indices, the Er:GYSO crystal should be characterized by the three principal TOCs, namely, dn_p/dT , dn_m/dT and dn_g/dT . For crystals belonging to the space group $P2_1/c$, the principal axis N_p coincides with the crystallographic axis b ($=N_p$), the other two principal axes N_m and N_g lie in the perpendicular plane [2].

To characterize the anisotropy of the TOCs, a sample from the grown Er:GYSO crystal is prepared in a shape of a rectangular parallelepiped with dimensions of $7.0 (N_p) \times 8.0 (N_m) \times 8.5 (N_g) \text{ mm}^3$. Each face of the sample was perpendicular to one of the optical indicatrix axes N_p , N_m and N_g . The orientation of the sample was accomplished firstly identifying the b axis of the crystal by X-raying the crystal sample in a backscattered Laue geometry, with a precision of 0.2° . Preparation of the sample with faces normal to the b direction then allowed the remaining two principal axes to be found by identifying extinction directions (with a precision of 0.4°) when the sample was viewed in the b direction between crossed polarizers [3].

For determination of the TOCs, the laser beam deflection technique for a material with a linear temperature gradient is used [4]. The measurements are performed at the wavelength of 632.8 nm by means of a continuous-wave He-Ne laser. The uncertainty in the TCOP determination is $\sim(0.3-0.4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. When determining the dn/dT (or α) coefficient, an additional error arises which is associated with the error in determining the α (or dn/dT) value, and the accuracy of the dn/dT (or α) measurements increases to $\sim(0.6-0.9) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

The TCOP for the Er:GYSO crystal measured at different light polarization E and propagation direction k are presented in Fig. 1. All TCOP are positive. The values of the TCOP (W) show polarization anisotropy in their absolute values which is most evident for the N_m -cut and N_g -cut crystals.

To extract the dn/dT values from the TCOP, the formula $dn_i/dT = W_{ij} - (n_i - 1)\alpha_j$ should be used where $i = p, m, g$ is a light polarization index, $j = p, m, g$ is an index of the light propagation direction k ($i \neq j$). Therefore, literature data are needed on the refractive indices n_p , n_m and n_g and the linear thermal expansion coefficients α_p , α_m and α_g . At present, the values of n and α of Er:GYSO studied in this work are still unknown. We therefore used the refractive indices and the linear thermal expansion coefficient reported for GSO, namely $n_p = 1.871$, $n_m = 1.884$, $n_g = 1.910$ at the wavelength of 632.8 nm [34], $\alpha_p = 12.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ at the temperature of 100°C [5]. It can be assumed that the n - and α -values do not change significantly when 10% of Gd^{3+} ions in GSO are replaced by Y^{3+} ions, without changing the crystal structure. It may be also suggested that the refractive indices of the GYSO do not change significantly with Er doping because it is very small (only 0.001 part of the Gd and Y ions is replaced by the Er ones).

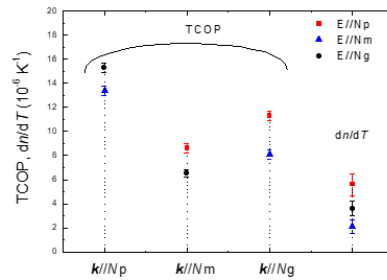


Figure 1 – Thermal coefficients of optical path (TCOP) and thermo optic coefficients (dn/dT) of Er:GYSO crystal for light polarizations $E//N_p$, N_m and N_g

Using the measured W_{mp} and W_{gp} the values of dn_m/dT and dn_g/dT are determined to be $(2.1 \pm 0.6)10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and $(3.6 \pm 0.6)10^{-6} \text{ K}^{-1}$, respectively. These values of dn_m/dT and dn_g/dT in combination with the measured W_{mg} and W_{gm} enable to find $\alpha_g = (6.8 \pm 0.8)10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and $\alpha_m = (3.2 \pm 0.8)10^{-6} \text{ K}^{-1}$. The obtained α_g - and α_m -values with the values of W_{pg} and W_{pm} make it possible to evaluate $dn_p/dT = (5.6 \pm 0.9)10^{-6} \text{ K}^{-1}$ as an average over the values of $(5.4 \pm 0.9)10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($k//N_g$) and $(5.8 \pm 0.9)10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($k//N_m$) for two directions of the light propagation k . The results on the obtained dn_p/dT , dn_m/dT , dn_g/dT , α_m and α_g are shown in Fig. 1.

According to phenomenological model developed for frequencies between a fundamental lattice resonance and an electronic bandgap, the dn/dT value is controlled by two factors. The first factor $(dn/dT)_{tec}$ is the contribution from the volumetric thermal expansion coefficient and it is negative. The second factor $(dn/dT)_{bg}$ is the contribution from the

change of the electronic bandgap with temperature and it is normally positive. These two factors compete with each other giving positive or negative values of dn/dT . Therefore, the positive dn/dT coefficients of the Er:GYSO crystal are due to the fact that the contribution of the $(dn/dT)_{bg}$ term is dominant over the $(dn/dT)_{tec}$ one.

The anisotropy of the TOCs is characterized by $dn_p/dT > dn_g/dT > dn_m/dT$. Thermal coefficients of the natural birefringence are $\Delta_p = |dn_m/dT - dn_g/dT| = 1.5$ for $k//N_p$ (N_p -cut crystal), $\Delta_m = |dn_p/dT - dn_g/dT| = 2.0$ for $k//N_m$ (N_m -cut crystal), and $\Delta_g = |dn_p/dT - dn_m/dT| = 3.5$ (10^{-6} K^{-1}) for $k//N_g$ (N_g -cut crystal). The values of Δ are relatively small, the maximum variation occurs for the N_g -cut Er:GYSO. For comparison, the monoclinic YSO, $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$, $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$, $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ have similar values of $\Delta_p = 1.03, 1.2, 1.1, 3.5$, $\Delta_m = 2.32, 1.3, 0.1, 2.2$ and $\Delta_g = 3.35, 2.5, 1.0, 5.7$ (10^{-6} K^{-1}), respectively [34, 39, 40].

The TCOP values are positive for all directions of the light propagation $k // N_p, N_m, N_g$. This means that the sign of the thermal lens, which is directly related to the TCOP value, will also be positive, and the positive

thermal lens is then expected for N_p -, N_m -, and N_g -cut Er:GYSO. The differences in the TCOP values for the same crystal cutting and the orthogonal light polarizations (1.9, 2.1, 3.2 for p-, m-, and g-cut crystals, respectively) are close to the corresponding values of the thermal coefficients of the natural birefringence Δ .

References

1. Mechanical properties and lattice parameters of $\text{Lu}_{2x}\text{Gd}_{2(1-x)}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ scintillation crystals / V. Maksimchuka [et al.] // Acta Phys. Pol. A. – 2010. – Vol. 117 (1). – P. 146–149.
2. Growth, spectroscopy and lasing of the Yb-doped monoclinic Gd_2SiO_5 in the prospect of hydrogen laser cooling with Lyman- α radiation / L. Cabaret [et al.] // Optical Materials. – 2016. – Vol. 62. – P. 597–603.
3. A ground-state depleted laser in neodymium doped yttrium orthosilicate / R. Beach [et al.] // in Proc. SPIE. – 1990. – Vol. 1223. P. 160–180.
4. Thermo-optic coefficients of monoclinic $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ / S. Vatik [et al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 95 (4). – P. 653–656.
5. Utsu, T. Growth and applications of $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ scintillators / T. Utsu, S. Akiyama // J. Crystal Growth. – 1991. – Vol. 109. – P. 385–391.

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ЗАДАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Алексеев В.А.¹, Усольцева А.В.¹, Усольцев В.П.¹, Юран С.И.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Ижевская государственная сельскохозяйственная академия
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Для обоснованного выбора режимов лазерной обработки материалов проведены исследования параметров профиля поверхности материала в зависимости от мощности лазерного излучения. Исследования показали, что задание и управление режимами лазерной обработки материалов необходимо производить на основании измеренных в реальном масштабе времени физико-механических характеристик материалов в условиях действия помех и неоднозначности существующих моделей динамики механических воздействий. Поскольку технология лазерной обработки материалов носит вероятностно-временной характер, при ее разработке следует учитывать корреляционные связи между состоянием поверхности (шероховатость, твердость и др.), и условиями (режимами) формирования поверхности (мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча, частота импульсов, диаметр сфокусированного лазерного луча и др.).

Ключевые слова: Микронеровности, коэффициент корреляции, мощность лазера, состояние поверхности.

INVESTIGATION OF CORRELATIONS WHEN SETTING TECHNOLOGICAL MODES OF LASER PROCESSING OF MATERIALS

Alekseev V.¹, Usoltseva A.¹, Usoltsev V.¹, Yuran S.²

¹Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov

²Izhevsk State Agricultural Academy
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. To make a reasonable choice of the modes of laser processing of materials, studies of the parameters of the surface profile of the material depending on the power of laser radiation were carried out. Studies have shown that the assignment and control of laser processing modes of materials must be carried out on the basis of the physical and mechanical characteristics of materials measured in real time under conditions of interference and the ambiguity of existing models of the dynamics of mechanical influences. Since the technology of laser processing of materials is of a probabilistic-temporal nature, its development should take into account correlations between the state of the surface (roughness, hardness, etc.), and the conditions (modes) of surface formation (laser radiation power, speed of movement of the laser beam, pulse frequency, diameter of the focused laser beam, etc.).

Key words: micro-dimensions, correlation coefficient, laser power, surface state.

Адрес для переписки: Юран С.И., ул. Студенческая, 11, Ижевск, Российская Федерация
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Во многих производственных процессах лазеры являются или единственным, или наиболее эффективным инструментом. Поэтому понимание основных принципов воздействия лазерного излучения на материал и знание алгоритма задания параметров лазера для решения определенных производственных задач является насущной потребностью производства.

Основной проблемой применения лазерной обработки в промышленности и декоративно-прикладном искусстве является отсутствие научно обоснованной информации о режимах обработки различных материалов. Особенно остро эта проблема стоит при обработке комбинированных материалов, когда художественно-промышленное изделие состоит из нескольких материалов, например, дерева, кожи, кости, оргстекла и т. д., а изображение наносится общее. При использовании одинаковых режимов для различных материалов происходит перерасход энергии, времени и понижение качества продукции.

До настоящего времени режимы обработки недостаточно отработаны, поэтому встречаются художественно-промышленные изделия, выполненные при неподходящем для данного материала режимах. Они имеют низкие технические и эстетические показатели. Экономическая эффективность лазерной обработки значительно повышается при априорном выборе оптимальных режимов за счет повышения качества обрабатываемой поверхности, минимального расхода энергии, времени и расходных материалов.

В процессе взаимодействия лазерного излучения с веществом происходит процесс плавления, испарения или абляции, обычно данные процессы сопровождаются разлетом частиц и капель исходного вещества. При низкой мощности излучения вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов, над облучаемой поверхностью образуется слабая плазма, обычно, темная, не светящаяся. При повышении плотности мощности происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и светящейся плазмы вместе с разлетающимися твердыми и жидкими частицами.

Указанные процессы носят нелинейный характер, поэтому, проведя даже несколько экспериментов, трудно предсказать итоговый результат.

В литературе по лазерным технологиям нет аналитических выражений, позволяющих рассчитать величину микронеровностей поверхности в зависимости от режимов работы лазерной установки. Приводимые в эксплуатационной документации на лазерные установки рекомендации по выбору технологических режимов носят рекомендательный характер и не показывают, какая шероховатость может быть достигнута.

Большинство рекомендаций по выбору режимов лазерной обработки предназначены для

подбора режимов опытным путем. Наиболее распространен метод получения необходимой производительности процесса и минимизации риска порчи изделия на начальных этапах следует делать пробы, желательно в незаметных местах изделия, или на схожем по составу материале [1].

Рассматривая поверхность материала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности представлено моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.), связанных с природой материала и условиями (режимами) образования поверхности, полученной после обработки.

В качестве параметров исследования выбраны: Ra – среднее арифметическое значение отклонения профиля, Rz – высота неровностей профиля, снятая в 10 точках.

Варьируемым фактором, при изменении которого меняются значения параметров, выбрана мощность лазера. Использованы образцы из наиболее распространенных в декоративно-прикладном искусстве материалов – дерева, кожи, кости, оргстекла и т. д.

Для примера рассмотрена среднее значение микронеровностей при обработке прозрачного бесцветного органического стекла, натуральной и искусственной кожи, кости и древесины. Для этого по аналогии с полутонным клином по ГОСТ 24.930-81 «Клин полутонной для факсимильной аппаратуры» воспроизводилась линейка с 15 ступенями изменения мощности лазерного излучения, от 0,64 Вт до 9,6 Вт, с другими постоянными параметрами (скорость движения лазерного луча 18 см/сек, разрешающая способность 500 dpi, частота импульсов 1000 Гц, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм, отклонение угла падения лазерного луча 0^0). На полученных образцах на каждой ступени измерена величина микронеровностей с использованием микроинтерферометра МИИ 4 и по известным формулам рассчитаны коэффициенты корреляции между соседними ступенями, при ступенчатом изменении мощности.

Произведена оценка связи между соседними ступенями путем вычисления коэффициентов корреляции. Расчеты показали, что корреляционная связь между соседними ячейками практически отсутствует, даже при незначительном изменении мощности и смещения лазерного излучения. Поэтому сложно предположить, какая величина микронеровностей будет получена.

Таким образом, исследования показали, что задание и управление режимами лазерной обработки материалов необходимо производить на основании измеренных в реальном масштабе времени физико-механических характеристик материалов в условиях действия помех и неоднозначности существующих моделей динамики механических

воздействий [2, 3]. Для обоснованного задания технологических режимов лазерной обработки материалов необходимо с помощью разработанных теоретических и методических основ учитывать также фоновые значения, связанные с природой материала (микроструктура, химический состав, физико-механические характеристики).

Следует сказать, что технология лазерной обработки материалов носит вероятностно-временной характер, поэтому при ее разработке необходимо учитывать корреляционные связи между состоянием поверхности (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.), и условиями (режимами) формирования поверхности, полученной после обработки (мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча,

разрешающая способность, частота импульсов, диаметр сфокусированного лазерного луча, направление луча на материал), тренд их изменения.

Литература

1. Otto, A. Multiphysical simulation of laser material processing / A. Otto, H. Koch, G. Vasquez // *Physics Procedia*. – 2012. – № 39. – P. 843–852.
2. Исследование влияния режимов лазерной обработки на качество поверхности материалов в приборостроении / В. А. Алексеев [и др.] // *Приборостроение-2019 : мат-лы 12-й Международной научно-технической конф.* – Минск : БНТУ, 2019. – С.433–435.
3. Исследование состояния поверхности биоткани при лазерной абляции / В. А. Алексеев [и др.] // *Прикладная оптика-2018: Сб. трудов Международной конф., СПб, 2018.* – Том 2. – С. 40–43.

УДК 528.854

МЕТОД МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПУТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ СОСТАВУ

Антонов Е.А.¹, Куприянов А.А.², Калугин А.И.¹, Зарипов М.Р.¹

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе был проведен обзор основных методов получения мультиспектральных изображений и были выявлены основные недостатки этих методов. Был предложен альтернативный метод мультиспектральной съемки, рассмотрены его преимущества перед существующими методами, а также его недостатки.

Ключевые слова: мультиспектральная съемка, мультиспектральная камера.

METHOD OF MULTISPECTRAL IMAGING BY SPATIAL SEPARATION OF IMAGES DEPENDING ON THEIR SPECTRAL COMPOSITION

Antonov E.¹, Kupriyanov A.², Kalugin A.¹, Zaripov M.¹

¹Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The review of common methods of multispectral imaging is performed. Disadvantages of these methods are revealed. Alternative method of multispectral imaging is proposed and its advantages and disadvantages are considered.

Keywords: multispectral imaging, multispectral camera.

Адрес для переписки: Антонов Е.А., ул. Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Российская Федерация
e-mail: slick25@mail.ru

Все большую актуальность в последнее время набирают мультиспектральные способы съемки объектов, позволяющие определять различия в спектральных коэффициентах яркости и отражения объектов и сред. Благодаря этому, возможно дистанционно определить, например, различия состава объектов, неразличимых при наблюдении человеческим глазом. Вместе с этим, остро встает задача разработки новых устройств, способных, будучи компактными, реализовать данный процесс с достаточным про-

странственным, временным и спектральным разрешением. К таким устройствам относятся мультиспектральные камеры, находящие все больше применений в различных сферах жизни, от аэрофотосъемки и спектрометрирования ландшафта до дистанционного определения сорняков и больших растений на полях.

На сегодняшний день применяются следующие методы мультиспектральной съемки [1]:

– применение двух и более независимых камер, захватывающих свой спектральный диапа-

зон. Недостатком этого метода являются искажения, вызванные параллаксом, не позволяющие преобразовать данные в одно мультиспектральное изображение;

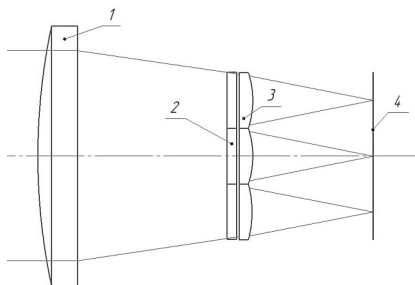
- установка массива пиксельных светофильтров. Данный метод применяется в большинстве камер, позволяющих получить цветное изображение. Недостатком этого метода является невозможность смены светофильтров. Кроме того, в таких системах формируется одно изображение, следовательно, из-за того что пиксели под различными светофильтрами сдвинуты друг относительно друга, изображения, полученные в различных спектральных диапазонах, будут отличаться;

- применение двух камер и светоделительного элемента. В отличие от первого метода, оптические оси камер должны быть совмещены, благодаря чему будут компенсированы искажения из-за параллакса, однако такой метод не позволит вести съемку в большом количестве различных спектральных диапазонов;

- применение призматических дихроичных разделителей пучка и нескольких приемников. Этот метод позволяет быстро получать качественные мультиспектральные изображения, однако размеры требуемых разделителей пучка значительно увеличиваются с увеличением количества используемых спектральных диапазонов;

- съемка с применением сменных узкополосных светофильтров. К этому методу относится, например, съемка с применением вращающегося перед камерой диска в котором установлены светофильтры [2]. Основным недостатком таких методов является долгое время построения мультиспектрального изображения.

В качестве альтернативы существующим методам мультиспектральной съемки в настоящей работе предлагается построение оптического узла камеры на основе единого приемного объектива с растровым элементом, совмещенного с массивом светофильтров. Массив представляет собой плоскопараллельную пластинку, собранную из нескольких светофильтров. Один из возможных вариантов реализации данного метода представлен на рис. 1.



1 – объектив; 2 – массив светофильтров; 3 – линзовый растр; 4 – фотоприемник

Рисунок 1 – Схематическое изображение предлагаемого метода мультиспектральной съемки

Каждый элемент растра 3 формирует в плоскости матричного фотоприемника 4 изображение, спектральный состав которого определяется функцией пропускания светофильтра 2, расположенного с этим элементом. Таким образом, в плоскости фотоприемника формируется некоторое количество изображений, равное количеству элементов растра. После записи кадра, программными методами эти изображения преобразуются в одно мультиспектральное изображение.

Кроме компоновки компонент показанной на рис. 1, светофильтры можно расположить возле фотоприемника, за линзовым растром либо заполнить в виде покрытия линз растра. Линзовый растр может копировать изображение как в одном, так и в двух направлениях.

Главным недостатком такого метода является обратная зависимость пространственного разрешения мультиспектрального изображения от количества применяемых спектральных диапазонов, поскольку для каждого изображения на плоскости матрицы отводится свой участок. Таким образом, при формировании изображения на четырех длинах волн, разрешение мультиспектрального изображения будет в идеальном случае в 4 раза меньше, чем разрешение фотоприемника. Данная проблема также встречается в системах с массивами светофильтров, устанавливаемыми на матрицах фотоприемников.

Тем не менее, данный метод обладает рядом следующих достоинств:

- не возникает сильных искажений из-за параллакса;

- скорость съемки равна скорости построения одного кадра;

- возможно реализовать смену блока светофильтров для получения мультиспектрального изображения с иным спектральным составом;

- данный метод можно комбинировать с методом, использующим светоделительный элемент, благодаря этому появляется возможность расширения спектрального диапазона или повышения пространственного разрешения;

- возможно получение мультиспектральных изображений высокого пространственного и спектрального разрешения при разделении изображения только по одному направлению в режиме строчного сканирования.

Литература

1. Multispectral imaging for medical and industrial machine vision systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.jai.com/multispectral-imaging>. – Дата доступа: 01.09.2022.

2. Макет мультиспектральной системы видения для мобильных систем / У. А. Ефимова, [и др.] // Приборостроение–2020: материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус.нац. техн. ун-т / редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 367–369.

УДК 535.317; 681.7

КОРРЕКЦИЯ ХРОМАТИЗМА В ОБЪЕКТИВЕ ШМИДТА Артиухина Н.К.¹, Самбрано Лус Фабиола², Шанчук В.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Национальный центр оптических технологий (CNTO)
Мерида, Венесуэла

Аннотация. Представлены анализ хроматизма, вносимого деформированной поверхностью коррекционной пластины объектива Шмидта и методика расчета профиля ее деформированной поверхности.

Ключевые слова: объектив, коррекция хроматизма, качество изображения.

CHROMATICISM CORRECTION IN THE SCHMIDT LENS

Artioukhina N.¹, Zambrano L.², Shanchuk V.¹

¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²National Center of Optical Technologies (CNTO)
Merida, Venezuela

Abstract. The analysis of chromaticism introduced by the deformed surface of the Schmidt lens correction plate and the method of calculating the profile of its deformed surface are presented

Key words: lens, image quality, chromaticism correction

Адрес для переписки: Шанчук В.А., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: vdmsacunewera@gmail.com

В последнее время актуально использовать в композициях объективов зеркальные элементы. В двух- и трехзеркальных объективах одно из зеркал обычно делают асферическим, так как сферические зеркала дают сравнительно большие остаточные aberrации, что является их недостатком с технической точки зрения (контроль и юстировка). Зеркально-линзовые системы применяют в том случае, когда для коррекции aberrаций экономичнее вводить в объектив коррекционные элементы.

В наиболее известных конструкциях (объективы Шмидта и Максудова) эти элементы размещают перед главным зеркалом; они причем требования к качеству стекла и точности обработки их поверхностей оказываются значительно более высокими, чем для линзового объектива.

Объектив Шмидта относится к катадиоптрическим системам, где впервые было получено резкое изображение при относительно отверстии, считавшемся до того несовместимым с большим полем зрения. При этом модуль состоит всего из двух оптических частей – из сферического зеркала и тонкой линзы, почти не обладающей оптической силой, но трудной в технологическом отношении. Отметим, что хроматизм, вносимый корректирующей пластиной Шмидта, довольно значителен. Недостатком являются также кривизна поля и расположение фокуса внутри модуля [1].

Объективы Шмидта довольно широко применяются, схемы совершенствуются за счет введения различных приемов. К примеру, для получения изображений астрономических объектов с

высоким качеством при больших полях в Национальной астрономической обсерватории «Льяндель Ато» (OAN) Венесуэлы разработан телескоп Шмидта со сферическим зеркалом с диаметром $D_m = 1520$ мм, фокусным расстоянием $f = 3000$ мм, который используется уже в течение 60 лет [2]. В настоящее время вносятся некоторые модификации, заменяется ПЗС-камера, ожидаются калибровочные испытания. При этом актуальными научными задачами являются полное устранение комы и хроматизма.

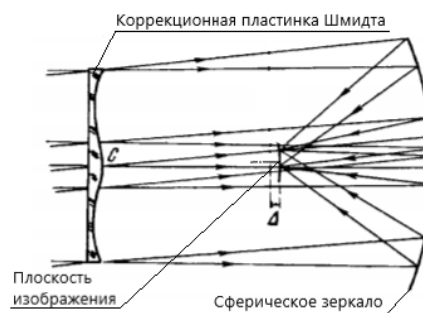


Рисунок 1 – Оптическая схема объектива Шмидта

Цель работы – исправить aberrацию комы, исследовать величину хроматизма, вносимого коррекционной пластиной и определить параметры коррекции при сохранении высокого качества изображения.

Оптическая схема коррекционной пластины и ход нулевого луча представлены на рис. 2. Зеркало сферическое, вторая поверхность пластинки асферическая, т. е. деформация поверхности $\sigma_2 \neq 0$.

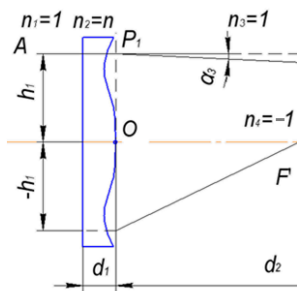


Рисунок 2 – Коррекционная пластинка объектива Шмидта

Составлен алгоритм абберационного расчета. Первый этап: получены уравнения устранения сферической абберации и комы, из которых определены радиус кривизны деформированной поверхности пластинки

$$\frac{1}{r_2} = -\frac{\alpha_3}{n-1}$$

и воздушный промежуток $d_2 = 2(1 - \alpha_3)$, установлено требование совмещения центра сферического зеркала с вершиной деформированной поверхности $r_3 = -d_2$.

На втором этапе получено уравнение меридиональной кривой коррекционной пластины

$$x = -\frac{\alpha_3}{2(n-1)}y^2 + \frac{1}{8}\left(\frac{1}{r_2} + \frac{\sigma_2}{r_2^3}\right)y^4.$$

На третьем этапе проведено исследование возможности получения наименьшего остаточного хроматизма за счет изменения формы меридиональной кривой деформированной поверхности, определяемого углом α_3 (рис. 3).

Угол γ характеризует клиновидность пластинки в конкретной зоне. Дифференцируя формулу отклонения оптического клина, определена угловая дисперсия; для расчета линейной дисперсии необходимо учитывать радиус сферического зеркала.

Формулы координат в меридиональном сечении получены для трех зон, указанных на рисунке, причем для кривой выполняется условие: $\gamma_r = -\gamma_e$, при соблюдении которого гарантируется выполнение минимального значения угла γ , т.е хроматизма в угловой мере.

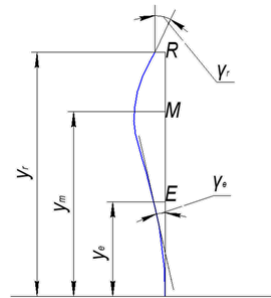


Рисунок 3 – Меридиональная кривая деформированной поверхности пластинки Шмидта

К примеру, для края отверстия (край входного зрачка): $\alpha_3 = \frac{3}{32}y_r^2$; $tg\gamma = \frac{y}{32(n-1)}(3y_r^2 - 4y^2)$.

Был выполнен расчет профиля коррекционной пластины в объективе с фокусным расстоянием $f' = 1000$ мм (рис. 4).

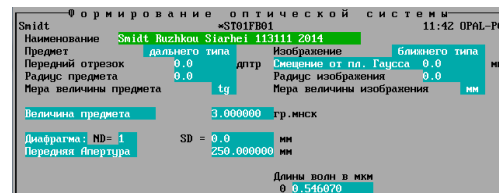


Рисунок 4 – Объектный модуль объектива Шмидта (ППП Опал)

Проведено компьютерное моделирование и оптимизация.

Абберации базовой схемы были значительно улучшены [3].

Литература

1. Русинов, М. М. Композиция оптических систем. / М. М. Русинов. – М.: Книжный дом «ЛИБРКОМ», 2011. – 384 с.
2. Ferrin, I. Busqueda general con la camara Mosaic CCD del telescopio Schmidt de 1m del Observatorio Nacional de Venezuela / I. Ferrin, C. Leal, I. Hernandez // Revista Mexicana de fisica. – 2006. – Vol. 52 (3) – С. 9–11.
3. Самбрано, Л. Ф. Основные факторы проектирования катадиоптрического объектива Шмидта / Л. Ф. Самбрано, Н. К. Артюхина // Новые направления развития приборостроения: материалы 12-й междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск. 17–19 апр. 2019. – Минск: БНТУ. – Т. 2 – Мн., 2019. – С. 285.

УДК 535.317; 681.7

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ИК ВАРИООБЪЕКТИВА
В ПП OPTICSTUDIO**

Артюхина Н.К.¹, Чергейко С.В.², Марчик В.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Усовершенствована методика автоматизированного синтеза объективов с плавным изменением фокусного расстояния с использованием OpticStudio; установлены особенности габаритного расчета.
Ключевые слова: вариообъектив, фокусные расстояния, подвижки компонентов, качество изображения.

**TECHNIQUE OF AUTOMATED SYNTHESIS OF IR ZOOM LENS
IN SOFTWARE OPTICSTUDIO**

Artioukhina N.K., Charheika S.², Marchik V.²

¹Belarusian National Technical University

²JSC "PELENG"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The technique of automated synthesis of smooth the focal length change lenses using OpticStudio has been improved; the features of dimensional calculation have been established.

Key words: zoom lens, focal length, component movements, image quality.

Адрес для переписки: Чергейко С.В., ул. Макаёнка 25, Минск 220114, Республика Беларусь
e-mail: ich0@bk.ru

В современном оптическом приборостроении находят достаточно широкое применение оптические системы с плавным изменением фокусного расстояния. Обсуждению темы габаритного расчета вариообъектива посвящено значительное количество публикаций, описывающих разные методы синтеза [1, 2]. Первая группа методов использует экспертные системы, основанные на поиске в базе данных наиболее подходящего аналога. Подход позволяет игнорировать этап параксиального синтеза, но не дает положительного результата при значительном изменении диапазона фокусных расстояний для получения нового решения. Вторая группа использует в синтезе методы нелинейного программирования. Подход требует наличия стартовой системы, которая требует трудоемкого патентного поиска. К третьей группе можно отнести методы, основанные на разработке специализированных алгоритмов, учитывающих специфику решаемых задач. Отметим, что методы не универсальны и не позволяют в полной мере выполнить параксиальный синтез системы переменного увеличения, поэтому исследование и разработка новых подходов к поиску решений является актуальной научной и практической задачей.

Цель настоящей работы – установить особенности габаритного расчета и усовершенствовать метод автоматизированного параксиального синтеза ИК вариообъективов в тонких компонентах с последующей оптимизацией.

Рассмотрим этапы предложенной методики, включающей синтез в тонких компонентах с использованием компьютерного моделирования и оптимизации в ПП OpticStudio (ранее ПП Zemax).

На первом этапе осуществлен выбор прототипа (базовой схемы, максимально подходящей по задаваемым параметрам), описание которого дано в работе [3]. Использована базовая схема из пяти компонентов, два из которых имеют подвижку, предназначенную для плавного изменения фокусного расстояния. Положение элементов схемы в тонких компонентах рассчитаны с помощью углов α_k и высот h_k нулевого луча (рис. 1).

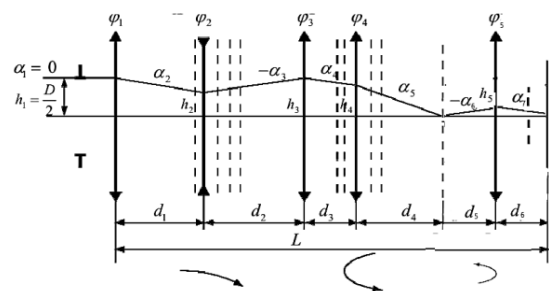


Рисунок 1 – Оптический модуль вариообъектива в тонких компонентах

Фокусные расстояния оптической системы, состоящей из бесконечно тонких линз, являются лишь первым приближением решения задачи расчета объектива. Габаритные размеры и размеры подвижек выбираются, чтобы удовлетворить требования к длине L .

Переход к компонентам конечной толщины сводится к минимизации оценочной функции: RMS (среднеквадратическое значение) поперечной аберрации в плоскости изображения. Формируя оценочную функцию, задаем положение и диаметр входного зрачка вариообъектива, а также поле зрения в пространстве предметов в угловой

мере 2ω для двух крайних и нескольких 5–10 промежуточных положений.

Результаты 1 этапа: сформирована оптическая система из компонентов, фокусные расстояния которых оптимизированы с использованием ограничений на световые диаметры, общий габарит и воздушные промежутки. Получены расчеты для 2 крайних положений (рис. 2) и определены промежуточные конфигурации при изменении фокусного расстояния системы с шагом 12,5 мм.

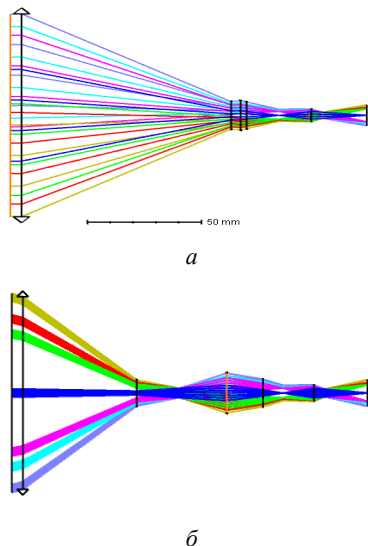


Рисунок 2 – Схемные решения вариообъектива в тонких компонентах для двух крайних положений

Получив конструкцию, переходим ко второму этапу расчета – синтез по компонентам при минимизации aberrаций каждого компонента в отдельности. В рассчитанной системе пять компонентов: первый, третий, четвертый и пятый положительные, второй отрицательный. Пятый компонент представляет собой проекционную систему. Создано пять новых покомпонентных систем с известными фокусными расстояниями и оптическими материалами линз. Для положительных линз компонентов использован кремний с относительно низким показателем преломления, для отрицательных линз компонента – германий с более высоким показателем преломления.

Использован последовательный расчет 1–4 и 5 компонентов согласовывая положения зрачков при заданных ограничениях, а также учете необходимых подвижек и расстояний между линзами для механического крепления их в оправках.

На 3 этапе объединяем все в единую систему и оптимизируем с использованием ПП OpticStudio. Компоновки системы после расчета отдельных компонентов недостаточно. Необходимо выполнить aberrационный расчет системы в целом, компенсируя aberrации одного компонента другим. Aberrационный расчет выполнен также в программной среде OpticStudio.

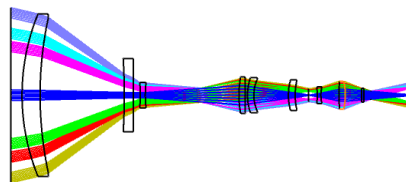


Рисунок 3 – Объединенная система вариообъектива после aberrационного расчета для положения с фокусным расстоянием 25 мм

На 4 этапе произведен расчет вариообъектива сначала по геометрическим aberrациям, далее по волновым.

Предложенная методика автоматизированного синтеза была использована для расчета вариообъектива, работающего в средней инфракрасной области спектра (3,5–5,0) мкм с приемником с охлаждаемой диафрагмой. Технические характеристики вариообъектива: диапазон изменения фокусного расстояния $f_{\max} = 300$ мм, $f_{\min} = 25$ мм; угловое поле зрения от $2,34^\circ$ до $27,6^\circ$ относительное отверстие 1:5,5.

В ПП OpticStudio произведена оценка рассчитанной системы на технологичность, результаты подтвердили, что данное техническое решение возможно реализовать [4].

Литература

1. Запрягаева, Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – М.: Логос, 2000. – 584 с.
2. Зверев, В. А. Идеи композиции как принцип построения рациональной конструкции оптической системы / В. А. Зверев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2002. – № 5. – С. 56–71.
3. Varioptic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.varioptic.com>. – Дата доступа: 20.09.2021.
4. Чергейко, С. В. Вариообъектив для систем технического зрения / С. В. Чергейко, Н. К. Артюхина, Д. С. Шарко – «Приборостроение–2021». Материалы 14-й МНТК, Минск, 17–19. 11. – 2021. – С. 387–389.

УДК 543.42:669.14

**ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКЕ
КОНЦЕНТРАЦИЙ C, Mn, Si, Cr, Ni И Cu В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ МЕТОДОМ
ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Бельков М.В., Борисевич Д.А., Кацалап К.Ю., Ходасевич М.А.

*Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. По эмиссионным спектрам низкого разрешения осуществляется калибровка концентраций C, Mn, Si, Cr, Ni и Cu в эталонных низколегированных сталях. Рассмотрены три метода выбора спектральных переменных для многопараметрической калибровки методом частичных наименьших квадратов. Лучшие результаты показал выбор спектральных переменных оригинальным методом поиска комбинации движущихся окон. Для C среднеквадратичное отклонение калибровки 0,04 %, остаточное отклонение в проверочной выборке 4,7, Mn – 0,02 % и 24,8, Si – 0,01 % и 12,9, Cr – 0,01 % и 21,8, Ni – 0,007 % и 23,3, Cu – 0,006 % и 23,2. Модели количественные (остаточное отклонение > 3) для всех шести рассматриваемых элементов, включая углерод.

Ключевые слова: лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, метод частичных наименьших квадратов, выбор спектральных переменных.

**SPECTRAL VARIABLES SELECTION IN MULTIVARIATE CALIBRATION
OF CONCENTRATIONS OF C, Mn, Si, Cr, Ni, AND Cu IN LOW-ALLOY
STEELS BY LIBS METHOD**

Belkov M., Borisevich D., Catsalap K., Khodasevich M.

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Calibration of concentrations of C, Mn, Si, Cr, Ni, and Cu by the low-resolution emission spectra are made in reference low-alloy steels. Three methods for spectral variables selection for multivariate calibration by the partial least squares method are considered. The best results were shown by selection of spectral variables using the searching combination moving window. For C root-mean-square error is 0.04 %, residual predictive deviation is 4.7 > 3, Mn – 0.02 % and 24.8, Si – 0.01 % and 12.9, Cr – 0.01 % and 21.8, Ni – 0.007 % and 23.3, Cu – 0.006 % and 23.2. Models are quantitative (residual predictive deviation > 3) for all six elements considered, including carbon.

Key words: laser induced breakdown spectroscopy, partial least squares, spectral variable selection.

*Адрес для переписки: Борисевич Д.А., пр. Независимости, 68, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: d.borisevich@ifanbel.bas-net.by*

Введение. Преимущества применения лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (LIBS – laser induced breakdown spectroscopy) для определения состава сталей заключаются в экспрессном многоэлементном анализе на открытом воздухе и относительно низкой стоимости. Однако низкое спектральное разрешение в компактных устройствах LIBS и сильное перекрытие аналитических линий затрудняет применение классической одномерной калибровки. В этом случае применимы многопараметрические модели, учитывающие большое количество спектральных переменных.

Эксперимент. В представленной работе по эмиссионным спектрам низкого разрешения (172–507 нм, разрешение 0,4 нм, шаг по спектру 0,1 нм) осуществлена калибровка концентраций C, Mn, Si, Cr, Ni и Cu в эталонах низколегированных сталей. Для каждого из 57 образцов были зарегистрированы по 50 спектров в 5 точках на поверхности. Экспериментальная установка описана в [1].

Методы и результаты. Ранее мы использовали широкополосный метод частичных наименьших квадратов (PLS – partial least squares) [2]. Разделение эталонов сталей на обучающую и проверочную выборки проводилось случайным образом при условии интерполяционной проверки. Особенности текущей модели являются нахождение выбросов в серии последовательных спектров, измеренных в каждой из 5 точек на поверхности образца, усреднение спектров в этих точках, использование предварительной обработки спектров в виде вычитания базовой линии с помощью адаптивного алгоритма наименьших квадратов с итеративным повторным взвешиванием, нормирование спектров на интенсивность выбранной эмиссионной линии железа и выбор спектральных переменных. Были рассмотрены три метода выбора спектральных переменных: метод ранжирования спектральных переменных по их коэффициенту корреляции с величиной искомого параметра (RSV – ranking of spectral

variables) [3], алгоритм последовательного проецирования (SPA – successive projections algorithm) [4] и оригинальная модификация [5] метода поиска комбинации движущихся окон (scmwiPLS – searching combination moving window iPLS). Наилучшие результаты в нашем случае получены для третьего метода. ScmwiPLS оперирует не отдельными спектральными переменными, а спектральными интервалами – окнами. На первом этапе этого метода определяется оптимальное количество латентных переменных с помощью модели широкополосной калибровки. После чего ширина окна фиксируется на одну спектральную переменную больше, чем оптимальное количество латентных переменных в широкополосной модели. Оптимальное положение первого сдвигающегося окна определяется и фиксируется по минимальному значению среднеквадратичного отклонения калибровки по проверочной выборке (RMSEP – root-mean-square error of prediction). Процедура повторяется со следующими окнами до включения в модель всего спектрального диапазона. Третий этап заключается в выборе модели с минимальной величиной RMSEP в зависимости от количества окон. Спектральные переменные, выбранные методом scmwiPLS для Mn, представлены на рис. 1.

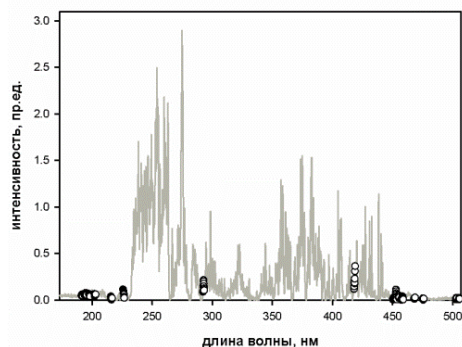


Рисунок 1 – Эмиссионный спектр эталона низколегированной стали и выбранные методом scmwiPLS спектральные переменные для калибровки Mn

Критериями качества калибровки являются RMSEP и остаточное отклонение предсказания RPD (residual predictive deviation). Пороговое значение RPD, при котором калибровка считается количественной, равно 3 [6]. Для калибровочной модели углерода среднеквадратичное отклонение RMSEP = 0,04 %, остаточное отклонение в проверочной выборке RPD = 4,7 > 3, для Mn – 0,02 % и 24,8, Si – 0,01 % и 12,9, Cr – 0,01 % и 21,8, Ni – 0,007 %

и 23,3, Cu – 0,006 % и 23,2. На рис. 2 показано соответствие эталонной величины концентрации марганца и оценки, полученной с помощью модели PLS с выбором спектральных переменных.

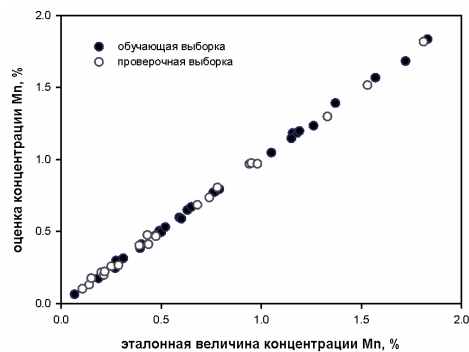


Рисунок 2 – Соотношение между предсказанной с помощью scmwiPLS модели и эталонной концентрацией Mn

Вывод. Выбор спектральных переменных с помощью поиска комбинации движущихся окон в методе частичных наименьших квадратов повышает качество многопараметрических моделей калибровки концентраций технологических примесей и добавок в низколегированных сталях по спектрам, полученным с помощью лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, и делает калибровку количественной для всех шести рассматриваемых элементов.

Литература

1. Многопараметрическая калибровка концентраций C, Mn, Si, Cr, Ni и Cu в низколегированных сталях методами лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии по необработанным спектрам с низким разрешением / Бельков М. [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 5. – С. 737–742.
2. Geladi, P. Partial Least-Squares Regression: A Tutorial / P. Geladi, B. R. Kowalski // *Analytica Chimica Acta*. – 1986. – Vol. 185. – P. 1–17.
3. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy / Z. Xiaobo [et al.] // *Analytica Chimica Acta*. – 2010. – Vol. 667. – P. 14–32.
4. The successive projections algorithm / S. F. C. Soares [et al.] // *Trends in Analytical Chemistry*. – 2013. – Vol. 42. – P. 84–98.
5. Khodasevich, M. Selection of spectral variables and improvement of the accuracy of calibration of temperature by projection onto latent structures using the fluorescence spectra of Yb³⁺:CaF₂ / M. Khodasevich, V. Aseev // *Opt. Spectrosc.* – 2018. – Vol. 124. – P. 748–752.
6. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils / R. Zornoza [et al.] // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2008. – Vol. 40. – P. 1923–1930.

УДК 621

БЕЗРУТУНЫЕ ЦЕЗИЕВЫЕ ЛАМПЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА (ИПР) ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ

Богданов А.А.¹, Гавриш С.В.², Марциновский А.М.¹, Столяров И.И.¹

¹Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Оветительные цезиевые лампы ИПР экологически безопасны, имеют высокое качество света, недороги и достаточно энергоэффективны (до 60–70 лм/Вт). Это позволит им конкурировать и с газоразрядными лампами, и со светодиодами. А для систем освещения с одновременным профилактическим УФ облучением для компенсации УФ недостаточности в высоких широтах они вне конкуренции.

Ключевые слова: цезий, импульсно-периодический разряд, светоотдача, профилактическая доза УФ.

MERCURYLTSS CESIUM LAMPS OF THE PULSE-PERIODIC DISCHFRGE

Bogdanov A.¹, Gavrish S.², Martsinovsky A.¹, Stolyarov I.¹

¹Ioffe Institute

St-Petersburg, Russian Federation

²Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd
Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. Cesium lighting PPD lamps are environmentally friendly, inexpensive, have a high quality of light and a relatively light output up to 60–70 lm/W. This allows them to compete with both gas discharge lamps and LEDs. And they are unrivaled for lighting systems with simultaneous preventive UV irradiation to compensate the UV deficiency in high latitudes.

Key words: cesium, pulse-periodic discharge, light output, prophylactic UV dose.

Адрес для переписки: Гавриш С.В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, Москва 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

Актуальность. Создание эффективного и экологически чистого источника света, позволяющего путем прямой замены в эксплуатируемых осветительных приборах газоразрядной лампы и электронной пуско-регулирующей аппаратуры является актуальным техническим решением. При этом достижение высокой светоотдачи при максимальном индексе цветопередачи лампы расширяет сферы применения источника света.

Особенности цезиевого ИПР. У атома Cs 6P и 5D рекомбинационные континуумы с сечением рекомбинации, на порядок превышающим таковые других щелочных атомов, создают непрерывный спектр в области при $\lambda < 600$ нм (рис. 1).

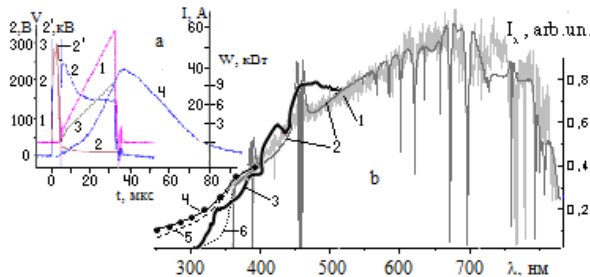


Рисунок 1 – а – осциллограммы тока (1), напряжения (2, 2'), мгновенной мощности (3) и освещенности (4) в импульсе; б – нормированные на $\lambda = 550$ нм снятый (1) и рассчитанный (2) спектры лампы и солнечный спектр (3), экстраполяция континуума в УФ область (4) и ее ослабление увиолевым стеклом колбы (5, 6)

Это обеспечивает «солнечное» качество света с индексом цветопередачи $Ra = 90-98$. Так как скорость рекомбинации пропорциональна n^2 , для высокой светоотдачи η необходима плазма с концентрацией $n \sim 10^{17}-10^{18}$ см⁻³, тогда почти вся видимая световая энергия выносится в континуумах, но при этом возрастает тепловая нагрузка на поверхность разрядной трубки (горелки). Нагрев оболочки горелки не позволяет достичь высокого давления паров цезия, и как следствие, значительной светоотдачи. По этой причине цезиевые осветительные лампы не получили распространения, хотя и были апробированы одновременно с НЛВД [1]. Режим ИПР за счет большой скажности импульсов тока позволяет получить нужную концентрацию в импульсе при допустимой средней мощности разряда и дает возможность реализовать преимущества цезиевого наполнения. Благодаря низкому потенциалу ионизации атома Cs (3,89 эВ) и высокой скорости ступенчатой ионизации плотная сильноионизованная плазма получается с минимальными затратами энергии. Большие сечения упругого рассеяния электронов и ионов обеспечивают низкую теплопроводность между осью разряда и стенкой горелки и достаточно высокое падение напряжения на положительном столбе без буферного газа – ртути. Адсорбция атомов Cs на электродах обеспечивает термоэмиссионные токи до сотен А/см² без катодных пятен, важно для большого срока службы цезиевых ламп.

Начальные исследования. Первоначально в ФТИ была развита детальная теория цезиевого ИПР, показавшая что при давлениях цезия P_{Cs} порядка сотен Торр и импульсных токах в сотни А/см² до 95 % вложенной в разряд энергии должно выноситься из плазмы излучением, что обеспечивает светоотдачу столба плазмы до 75–85 лм/Вт (60–70 лм/Вт для лампы) [2]. Но в первых экспериментальных работах были получены заметно меньшие светоотдачи, всего 45 лм/Вт [3, 4]. Для устранения наблюдаемого расхождения потребовались дополнительные исследования.

Методика. Исследовались лампы с сапфировыми горелками (внутренний диаметр $2r = 5$ мм) и внешней вакуумированной кварцевой колбой как отпаяные, так и откачные с выводом термпары с холодной точки горелки для приближенного определения P_{Cs} . Электроды диаметром 2–2,5 мм стандартные витые из торированного W, межэлектродное расстояние $L = 55$ и 22 мм. Питание от генератора тока с максимальным напряжением 3 кВ биполярными импульсами линейно-нарастающего тока (рис. 1, *b*) длительностью $\tau = 10$ –50 мкс, амплитудой $J_m = 10$ –150 А и частотой $f = 100$ –1500 Гц, дежурный ток до 1,5 А. Регистрировались осциллограммы напряжения, тока и освещенности перпендикулярно оси лампы на расстоянии $1\text{ м} \gg L$, что позволяло определить энерговыход и интегральный видимый световой поток в импульсе, частоту, мощность лампы и при измеренном эффективном телесном угле лампы ($\Omega_{\text{эф}} = 11,2$), средний по времени полный световой поток и светоотдачу. Спектральные измерения проводились стробинтегратором.

Светоотдача. Она измерялась в зависимости от средней мощности разряда W , менявшейся за счет частоты при постоянной амплитуде импульса тока J_m (рис. 2). На рис. 2 для «длинной» горелки с термпарой приведены соответствующие значения P_{Cs} .

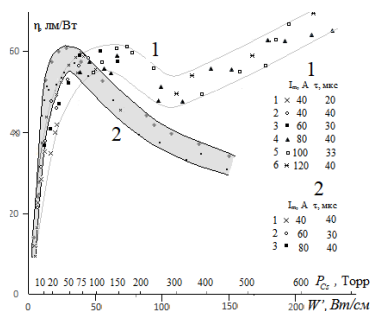


Рисунок 2 – Зависимость $\eta(W)$ для ряда исследованных режимов ламп с длинной (1) и короткой (2) горелками

Видно, что амплитуда и длительность токового импульса, в согласии с теорией [5], в изученном интервале слабо влияют на светоотдачу – в отличие от P_{Cs} . Начальный быстрый рост η при малых давлениях связан с быстрым ростом концентрации

на оси разряда, где плазма полностью ионизована. Замедляет рост реабсорбция континуумов в периферийных областях, и при радиальной оптической плотности ~ 1 наблюдается максимум при $P_{Cs} \approx 75$ –100 Торр. Это несколько меньше, чем оптимальное давление Na в НЛВД, что обусловлено, скорее всего, разным характером реабсорбции континуумного и резонансного излучения. Повидимому, по этой же причине светоотдача цезиевых ламп растет с уменьшением внутреннего диаметра горелки. Немонотонный спад зависимости $\eta(P)$ для длинной горелки связан с наблюдавшейся визуальной контракцией анодного столба, локализуящегося при этом на стенке горелки, что резко уменьшает радиальную оптическую плотность. Это вызывает повторный рост светоотдачи с мощностью (давлением). Для короткой горелки распределенный разряд наблюдался лишь при удельных мощностях W^2 , 5 Вт/см, для остальной кривой $\eta(W)$ диаметр светящегося разрядного шнура определяется диаметром электродов, локализован по центру горелки и не касается стенок, и повторный рост светоотдачи не наблюдался.

Перспективы применения. Достигнутый уровень светоотдачи делает цезиевые лампы конкурентоспособными по отношению к газоразрядным осветительным лампам (экологическая безопасность, качество света) и даже светодиодам. Но наибольший эффект их применение должно дать при создании систем внутреннего освещения с дозированным ультрафиолетовым излучением в *A* и *B* поддиапазонах для компенсации УФ дефицита зимой в высоких широтах [6]. Оценки показывают, что близкий к солнечному рекомбинационный спектр цезиевых ламп в УФ области (рис. 1) позволит заменить в существующих системах осветительные и эритемные люминесцентные лампы (ЛЭ, ЛЭР) с уменьшением потребляемой мощности. Более того, изменение соотношения УФ и видимого света с режимом ИПР и пропусканьем колбы (рис. 1, *b*) делает возможным разработку цезиевых ламп прямой замены для бытового внутреннего освещения с профилактической дозой УФ излучения.

Литература

1. Лампы на парах металла : пат. US 2971110 / K. Schmidt. – Оpubл. 1959.
2. Бакшт, Ф. Г., Лапшин, В. Ф. // Усп. Прил. Физ., 2017. – Т. 5, № 6. – С. 525.
3. Plasma Sources Sci. Technol / H. Gu, [et al.]. – 2001. – Vol. 10.
4. Pichler G, Živčec V, Beuc R, Mrzljak Ž, Ban T, Skenderović H, Gunther K and Liu J // Phys. Scr. – 2003. – Vol. T105. – P. 98–100.
5. Бакшт, Ф. Г., Лапшин, В. Ф., Шиман, А. С. // Светотехника, 2005. – № 3. – С. 20–22.
6. Ненахова, Е. В. УФ излучение. Влияние УФ излучения на организм человека / Е. В. Ненахова, Л. А. Николаева. – Иркутск, ИГМУ, 2020.

УДК 621.327

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С САПФИРОВОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В., Ушаков Р.М.

ООО «Научно-производственное предприятие
«Мелитта» Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению особенностей конструкции и технологии газоразрядных источников оптического излучения с сапфировой оболочкой: натриевых ламп, источников света с импульсно-периодическим разрядом в парах цезия, ВЧ-ячеек, импульсных источников УФ-излучения и ксеноновых ламп сверхвысокого давления. Даны рекомендации по эксплуатации и применению указанных газоразрядных ламп.

Ключевые слова: газоразрядная лампа, сапфировая оболочка, натриевая лампа, высокочастотная ячейка, импульсный источник УФ-излучения, короткодуговая ксеноновая лампа.

A NEW GENERATION OF GAS-DISCHARGE OPTICAL RADIATION SOURCES WITH A SAPPHIRE SHELL

Gavrish S., Loginov V., Puchnina S., Ushakov R.

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd,
Moscow, Zelenograd, Russia

Abstract. The work is dedicated to the consideration of the design features and technology of gas-discharge optical radiation sources with a sapphire shell: sodium lamps, light sources with pulsed periodic discharge in caesium vapor, HF-cells, pulsed UV-radiation sources and ultrahigh pressure xenon lamps. Recommendations on the operation and use of these gas-discharge lamps are given.

Key words: gas-discharge lamp, sapphire shell, sodium lamp, high-frequency cell, pulsed UV-radiation source, short-arc xenon lamp.

Адрес для переписки: Гавриш С.В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, Москва 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

В настоящее время повышение эффективности и долговечности газоразрядных ламп невозможно без применения в их конструкции новых материалов, обеспечивающих устойчивость к агрессивному воздействию различных плазмообразующих сред, механическую прочность, оптическую прозрачность в спектральном диапазоне от 0,2 до 6,0 мкм и т. д. Таким материалом, несомненно, является монокристаллический оксид алюминия (сапфир, корунд) [1]. Внедрение технологии изготовления профилированных монокристаллов по методу А.В. Степанова в промышленность обеспечило возможность группового выращивания сапфировых труб и послужило толчком к развитию новых газоразрядных ламп с корундовой оболочкой (колбой).

Газоразрядные лампы для освещения. Натриевые лампы высокого давления (НЛВД) на сегодняшний день являются самыми эффективными источниками света, так как обеспечивают рекордную светоотдачу (до 120 лм/Вт), что связано с наличием резонансных линий натрия (589,59 и 589,99 нм) [2] в спектральной области максимальной чувствительности глаза.

Важной особенностью конструкции НЛВД является использование в качестве материала оболочки, ограничивающей натриевый разряд, поликристаллического оксида алюминия (поликора), обладающего высокими рассеивающими и от-

ражающими свойствами. Проведенный цикл конструктивных и технологических исследований позволил нам создать базовый вариант НЛВД с сапфировой оболочкой (рис. 1, а), изготавливаемой по бесштенгельной технологии. Такое техническое решение обеспечило рост светоотдачи лампы на 15 % за счет высокой прозрачности сапфира. Разработанные конструкция и технология серийных НЛВД позволили нам совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе создать первые безртутные источники света на основе импульсно – периодического разряда в парах цезия, которые обеспечивают высокие светоотдачу 80–90 лм/Вт и индекс цветопередачи $Ra = 80$.

Высокочастотные ячейки. Известно, что в качестве источников реперных линий для стандартов частоты применяются резонансное излучение изотопов рубидия и цезия. До настоящего времени в качестве материала оболочки ВЧ ячеек использовалось стекло С55-2, которое не устойчиво к агрессивному воздействию паров щелочных металлов. Нами создан вариант конструкции на базе сапфировой трубы с впаиваемыми полированными сапфировыми окнами (рис. 1, б), что позволило поднять ресурс таких ламп с 500 до 5000 часов непрерывной работы. Использование в качестве плазмообразующей среды пары различных щелочных металлов дает возможность расширить область применения такой конструк-

ции ВЧ ячейки, например, в прецизионных магнито-кардиографах и магнито-энцефалографах, способных регистрировать сверхслабые электромагнитные поля органов человека, (мозга, сердца, мышц и т. д.). Проведенные совместно с институтом ядерной физики МГУ исследования по наработке калиевой ячейки показали снижение интенсивности резонансной линии К на 1 % через 3,5 тыс. часов, что достаточно для применения этих разрядных приборов в гироскопах для авиации, автомобилестроения и т. д.



а



б



в



з

Рисунок 1 – Фото разработанных ламп с сапфировой оболочкой: НЛВД (а), ВЧ-ячейки стандартов частоты (б), импульсный источник УФ излучения (в), короткодуговая лампа СВД (з)

Импульсные источники УФ-излучения.

В настоящее время широкое распространение получила разработанная в ООО «Мелитга» оптико-плазменная технология обеззараживания воздуха и поверхностей на основе высокоинтенсивного УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп с кварцевой оболочкой [4]. Особенностью импульсного разряда в ксеноне является высокий энерговклад в плазму (более 100 Дж) при короткой длительности импульса тока (менее 100 мкс). При эксплуатации в указанных режимах происходит резкий рост температуры плазмы, приводящий к испарению внутренней поверхности кварцевой оболочки и, как следствие, к снижению пропускания материала колбы. Данное явление связано с незначительной температурой кипения

кварцевого стекла $T_{кип.к} = 2230$ °С. Сапфир обладает более высокой $T_{кип.с} = 3500$ °С, что позволяет ожидать более высокого срока службы импульсной ксеноновой лампы. Испытания созданных нами опытных образцов (рис. 1, в) подтвердили перспективность применения сапфира в качестве материала оболочки. При работе в разрядном контуре ($C = 60$ мкФ, $U_n = 1,37$ кВ) нами достигнуто снижение интенсивности УФ-излучения на 30 % после прохождения $5 \cdot 10^6$ импульсов тока в сравнении с 10^5 импульсов у газоразрядной лампы с кварцевой оболочкой.

Газоразрядные ксеноновые лампы сверхвысокого давления (СВД). Точечные источники излучения, использующие разряд в инертных газах СВД (6–20 атм.), ограниченный электродами, широко востребованы в прожекторных системах, промышленном оборудовании и специальной технике [5]. В связи с расширяющейся областью применения таких ламп возрастают технические требования к механической прочности и компактности таких источников излучения. Широко распространенные лампы с кварцевой шаровой колбой и фольговыми тоководами (рис. 1, з) уже не удовлетворяют указанным требованиям [2, 4, 5]. Устранить данный недостаток позволяет замена кварца на сапфир. Проведенные нами исследования показали, что в процессе работы лампы СВД происходит рост давления ксенона в 2–3 раза, достигая величины 60 атм. при температуре колбы 600 °С. Такие жесткие условия работы газоразрядной лампы потребовали поиска способов повышения механической прочности сапфировой колбы, в результате которых были выработаны технические требования к корундовой трубе и технологии изготовления лампы. Изготовленные ксеноновые лампы СВД с сапфировой оболочкой (рис. 1, з) прошли полный цикл испытаний на устойчивость механических и климатических факторов в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.414.1-97 и доказали правомочность выбранных технических решений.

Литература

1. Добровинская, Е. Р. Энциклопедия сапфира / Е. Р. Добровинская, Л. А. Литвинов, В. В. Пищик. – Харьков: Институт монокристаллов, 2004. – 508 с
2. Рохлин, Г. Н. Разрядные источники света / Г. Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
3. Исследование светоотдачи безртутной цезиевой лампы в режиме импульсно-периодического разряда / С. В. Гавриш [и др.] // Прикладная физика. – 2019. – № 5. – С. 78–84.
4. Импульсные источники света / И. С. Маршак, А. С. Дойников, В. П. Жильцов [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
5. Басов, Ю. Г. Специальная светотехника / Ю. Г. Басов, А. Г. Раквиашвили, В. В. Сысун. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. – 414 с.

УДК 621.375

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Юран С.И.¹, Зарипов М.Р.², Вершинин М.Н.¹

¹Ижевская государственная сельскохозяйственная академия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен способ воздействия низкоинтенсивным когерентным излучением на различные растительные организмы. Описаны основные преимущества использования лазерного излучения и свойства, которые приобретает растительный организм после проведения стимуляции лазерным излучением. Рассмотрены источники лазерного излучения и их эффективность использования для облучения различных растительных организмов, а также некоторые факторы, которые имеют немаловажное значение при проведении процесса лазерной стимуляции.

Ключевые слова: лазерная стимуляция, газовый лазер, полупроводниковый лазер, растительные организмы.

INFLUENCE OF LASER RADIATION ON PLANTS

Yuran S.¹, Zaripov M.², Vershinin M.¹

¹Izhevsk State Agricultural Academy

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The method of low-intensity coherent radiation exposure to various plant organisms. The main advantages of using laser radiation, the properties that a plant organism acquires after laser exposure are described. The sources of laser radiation and the effectiveness of their use for plant organisms are considered. Some factors that are important in the process of laser stimulation are also taken into account.

Key words: laser stimulation, gas laser, semiconductor laser, plant organisms.

Адрес для переписки: Вершинин М.Н., ул. Студенческая, 11, Ижевск 426069, Российская Федерация
e-mail: verchinin777@mail.ru

Изучению эффекта лазерной стимуляции посвящено множество работ. Источником лазерного излучения в них выступают гелий-неоновый лазер, как более распространенный вид газовых лазеров, и полупроводниковый лазер. Авторами исследований отмечается, что при кратковременном воздействии лазерного излучения видимой области спектра наблюдается повышение функциональной активности различных сельскохозяйственных культур [1–3]. В результате такой обработки происходит стимуляция роста и развития растений.

В последних исследованиях облучение излучением полупроводниковых лазеров набирает все большее распространение. Данные лазеры характеризуются меньшими размерами и большей приспособленностью к автоматизированным процессам. Использование полупроводниковых лазеров является перспективным направлением в области лазерной стимуляции растительных клеток, но при этом имеется ряд особенностей, которые в ряде случаев ставят под сомнение использование полупроводникового лазера.

Эффективность использования гелий-неонового лазера представлена во множестве исследований на различных растительных организмах [1]. В тоже время, существует ряд исследований, где использование полупроводникового лазера для облучения тех же растительных организмов дало существенно меньший результат, или результат

практически не отличался от контрольного образца [2]. Несмотря на этот факт, лазерная стимуляция широко применяется для стимуляции биологических объектов.

Проведенные авторами исследования также показали эффективность использования полупроводникового лазера при проведении предпосевной обработки семян пшеницы [3]. Для проведения сравнения результатов исследования представлен график энергии роста в зависимости от времени облучения в начале и к концу периода наблюдения (рис. 1 и 2). Исследование проводилось на разработанном лабораторном стенде для выявления влияния лазерной стимуляции на растительные организмы [3, 4]. Лабораторный стенд позволяет использовать для облучения источники с разным спектральным составом, с регулированием мощности излучения и времени облучения.

При подведении итогов проведенного исследования можно отметить, что:

1. При воздействии на криптохром, чей спектр поглощения лежит в диапазоне 350–500 нм, квазимонохроматическим лазерным излучением с длиной волны 405 нм, наблюдался «гормообразующий эффект» практически при всех экспозициях облучения на протяжении всего периода наблюдения (25 дней). При одностороннем облучении энергия прорастания была сопоставима с контрольным образцом.

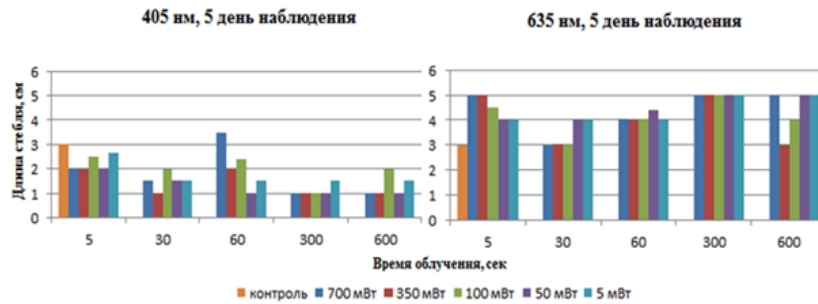


Рисунок 1 – График роста пшеницы на 5 день наблюдения

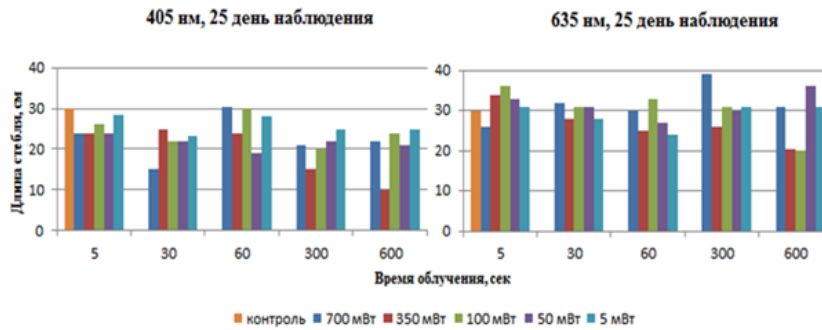


Рисунок 2 – График роста пшеницы на 25 день наблюдения

2. При воздействии на фитохром, чей спектр поглощения лежит в диапазоне 600–690 нм, квазимонохроматическим лазерным излучением с длиной волны 635 нм, эффект лазерной стимуляции наблюдался при всех экспозициях облучения на протяжении всего периода наблюдения (25 дней). При 5 минутном облучении эффект лазерной стимуляции был выражен ярче остальных.

В рамках исследования также было выявлено влияние мощности лазерного излучения на физиологическую активность растительных клеток. Так, в первые дни исследования видно, что эффект лазерной стимуляции при использовании больших мощностей излучения (700 и 350 мВт) практически не отличается от малых (5 и 50 мВт). Данная ситуация, с незначительным перевесом в сторону больших мощностей, сохраняется и к концу срока проведения исследования. С экономической точки зрения, эффективность облучения складывается исходя из затрат энергии на проведение облучения. Таким образом получа-

ется, что затраты на облучение растительных организмов излучением в 100 мВт в течение 5 секунд много раз меньше, чем при излучении в 700 и 50 мВт в течение 300 и 600 секунд соответственно.

Литература

1. Будаговский, А. В. Фотоника в сельском хозяйстве и природопользовании / А. В. Будаговский, О.Н. Будаговская / Лазер-Информ. – 2017. – № 5. – С. 16–19.
2. Harnandez, M. Stimulation of three biological systems using low level laser radiation / M. Harnandez, A. Michtchenko // RISCE Revista Internacional de Sistemas Computacionales y Electronicos. – 2011. – № 83. – P. 30–33.
3. Юран, С. И. Влияние монохроматического излучения различного спектрального состава на растительные клетки / С. И. Юран, М. Р. Зарипов, М. Н. Вершинин // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 7 (122). – С. 16–25.
4. Устройство для предпосевной обработки семян : пат. РФ 2764194 / Юран С. И., Вершинин М. Н., Зарипов М. Р. – Оpubл. 14.01.2022.

УДК 621.327.7: 621.791.3

СПАИ САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК С МЕТАЛЛАМИ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМПАХ

Гавриш С.В., Пучнина С.В., Ушаков Р.М.

ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»

Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассмотрены основы конструирования вакуумноплотных цилиндрических спаев сапфира, выращенного по методу А.В. Степанова, с ниобием и коваром (сплавом 29НК). Подробно описаны технические требования к спаям, даны рекомендации по подготовке монокристаллической трубы к пайке, обоснованы выбор материалов каждого из соединений и температурные режимы пайки. Выявлены основные механизмы взаимодействия материалов в процессе нагрева и даны рекомендации по использованию в изделиях плазменной электроники.

Ключевые слова: сапфир, спай, стеклокерамический припой, металлизация, активный металл.

JUNCTIONS OF SAPPHIRE SHELLS WITH METALS IN GAS-DISCHARGE LAMPS

Gavrish S., Puchnina S., Ushakov R.

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd,

Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. The paper considers the basics of designing vacuum-dense cylindrical junctions of sapphire grown by the method of A.V. Stepanov with niobium and kovar (alloy 29NC). The technical requirements for the solders are described in detail, recommendations are given on the preparation of a single-crystal pipe for soldering, the choice of materials for each of the joints and the temperature conditions of soldering are justified. The main mechanisms of interaction of materials in the heating process are revealed and recommendations on the use of plasma electronics in products are given.

Keywords: sapphire, solder, glass-ceramic solder, metallization, active metal.

Адрес для переписки: Гавриш С.В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, Москва 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

Актуальность работы. На сегодняшний день цилиндрические соединения сапфира (корунда) с металлами получили промышленную реализацию в конструктивном исполнении импульсных источников излучения (газоразрядных ламп) с двумя оболочками [1]. Импульсная лампа представляет собой цилиндрическую разрядную сапфировую трубку с парами щелочных металлов, которая коаксиально размещена в наружной термостатирующей цилиндрической корундовой оболочке (колбе), заполненной газом-теплоносителем. В описанной конструкции газоразрядной лампы плазма формируется между электродными узлами, материал и конструкция которых должны обеспечивать химическую стойкость к агрессивному воздействию паров щелочных металлов и герметичность соединения (спая, гермоввода, токового ввода) с сапфировой трубкой при рабочих температурах до 700 °С. Токовые вводы во внешнюю колбу должны сохранять герметичность соединения при рабочих температурах до 400 °С в условиях механических и климатических воздействий, флуктуации температуры охлаждающего потока воздуха от минус 60°С до плюс 80 °С. Такие условия эксплуатации газоразрядной лампы приводят к высоким продольным и поперечным градиентам температуры в стенке трубки и, как следствие, термоупругим напряжениям в корундовых оболочках и соединениях металла с сапфиром.

В настоящее время разработаны и освоены в производстве спаи сапфира с металлами, обладающие термостойкостью и герметичностью в указанных условиях эксплуатации. (рис. 1). Ниже кратко приведены основные результаты исследований, позволившие добиться высокой надежности соединений сапфира с металлами.



Рисунок 1 – Фото цилиндрических спаев сапфира с ниобием и коваром

Общие сведения о подготовке сапфира к пайке. Наиболее распространенным и сравнительно дешевым способом получения сапфировой трубы является метод направленной кристаллизации, разработанный А.В. Степановым. При этом выращенный монокристалл обладает несколькими видами дефектов, которые подробно рассмотрены в [2]. Поэтому входной контроль перед

пайкой по описанным в [3] методикам должен исключить отклонение геометрической оси от кристаллографического направления $[000\bar{1}]$ более чем на 10° , наличие более 5 блоков в поперечном сечении стенки, разориентацию соседних блоков на угол более 15° , термоупругие напряжения выше значений 200 МПа, присутствие непрозрачных дефектов, пузырей, ростовых сдвигов [2]. Частично перечисленные дефекты устраняются механической обработкой сапфира (шлифовка и полировка) и высокотемпературным ожогом при температуре около 1800°C [2–3].

Спай сапфира с ниобием. Данное соединение сапфира устойчиво в условиях воздействия паров щелочных металлов и других агрессивных сред. По разработанному нами алгоритму термодинамического анализа были рассчитаны температурные зависимости энергии Гиббса оксидов металлов, участвующих в образовании спае. В результате установлено, что в качестве основного металла необходимо использовать ниобий с присадкой циркония (до 1,2 вес. %), а для герметизирующего припоя пригодна система на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$ с добавлением окислов MgO , BaO .

При определении температуры пайки нами сделаны следующие заключения:

– температура плавления припоя определяется соотношением компонентов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$;

– при нагреве ниобия в металле происходят процессы рекристаллизации, приводящие к миграции образовавшихся зерен вплоть до нарушения герметичности тонкостенной детали.

Таким образом, необходимо определить такое соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO}$, чтобы при расплавлении припоя свести к минимуму рекристаллизацию ниобия. Нами установлено, что введение в состав сплава примеси циркония, при нагреве снижает миграцию зерен вплоть до температуры 1800°C . При этом в стеклокерамическом припое при нагреве до 1380°C наблюдается гомогенизация состава, а при 1480°C начинается формирование кристаллических зон, что повышает напряжение в спае. Поэтому в итоге наших исследований выбран состав стеклоцемента в следующих весовых соотношениях $\text{MgO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}=6:49:45$ с температурой пайки 1440°C .

Важным фактором получения надежности спае является устранение огранки внутренней поверхности сапфировой трубы путем механической шлифовки на определенные глубину по диаметру и расстояние от торцевой поверхности, где наблюдается скопление механических дефектов (сколы, микротрещины и т.д.)

Спай сапфир – ковар (сплав 29 НК). В настоящее время широкое распространение получили две технологии спаивания металлов с сапфиром, а

именно, применение для пайки активных металлов (титан, цирконий) или металлизационных покрытий на основе молибдено-марганцевых или вольфрамовых паст. Перечисленные методы обладают рядом недостатков и сложностью технологии для промышленного производства [4]. Поэтому нами предложено техническое решение, основанное на комбинации указанных технологий [4]. Суть разработанного метода спаивания заключается в нанесении магнетронным напылением на поверхность сапфира последовательно активного металла (титана) от одного магнетрона с последующим напылением смеси меди с титаном при работе двух магнетронов. Дальнейшая пайка с коваром производится по нанесенной металлизации расплавлением припоя в виде медной фольги. Надежность предложенного способа обусловлена следующими процессами, происходящими в спае:

– при температуре 1000°C происходит взаимодействие слоя титана с сапфиром и расплавление смеси медь-титан, которая активизирует реакции взаимодействия титана с сапфиром и обеспечивает надежное смачивание основного медного припоя;

– при температуре 1125°C происходит расплавление основного припоя и взаимодействие с коваром и расплавом металлизации.

Микрорентгеновский анализ распределения интенсивности K_α линий титана и меди позволил нам выявить наличие в спае интерметаллидов, образующихся при температурах выше 1200°C , что в итоге явилось температурным ограничением разработанной технологии.

В заключении необходимо отметить, что разработанные технологии были успешно опробованы для спаев перечисленных металлов с сапфировыми пластинами, штабиками, сложными корундовыми профилями.

Литература

1. Гавриш, С. В. Импульсные газоразрядные источники ИК излучения для оптико – электронных систем / С. В. Гавриш, В. В. Логинов, С. В. Пучнина // Успехи прикладной физики. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 333–348.
2. Браиловский, В. Б. Дефекты структуры и диагностика характеристик труб из профилированных монокристаллов корунда для оболочек импульсных разрядных ламп ИК излучения / В. Б. Браиловский, С. В. Гавриш, А. Е. Рыжков // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 2. – С. 49–59.
3. Пучнина, С. В. Влияние свойств сапфира на надежность его цилиндрических спаев в приборах плазменной электроники / С. В. Пучнина // Сварочное производство. – 2021. – № 8. – С. 40–45.
2. Gavrish, S. V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals / S. V. Gavrish, V. V. Loguinov, S. V. Puchnina // Welding International. – 2015. – Vol. 29, № 1. – P. 78–80.

УДК 621.3.038.825.2

Er,Yb:YGdSiO₅ – ПЕРСПЕКТИВНАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5-1,6 МКМ

**Горбаченя К.Н.¹, Ясюкевич А.С.¹, Кисель В.Э.¹, Толстик Н.А.², Тараченко А.А.¹,
Шишко Т.А.¹, Гоман В.И.¹, Павловский Л.К.¹, Орлович В.А.³,
Волкова Е.А.⁴, Япаскурт В.О.⁴, Кулешов Н.В.¹**

¹НИИЦ оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Норвежский Университет науки и технологий
Трондхейм, Норвегия

³Институт физики имени Б.И. Степанова
Минск, Республика Беларусь

⁴Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Проведены исследования спектроскопических характеристик кристалла Er,Yb:YGdSiO₅ как лазерной среды на область спектра 1,5–1,6 мкм. Показано, что кристалл является перспективным для использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, иттрий-гадолиниевый силикат, спектроскопические свойства.

Er,Yb:YGdSiO₅ AS A PROMISING GAIN MEDIUM FOR DIODE-PUMPED LASERS EMITTING AT THE SPECTRAL RANGE OF 1.5-1.6 μm

**Gorbachenya K.¹, Yasukevich A.¹, Tolstik N.², Kisel V.¹, Tarachenko A.¹, Shishko T.¹,
Homan V.¹, Pavlovskiy L.¹, Orlovich V.³, Volkova E.⁴, Yapaskurt V.⁴, Kuleshov N.¹**

¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²Norwegian University of Science and Technology
Trondheim, Norway

³B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

⁴Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract. The investigation of spectroscopic properties of Er,Yb:YGdSiO₅ crystal as a gain medium for eye-safe lasers was carried out. It was shown that Er,Yb:YGdSiO₅ crystal is a promising material for lasers emitting at the spectral range of 1.5–1.6 μm.

Key words: erbium, ytterbium, yttrium-gadolinium silicate, spectroscopic properties.

Адрес для переписки: Горбаченя К.Н., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Твердотельные эрбиевые лазеры, излучающие в спектральной области 1,5–1,6 мкм, представляют большой интерес для различных практических применений. Для создания лазеров с высокими выходными мощностями на сегодняшний день актуальной задачей является поиск новых кристаллических активных лазерных сред [1]. В данной работе представлены результаты исследований спектроскопических свойств кристалла иттрий-гадолиниевого силиката, легированного ионами эрбия и иттербия – Er³⁺, Yb³⁺:YGdSiO₅ (YGSO) как перспективной активной среды лазеров условно безопасного для органов зрения спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

Кристалл Er,Yb:YGSO является двусосным анизотропным кристаллом и принадлежит к моноклинной сингонии C2/c с параметрами элементарной ячейки $a = 1,2547$ нм, $b = 0,6750$ нм,

$c = 1,0477$ нм, $\beta = 102,7933^\circ$ [2]. Элементный состав монокристалла изучался с помощью энергодисперсионного спектрометра, установленного на базе растрового электронного микроскопа с вольфрамовым термоэмиссионным катодом. По результатам определено, что массовое содержание ионов Er³⁺ и Yb³⁺ в кристалле составило 0,3 мас.% и 3,5 мас.%, соответственно. Внешний вид выращенного кристалла Er,Yb:YGSO приведен на рис. 1.

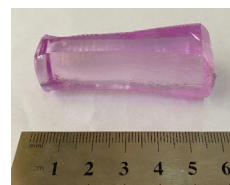


Рисунок 1 – Кристалл Er,Yb:YGSO

Для исследования спектроскопических свойств кристаллов использовались плоско-параллельные пластинки толщиной $2,0 \pm 0,1$ мм, ориентированные вдоль кристаллографических осей кристалла a , b , c . Измерение абсорбционных свойств производилось при комнатной температуре на двулучевом спектрофотометре Varian CARY5000 в двух спектральных областях: 850–1050 нм и 1400–1650 нм. Кристалл характеризуется достаточно широкой полосой поглощения с максимумом около 925 нм для поляризации $E//b$ и узкой интенсивной полосой на 976 нм с максимальным сечением поглощения $1,65 \cdot 10^{-20}$ см² для поляризации $E//a$. Полуширина полосы с максимумом на 976 нм составляет около 2 нм. Спектры сечений поглощения в области 1,5 мкм приведены на рис. 2. Максимальное сечение поглощения достигает $2,5 \cdot 10^{-20}$ см² на длине волны 1530 нм.

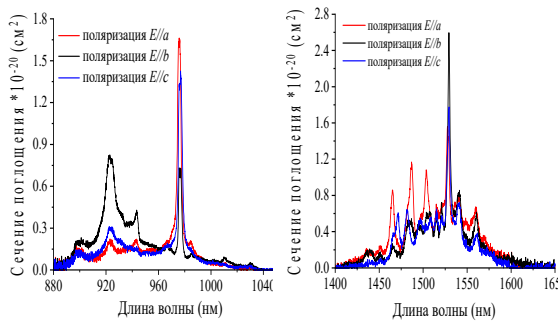


Рисунок 2 – Спектры сечений поглощения кристалла

Целью проведения измерений кинетик люминесценции было определение времени жизни возбужденных состояний $^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$ ионов эрбия. Люминесценция возбуждалась импульсным излучением на длине волны 976 нм. Затухание люминесценции с уровня $^4I_{13/2}$ ионов эрбия носило моноэкспоненциальный характер с характерным временем $7,2 \pm 0,5$ мс. Затухание люминесценции с $^4I_{11/2}$ уровня также имело экспоненциальный характер, и время жизни этого уровня составило 20 ± 1 мкс. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия оценивалась по сокращению времени жизни уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристалле YGSO, легированном ионами Er и Yb, относительно соответствующего времени жизни в кристалле, легированном только ионами иттербия. Для исследуемого кристалла эффективность переноса энергии $Yb \rightarrow Er$ составила 91 %.

Спектры сечений вынужденного излучения для перехода $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов эрбия, определенные по модифицированному методу соответствия приведены на рис. 3. Наиболее интенсивный максимум с сечением вынужденного излучения $1,2 \cdot 10^{-20}$ см² наблюдается для поляризации $E//b$ на длине волны 1530 нм. На рис. 4 приведены спектры коэффициента усиления для различных значений относительной населенности β уровня $^4I_{13/2}$ для поляризации $E//b$.

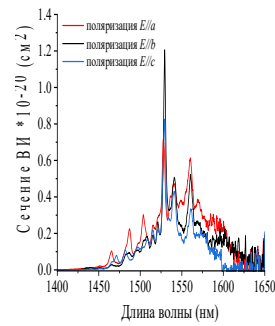


Рисунок 3 – Спектры сечений вынужденного излучения

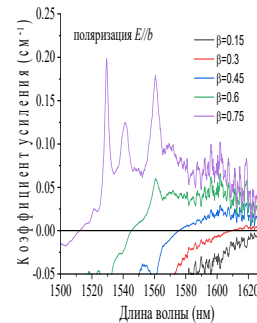


Рисунок 4 – Спектр коэффициент усиления для поляризации $E//b$

Поглощение из возбужденного состояния в области 1,5 мкм (переход $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ионов эрбия) является одним из самых существенных каналов энергетических потерь в эрбий-содержащих средах. В случае спектрального перекрытия полосы поглощения из возбужденного состояния с полосой усиления, эффективность лазерной генерации в спектральной области 1500–1600 нм может существенно снизиться. Спектр поглощения из возбужденного состояния кристалла Er, Yb:YGSO приведен на рис. 5. Спектр показывает, что полосы поглощения из возбужденного состояния лежат в области 1625–1800 нм (участок отрицательных значений) и практически не перекрываются с полосами усиления в области 1500–1600 нм.

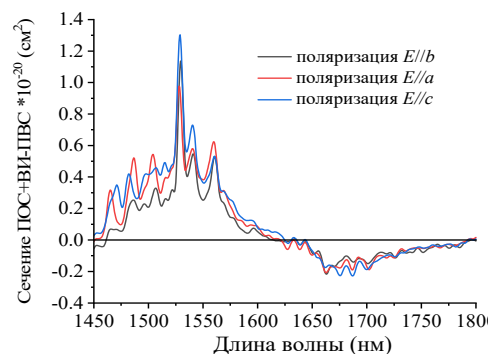


Рисунок 5 – Спектры поглощения из возбужденного состояния кристалла Er, Yb:YGSO

В данной работе проведены систематические исследования спектроскопических характеристик

кристалла Er,Yb:YGSO как лазерной среды на область спектра 1,5–1,6 мкм. Полученные результаты показали, что кристалл Er,Yb:YGSO является перспективным для использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

Литература

1. Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser / K. N. Gorbachenya [et al.] // Optics Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 918–921.
2. Tunable and efficient diode-pumped Yb³⁺:GYSO laser / J. Du [et al.]. – Opt. Express. – 2006. – Vol. 14. – P. 3333.

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 621.373.8

ПОСЛОЙНОЕ СКАНИРОВАНИЕ РЖАВЧИНЫ С МИКРОНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ СЛОЯ ДВУХИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ ЛАЭМС Ермалицкая К.Ф.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан метод послойного качественного и количественного исследования ржавчины на изделиях из сплавов на основе железа методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии с помощью спектрометра ЛАЭМС. Использование метода отрицательной расфокусировки для снижения плотности мощности лазерного излучения и, соответственно, толщины испаряемого слоя, дает возможность проводить сканирования ржавчины с микронным разрешением. Двухимпульсное лазерное возбуждение обеспечивает высокое отношение сигнал/шум, а, следовательно, и чувствительность определения концентрации примесей при снижении плотности мощности.

Ключевые слова: лазерная абляция, двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, послойное сканирование.

LAYERWISE RUST SCANNING WITH MICRON RESOLUTION BY DOUBLE-PULSE LASER SPECTROMETER LAEMS Ermalitskaia K.

*Belorussian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. New method for layerwise qualitative and quantitative rust analysis on surface of iron-based alloys using double pulse laser atomic emission spectrometer LAEMS is suggested. Using negative defocusing of laser beam technique for lowering of flux density and thickness of evaporated layer one can perform depth scanning of rust with micron resolution. Double pulse laser excitation provides high signal/noise ratio and consequently high sensitivity of impurities concentration definition.

Key words: laser ablation, double pulse laser atomic emission spectroscopy, layerwise scanning.

*Адрес для переписки: Ермалицкая К.Ф., ул. Бобруйская, 5, Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: ermaliaskaia@gmail.com*

Введение. Одним из наиболее важных преимуществ лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии является возможность проведения исследования без предварительной подготовки поверхности, так как программным обеспечением спектрометров предусмотрена возможность проводить предварительную абляцию поверхности без регистрации аналитических спектров. В большинстве случаев эмпирически определяется число таких «предимпульсов», чтобы с одной стороны исключить из рассмотрения данные относящиеся к окислам, нитридам и загрязнениям на поверхности, а с другой стороны не проводить абляцию со дна кратера, длина которого превышает его диаметр. В противном случае, абляционная плазма будет конденсироваться на стенках, не достигая поверхности и не давая адекватного вклада в аналитический сигнал.

В большинстве случаев, соединения на поверхности образца, являются лишь «досадным препятствием» при проведении исследования.

Однако, анализ ржавчины, патины и других молекулярных соединений дает возможность судить как о качестве сплава, так и об условиях хранения образца. Особый интерес представляет в этом случае ржавчина, так как, по сравнению с патиной, она более неоднородна и может проникать вглубь образца на неограниченную глубину.

Целью данной работы является создание аналитической методики послойного исследования с микронным разрешением ржавчины методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре ЛАЭМС с управлением толщиной испаряемого слоя с помощью отрицательной расфокусировки.

Лазерный спектрометр ЛАЭМС. Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭМС (производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭМС:

- источник возбуждения плазмы – двухимпульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой, с частотой повторения импульсов $f_{л} = 10$ Гц и длиной волны $\lambda = 1064$ нм;

- длительность импульсов $t_{л} \approx 10$ нс;

- межимпульсный интервал $\Delta t = 0$ –100 мкс (шаг 1 мкс);

- диапазон анализируемых длин волн $\Delta\lambda = 260$ –760 нм;

- энергия лазерного импульса $E_{имп} = 10$ –100 мДж.

Специализированное программное обеспечение спектрометра ЛАЭМС позволяет задавать следующие параметры:

- режим одиночных (временной сдвиг между импульсами 0 мкс, т.е. оба импульса воздействуют на поверхность образца одновременно) и сдвоенных лазерных импульсов (временной интервал между импульсами может изменяться в пределах от 1 до 100 мкс с шагом 1 мкс). Следует отметить что при использовании ЛАЭМС переход от одиночных к сдвоенным лазерным импульсам происходит без изменения суммарной энергии и мощности излучения;

- количество импульсов в точку, при этом можно дополнительно задавать количество импульсов преобжига – импульсов, которые воздействуют на поверхность перед основными, но спектр от них не регистрируется. Использование импульсов преобжига необходимо при исследовании образцов, поверхность которых покрыта видимыми загрязнениями, окислами, ржавчиной, патиной;

- энергию сдвоенных лазерных импульсов и частоту их следования;

- программное обеспечение позволяет перемещать предметный столик с закрепленным образцом в двух плоскостях (вверх-вниз, влево-вправо). Режим «микроскоп» в совокупности со светодиодной подсветкой и прицельным лазером позволяет точно определить метод воздействия лазерного излучения на образец, что является необходимым при исследовании готовых промышленных изделий, предметов искусства и артефактов, ювелирных изделий, образцов, размеры которых не превышают нескольких мм.

Деструкцию поверхности образца контролировали с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4.

Исследование ржавчины с помощью лазерного спектрометра ЛАЭМС. На первом этапе были экспериментально определены оптимальные параметры лазерных импульсов, обеспечивающие максимальную интенсивность примесей в железных сплавах: энергия сдвоенных лазерных импульсов – 100 мДж, временной интервал между сдвоенными импульсами – 8 мкс (по сравнению с интервалом 0 мкс, интенсивность спектральных линий хрома возрастала в 12 раз, никеля в 8 раз,

марганца в 9 раз). С помощью микроинтерферометра Линника была определена толщина слоя железных сплавов, испаряемого лазерными импульсами с данными параметрами – она составила 3 мкм. Однако, такой шаг послойного сканирования может быть слишком большим для исследования ржавчины по глубине. Для снижения толщины испаряемого лазерными импульсами слоя было предложено использовать метод расфокусировки, который уменьшает глубину абляции за счет снижения плотности мощности на поверхности (рис. 1) [2]. Расфокусировка лазерного луча осуществляется механическим смещением образца относительно точки фокуса лазерного луча (навстречу лучу – отрицательная, от точки фокуса – положительная расфокусировка).



Рисунок 1 – Схематическое изображение различных схем фокусировки лазерного луча относительно поверхности объекта

Анализ зарегистрированных спектров совместно с контролем деструкции поверхности с помощью микроинтерферометра Линника, показал, что как при отрицательной, так и при положительной расфокусировке существует возможность снизить толщину испаряемого слоя до 1 мкм, при этом относительная интенсивность спектральных линий хрома, никеля, марганца превышает уровень фона в 5 раз ($\Delta f = 5$ см). При дальнейшем сдвиге образца от точки фокуса можно достичь и субмикронного разрешения слоя, однако при этом интенсивность спектральных линий примесей будет находиться на уровне фона и исследование можно проводить исключительно по спектральным линиям железа. В таком случае, невозможно проводить количественный анализ ржавчины, однако появляется возможность изучить неоднородность гидроксида железа – периодическое падение интенсивности спектральных линий будет указывать на наличие в ржавчине пор и каверн, послойное же сканирование позволит оценить их размеры и количество.

Результаты полученные при положительной и отрицательной расфокусировке совпадают, однако для создания аналитической методики была выбрана отрицательная, чтобы избежать возможного формирования «лазерной искры», когда абляционная плазма может вступать во взаимодействие с лазерным лучом в точке фокуса при положительной расфокусировке. Следует отметить, что такая ситуация не наблюдалась ни в одном из экспериментов.

Для проведения исследования были выбраны три образца с различной степенью покрытия поверхности ржавчиной: 1 – визуально тонкий слой гидроксида железа с небольшими пятнами серого цвета, относящиеся к неповрежденному металлу; 2 – визуально толстый однородный слой рыже-коричневого цвета; 3 – неоднородная рыже-коричневая поверхность с ярко выраженным рельефом.

Толщина ржавчины для каждого образца определялась по изменению относительной интенсивности спектральных линий хрома, никеля, марганца и железа при послойной двухимпульсной лазерной абляции. При достижении неповрежденного сплава интенсивность спектральных линий всех элементов увеличивалась и становилась более стабильной (колебания не превышали 3 %). Динамика интенсивности спектральной линии марганца 482 нм по глубине для всех трех образцов приведена на рис. 2.

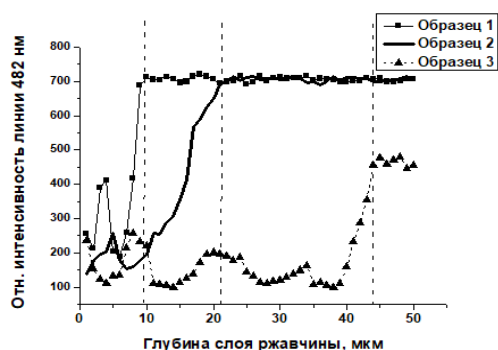


Рисунок 2 – Динамика интенсивности спектральной линии марганца 482 нм по глубине ржавчины для трех исследованных образцов с различной степенью поражения

Из приведенных на рис. 2 данных можно сделать вывод от толщине слоя гидроксида железа на поверхности исследуемых образцов: 9–10 мкм, 22–23 мкм, 44–45 мкм. Следует однако отметить, что в третьем образце толщина ржавчины как визуально, так и измеренная в результате эксперимента существенно отличались – от 40 до 61 мкм. При увеличении толщины ржавчины возрастает и ее неоднородность – появляются полости размером от 2 мкм при толщине ржавчины 10 мкм, до 5 мкм при глубине 50 мкм.

Были разработаны методики послойного количественного анализа образцов методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре ЛАЭС. Для этого было проведена регистрация спектров стандартных образцов сталей и чугунов при аналогичных параметрах сдвоенных лазерных импульсов, построены градуировочные графики, рассчитаны коэффициенты корреляции (они оказались в диапазоне 0,82–0,87 для различных спектральных линий хрома, никеля, марганца).

Проведенный количественный анализ показал, что содержание хрома, никеля и марганца суще-

ственно снижено в ржавчине, по сравнению с основным материалом образца – в среднем в 7 раз для Mn, в 4 раза для Cr, в 3,5 для Ni. Однако концентрация элементов в ржавчине не является постоянной – наибольшее отличие имеет место на поверхности и оно практически исчезает с глубиной по мере приближения к неповрежденному металлу.

Для более детального исследования размеров образующихся полостей внутри ржавчины было проведено послойное двухимпульсное лазерное сканирование с отрицательной расфокусировкой с $\Delta f = 8$ мкм. Толщина слоя вещества, испаряемого при этом за 1 сдвоенный импульс составила 0,3 мкм. При этом плотности мощности лазерного излучения оказывается недостаточно для получения хорошего значения сигнал/шум для спектральных линий хрома, никеля и марганца, и анализ следует проводить на основании динамики интенсивности спектральных линий железа, что делает невозможным создание методики количественного анализа ржавчины с субмикронным разрешением слоя.

Проведенное исследование ржавчины по глубине при отрицательной расфокусировке с $\Delta f = 8$ мкм показало, что при толщине гидроксида железа 50 мкм полости в ржавчине начинают появляться уже на расстоянии 4 мкм от неповрежденного металла, однако на таком расстоянии их размер не превышает 1–1,5 мкм. При движении от чистого металла размер полостей возрастает до 5 мкм по глубине и продольного размера 10–15 мкм. При этом увеличивается и количество образующихся полостей.

Двухимпульсный лазерный атомно-эмиссионный метод анализа с микронным разрешением может быть использован не только для исследования ржавчины, но и при анализе патины и окалины. Однако в каждом конкретном случае необходимо определять толщины испаряемого сдвоенными лазерными импульсами металла-основы.

Выводы. Разработанная методика качественного и количественного послойного сканирования ржавчины на спектрометре ЛАЭС, позволила исследовать стальные образцы с различной степенью повреждения поверхности с микронным разрешением. Определено, что при визуальном значительном слое гидроксида железа – ржавчина неоднородна, как по структуре – внутри есть полости размер которых увеличивается до 5 мкм при толщине повреждения – 50–70 мкм, так и по содержанию примесей – концентрация марганца снижается в 7 раз, хрома в 4 раза, никеля в 3,5 раза по сравнению с исходным образцом.

Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой. / Е. С. Воропай [и др.] // ЖПС. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.
2. Ермалицкая, К.Ф. Управление плотностью мощности лазерного излучения при двухимпульсной лазерной абляции металлов / К. Ф. Ермалицкая // Мат. 14 научн.-технич. конфер. «Приборостроение 2021». – 2021.

УДК 681.785

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В КОЛЬЦЕВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

Зарипов М.Р.¹, Алексеев В.А.², Офицерова А.В.², Антонов Е.А.¹, Куприянов А.А.²

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается проблема повышения степени автономности лазерных систем путем увеличения эффективности их работы. Предлагается ее решение за счет применения систем синхронного сложения пучков на кольцевой линии задержки. Описываются структура доработанной экспериментальной установки на многомодовых волоконных компонентах и приводятся результаты измерений в виде осциллограмм.

Ключевые слова: сложение пучков, оптическая линия задержки, экспериментальная установка, автономная лазерная система.

EXPERIMENTAL SETUP FOR RESEARCH OF LASER BEAM COMBINING POSSIBILITY IN RING FIBER DELAY LINE

Zaripov M.¹, Alekseev V.², Oficerova A.¹, Antonov E.¹, Kuprijanov A.²

¹Udmurt Federal

Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The problem of increasing the degree of autonomy of laser systems by increasing their effectiveness is considered. Its solution is proposed by the use of systems for synchronous beam combining on a ring delay line. The structure of the modified experimental setup based on multimode fiber components is described, and the measurement results in the form of oscillograms are presented.

Key words: beam combining, optical delay line, experimental setup, autonomous laser system.

Адрес для переписки: Зарипов М.Р., 426067, ул. им. Т. Барамзиной, 34, Ижевск, Российская Федерация
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

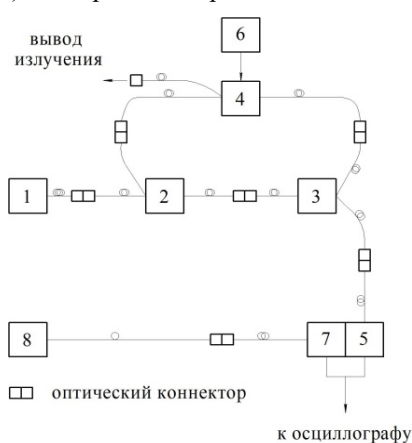
К настоящему моменту актуальным остается создание портативных, мобильных лазерных систем с автономным энергопитанием. Вместе с тем возникает задача повышения степени автономности таких лазерных систем. Данная задача, связанная с увеличением времени их работы, в течение которого им не потребуются подачи дополнительной энергии, может быть решена двумя основными путями: созданием энергоемких источников питания, или повышением эффективности работы лазерных систем. Причем решение во втором направлении предполагает увеличение выходной мощности или выходной энергии импульса лазерного излучения с сохранением прежней степени автономности всей системы в целом без возрастания потребляемой энергии. Если к настоящему времени проблема повышения энергетических характеристик лазерного источника уже давно стала решенной [1–3], то сохранение при этом прежней степени автономности лазерной системы или, тем более, ее увеличение за счет применения оптических усилителей, существующих методов компрессии лазерных импульсов или разработанных схем когерентного и некогерентного сложения пучков от нескольких лазерных источников по прежнему остаются сомнительными.

Повышение выходных энергии или мощности лазерного источника без увеличения потребляемой им энергии питания возможны за счет применения систем синхронного сложения лазерных пучков, построенных на основе одиночной кольцевой или нескольких прямых линий оптической задержки [4]. Они позволяют перераспределять энергию лазерного излучения в последовательности импульсов и, сохраняя на прежнем уровне среднюю мощность подключаемого к ним лазерного источника, увеличивать энергию и пиковую мощность одного импульса лазерного излучения в этой последовательности в несколько раз – пропорционально количеству прямых линий задержки или числу циркулирующих излучения в кольцевой линии задержки.

На практике наиболее простой при изготовлении стала система синхронного сложения лазерных пучков с одиночной кольцевой волоконной линией задержки, реализованной на основе соединенных оптически волоконно-оптического коммутатора ВОК 1×2 и волоконно-оптического сумматора ВОС 2×1. Она не требует использования множества линий задержки, длины которых должны точно подгоняться для обеспечения синхронного сложения лазерных пучков.

Для изготовления установки использовались недорогие коммерчески доступные электромеханические ВОК 1×2, которые не обладали высоким быстродействием (минимальное время переключения применяемого в установке ВОК 1×2 – не более 3 мс). Поэтому реализованная система не может быть использована напрямую для измерения энергетической эффективности, но ее можно применить для оценки возможности сложения пучков в кольцевой линии задержки.

В настоящем сообщении авторами статьи предлагается доработанная версия (рис. 1) рассмотренной ранее установки [5], которая состоит из основного лазерного источника 1, многомодового ВОС 2×1 2, многомодового волоконного сплиттера 1×2 3 с делением пучка 95:5, ВОК 1×2 4, основного фотоприемного устройства (ФПУ-1) 5, блока управления 6, опорного фотоприемного устройства (ФПУ-2) 7, опорного лазера 8.



1 – основной лазерный источник; 2 – ВОС 2×1; 3 – волоконный сплиттер 95:5; 4 – ВОК 1×2; 5 – ФПУ-1; 6 – блок управления; 7 – ФПУ-2; 8 – опорный лазер

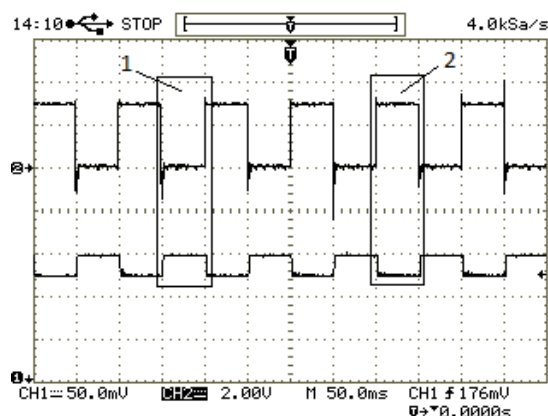
Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

ФПУ-1 и ФПУ-2 связаны электрически и сигнал U_m , регистрируемый от них с помощью осциллографа, представляет собой разность сигнала U_r , формируемого ФПУ-2 (опорный сигнал), и сигнала U_o , формируемого ФПУ-1 (основной сигнал). Причем регистрируемый осциллографом сигнал будет инвертирован по амплитуде.

Установка для проведения измерений помещалась в оптическую камеру, представлявшую собой помещение с гладкими черными стенками, в которое исключалось попадание внешнего фонового излучения.

Были получены первые результаты измерений в виде осциллограмм временных зависимостей мощностей излучения пучка, циркулирующего в волоконном «кольце» (сигнал циркуляции), и пучка, проходящего через участок «кольца» без циркуляции (сигнал вывода).

Проанализируем одну из зарегистрированных осциллограмм (рис. 2).



1 – временной участок сигнала вывода; 2 – временной участок сигнала циркуляции

Нижняя осциллограмма – сигнал U_m (первый канал); верхняя осциллограмма – сигнал переключения V_+ (второй канал)

Рисунок 2 – Снимок экрана осциллографа

Нижний уровень сигнала переключения V_+ соответствует оптическому сигналу вывода величины U_{m1} , а верхний уровень – сигналу циркуляции величиной U_{m2} . Учитывая, что $U_{m1} > U_{m2}$, а оптические сигналы, зарегистрированные осциллографом, инвертированы, можно сказать, что мощность P_1 оптического сигнала, формируемого без сложения пучков основного лазера, меньше мощности P_2 оптического сигнала, формируемого путем сложения пучков в волоконном «кольце». При этом расчетное отношение P_2/P_1 достигает до 1,1. Это демонстрирует возможность сложения лазерных пучков в системах с кольцевой волоконной линией задержки.

Литература

- Хазанов, Е. А. Нелинейное сжатие сверхмощных лазерных импульсов: компрессия после компрессора / Е. А. Хазанов, С. Ю. Миронов, Ж. Муру // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189. – С. 1173–1200.
- Islam, M. N. Raman amplifiers for telecommunications / M. N. Islam // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics – 2002. – Vol. 8, № 3. – P. 548–559.
- Brignon, A. Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. – 509 p.
- Энергоэффективный источник импульсного лазерного излучения на кольцевой линии задержки / В. А. Алексеев [и др.] // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 7. – С. 12–17.
- Экспериментальная установка для сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки / М. Р. Зарипов [и др.] // Приборостроение-2021: материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 17-19 ноября 2021 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 415–416.

УДК 621.311.001.57

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Збышинская М.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Review of block diagram stand-alone photovoltaic systems and their main elements. The most important elements of stand-alone photovoltaic system are identified. A Structural active scheme of stand-alone photovoltaic system with a hybrid battery-capacitive energy storage device is being developed and presented. This scheme is designed for ensuring voltage stability under conditions of an impulsive load and an alternating-current voltage generated by a solar panel.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая система, гибридный накопитель энергии, аккумуляторно-емкостной накопитель, суперконденсатор, активная схема автономной фотоэлектрической установки.

BLOCK DIAGRAM STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Zbyshinskaya M.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Обзор структурных схем автономных фотоэлектрических энергетических установок и их основных элементов. Выявляются наиболее важные элементы фотоэлектрических энергетических установок. Разрабатывается и приводится структурная активная схема автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем электроэнергии для обеспечения стабильности напряжения в условиях импульсного характера нагрузки и переменного характера напряжения генерируемой солнечной панелью.

Key words: stand-alone photovoltaic system, hybrid energy storage device, battery-capacitive energy storage device, supercapacitor, active scheme of of stand-alone photovoltaic system.

Адрес для переписки: Збышинская М.Е., ул. П. Бровки, 6, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: 10mash@mail.ru

Автономная фотоэлектрическая система (АФЭС) обычно состоит из фотоэлектрических преобразователей, аккумуляторных батарей (АБ), инвертора (при необходимости), и контроллера заряда аккумуляторных батарей. Соединение данных элементов системы производится согласно структурной схеме АФЭС, представленной на рис. 1.

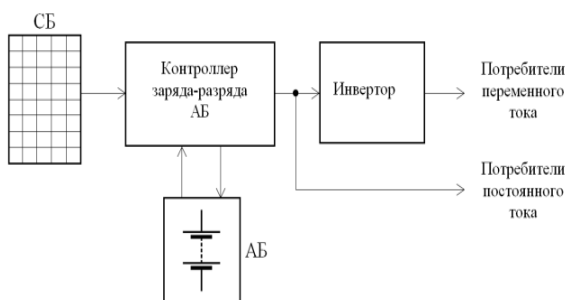


Рисунок 1 – Структурная схема автономной фотоэлектрической системы

В зависимости от места расположения и условий эксплуатации в состав фотоэлектрической системы могут вводиться дополнительные источники энергии, например, ветрогенераторы и/или дизель- или бензогенераторы.

В АФЭС важную роль играют накопители энергии. Идея гибридизации состоит в сочетании аккумуляторов и суперконденсаторов в одном

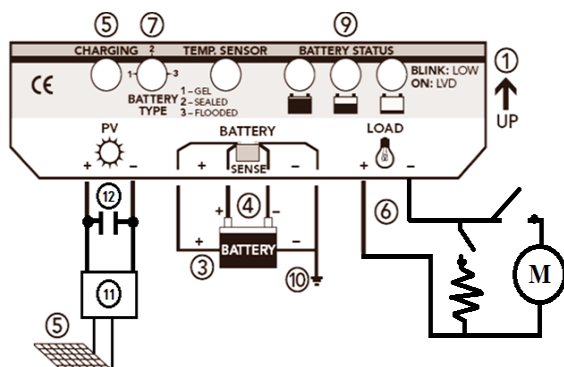
накопителе, что может дать существенный эффект. Суперконденсатор компенсирует возмущения тока с длительностью до нескольких первых минут. При более длительных возмущениях (минуты, часы) в действие включается аккумуляторный накопитель. А наличие в составе накопителя суперконденсаторной части (при параллельном с аккумулятором включении) позволяет сглаживать фронты импульсов тока и напряжения, обеспечивая тем самым снижение мгновенной мощности, отдаваемой или получаемой аккумуляторной частью накопителя. При этом экономический эффект заключается также и в продлении срока службы аккумуляторной батареи [1].

Структура и состав АФЭС в основном зависят от условий эксплуатации, а также требований конечного потребителя. В настоящее время известны различные методы определения структуры, параметров и характеристик АФЭС. В основном это методики или автоматические программы расчета.

На взгляд авторов статьи одной из наиболее удачных структурных схем является – активная схема. АФЭС с гибридным накопителем, упрощенная структурная схема приведена на рис. 2.

Солнечная батарея с мощностью 100 Вт состоит из двух модулей МС-50, соединенных параллельно. Ток короткого замыкания панели был равен 6,4 А, напряжение холостого хода – 17 В.

Аккумуляторная часть гибридного накопителя – гелевая свинцово-кислотная 12 В батареей с зарядной емкостью 11 А·ч, а емкостная часть – это блок суперконденсаторов с электростатической емкостью 80 Ф с номинальным напряжением 15,5 В. Регулятором заряда и разряда аккумуляторного накопителя служит 12 В контроллер ProStar-15 с функцией ШИМ-модуляции зарядного тока. Нагрузкой при стационарном разряде накопителя служил реостат с сопротивлением 12 Ом, в качестве иммитатора импульсного разряда был использован автомобильный воздушный компрессор [2].



- 1 – Цоколь контроллера ProStar – 15; 2 – допустимая сила тока – 15 А; 3 – подключение АБ 12 В, 11 А·ч; 4 – подключение датчика температуры АБ; 5 – подключение солнечной батареи, подключение регулятора заряда СК, подключение СК; 6 – подключение нагрузки; 7 – установка типа АБ; 8 – автоматическое определение напряжения сети 12 В/24 В; 9 – индикатор степени заряда АБ; 10 – заземление; 11 – шунтовый регулятор заряда СК; 12 – СК

Рисунок 2 – Структурная активная схема автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем электроэнергии

Данная схема позволяет осуществлять различные варианты коммутации ее элементов, а проверка работоспособности осуществляется системой индикации и диагностики контроллера ProStar-15. Защиту солнечной панели и накопителей энергии от токов обратной полярности осу-

ществляют блокирующие диоды Шоттки, максимальное падение напряжение которых не более 0,5 В при прямом токе 10 А, а также их прямом включении. Отсутствие разряда АБ через разряженный СК (которые представляют собой короткозамкнутую нагрузку) правильная работа алгоритма заряда АБ и обеспечение в буферном режиме заряда СК и АБ частей гибридного накопителя энергии при подключении одного или нескольких потребителей энергии – основной момент работоспособности схемы. Буферный режим заряда СК и АБ выполняет функции обеспечения энергоснабжения нагрузки при прерывистом поступлении энергии для заряда накопителя и обеспечение необходимого количества энергии при неравномерном потреблении ее нагрузкой. Временной приоритет заряда в гибридном накопителе следующий: сначала от солнечной батареи заряжается суперконденсаторная часть, далее при достижении напряжения СК выше напряжения аккумуляторной части, осуществляется, управляемый контроллером, заряд АБ. Управление зарядом СК будет осуществляться разработанным шунтовым регулятором.

Для решения задачи обеспечения стабильности напряжения в условиях импульсного характера нагрузки и переменного характера генерируемой солнечной панелью мощности исследована структура и схемотехнические решения автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем энергии. Предложена оригинальная активная схема управления гибридным накопителем. От правильной настройки и режима использования оборудования, управляющего зарядом и разрядом накопителя, зависит производительность всей системы, надежность и срок службы установки.

Литература

1. Автономные солнечные энергетические системы с использованием суперконденсаторов / С. М. Карabanov [и др.] // Вестник РГРТУ. – 2015. – № 54, ч. 2. – С. 137–142.
2. Василевич, В. П. Особенности структуры и схемотехники автономной фотоэлектрической установки с аккумуляторно-емкостным накопителем энергии / В. П. Василевич, М. Е. Збышинская // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 5. – С. 90–98.

УДК: 681.7

ПРИМЕНЕНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО КАНАЛА В СОСТАВЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Киль И.А., Погорелов М.Г.

ФГБОУ «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. В докладе определены преимущества КВИК-диапазона технического зрения для его применения в составе оптико-электронных систем, предназначенных для беспилотных летательных аппаратов, осуществляющих обзор местности и объектов.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, беспилотный летательный аппарат, коротковолновый ИК-диапазон.

APPLICATION OF A SHORT WAVE INFRARED CHANNEL AS A PART OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Kil I., Pogorelov M.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. The report defines the advantages of the short range of technical vision for its use as part of optoelectronic systems designed for unmanned aerial vehicles that survey the terrain and objects.

Key words: optoelectronic systems, unmanned aerial vehicle, shortwave IR range.

Адрес для переписки: Киль И.А., пр. Ленина, 92, Тула 300000, Российская Федерация
e-mail: johnnykia@yandex.ru

В настоящее время постоянно увеличиваются темпы разработки и производства беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Изначально БПЛА изготавливались только для военных задач, но с развитием технологий они нашли свое применение в гражданских целях и участвуют во многих решениях современных проблем. Примеры такого использования: доставка груза, патрулирование территории, наблюдение за объектом, воздушные видео и фото съемки и др.

Основные преимущества БПЛА по сравнению с управляемыми ЛА заключаются в мобильности, габаритах, возможности добраться туда, куда человеку сложно попасть или где опасно находиться для жизни, и удаленном управлении.

Сейчас невозможно представить БПЛА без оснащения оптико-электронными системами (ОЭС). ОЭС открывает множество новых возможностей и упрощает решение поставленных задач.

ОЭС могут иметь как один, так и несколько каналов технического зрения. В их состав, как правило, входят: телевизионный блок, лазерный дальномер, тепловизионный блок с матрицей.

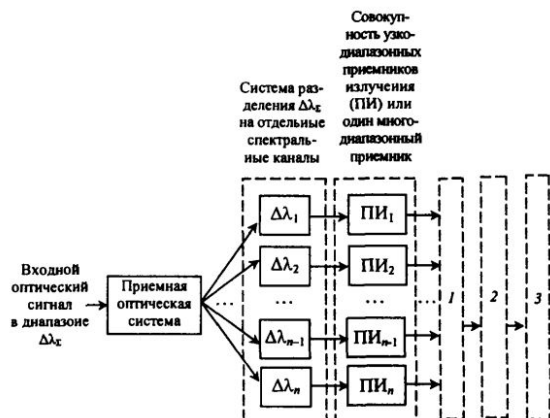
В настоящее время больше всего распространены ИК-системы визуализации. Это объясняется тем, что именно в этом спектральном диапазоне сосредоточена основная часть собственных излучений электромагнитных волн большинства окружающих объектов естественного и искусственного происхождения. Инфракрасное излучение объектов фоно-целевой обстановки содержит информацию о составляющих эти тела веществах и их расположении на местности. Восприятие дан-

ной информации происходит с помощью системы, которая принимает сигналы в инфракрасной области спектра и преобразует их в видимые изображения.

В последнее время помимо широко применяемых «классических» тепловизионных систем с рабочими диапазонами длин волн 3–5 мкм и 8–12 мкм, все большее применение находят системы, работающие в коротковолновом ИК-диапазоне – 0,9–1,7 мкм. В решении гражданских задач такие системы используются, например, для определения влажности, что позволяет узнать степень увлажненности материала; выявление гнилых или испорченных овощей, ягод и фруктов; относительное содержание влаги в растениях. Помимо этого, службы МЧС часто применяют камеры с КВИК диапазоном, чтобы найти очаг возгорания в лесной местности, или человека в условиях затрудненной видимости, например, из-за сильной задымленности. КВИК-диапазоном пользуются во многих других отраслях: в пищевой; сельскохозяйственной; горнодобывающей; деревообрабатывающей; металлургии; автомобильной и легкой промышленности. При наличии в ОЭС нескольких каналов технического зрения (рис. 1), то КВИК-диапазон может применяться как дополнительный информационный канал для повышения помехозащищенности и комплексирования.

В конце 90-х годов XX в. произошел новый этап развития ИК-систем, связанный со значительным совершенствованием матричных приемников излучения (МПИ), которые позволяют реализовывать методы электронного сканирования и

пространственной выборки ИК-изображений. Последним этапом развития явилась разработка новых приборов с зарядовой связью и схем считывания первичной обработки сигнала в отдельном элементе чувствительной матрицы, что позволило создать МПИ высокого разрешения с большим форматом.



1 – электронный блок последовательный или параллельной обработки сигналов, получаемых в отдельных спектральных каналах, 2 – система объединения изображений, 3 – выходное устройство

Рисунок 1 – Структурная схема ОЭС

В докладе будет рассмотрено применение коротковолнового инфракрасного диапазона. КВИК – это общепринятое название электромагнитного излучения в коротковолновом диапазоне волн от 0,9 мкм до 1,7 мкм, но может быть расширен до 0,7–2,5 мкм. Чувствительные матрицы современных МПИ, принимающих коротковолновое излучение, выполнены из кремния или соединения на основе арсенида индия-галлия (InGaAs). Предел чувствительности кремния равен приблизительно 1,0 мкм, а у сенсоров, сделанных из InGaAs захват области от 0,5 до 2,5 мкм. У МПИ на основе InGaAs высокая чувствительность и им не требуется система охлаждения, что уменьшает габариты конструкции приемника и стоимость, увеличивает его надежность. МПИ на основе InGaAs благодаря разделению слоев имеют возможность получать эффект умножения в малых электрических полях и более низкие темновые токи за счет эффекта туннелирования носителей заряда в узкозонном поглощающем слое. Межа-структура позволяет ограничить отдельные элементы матрицы фотодиодов, исключив их взаимное влияние друг на друга.

Стоит отметить, что в отличие от классических тепловизионных приборов, регистрирующих собственное излучение объектов и фонов средневолнового ИК- или длинноволнового ИК-диапазонов, датчики КВИК диапазона регистрируют отраженное от наблюдаемых объектов и фонов излучение естественных и искусственных внешних источников, например, солнечного света или звездного неба, что является основой для обеспечения широкого динамического диапазона, необходимого для формирования высокого энергетического разрешения цели. К числу положительных аспектов, определяющих актуальность развития техники в коротковолновом диапазоне, стоит отнести: высокую чувствительность и способность формировать изображение хорошего качества при сиянии ночного или звездного неба, т.е. возможность использования приборов круглосуточно; наблюдение в условиях пыли, тумана, дыма, ливня и т.д.; способность обнаруживать лазерные сигналы; компактность габаритов прибора и низкое энергопотребление и др.

Датчики и чувствительные элементы в КВИК-камерах работают по аналогии с ПЗС, который представляет собой полупроводниковый элемент, разделенный на элементы в виде матрицы. МПИ преобразует световой поток в электрические сигналы, используемые для дальнейшей обработки с помощью электронных схем. Излучение можно рассматривать как поток элементарных частиц – фотонов. Фотоны, попадая на поверхность полупроводниковых материалов, способны приводить к образованию электронов и дырок. Генерация электронно-дырочных пар под воздействием излучения возможна только в том случае, когда энергии фотона достаточно, чтобы «оторвать» электрон от «родного» ядра и перевести его в зону проводимости.

На данный момент разнообразие ОЭС имеющих КВИК-канал не велико, не смотря на многие положительные стороны и преимущества использования приборов в этом диапазоне. Поэтому развитие и совершенствование таких ОЭС является актуальным.

Литература

1. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники. / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков – М.: Изд. МИИГА и К, 2011. – 84 с.
2. Holst, G. C. Electro-optical imaging system performance. JCD Publishing and SPIE, 2017. – 408 с.

УДК 621.375.826

УСЛОВИЯ И РЕЖИМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ КОРУНДА, АКТИВИРОВАННОГО Ti^{3+} , ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И., Кулешов Н.В.***НИИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы условия и режимы роста кристаллов $Ti^{3+}:Al_2O_3$ с различной концентрацией трехвалентных ионов титана. Измерены спектры поглощения выращенных образцов для π - и σ -состояний поляризации излучения в кристалле.

Ключевые слова: рост кристаллов, спектры поглощения, кристалл, сапфир с титаном, трехвалентные ионы титана.

CONDITIONS AND MODES FOR GROWING Ti^{3+} -activated CORUNDUM CRYSTALS FOR THEIR APPLICATION IN DIODE-PUMPED LASERS**Kisel V., Gorbachenya K., Goman V., Kuleshov N.***¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The growth of Ti:sapphire ($Ti^{3+}:Al_2O_3$) crystals was investigated for different concentration of trivalent titanium ions. Absorption spectra of different samples were measured for π - and σ -light polarizations.

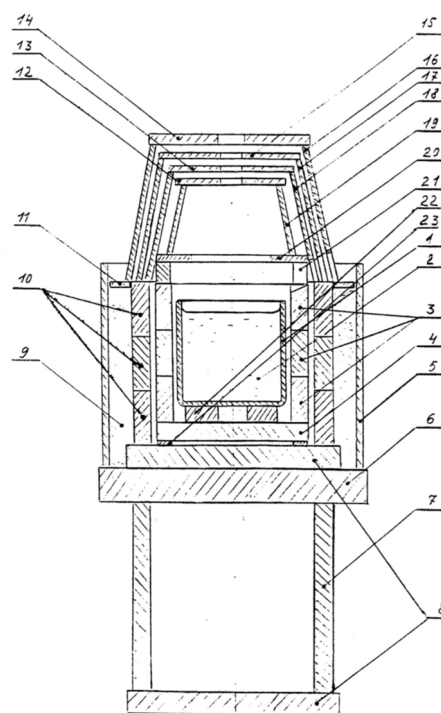
Key words: crystal grows absorption spectra, crystal, Ti^{3+} :sapphire, trivalent titanium ions.

Адрес для переписки: Горбаченя К.Н., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Рост кристаллов осуществлялся по методу Чохральского. Суть метода сводится к тому, что в тигель помещают шихту, по составу соответствующую кристаллам, которые необходимо вырастить. Тигель устанавливают в герметичную камеру, утепляют керамическими трубами и тугоплавкими порошками. К штоку, который закреплен в верхней части камеры, крепится затравка, состав которой аналогичен составу кристалла, который мы хотим вырастить. Для анизотропных кристаллов затравка предварительно ориентируется согласно направлению роста. После чего камера закрывается, герметизируется и заполняется защитным газом (азот, аргон). Для выращивания кристаллов $Ti^{3+}:Al_2O_3$ используются молибденовые тигли. Затравкодержатель представляет собой молибденовый пруток диаметром около 8 мм. Тигель разогревается до температуры плавления шихты. Затем сверху к расплаву в тигле подается вращающаяся затравка кристалла, а при касании расплава происходит вытягивание штока с затравкой вверх и начинается процесс выращивания кристалла.

Затравка центрировалась относительно тигля и утепления с отклонением не более 1 мм, что обеспечивалось последовательным исключением биелий элементов затравочного узла. Согласно тепловой схеме проводилась сборка утепления, чтобы радиальные градиенты в точке затравки были минимальными. Для процесса роста экспериментально подбирались оптимальные конструкции теплового узла.

Схема теплового узла представлена на рис. 1.



- 1 – тигель; 2 – расплав; 3, 4 – труба керамическая;
5 – труба кварцевая; 6 – диск керамический; 7 – труба керамическая; 8 – диск керамический; 9 – вата огнеупорная; 10 – труба керамическая;
11–15, 20 – шайба керамическая; 16–19 – конус керамический; 21 – труба керамическая;
22, 23 – кольцо керамическое

Рисунок 1 – Установка для выращивания монокристаллов $Ti^{3+}:Al_2O_3$ методом вертикального вытягивания

При использовании молибденового тигля в вакууме или в нейтральной атмосфере расплав загрязняется оксидами молибдена, которые входят в состав растущего кристалла, что приводит к снижению оптического качества. Для предотвращения этого в ростовой камере создавалась восстановительная атмосфера, состоящая, например, из нейтрального газа и водорода. Водород предотвращает окисление тигля. Для роста использовалась атмосфера, состоящая из азота и водорода. От объемного соотношения этих газов в камере зависело качество кристаллов, мощность, потребляемая установкой, и скорость вытягивания кристалла. Оптимальный состав газа в объемных долях составлял около 10 % водорода и 90 % азота. Лучшие кристаллы получены при скорости вытягивания 1,5–1,7 мм/час, скорость вращения – 55–65 об/мин.

Для контроля спектральных характеристик выращенных кристаллов изготавливались плоскопараллельные пластинки апертурой 5×5 мм² и толщиной около 2 мм. Регистрация спектров поглощения проводилась в поляризованном свете на спектрофотометре фирмы Varian модель CARY 5000D. Спектральное разрешение составляло около 0,4 нм. Спектр поглощения кристалла $Ti^{3+}:Al_2O_3$ с максимальной концентрацией Ti^{3+} представлен на рис. 2.

Для кристаллов с максимальным содержанием трехвалентных ионов титана параметр качества, определяется как соотношение коэффициентов поглощения на длине волны накачки (490 нм) и длине волны генерации (800 нм) составлял от 50 до 53.

С уменьшением содержания трехвалентных ионов титана в два раза наблюдалось увеличение параметра качества до 100–110. Спектры поглощения представлены на рис. 3.

Для диодной накачки наибольший интерес представляют кристаллы с максимальным содержанием ионов Ti^{3+} в кристалле, т. к. обеспечивают

максимальное поглощение излучения накачки при минимальной толщине активного элемента и, одновременно, максимальное качество модового перекрытия между пучком излучения генерации пучком излучения накачки, имеющим более низкое пространственное качество.

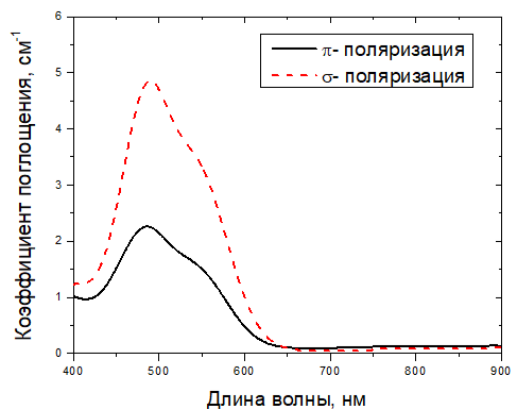


Рисунок 2 – Спектр поглощения концентрированного кристалла $Ti^{3+}:Al_2O_3$

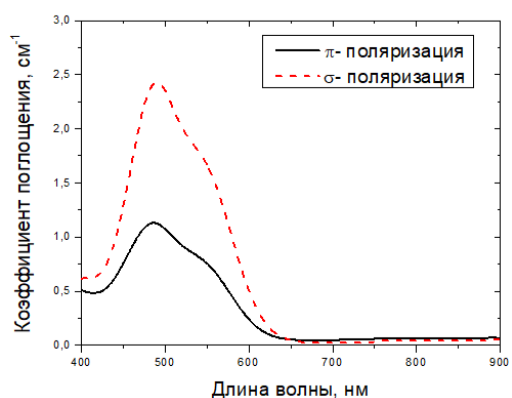


Рисунок 3 – Спектр поглощения кристалла $Ti^{3+}:Al_2O_3$

УДК 621.375.826

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ В КРИСТАЛЛАХ Yb:KY(WO₄)₂ НА ВЕЛИЧИНУ НЕАКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ

Кисель В.Э.¹, Горбаченя К.Н.¹, Гурецкий С.А.², Кулешов Н.В.¹¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ²НПЦ НАН РБ по материаловедению

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены особенности спектров поглощения кристаллов двойных вольфраматов с высоким содержанием трехвалентных ионов иттербия. Исследована зависимость величины неактивных потерь в спектральной области генерации ионов Yb³⁺ в зависимости от содержания активных центров в кристалле. **Ключевые слова:** кристаллы двойных вольфраматов, трехвалентные ионы иттербия, спектры поглощения.

EFFECT OF THE CONCENTRATION OF TRIVALENT YTTERBIUM IONS IN YB:KY(WO₄)₂ CRYSTALS ON THE INACTIVE OPTICAL LOSS IN THE SPECTRAL REGION OF GENERATION

Kisel V.¹, Gorbachenya K.¹, Guretsky S.², Kuleshov N.¹¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University²SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Absorption spectra features of highly Yb³⁺-doped double tungstate crystals were studied. The values of passive losses in the lasing spectral range of Yb³⁺ ions were studied in dependence on Yb³⁺ content in the crystal. **Key words:** double tungstate crystals, trivalent ytterbium ions, absorption spectra.

Адрес для переписки: Горбаченя К.Н., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Кристаллы калий-иттриевого (KY(WO₄)₂) вольфрамата относятся к ряду двойных калий-редкоземельных вольфраматов. Кристаллы являются моноклинными с пространственной группой симметрии C_{2h}^6-C2/c . Параметры элементарной кристаллической ячейки: $a = 8,05 \text{ \AA}$, $b = 10,33 \text{ \AA}$, $c = 7,54 \text{ \AA}$, $\beta = 94$. Ионы Yb³⁺ замещают в данных соединениях ионы Y³⁺ в позиции с локальной симметрией C₂. Образцы монокристаллов были выращены путем кристаллизации из раствора в расплаве K₂WO₄+WO₃ модифицированным методом Чохральского. В качестве шихты использовался окисел редкоземельного элемента. Были получены образцы высокого оптического качества с содержанием ионов Yb³⁺ от 0,2 ат.% до 100 ат.% по отношению к ионам Y³⁺. С оптической точки зрения кристаллы являются двусосными. Главные значения показателей преломления кристалла Yb³⁺:KY(WO₄)₂ на длине волны 1030 нм составляют: $n_g = 2,017$, $n_m = 1,982$, $n_p = 1,946$ [1]. Теплопроводность кристаллов составляет около 3,5 Вт/м·К⁻¹ вдоль оси оптической индикатрисы N_g , 3,0 Вт/м·К⁻¹ вдоль N_m и 2,5 Вт/м·К⁻¹ вдоль N_p [2]

Спектры поглощения измерялись для кристалла Yb:KY(WO₄)₂ с содержанием ионов иттербия от 0,2 ат.% до 100 ат.% в области 850–1100 нм, для трех поляризаций излучения (соответствующих осям индикатрисы показателя преломления кристалла N_m , N_p , N_g) при комнатной

температуре. Измерения проводились на спектрофотометре CARY 5000D, спектральное разрешение составляло около 0,4 нм.

Для записи спектров поглощения в широкой спектральной области изготавливались плоскопараллельные пластинки толщиной от 0,1 мм до 5 мм для образцов с различной концентрацией ионов иттербия для того, чтобы поглощение в максимуме полосы находилось в пределах динамического диапазона работы спектрофотометра. Максимальное поглощение не должно превышать 3 единиц оптической плотности во всем диапазоне регистрации. Для оценки величины серых неактивных потерь в спектральной области генерации изготавливались образцы одинаковой толщины, достаточной для корректной оценки величины коэффициента поглощения на краях полосы. В нашем случае использовались кристаллы толщиной около 10 мм. В поглощении для поляризации $E//N_m$ наблюдается сильная полоса с максимумом на длине волны 981,2 нм и шириной на полувысоте около 3,5 нм. При изменении концентрации трехвалентных ионов иттербия в кристаллах наблюдалось пропорциональное изменению концентрации изменение коэффициентов поглощения. Измеренные спектры поглощения для тонких образцов, записанные в широкой спектральной области представлены на рис. 1.

Измеренные спектры поглощения для образцов толщиной около 10 мм проводились в непо-

ляризованном свете. Спектры записанные в спектральной области генерации 1020–1100 нм представлены на рис. 2.

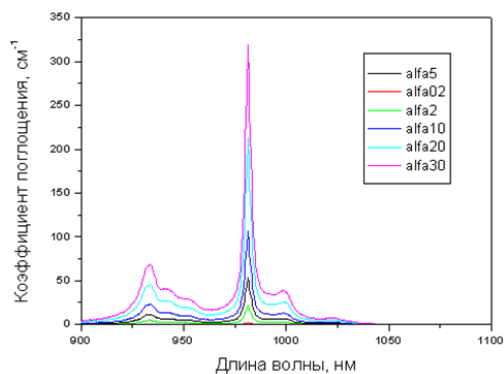


Рисунок 1 – Поляризованные спектры поглощения кристалла $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ ($x = 0,02–0,3$) в спектральной области 900–1100 нм

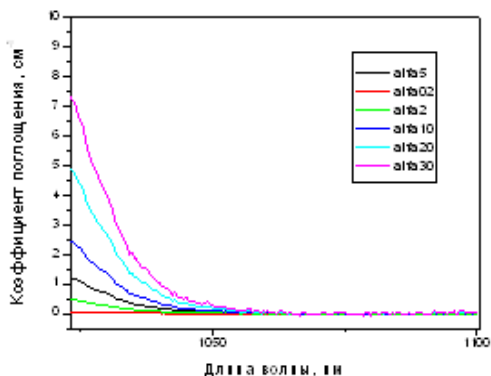


Рисунок 2 – Спектры поглощения кристалла $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ ($x = 0,02–0,3$) в спектральной области 1020–1100 нм

Из проведенных измерений определено, что потери на краю полосы поглощения для всех исследованных кристаллов находятся на уровне шумов спектрофотометра, т. е. не наблюдается роста серых неактивных потерь в спектральной области генерации с ростом концентрации трехвалентных ионов иттербия, что свидетельствует об отсутствии потерь связанных с рассеянием излучения на дефектах в кристаллах калий-иттриевого вольфрамата и свидетельствует о высоком качестве полученных кристаллов в широком диапазоне концентраций активных центров, что хорошо согласуется с измерениями времени жизни возбужденного состояния $^2F_{5/2}$. Измерения проводились

с учетом эффекта перепоглощения с использованием порошков кристаллов в глицерине. С уменьшением весовой концентрации порошка в глицерине, начиная с определенного содержания порошка в суспензии, время жизни возбужденного состояния ионов иттербия оставалось постоянным, что свидетельствовало об устранении влияния эффектов перепоглощения на измеренное значение времени жизни возбужденного состояния трехвалентных ионов иттербия. Зависимость времени затухания люминесценции для образцов $Yb(0,2\text{ат.}\%):KY(WO_4)_2$ и $Yb(100\text{ат.}\%):KY(WO_4)_2$ представлено на рис. 3.

Видно, что при изменении концентрации от 0,2 ат.% до самоактивированного кристалла $KYb(WO_4)_2$ время жизни верхнего лазерного состояния $^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} остается постоянным, что свидетельствует об отсутствии эффектов концентрационного тушения люминесценции в кристаллах калий-иттриевого вольфрамата и подтверждает отсутствие дефектов в исследованных образцах кристаллов с различной концентрацией активных центров.

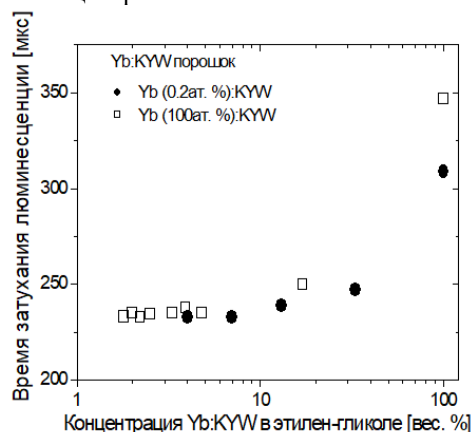


Рисунок 3 – Зависимость времени затухания люминесценции в порошке кристалла $Yb:KYW$ от весовой концентрации порошка в этиленгликоле

Литература

1. Crystal growth, optical and spectroscopic characterisation of monoclinic $KY(WO_4)_2$ co-doped with Er^{3+} and Yb^{3+} / X. Mateos [et al.] // Optical Materials. – 2006. – Vol. 28, № 4. – P. 423–431.
2. Biswal, S. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate / S. Biswal, S. P. O'Connor, S. R. Bowman // Appl. Opt. – 2005. – Vol. 44, № 15. – P. 3093–3097.

УДК 681.7.023.72

ОБРАБОТКА КОНИЧЕСКИХ ЛИНЗ**Козерук А.С.¹, Диас Гонсалес Р.О.^{1,2}, Кузнецик В.О.¹, Али-заде Э.Р.¹, Шевченко В.¹, Якубович Т.С.¹**¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь²Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо
Мерида, Венесуэла

Аннотация. Рассмотрена схема обработки конических поверхностей посредством их притирания к плоскому инструменту и предложено техническое решение для реализации такой обработки. Разработана математическая модель закономерностей съема припуска с конической детали плоским инструментом. Получена формула для расчета модуля скорости скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности, реализующая инженерные методы управления формообразованием конических изделий без проведения предварительных трудоемких экспериментальных исследований.

Ключевые слова: коническая поверхность, плоский инструмент, свободное притирание, параметры обработки.

PROCESSING OF CONICAL LENSES**Kozeruk A.¹, Diaz Gonzalez R.^{1,2}, Kuznechik V.¹, Ali-zadeh E.¹, Shevchenko V.¹, Yakubovich T.¹**¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus²University Polytechnic Institute of Santiago Marinho
Merida, Venezuela

Abstract. The scheme of processing conical surfaces by grinding them to a flat tool is considered and a technical solution for the implementation of such processing is proposed. Using the created device allows implementing the group method of forming conical parts with a deviation of the generatrix of the cone from straightness of not more than ± 0.00012 mm. A mathematical model of the patterns of removal of stock from a conical part with a flat tool is developed. A formula is obtained for calculating the modulus of the sliding velocity at any point on the processed conical surface, which implements engineering methods for controlling the shaping of conical parts without conducting preliminary labor-intensive experimental studies.

Key words: conical part, flat tool, free grinding, processing parameters.

Адрес для переписки: Козерук А.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kozeruk@bntu.by

В настоящее время конические линзы изготавливают поштучно вручную посредством перемещения по образующей вращающейся конической заготовки плоского круглого инструмента с лункой в центре. В лунку помещают шаровой наконечник удерживаемого в руке поводка. Благодаря шаровому соединению поводка с инструментом последний совершает, наряду с переносным, относительное движение по образующей конуса. Обработка непроизводительна, причем ее результат полностью зависит от опыта и интуиции рабочего. Поэтому разработка технологии групповой обработки оптических конических деталей с применением инженерных методов управления процессом формообразования конических поверхностей плоским инструментом является актуальной научно-технической проблемой.

Устройство (рис. 1) содержит шпиндель базового станка 1, инструмент 2, угольник 3, деталь 4, привод вращательного движения деталей 5, вал привода возвратно-вращательного перемещения деталей 6.

Для компенсации колебаний инструмента 20 в горизонтальной плоскости, обусловленных биением шпинделя станка, служат компенсационные муфты 7 и 17.

Процесс обработки включает несколько этапов шлифования абразивной суспензией электрокорунда белого с постепенным уменьшением ее фракции, позволяющим достичь шероховатости $R_a \leq 0,04$ мкм, и операцию полирования водной суспензией окиси церия, обеспечивающей шероховатость $R_z \leq 0,05$ мкм.

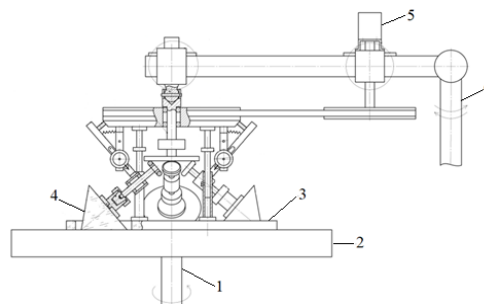


Рисунок 1 – Схема устройства для обработки образующей конических линз при наружной их ориентации

Предлагается обработка оптических деталей с конической поверхностью в условиях свободного их притирания к инструменту в виде планшайбы [1, 2]. Схема такой обработки приведена на рис. 2, а. Здесь возвратно-вращательное движение стойки 1

базового шлифовально-полировального станка мод. ЗШП-350 через выходное звено исполнительного механизма (штангу) 2 и поводок 3 преобразуется в колебательное движение планшайбы 4 вместе с коническими деталями 5 относительно инструмента 6, а вращение последнего сообщает, благодаря наличию сил трения, относительное вращение деталям, которые в результате совершают сложное движение по рабочей поверхности инструмента.

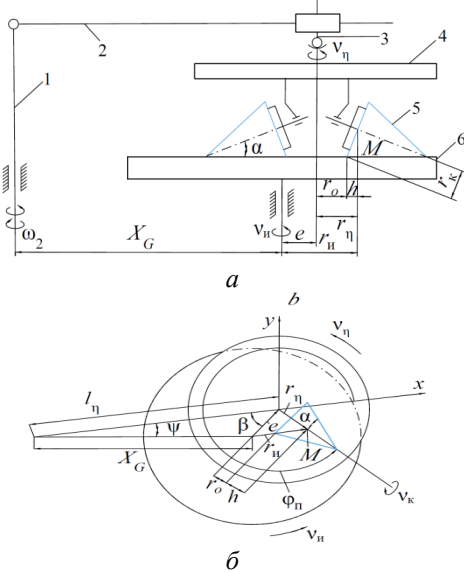


Рисунок 2 – Схема обработки деталей с коническими поверхностями (а) и размерная цепь ее рабочей зоны (б)

Из анализа рассматриваемой схемы обработки конических поверхностей следует (рис. 2, б), что скорость скольжения v в произвольной точке M детали выражается векторным соотношением:

$$\vec{\omega}_и = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_и \end{pmatrix}; \quad \vec{\omega}_п = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_п \end{pmatrix}; \quad \vec{\omega}_к = \begin{pmatrix} \omega_д \cos \alpha \cos \varphi_п \\ \omega_д \cos \alpha \sin \varphi_п \\ \omega_и \sin \alpha \end{pmatrix}; \quad \vec{\psi} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix};$$

$$\vec{r}_п = \begin{pmatrix} r_п \cos \theta_п \\ r_п \sin \theta_п \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{e} = \begin{pmatrix} e \cos \beta \\ e \sin \beta \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{r}_д = \begin{pmatrix} r_д \sin \alpha \cos \theta_п \\ r_д \sin \alpha \sin \theta_п \\ -r_д \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Используя записанные проекции и выполнив соответствующие преобразования, проекции скорости скольжения v на оси системы координат XYZ согласно соотношению (1) запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\omega_и(r_и \sin \varphi_п + e \sin \beta) + (\omega_п r_п + \omega_д r_д) \sin \varphi_п, \\ v_y &= \omega_и(r_и \sin \varphi_п + e \cos \beta) - (\omega_п r_п + \omega_д r_д) \sin \varphi_п - \dot{\psi} l_п, \\ v_z &= 0, \end{aligned} \right\} (3)$$

где $\varphi_п$ – угол поворота планшайбы 4 относительно оси X ; $\beta = \arccos \frac{l_п^2 + e^2 - X_G^2}{2l_п e}$ – угол между осевой линией штанги 2 и прямой, проходящей через ось симметрии инструмента 6 и планшайбы 4.

Используя уравнения (3), по формуле

$$\vec{v} = \vec{v}_и - \vec{v}_п - \vec{v}_к - \vec{v}_\psi, \quad (1)$$

в правой части которого записаны векторы линейных скоростей вращательных движений инструмента 6 $v_и$, планшайбы 4 $v_п$, конуса 5 $v_к$ и возвратно-вращательное перемещение штанги 2 v_ψ относительно оси симметрии стойки 1. В нашем случае эти скорости имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \vec{v}_и &= \vec{\omega}_и \times \vec{r}_и; \quad \vec{v}_п = \vec{\omega}_п \times \vec{r}_п \\ \vec{v}_к &= \vec{\omega}_к \times \vec{r}_к; \quad \vec{v}_\psi = \vec{\psi} \times \vec{l}_п \end{aligned} \right\} (2)$$

где $\vec{\omega}_и, \vec{\omega}_п, \vec{\omega}_к$ и $\vec{r}_и = \vec{e} + \vec{r}_п, \vec{r}_п, \vec{r}_к$ – векторы угловых скоростей инструмента, планшайбы, конуса и радиус-векторы рассматриваемой точки M относительно их оси симметрии соответственно; $l_п$ – расстояние между осями симметрии поводка 3 и стойки 1; $e = \sqrt{l_п^2 + X_G^2} - 2X_G l_п \cos \psi$ – текущее значение расстояния между осями инструмента и планшайбы; X_G – расстояние между осями вращения стойки 1 и инструмента 6; ψ – угол поворота штанги 2 от исходного положения; $\dot{\psi}$ – угловая скорость возвратно-вращательного движения штанги 2.

Закон изменения $\dot{\psi}$ определяется типом исполнительного механизма. В рассматриваемом устройстве в качестве последнего применяется четырехзвенник. Для него, как показано в [3], $\dot{\psi} = \omega_2 i_{42}$, где ω_2 – угловая скорость входного звена исполнительного механизма станка, а i_{42} – кинематическая передаточная функция этого механизма.

Запишем проекции векторов, входящих в уравнения (2), на оси системы координат XYZ , начало которой находится на оси вращения планшайбы 4, а ось X совпадает с осевой линией штанги 2:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (4)$$

можно определить модуль скорости скольжения в любой точке обрабатываемой конической поверхности.

Литература

1. Устройство для обработки деталей с коническими поверхностями: пат. РБ 17104 / А. С. Козерук [и др.]. – Оpubл. 01.30.2013.
2. Устройство для групповой обработки деталей с коническими поверхностями: пат. РБ 21163 / А. С. Козерук [и др.]. – Оpubл. 03.28.2017.
3. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ – ЮНИТИ, 1997. – 176 с.

УДК 681.5.08

МАТРИЦА РЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКЕ

Кравченко В.М., Конойко А.И., Кузьмицкая А.С., Малютина-Бронская В.В.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе отражены результаты работы по исследованию разработанной матрицы микрорезонаторов Фабри-Перо, функционирующей на основе термооптического эффекта. В ходе изучения данной системы были определены основные рабочие параметры и сделаны выводы о возможности ее применения в тепловизионной технике.

Ключевые слова: термооптический преобразователь, инфракрасное излучение, спектральные характеристики, методика измерения.

STUDY OF THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF THE THERMOPTICAL CONVERTER BASED ON A FABRY-PEROT MICRORESONATOR MATRIX

Kravchenko V., Konoiko A., Kuzmitskaya H., Malyutina-Bronskaya V.

SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology"
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This paper reflects the results of the study of the developed array of Fabry-Perot microresonators, which operates on the basis of the thermo-optical effect. During the study of this system, the main operating parameters were determined and conclusions were drawn about the possibility of its application in thermal imaging technology.

Key words: thermo-optical converter, infrared radiation, spectral characteristics, measurement method.

Адрес для переписки: Кузьмицкая А.С., пр. Логойский, 22/1-207, Минск 220090, Республика Беларусь
e-mail: mickevichhanna@gmail.com

Введение. В настоящее время активно развивается направление тепловизионной техники и инфракрасных систем (ИК-систем) в связи с их широким применением в различных областях науки и техники. В ряде случаев выделяют две группы ИК-систем. К одной из которых относят системы, предназначенные для визуализации инфракрасных изображений (тепловизионные системы), а к другой – системы, служащие для радиометрических измерений. Каждая из этих систем обладает своими техническими требованиями по пространственному и временному разрешению, отношению сигнал/шум, пороговой чувствительности и другим. Среди промышленно выпускаемых ИК-систем наибольшее распространение получили неохлаждаемые тепловые многоэлементные фотоприемники излучения на основе микроболометрических матриц.

В настоящей работе представлены результаты разработки матрицы неохлаждаемой ИК-системы на базе микрорезонатора Фабри-Перо, функционирующего на основе термооптического эффекта, для его возможного применения в тепловизионной технике длинноволнового ИК-диапазона (от 8 до 14 мкм).

Материалы и методы исследования. В основе разработанной ИК-системы лежит матрица перестраиваемых теплоизолированных между собой микрорезонаторов Фабри-Перо (пикселей) на теплопроводной и прозрачной для оптического излучения подложке. Структурная схема пикселя и внешний вид матрицы микрорезонаторов Фабри-Перо представлен на рис. 1 и 2.

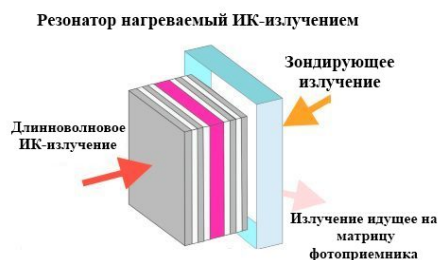


Рисунок 1 – Структурная схема пикселя матрицы микрорезонаторов Фабри-Перо

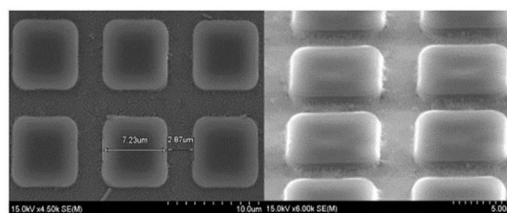


Рисунок 2 – Внешний вид матрицы микрорезонаторов Фабри-Перо

Принцип действия данной ИК-системы основан на термооптическом эффекте. Формируемое объективом изображение в длинноволновом ИК-диапазоне строится на матрице резонаторов-пикселей, из-за нагрева которых происходит сдвиг их пиковых длин волн. Поглощенная энергия падающего ИК-излучения приводит, в конечном счете к изменению оптической базы микрорезонатора. Система считывания направляет на резонаторы-пиксели считывающее излучение с длиной

волны, близкой к пиковым длинам волн спектральных характеристик резонаторов-пикселей. Коэффициент пропускания резонаторов-пикселей зависит от их температуры. Высокая чувствительность микрорезонаторов Фабри-Перо является следствием того, что принцип их работы базируется на физическом явлении многолучевой интерференции. Поэтому на фотоприемной матрице, принимающей считывающее излучение, формируется изображение, соответствующее нагреву резонаторов-пикселей, т. е. входному изображению в длинноволновом ИК-диапазоне. Таким образом, светомодуляционные характеристики микрорезонатора определяются коэффициентом температурного преобразования, т. е. температурной зависимостью базы резонатора.

Измерение зависимости коэффициента пропускания от длины волны получаемых микрорезонаторов производилось на приборе «Photon-RT» в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм, с шагом 0,25 нм. Для оценки термооптического эффекта полученных структур была разработана специализированная оснастка, которая позволяет прямо в камере спектрофотометра нагревать экспериментальный образец от комнатной температуры до 65 °С, с шагом 0,1 °С. Температура экспериментального образца контролировалась термодатчиком.

Результаты исследований. Измерение параметров матрицы экспериментального образца проводилось согласно методике, описанной в [1, 2]. Основными рабочими параметрами являются максимальный коэффициент пропускания резонатора-пикселя, диапазон изменения рабочей температуры, температурный сдвиг максимума коэффициента пропускания на рабочей длине волны, крутизна преобразования ИК-излучения и коэффициент перестройки. Результаты исследований параметров экспериментального образца микрорезонатора Фабри-Перо приведены в табл. 1.

Также был проведен сравнительный анализ промышленно выпускаемых ИК-систем на базе микроболометрических матриц и экспериментального образца микрорезонатора Фабри-Перо. Данные результаты представлены в табл. 2. Матрицы фирм АТОМ 640 (Lynred, США) [3], TENUM™640 (Sierra-Olympic, США) [4] и TWV640 (BAE SYSTEMS, Великобритания) [5] разработаны на основе оксида ванадия и функционируют на основе микроболометрических принципов преобразования ИК-излучения.

Крутизна преобразования разработанной ИК-системы, определяемая изменением коэффициента пропускания резонатора-пикселя, происходящим на 1° К изменения температуры, составляет от 6 % до 9 %, что гораздо выше температурных коэффициентов сопротивления материалов

традиционных микроболометров (2,7 % для оксидов ванадия и 1,5 % для аморфного кремния). Необходимо отметить, что в разработанной ИК-системе отсутствуют проводниковые соединения со схемой считывания: это снижает уровень шума и дает возможность увеличить коэффициент годных пикселей, превышающий 98 %. Для получения температуростабильной работы разработанной ИК-системы, в диапазоне отрицательных температур окружающей среды, необходимо использование термостабилизирующего кожуха.

Таблица 1. Технические параметры экспериментального образца микрорезонатора Фабри-Перо

Параметр	Величина, ед.изм.
Максимальный коэффициент пропускания резонатора-пикселя	70 %
Диапазон изменения рабочей температуры	20 °С
Температурный сдвиг максимума коэффициента пропускания на рабочей длине волны	8,8 нм
Крутизна преобразования ИК-излучения	8,91 %/°С
Коэффициент перестройки	0,44 нм/°С

Заключение. Таким образом, ИК-система на базе разработанной матрицы микрорезонаторов Фабри-Перо не будет уступать тепловизионным системам сопоставимого класса по основным параметрам, а стоимость изготовления в случае серийного выпуска ниже (за счет меньшего количества фотолитографических процессов), что открывает новые возможности для развития тепловизионной техники.

Литература

1. Перспективы применения микрорезонаторов Фабри-Перо для тепловизионной техники / В. М. Кравченко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 280–286.
2. Методика измерения характеристик экспериментального образца термооптического преобразователя / В. Б. Залесский [и др.] // 14-я международная научно-техническая конференция «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2021», Минск, 17–19 ноября 2021 г. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 127–130.
3. ATTO640™ – Infrared sensor [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.lynred-usa.com/products/vga-resolution/atto640-infrared-sensors.html>. – Date of access: 06.10.2022.
4. TENUM® 640 10 micron pixel pitch LWIR [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sierraolympic.com/thermal-cameras-lwir/tenum-640/>. – Date of access: 06.10.2022.
5. TWV640 Thermal Camera Core [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core>. – Date of access: 06.10.2022.

УДК 535.243+543.424

ПОРТАТИВНЫЙ АЛЬБЕДОМЕТР ДЛЯ РАБОТЫ В УДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ
Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Ломако А.А., Хомицевич А.Д., Домарацкий А.В.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описывается конструкция портативного альбедометра, предназначенного для измерения альбедо подстилающей поверхности в диапазоне 400–900 нм. Альбедометр построен на базе двух компактных спектрометров собственной разработки, размещенных в одном корпусе. Система освещения входной щели каждого из спектрометров в составе своего объектива имеет косинусную насадку, которая позволяет регистрацию оптического сигнала из соответствующей полусферы. В работе представлены первые результаты измерений альбедо различных вулканических пород в районе Курильских островов.

Ключевые слова: альбедометр, косинусная насадка.

PORTABLE ALBEDOMETER FOR OPERATION IN REMOTE AREAS
Litvinovich H., Bruchkouski I., Lamaka A., Khomitsevitch A., Domaratskii A.

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The design of a portable albedometer for the albedo measurements of the underlying surface in the range of 400–900 nm is described. The albedometer is built on the base of two compact spectrometers of our own design, placed in one housing. The illumination system of the entrance slit of each of the spectrometers has a cosine attachment as part of its lens, which allows recording the optical signal from the corresponding hemisphere. The paper presents the first results of the albedo measurements of various volcanic rocks in the area of the Kuril Islands.

Key words: albedometer, cosine corrector.

Адрес для переписки: Литвинович Г.С., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by

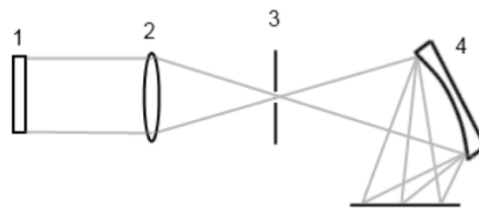
Альбедо подстилающей поверхности является входной переменной для работы моделей переноса излучения, которые применяются для численных расчетов многих геофизических параметров. В этой связи, существует необходимость производить измерения альбедо различных подстилающих поверхностей, в том числе в удаленных районах. Как правило, выпускаемые промышленностью альбедометры не предназначены для походных условий, а также не способны измерять альбедо в различных спектральных каналах и ограничиваются интегральной характеристикой [1, 2]. Поэтому, существует необходимость в разработке портативных альбедометров, позволяющих измерять альбедо поверхности со спектральным разрешением, превосходящем ширину канала спутниковых сенсоров.

По определению, альбедо поверхности на длине волны λ вычисляется как отношение интенсивности отраженного $I_{отр}$ от поверхности излучения на длине волны λ к интенсивности падающего $I_{пад}$, по формуле

$$p(\lambda) = \frac{I_{отр}(\lambda)}{I_{пад}(\lambda)}. \quad (1)$$

Для проведения измерений альбедо подстилающей поверхности в диапазоне 400–900 нм, сотрудниками НИИПФП был разработан портативный альбедометр на базе двух идентичных малогабаритных спектрометров. Каждый из спек-

трометров построен по схеме Роуланда с вогнутой голографической дифракционной решеткой 4 (рис. 1). В качестве детектора 5 используется неохлаждаемая ПЗС-линейка Toshiba TCD1304, состоящая из 3648 активных пикселей и 13 пикселей, конструктивно изолированных от света, что позволяет впоследствии вычитать электронную подставку, вызванную электрической обвязкой и собственным шумом детектора. Фактическое спектральное разрешение готовых спектрометров составило 3,6 нм.



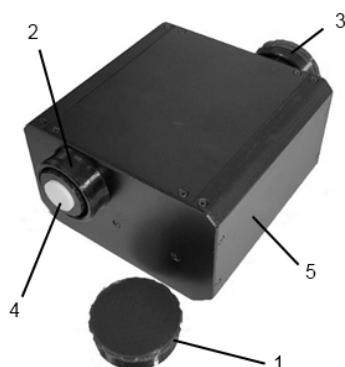
1 – косинусная насадка; 2 – линза; 3 – входная щель;
4 – вогнутая дифракционная решетка; 5 – детектор

Рисунок 1 – Оптическая схема спектрометра

Линзы 2 спектрометров изготовлены из стекла марки К-8 и имеют фокусное расстояние 100 мм. Корпус объектива изготовлен из полимерных материалов. Для возможности регистрации излучения, приходящего из верхней/нижней полусферы применяется косинусная насадка 1. Косинусная насадка 1 и ее крепление изготовлены таким образом, чтобы излучение попадало в том числе и на

боковую грань насадки, что обеспечивает требуемую косинусную характеристику системы освещения входной щели.

Время накопления сигнала для каждого спектрометра может принимать значения от 15 до 2000 мс. Априорно известно, что породы вулканического происхождения имеют альbedo в пределах 0,04–0,2, и с учетом различной освещенности от верхней и нижней полусферы изготавливались фторопластовые косинусные насадки 4 различной толщины: 0,25 мм для нижнего канала и 0,75 мм для верхнего (рис. 2). Защиту косинусных насадок 4 от механических воздействий, обеспечивал колпачок 1.



1 – защитный колпачок; 2 – верхний канал;
3 – нижний канал; 4 – косинусная насадка;
5 – корпус

Рисунок 2 – Внешний вид альбедометра

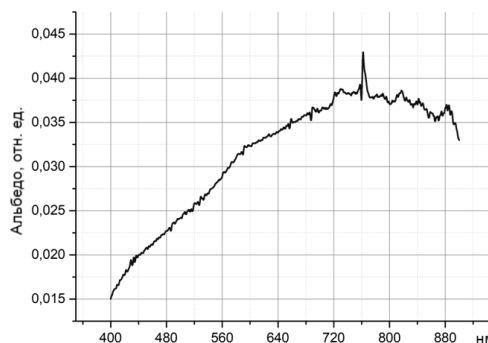
Оба спектрометра закреплены в корпусе 5 таким образом, чтобы оптические оси объективов были параллельны и направлены в противоположных направлениях. В связи с использованием колпачков различной толщины, а также различием в юстировке спектрометров, в формулу (1) требуется введение корректирующего коэффициента $k(\lambda)$:

$$p(\lambda) = \frac{I_{\text{omp}}(\lambda) \cdot k(\lambda)}{I_{\text{nad}}(\lambda)}. \quad (2)$$

Коэффициент $k(\lambda)$ получается путем поочередной регистрации каждым каналом излучения источника спектральной плотности энергетической освещенности на одинаковой экспозиции и последующего деления полученных сигналов на соответствующих длинах волн.

В период с 27.07.2022 по 23.08.2022 сотрудниками НИИ ПФП проводились работы по получе-

нию массива данных по предметно-специфическим признакам и спектральным характеристикам участков в сейсмически и вулканически активных зонах, расположенных на Северных Курильских островах (рис. 3).



1 – альбедометр; 2 – опора; 3 – тренога;

Рисунок 3 – Процесс измерений (сверху) и соответствующее альbedo поверхности (снизу)

Выводы. Разработанный альбедометр успешно применялся в условиях экспедиции, в результате чего был получен массив спектральных характеристик подстилающих поверхностей в сейсмически и вулканически активных зонах. Для корректного вычисления альbedo необходимо обеспечивать синхронность регистрации сигнала от обоих каналов, что было реализовано программным обеспечением собственной разработки. Калибровки для нахождения корректирующего коэффициента $k(\lambda)$ проводилась в условиях лаборатории.

Литература

1. Spectrafy Inc. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.spectrafy.com/products/solarsim-alb>. – Date of access: 30.09.2022.
2. Hukseflux Thermal Sensors BV [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.hukseflux.com/>. – Date of access: 30.09.2022.

УДК 621.383.523

ДЕТЕКТОРЫ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ Малютина-Бронская В.В., Сорока С.А., Сенькевич Д.В., Ермаков О.В.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе представлены результаты разработки и исследования детекторов ионизирующих излучений на базе кремниевых лавинных фотодиодов и фотоумножителей. Разработана конструкция и собран экспериментальный образец детектора регистрации ионизирующего излучения для регистрации излучения диапазоне энергий от 10 кэВ до 2 МэВ.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, детектор ионизирующего излучения.

DETECTORS FOR REGISTRATION OF IONIZING RADIATION Malyutina-Bronskaya V., Soroka S., Senkevich D., Ermakov O.

SSPA of Optics, Optoelectronics and Laser Technology
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This paper presents the results of the development and research of ionizing radiation detectors based on silicon avalanche photodiodes and photomultipliers. A design was developed and an experimental sample of the detector for detecting ionizing radiation has been assembled for detecting the radiation in the energy range from 10 keV to 2 MeV.

Key words: ionizing radiation, detector of ionizing radiation.

Адрес для переписки: Малютина-Бронская В.В., пр. Независимости, 68-1, Минск 220072, Беларусь
e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

Введение. Оптические люминесцентные детекторы сцинтилляционного типа широко применяются в комплексах и системах радиационного, радиоэкологического и радиологического мониторинга для обнаружения делящихся и радиоактивных веществ. Такие детекторы все больше применяются для радиационного контроля природного и вторичного сырья и материалов, используемых в металлургической промышленности и строительной индустрии. Замеры радиационного фона – важный элемент защиты персонала атомных станций и некоторых гражданских и военных объектов. Для данной цели необходимы миниатюрные детекторы ионизирующих излучений с высокой чувствительностью и, в отличие от вакуумных, низким напряжением питания, что может быть реализовано с помощью Si-ФЭУ [3, 4].

Одним из методов регистрации излучения является сцинтилляционный метод, основанный на регистрации коротких вспышек света – сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах при прохождении через них заряженных частиц, квантов ионизирующего излучения [1, 2].

Актуальность решаемой проблемы заключается в необходимости разработки импортозаменяющих оптоэлектронных устройств. Целью работы была разработка конструкции детектора, сборка экспериментального образца и исследование его работоспособности.

Методика эксперимента. Основная задача при разработке детекторов ионизирующих излучений заключается в согласованности оптических параметров: области спектральной чувствительности приемника излучения (ЛФД или Si-ФЭУ) и спектрального диапазона фотолюминесценции

сцинтилляционного материала. Существует большое разнообразие органических и неорганических сцинтилляторов, и их выбор определяется прежде всего областью применения [3]. Рабочий спектральный диапазон фотоприемников: кремниевых лавинных фотодиодов (ЛФД) или кремниевого фотоумножителя (Si-ФЭУ) составляет от 400 нм до 1000 нм [4].

Для детекторов гамма-излучения подходит сцинтиллятор CsI (Tl) [4]. На рис. 1 показаны спектральная чувствительность Si-ФЭУ при перенапряжении 4В (1) и спектр излучения образцов кристаллов CsI (Tl) при однократном возбуждении на длине волны 308 нм [6].

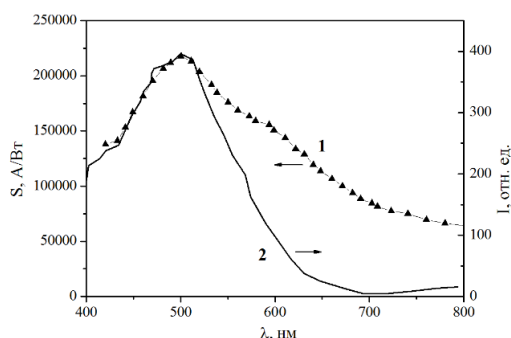
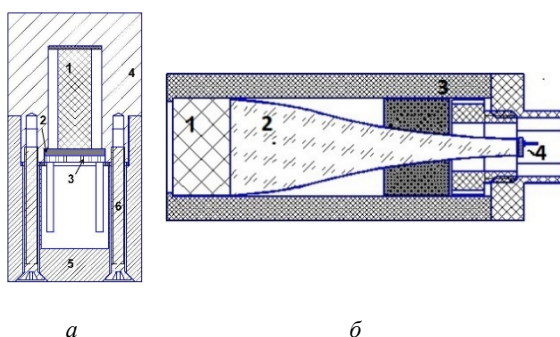


Рисунок 1 – Спектральная чувствительность Si-ФЭУ при перенапряжении 4В (1) и спектр излучения образцов кристаллов CsI (Tl) при однократном возбуждении на длине волны 308 нм [6] (2)

Как можно видеть, спектральные характеристики (особенно в максимуме) сцинтиллятора и фотодетектора хорошо совпадают, что является определяющим фактором практического применения Si-ФЭУ для детектора гамма-излучения.

На рис. 2 показаны структурные схемы разработанных макетов детекторов ионизирующего излучения (гамма- и бета-излучения) в сборе. Макет датчика гамма излучения реализован на базе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. В качестве сцинтиллятора использовался кристалл Cs(Tl) размером 7×7×30 мм. В качестве детектора оптического излучения использовался Si- ФЭУ с размером приемной части 6х6 мм, с размером одиночной приемной ячейки 35×35 мкм и с количеством приемных ячеек 19 000 шт. Эффективностью регистрации фотонов для этого фотоумножителя на длине волны 550 нм (длина волны излучения сцинтиллятора CsI(Tl)) составляет 25 %. Квант ионизирующего излучения, попадая в сцинтиллятор генерирует в нем вспышку оптического излучения, интенсивность которой пропорциональна энергии падающего кванта.



а: 1 – сцинтиллятор; 2 – Si ФЭУ; 3 – плата для Si – ФЭУ; 4 – корпус; 5 – крепежные винты;
б: 1 – сцинтиллятор; 2 – фокон; 3 – корпус; 4 – ЛФД

Рисунок 2 – Структурные схемы датчиков регистрации ионизирующего излучения в сборе на базе Si-ФЭУ (а) и ЛФД (б)

Оптическое излучение поглощается фотоприемником и преобразуется в электрический сигнал, который дальше, с помощью схемы регистрации и обработки усиливается, формируется и преобразуется в TTL формат для дальнейшей передачи на устройство визуализации (осциллограф, компьютер или т. п.). Вся конструкция – сцинтиллятор, Si- ФЭУ или ЛФД на плате помещены в светонепроницаемый корпус. Конструкция детектора определяется размером фоточувствительной площадки фотоприемника и видом ионизирующего излучения.

Для регистрации бета-излучения использовали источник на основе изотопа стронция 90 с поверхностной активностью 5500 Бк/ см².

Для визуализации информации с датчика ионизирующего излучения использовался осциллограф Tektronix MDO 4054. К детектору приближали источник излучения и сигнал с Si ФЭУ через зарядочувствительный усилитель и формирователь подавался на вход осциллографа. Фиксировалась амплитуда выходного сигнала.

Результаты исследований. На рис. 3 представлена осциллограмма импульсов бета-излучения регистрируемого разработанным детектором на основе Si-ФЭУ в течении 2 мсек.

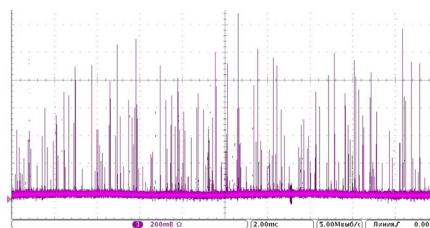


Рисунок 3 – Осциллограмма импульсов регистрируемых датчиком ионизирующих излучений на базе Si-ФЭУ

Световой выход сцинтиллятора CsI(Tl)) составляет около 40 000 фотонов/МэВ поглощенной энергии, а эффективность передачи света со сцинтиллятора на кремниевый фотоумножитель составляет 50 %. При этих характеристиках используемый Si- ФЭУ регистрирует 5 000 фотонов/МэВ поглощенной сцинтиллятором энергии кванта. Это позволяет регистрировать излучение в диапазоне энергии от нескольких КэВ до 2 МэВ с хорошей линейностью.

Закключение. Таким образом, были разработаны и исследованы конструкции детекторов ионизирующих излучений на базе кремниевых лавинных фотодиодов и фотоумножителей. Полученные результаты исследований показали, что на базе разработанных макетов датчиков ионизирующих излучений возможно реализовать спектрометр для регистрации излучения диапазоне энергий от 10 кэВ до 2 МэВ.

Литература

1. Марков, В. Ф. Технология тонкопленочных твердотельных сенсоров: учеб, пособие / В. Ф. Марков. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2019. – С. 148.
2. Шендрик, Р. Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов: Учебное пособие / Р. Ю. Шендрик. – Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та, 2013. – 110 с.
3. Гулаков, И. Р. Регистрация ионизирующих излучений : учебное пособие / И. Р. Гулаков. – Минск : Вышэйшая школа, 2021. – 287 с.
4. Кремниевые фотоприемники с внутренним усилением широкого спектра применения / В. Б. Залесский [и др.] // Сб. материалов 13-й международной научно-технической конференции “Приборостроение–2020”, Минск – БНТУ – 2020. – С. 393–394.
5. Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering. – Springer, 2006.
6. Shahmaleki, S. Investigation on the scintillation characteristics of CsI(Tl) crystal with Eu dopant: Monte Carlo simulation using GATE code and experimental results / S. Shahmaleki, F. Rahmani // Optik. – 2020. – Vol. 201. – P. 163492.

УДК 623.4.023.43

ОПТИКО-ВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА ПОДВОДА ОПОРНОГО СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В БЛОКЕ ВИЗИРНО-ДАЛЬНОМЕРНОМ ТАНКОВОГО ПРИЦЕЛА

Мандик Н.С.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹, Нупрейчик А.О.²

¹ОАО «Пеленг»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены варианты подвода опорного сигнала от лазерного излучателя к фотоприемнику в визирно-дальномерном блоке комбинированного многоканального танкового прицела. Проведено сравнение эффективности сборки, юстировки и устойчивости работы изделия в случае применения классической оптической призмной системы и при использовании в качестве средства транспортировки лазерного излучения гибкого оптического волокна.

Ключевые слова: оптическое волокно, лазерное излучение, визирно-дальномерный блок, танковый прицел.

FIBER-OPTIC SYSTEM FOR SUPPLYING THE REFERENCE SIGNAL OF A LASER EMISSION IN THE SIGHT AND RANGING UNIT OF A TANK SIGHT

Mandik N.^{1,2}, Feodortsau R.¹, Nupreichik A.²

¹JSC "Peleng"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article considers options for supplying a reference signal from a laser emitter to a photodetector in the sighting and rangefinder unit of a combined multi-channel tank sight. The efficiency of assembly, adjustment, and stability of the work of the product is compared in the case of using a classical optical prism system and when using a flexible optical fiber as a means of transporting laser radiation.

Keywords: optical fiber, laser radiation, sighting and rangefinder unit, tank sight.

Адрес для переписки: Мандик Н.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mandik.nikita@yanex.ru

Блок визирно-дальномерный танкового прицела многофункциональное устройство предназначен для визуального и тепловизионного наблюдения за местностью, лазерного дальнометрирования, проектирования управляющего ракетного поля, оснащен режимом выверки параллельности оптических осей тепловизионного, дальномерного и информационного каналов по отношению визирному каналу, а также оперативного встроенного контроля. Система визирования предусмотрена для создания и анализа изображения местности с различными увеличениями.

Предназначение тепловизионного канала аналогично, отличие заключается лишь в том, что наблюдение проводится в ночных условиях.

Таким образом, конструктивно блок визирно-дальномерный включает в себя лазерный канал управления, канал лазерного дальномера, систему индикации и систему выверки, которые отвечают за положение оси дальномерного канала, оси линии нулевых команд поля управления и оси тепловизионного канала относительно оси прицеливания системы визирования.

Канал лазерного дальномера (ЛД) основан на принципе измерения времени прохождения излучения до цели и обратно. Часть сгенерированного лазерного импульса формирующей оптикой направляется на цель, после отражения излучение попадает в приемный канал дальномера и, пройдя

оптическую составляющую, поступает на фотоприемное устройство (ФПУ). В ЛД генерируется излучение ближнего инфракрасного (ИК) диапазона с рабочей длиной волны 1064 нм.

Лазерный дальномер включает в себя излучатель, генерирующий лазерное излучение, телескопическую систему, предназначенную для увеличения кратности, коллиматора и компенсатора для компенсации рассогласования непараллельности дальномерного канала относительно оптического канала, а также ФПУ, блока питания дальномера и блока цифровой обработки сигнала.

При запуске лазерного излучения, часть импульса, называемая "стар-сигналом", минуя все расстояние до цели и обратно, попадает через оптику прицела на фотоприемное устройство, тем самым задавая начало отсчета, другая часть излучения отразившись от цели попадает на ФПУ и подает сигнал для остановки, разница между этими сигналами способствует определению расстояния до цели.

В существующей конструкции блока визирно-дальномерного часть генерируемого излучения (старт-сигнал) направляется на ФПУ с помощью пента-призмы и оптической системы узкого поля зрения (УПЗ). Наличие отдельных оптико-механических компонентов в виде призмной узла и фокусирующей линзовой системы требует точной системы их сведения и юстировки как в процессе

первоначальной сборки изделия, так и последующих калибровок в процессе эксплуатации возникающих вследствие воздействия знакопеременных нагрузок на корпус прицела в боевых условиях.

Анализ существующих технических решений по формированию старт-сигнала и его регистрации показывает различные варианты реализации. Например, в мобильных лазерных локационных системах (МЛЛС) излучение с импульсного YAG:Nd³⁺ лазера с длиной волны ($\lambda_1 = 0,53$ мкм и $\lambda_2 = 1,06$ мкм) и длительностью порядка 100–200 нс отводится через полупрозрачное зеркало на опорный фотодетектор с последующим прохождением через схему фазирования и формирования строб-импульса [1]. Для сравнения, опорного и отраженного сигналов в работе [2] рекомендуется использовать микроконтроллеры, многоканальные преобразователи временных интервалов в цифровой код TDC-GPX с подключаемыми кварцевыми датчиками (20 МГц) обеспечивающие разрешение до 10 пс. В лазерном дальномере [3] сигнал измерения дальности одновременно поступает в ключевую схему и на вход импульсной последовательности счетчика импульсов. В качестве излучателя используется лазерный диод типа PGEW1S09 фирмы PerkinElmer, а в качестве фотоприемника высокочувствительный фотодиод C30724 фирмы EG&G Canada. Рассмотренный лазерный дальномер может иметь модификацию в котором в качестве светоделителя используется куб-призма [4].

Новая модификация конструкции блока визирно-дальномерного предусматривает применение одномодового оптического волокна (ОВ) ITU-T G.652.C(D) упакованного в волоконно-оптический жгут О-ИК-ТС-I-3,0-600 ТУЗ-3.2288-90 (рис. 1).

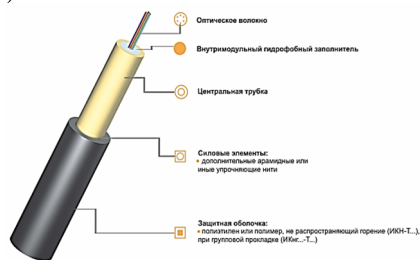


Рисунок 1 – Конструкция оптического кабеля марки ОК-Т

Номинальный наружный диаметр кабеля 5,5 мм. Минимально допустимый радиус изгиба 110 мм.

Необходимая часть старт-сигнального излучения от источника с полупрозрачного зеркала резонатора, передается непосредственно в фотоприемное устройство (ФПУ) в качестве «опорного сигнала» (рис. 2).

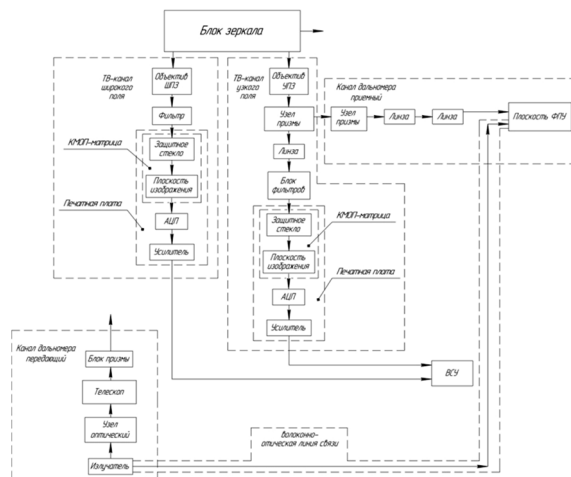


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема блока визирно-дальномерного прицела

В качестве лазерного источника используется импульсная лампа с ксеноновым наполнением, с естественным и принудительным жидкостным охлаждением. Одинокое импульсное излучение с амплитудой импульса зажигания 18 кВ и предельной средней мощностью 10 Вт.

Излучение принимается фотоприемным устройством ФПУ-21ВТ с рабочей длиной волны 1064–1570 нм с пороговой чувствительностью 50 нВт.

При этом потерями внутри оптического волновода пренебрегают, вследствие малой протяженности (примерно 600 мм) передающего участка. Гибкость ОВ позволяет менять конфигурацию пути укладки внутри корпуса прицела в свободных местах за счет установки дополнительных опорных кронштейнов.

Дополнительным преимуществом модификации является существенное снижение конечной себестоимости изделия, стоимость участка ОВ существенно ниже стоимости узла крепления призмы.

Литература

1. Ефимов, В. О. Вопросы проектирования дальнометрического канала мобильных лазерных локационных систем / В. О. Ефимов, Л. М. Сарварова, А. А. Тяжелова // Инновационная наука. – 2017. – № 8. – С. 15–18.
2. Лазерные дальнометры. Acam Messelectronic GmbH. 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://acam-e.ru/?page_id=551.
3. Лазерный дальномер : пат. RU 2590311 / П. А. Гарасов, Б. Б. Иванов. – Опубл. 10.07.2016.
4. Лазерный дальномер : патент RU 2343413 / А. И. Абрамов, А. А. Зборовский, А. И. Гоев, Б. Б. Иванов. – Опубл. 10.01.2009.
5. ОК...-Т. Оптический кабель для прокладки в пластмассовый трубопровод на основе центральной трубки. «Союз-Кабель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sk.by/production/ppt/v-trubi_63.html.

УДК 551.508.59

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА

Павлюковец Е.Ю., Артюхина Н.К., Кузнецик В.О.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация: Приведена классификация методов измерения параметров ветра. Рассмотрены различные методы измерения скорости ветра. Выполнен анализ дистанционных методов измерения.

Ключевые слова: направление ветра, скорость ветра, дистанционные методы измерения скорости ветра, оптические методы, доплеровский лидар.

METHODS FOR MEASURING THE MAIN WIND PARAMETERS

Pavlyukovets E., Artyukhina N., Kuznechik V.

*Belorussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation: The classification of methods for measuring wind parameters is given. Various methods of measuring wind speed are considered. The analysis of remote measurement methods is carried out.

Keywords: wind direction, wind speed, remote methods of measuring wind speed, optical methods, Doppler lidar.

*Адрес для переписки: Кузнецик В.О., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kuznechik@bntu.by*

Появление ветра связано с перемещением воздушных слоев в следствии разницы в давлении между ними.

Под ветром понимают горизонтальное движение воздуха относительно земной поверхности, которое характеризуется скоростью (силой) и направлением.

На метеорологических станциях и постах оценивают направление (в градусах или румбах) и скорость (м/с, км/ч, баллы) ветра. Сила ветра оценивается по шкале силы ветра в баллах.

Направление ветра определяется той стороной горизонта откуда дует ветер.

Существуют различные методы (рис. 1), средства и приборы для измерения параметров ветра.

Величину скорости, профиль скорости и направления ветра необходимо знать для решения различных практических задач, например, для прогноза погоды, охраны окружающей среды, для служб аэропортов, научных исследований.

Дистанционные методы измерения скорости ветра можно разделить на оптические (другое название лазерные или лидарные) акустические и радиолокационные. Эти методы основаны на излучении волн, которые при распространении через атмосферу рассеиваются в обратном направлении.



Рисунок 1 – Классификация методов измерения основных параметров ветра

Метод акустического зондирования (дальность действия обычно не превышает 1000 метров; чувствителен к уровню шумовых помех), на котором работают содары, заключается в излучении пакетов звуковых волн, которые при распространении рассеиваются на акустических неоднородностях атмосферы и определении времени задержки сигнала (определяют дальность), измерении мощности отраженного сигнала (судят об интенсивности турбулентности) и доплеровского сдвига частоты (вычисляют скорость ветра в проекции на направление зондирования) [1].

Радарные ветровые профайлеры работают в длинноволновой части спектра в диапазонах 0,3–0,23 м, 0,75–0,55 м и 5–10 м. (существуют ветровые системы миллиметрового диапазона для приграничного слоя атмосферы) в режиме накопления сигнала, т. е. окончательный результат измерения формируется на основе пакета, состоящего из нескольких сотен импульсов [1]. За время зондирующего импульса (10^{-6} секунд), рассеивающие неоднородности в атмосфере за данный период времени сдвигаются всего на несколько микрон, т. е. можно считать, что импульс работает по «застывшим» в пространстве рассеивателям.

Метод измерения параметров ветра системами радиоакустического зондирования заключается в искусственном создании в атмосфере отражающей неоднородности в виде звуковой решетки, которая искажается как за счет рассеяния на турбулентности, так и за счет градиентов ветра и сильной рефракции. Звуковой пакет лоцируют с помощью радара, подбирая длину волны радиолокатора такой, чтобы выполнялось условие Брэгга (длина волны радиолокатора должна быть вдвое больше длины звуковой волны). Скорость ветра регистрируется не на нулевых доплеровских частотах, а на частоте, сдвинутой на скорость звука, что облегчает селекцию сигнала.

В настоящее время широкое распространение получили дистанционные корреляционные и доплеровские оптические методы измерения параметров атмосферы, основанные на лазерных технологиях, как более точные и надежные.

Корреляционные измерения основаны на флуктуации величины эхо-сигнала при прохождении зондирующего лазерного пучка через освещенный им рассеивающийся объем атмосферы и корреляционном анализе полученных данных. Методы простые, не требуют применения дорогостоящей аппаратуры, позволяют выполнять измерения в условиях сложного рельефа местности.

Доплеровские лазерные методы (как и доплеровские методы в радиодиапазоне) основаны на использовании доплеровского смещения частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися в атмосфере отражателями (аэрозольными частицами присутствующими в атмосфере). Эти методы реализованы в некогерентных и когерентных доплеровских лидарах.

Некогерентные лидары регистрируют рассеянное излучение, которое анализируют на интерферометре, при этом измеряется доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала, по которому определяют проекцию ветра на направление зондирования, определяют скорость и направление ветра на различных высотах [4].

Когерентные доплеровские лидары, в которых используют два канала (опорный и зондирующий) работают следующим образом, лазерное излучение на частоте f_1 при распространении в атмосфере рассеивается на аэрозольных частицах, частота рассеянной назад волны, с учетом скорости движения частиц V_r , согласно эффекту Доплера, изменяется и равна $f_1(1 + V_r/c)$, где c – скорость света. Рассеянное излучение поступает в приемный канал и, после сложения с опорным сигналом на частоте f_2 подается на приемник. Детектируемый сигнал будет иметь составляющие на промежуточной частоте

$$f_3 = f_1 \left(1 + \frac{2V_r}{c}\right) - f_2 = f_1 - f_2 + f_d,$$

где $V_r = \frac{f_d \lambda}{2}$, f_d – доплеровский сдвиг частоты, λ – длина волны, в спектре мощности сигнала которого ярко выраженный пик на частоте f_3 [1, 4].

Когерентные доплеровские лидары можно разделить на непрерывные и импульсные. В первом используется зондирующий лазерный пучок непрерывного излучения, который фокусируется на дистанции измерения [2–4]. Во втором – для формирования зондирующего пучка используют генератор импульсного лазерного излучения с частотой отличной от опорной. Энергия рассеивается на аэрозольных частицах и, попадая в приемный канал, смешивается с опорным излучением и фиксируется приемником. Благодаря интерференции рассеянного и опорного пучков приемником регистрируется сигнал, спектр которого будет локализован вокруг промежуточной частоты. Положение пика определяется средней скоростью движения рассеивающих излучение частиц аэрозоля [3, 4].

Литература

1. Потапцев, И. А. Анализ методов измерения вектора скорости ветра / И. А. Потапцев. – Томск: ТГУ, 2017.
2. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки – Фотоника. – 2014. – № 6.
3. Intelligent and compact coherent Doppler lidar with fiber-based configuration for robust wind sensing in various atmospheric and environmental conditions // Optics express. – 2022. – Vol. 30, № 11.
4. Стерлядкин, В. В. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы / В. В. Стерлядкин. – Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2102630/obzor-metodov-i-sredstv-vetrovogo-zondirovaniya-atmosfery>.

УДК 621.315.2:535.8

УМЕНЬШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ОДНОМОДОВЫМИ ВОЛОКОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ

Поляков А.В., Королёва Е.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для уменьшения величины оптических потерь при вводе излучения от полупро-водникового инжекционного лазера в одномодовый волоконный световод предложили использовать специальную анизотропную волоконно-оптическую вставку. С помощью численного моделирования проведена оптимизация параметров оптической вставки, позволившая достичь значений оптических потерь не превышающих 0,8 дБ при радиусе входного торца 100 мкм и длине модового преобразования 83 см.

Ключевые слова: измерительное устройство, инжекционный лазер, одномодовый волоконный световод, анизотропная вставка, оптические потери.

REDUCTION OF OPTICAL LOSSES WHEN JOINING MEASURING DEVICES WITH SINGLE-MODE FIBER FIBER

Polyakov A., Karaliouva E.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. To reduce the optical loss when radiation from a semiconductor injection laser is coupled into a single-mode optical fiber, it was proposed to use a special anisotropic fiber-optic insert. Using numerical simulation, the optimization of the parameters of the optical insert was carried out, which made it possible to achieve optical loss values not exceeding 0.8 dB with an input end radius of 100 μm and a mode conversion length of 83 cm.

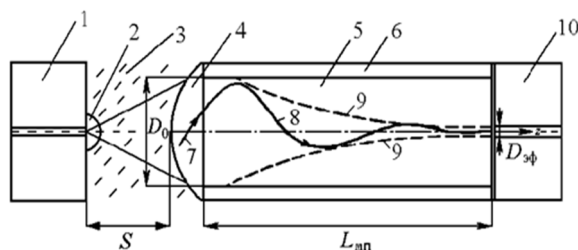
Keywords: measuring device, injection laser, single-mode optical fiber, anisotropic insert, optical losses.

Адрес для переписки: Поляков А.В., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

Уровень мощности сигнала, вводимого в волоконно-оптический световод, является одним из основных параметров, определяющих характеристики волоконно-оптических информационно-измерительных систем. Поскольку расходимость излучения инжекционного лазера является достаточно существенной, потери при вводе в одномодовый волоконный световод с диаметром сердцевины 9 мкм становятся неприемлемо большими. Для их уменьшения используются специальные согласующие элементы, при этом потери мощности излучения на ввод составляют 2–3 дБ [1, 2].

Для уменьшения потерь ввода излучения инжекционного лазера (ИЛ) в одномодовый волоконный световод (ВС) предложен стыковочный элемент в виде анизотропной волоконно-оптической вставки [3, 4]. Анизотропная волоконно-оптическая вставка (АВОВ) – это устройство, обладающее фокусирующими и коллимирующими свойствами. В АВОВ (рис. 1) градиент показателя преломления в сердцевине 5 оптического волокна (6 – оболочка) обусловлен не химическим составом стекла, а упорядочением внешним электрическим полем в процессе производства внутренней молекулярной структуры кварцевого стекла. При этом анизотропные молекулы и образующиеся микрокристаллы материала сердцевины ориентированы так (эффект Керра-Поккельса), что их оптические оси направлены вдоль силовых линий электрического поля. Под действием светового

пучка данная нелинейная среда становится оптически неоднородной: в центре пучка, где интенсивность выше, показатель преломления становится больше, чем на краю, а следовательно, фазовая скорость распространения осевых лучей уменьшается. В результате, наблюдается эффект самофокусировки света или нелинейная рефракция, когда лучи, первоначально распространявшиеся по нормали к плоскому волновому фронту, начинают искривляться к оси.



1 – инжекционный лазер; 2 – полусферический элемент; 3 – иммерсионная жидкость; 4 – сферическая полимерная микролинза; 5 – световодная жила АВОВ; 6 – оболочка АВОВ; 7 – луч; 8 – синусоида; 9 – ограничение; 10 – одномодовое оптическое волокно

Рисунок 1 – Устройство ввода лазерного излучения в одномодовое оптическое волокно на основе АВОВ

Траектория меридионального луча 7 любой моды, вводимого в пределах апертурного угла θ_A , представляет собой экспоненциально затухающую

к оптической оси z синусоиду δ , ограниченную линиями 9. С волновой точки зрения это означает, что указанные моды будут преобразовываться по пути их распространения в моду одной линейной поляризации HE_{11} , имеющую минимальный относительно оси z угол следования луча. Благодаря значительной концентрации (коллимации) энергии излучения вдоль оси z после прохождения длины модового преобразования $L_{мп}$ обеспечивается одномодовый режим распространения световой волны. Таким образом, излучение, введенное в АВОВ диаметром D_0 , после прохождения $L_{мп}$ будет иметь эквивалентный диаметр одномодового режима распространения $D_{эф} < D_0$.

Для согласования числовых апертур ИЛ и АВОВ применяли варианты конструкции, использующие полимерный плоскосферический элемент (ПСЭ) с радиусом кривизны $r_c = 15$ мкм и показателем преломления $n_c = 2,1$ на торце кристалла ИЛ или сферическую полимерную микролинзу (СПМЛ) на входном торце АВОВ с показателем преломления, равным показателю преломления сердцевины АВОВ.

С помощью модифицированной математической модели, учитывающей продольное, радиальное, угловое смещение и несовпадение модовых пятен между анизотропной вставкой и торцом волокна, продольное смещение и френелевские потери между инжекционным лазером и вставкой, проведено численное моделирование зависимости потерь от радиуса входного торца АВОВ. Из результатов расчетов следует, что более предпочтительным является применение сферической полимерной микролинзы. Кроме того, размер входного торца эффективно увеличивать до величин порядка 100 мкм, поскольку дальнейшее увеличение R_0 не ведет к существенному уменьшению потерь. При этом, согласно рис. 2, длина модового преобразования будет составлять 83 см.

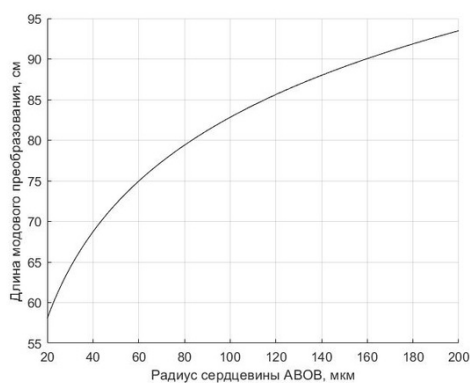


Рисунок 2 – Зависимость длины АВОВ от радиуса входного торца R_0

На рис. 3 представлены зависимости суммарных потерь от показателя преломления иммерсионной

жидкости между ИЛ и АВОВ при фиксированном значении $R_0 = 100$ мкм. Из полученных графиков следует, что величина потерь на френелевское отражение и продольное смещение минимальны при условии, что показатель преломления иммерсионной жидкости будет составлять величину $n_{ж2} = 2,3-2,4$, и при использовании сферической полимерной микролинзы потери на стыковку между ИЛ и ВС достигают величины менее 0,8 дБ. Предложенное устройство стыковки увеличивает эффективность ввода лазерного излучения в ВС в 3–3,5 раза по сравнению с использованием только согласующих линз различной конструкции. Применение АВОВ позволяет увеличить длину тестируемого ВС на 4–5 км при рефлектометрических измерениях.

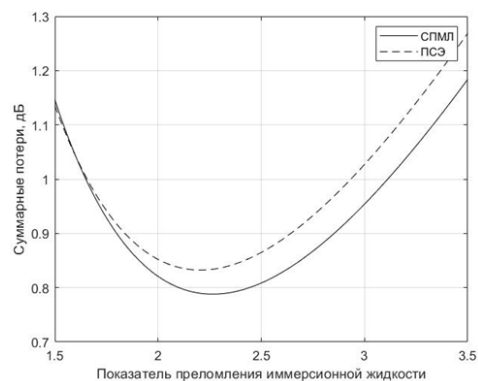


Рисунок 3 – Зависимость суммарных потерь на соединении от показателя преломления иммерсионной жидкости

Использование АВОВ для повышения эффективности соединения ИЛ с одномодовым ВС может найти широкое применение в различных областях волоконной оптики, включая волоконно-оптические системы связи, волоконно-оптические датчики, оптоэлектронные динамические запоминающие устройства с оптоволоконной линией задержки, а также в оптических рефлектометрах и измерителях мощности.

Литература

1. Плеханов, А. И. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами / А. И. Плеханов, В. В. Шелковников // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т 1, № 1. – С. 240–244.
2. Lensed photonic crystal fiber obtained by use of an arc discharge / G. L. Kong [et al.] // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, № 7. – P. 894–896.
3. Макаров, Т. В. Ввод лазерного излучения в одномодовые оптические волокна / Т. В. Макаров // Электросвязь. – 1995. – № 11. – С. 19–21.
4. Ксенофонтов, М. А. Повышение эффективности ввода лазерного излучения в световоды волоконно-оптических информационно-измерительных систем / М. А. Ксенофонтов, А. В. Поляков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 8. – С. 22–26.

УДК 528.8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ИЗМЕРЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОЭА ДЛЯ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА

Романов Д.В., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрена апробация математической модели, описывающей прохождение сигнала в оптико-электронном тракте, по космическим снимкам, полученным с космических аппаратов (КА) для дистанционного зондирования Земли. Для апробации модели были отобраны снимки со съемочной аппаратуры высокого разрешения с различной проекцией пиксела на Землю. По данным снимкам были определены следующие параметры изображения: отношение сигнал/шум (SNR), функция передачи модуляции (ФПМ) и выполнен расчет линейного разрешения на местности (ЛРМ). В результате сравнительного анализа было определено, что разработанная модель имеет относительную погрешность не более 10 % от реальных полученных параметров ОЭА.

Ключевые слова: оптико-электронная аппаратура, отношение сигнал/шум (SNR), функция передачи модуляции (ФПМ), линейное разрешение на местности (ЛРМ), дистанционное зондирование Земли из космоса.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CALCULATED AND MEASURED INFORMATION PARAMETERS OF OEE FOR ERS FROM SPACE

Romanov D., Feodortsau R.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article considers the approbation of a mathematical model of the optical-electronic path of optoelectronic equipment (OEE) using satellite images obtained by spacecraft (SC) for remote sensing of the Earth from space. To test the model, images from high-resolution imaging equipment with different ground sample distance (GSD) were selected. Based on these images, the following image parameters were determined: signal-to-noise ratio (SNR), modulation transfer function (MTF), and the calculation of linear terrain resolution (LTR) was performed. A comparative analysis of the calculated and measured parameters of the OEE has been carried out.

Keywords: optoelectronic equipment, signal-to-noise ratio (SNR), modulation transfer function (MTF), linear terrain resolution (LTR), remote sensing of the Earth from space.

Адрес для переписки: Романов Д.В., ул. Академика Высоцкого, 3, Минск 220114, Республика Беларусь
e-mail: dmitrij_romanov_86@mail.ru

Разработана математическая модель оптико-электронного тракта оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) среднего и высокого разрешения, предназначенной для дистанционного зондирования Земли из космоса. Модель оптико-электронного тракта описывает параметры ОЭА с последующим расчетом линейного разрешения на местности (ЛРМ), в т.ч. параметры: геометрическое пространственное разрешение (проекция пиксела на Землю) (GSD), ширина полосы захвата, отношение сигнал/шум (SNR), функция передачи модуляции (ФПМ), спектральный диапазон [1]. Данная модель позволяет при различных условиях съемки прогнозировать вышеперечисленные параметры информативности ОЭА. Под различными условиями съемки понимается высота рабочей орбиты, углы крена и тангажа, высота Солнца над местным горизонтом, коэффициент пропускания атмосферы, коэффициент отражения подстилающей поверхности, коэффициент отражения тест – объекта, альbedo фона и вероятность обнаружения.

Так, с использованием данной модели были определены конструктивные параметры реально

разрабатываемых ОЭА среднего ($1,0 \text{ м} \leq \text{GSD} \leq 4,0 \text{ м}$) и высокого ($\text{GSD} < 1,0 \text{ м}$) разрешения для удовлетворения требованиям по качеству получаемого изображения (см. табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики ОЭА (расчетные)

Наименование	GSD, м	ЛРМ, м	ФПМ	SNR
ОЭА среднего разрешения	2,2	3,0	0,11	120
ОЭА высокого разрешения	0,75	1,1	0,10	100

Расчет проводился для ОЭА среднего и высокого разрешения с высоты орбиты 500 км для следующих зачетных условий:

- съемка в надири;
- высота Солнца над местным горизонтом – не менее 30 град;
- коэффициент пропускания атмосферы – не менее 0,85 (интегральный) или метеорологическая дальность виденья (МДВ) не хуже – 20 км;
- минимальный коэффициент отражения подстилающей поверхности 0,1;

- максимальный коэффициент отражения тест – объекта 0,4;
- альbedo фона 0,07;
- вероятность обнаружения не менее 0,8.

После запуска на орбиту представленных ОЭА в составе КА в ходе летных испытаний по реальным полученным изображениям подстилающей поверхности Земли из космоса были определены основные параметры изображений [2].

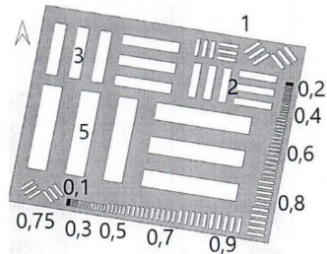


Рисунок 1 – Фрагмент полигона Баотоу с «трехшпальными мирами» с обозначением их геометрических размеров в метрах [3]

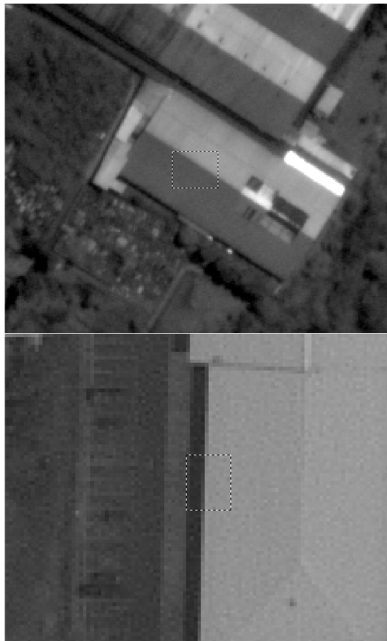


Рисунок 2 – Фрагменты изображений, подлежащие оценке методом «резкого края»

SNR определялось как отношение среднего значения сигнала к стандартному отклонению сигнала при съемке равномерных по яркости участков поверхности Земли.

ЛРМ определялось по съемке объекта типа «Трехшпальная мира» по специализированному наземному полигону Баотоу (КНР) (рис. 1).

Расчет ФПМ с учетом величины «смаза» и параметров навигации и ориентации проводился по методу «резкого края» (рис. 2).

В результате оценки данных параметров получились следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2. Технические характеристики ОЭА (измеренные)

Наименование	ЛРМ, м	ФПМ	SNR
ОЭА среднего разрешения (GSD = 2,0 м)	3,0	0,12	112
ОЭА высокого разрешения (GSD = 0,75 м)	1,0	0,11	108

В результате сравнительного анализа было определено, что разработанная модель имеет относительную погрешность не более 10 % от реальных полученных параметров ОЭА. Данная погрешность обусловлена в первую очередь состоянием атмосферы на момент реальной съемки, а именно ее турбулентностью.

Данную математическую модель можно использовать для проектирования ОЭА ДЗЗ из космоса.

Литература

1. Романов, Д. В. Оценка основных показателей информативности оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли из космоса / Д. В. Романов, Р. В. Фёдорцев // 12-я международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2019». – Минск, Изд-во БНТУ, 2019. – С. 472–474.
2. Основные оценочные параметры съемочной аппаратуры при формировании космических снимков земной поверхности / Д. В. Романов [и др.] // 14-я международная научно-техническая конференция «Приборостроение- 2021». – Минск, БНТУ, 2021. – С. 462–464.
3. Uncertainty Analysis Statement-Batou Site (QA4EO-WGCV-IVO-CSP-002) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.academia.edu/>.

УДК 535.08

ГАММА-КОМПЕНСАЦИЯ И МАСШТАБИРОВАНИЕ КАК ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Савкова Е.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Показаны опорные маркеры управления динамическим диапазоном цифровых изображений и выполнен обзор технологий гамма-компенсации и масштабирования с указанием значений и формул расчета для конкретных практических ситуаций и предпочтений пользователей.

Ключевые слова: цифровое изображение, динамический диапазон, гамма, масштабирование.

GAMMA COMPENSATION AND SCALING AS TECHNOLOGIES FOR MANAGING THE DYNAMIC RANGE OF DIGITAL IMAGES

Saukova Y.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Reference markers for dynamic range managing of digital images are shown. The overview of gamma compensation and scaling technologies is made with the indication of values and calculation formulas for specific practical situations and user preferences.

Key words: digital image, dynamic range, gamma, scaling.

Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by

С целью приближения к диапазону человеческого зрения ($10^{-6} \sim 10^8$ кд/м²) [8, 9] [1] в телевидении, компьютерных играх, дизайне, применяются многослойные HRDI-изображения и специальные передаточные функции. Динамический диапазон цифрового изображения формируется при преобразованиях видеосигнала из стандартного контента SDR в контент HDR с высоким динамическим диапазоном и обратно сверткой передаточных функций ITU: конвертации световой сцены в видеосигнал (OETF), видеосигнала в линейную свет-сигнальную передаточную характеристику отображающего устройства (EOTF), световой сцены в отображаемую сцену (OOTF) или функций ICC типа А, В, М. Обобщенно свет-сигнальная характеристика в виде зависимости выходного сигнала интенсивности в выбранном цветовом пространстве от яркости сцены показана на рис. 1.

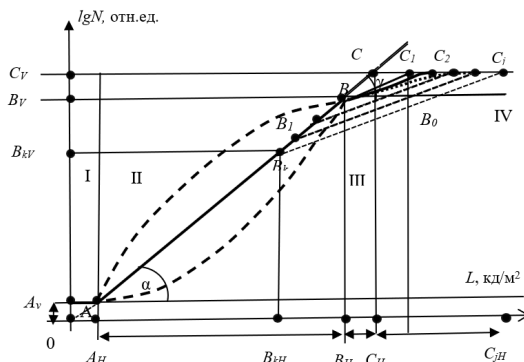


Рисунок 1 – Структурная схема динамического диапазона цифрового изображения

На рис. 1: I – область собственных шумов (отрезок $0A_V$); II – рабочая область или исходный динамический диапазон (отрезок A_VB_V); III – область насыщения (отрезок B_VB_0); IV – дополнительная область, полученная в результате расширения (отрезок B_VC_V). Управление динамическим диапазоном осуществляют с помощью опорных маркеров: для областей I-III – эталонных уровней «белого», «серого» и «черного» сигналов согласно ITU-R BT.2408-2, полученных в эталонной среде просмотра ITU-R BT.2035 на эталонном мониторе при соответствующих настройках «идеальной» камеры. Место перегиба, угол наклона γ и вид функции участка B_VC_V влияют на светопередачу ярко освещенных объектов: уменьшая наклон. Наклон характеристики изменяется пропорционально количеству деталей светлого участка, которые были бы обнаружены. Также путем смещают точку перегиба B в положения $B_1 \dots B_k$, оставляя угол наклона постоянным, удерживая сигнал от ярких мест ниже уровня ограничения.

Гамма-компенсация и масштабирование управляют видом и углом наклона свет-сигнальной характеристики в области IV и гамму захватываемых или отображаемых цветов. Согласно ITU-R BT.2446-0 линейное масштабирование не обеспечивает наилучшего визуального восприятия, поскольку это слишком сильно увеличило бы среднюю яркость (не подходящую для комфортного просмотра) и создало бы проблемы с цветностью/насыщенностью из-за эффекта Ханта). Применение нелинейного преобразования в виде простой степенной функции (т. е. гамма-кривой) исключает обработку в про-

странстве RGB, что могло бы привести к смещению оттенков. Согласно ITU-R BT.2390-09 типичная сигмовидная форма, используемая для отображения освещения сцены демонстрирует сжатие или обрезание крайних ярких и темных областей, а в средней области – повышение контрастности (гамма больше 1). Гамма настраивается на пиковую яркость L_w монитора и регулируется в зависимости от условий просмотра контента и предпочтений пользователей, например, $\gamma = 1,18$ для OLED-дисплея (Sony BVM-X300) с $L_w = 1000$ кд/м²; $\gamma = 1,20$ для эталонного дисплея с $L_w = 1000$ кд/м²; $\gamma = 1,29$ для ЖК-дисплея (Canon DP-V3010) с $L_w = 2000$ кд/м². Для дисплеев с номинальной пиковой яркостью более 1000 кд/м² или где эффективная номинальная пиковая яркость снижается за счет использования регулятора контрастности, гамму следует регулировать в соответствии с формулой ITU-R BT.2390-09:

$$\gamma = 1,2 + 0,42lg\left(\frac{L_w}{1000}\right). \quad (1)$$

За пределами диапазона пиковой яркости соответствие модели начинает ухудшаться. Расширенная модель Rec. ITU-R BT.2390-7 показывает варьирование значений гаммы для сопоставления изображений с разной пиковой яркостью экрана: $\gamma = 0,85$ для $L_w = 100$ кд/м²; $\gamma = 0,88 \sim 0,95$ для $L_w = 200$ кд/м²; $\gamma = 0,97 \sim 1,05$ для $L_w = 300$ кд/м²; $\gamma = 1,1 \sim 1,29$ для $L_w = 400 \sim 1000$ кд/м²; $\gamma = 1,29 \sim 1,5$ для $L_w = -1000$ кд/м² и выше. Модель описывается формулой ITU-R BT.2390-7:

$$\gamma = 1,2k^{log_2(0,001L_w)}, \quad (2)$$

где $k = 1,111$.

Эксперименты BBC показали уменьшение гаммы по мере увеличения яркости окружающего пространства [BT.2390]: от 0,8 до 0,67 для $L_w = 100$ кд/м²; от 1,33 до 1,35 для $L_w = 1000$ кд/м². Линия наилучшего соответствия в условиях, отличных от эталонных, задается уравнением ITU-R BT.2390-09:

$$\gamma_{bright} = \gamma_{ref} - 0,076lg\left(\frac{L_{amb}}{5}\right), \quad (3)$$

где γ_{bright} – системная гамма для окружения дисплея более 5 кд/м²; γ_{ref} – системная гамма для эталонной среды, рассчитанная в соответствии с рекомендацией ITU-R BT.2100; L_{amb} – уровень яркости окружающей среды.

Альтернативная модель Борера включает в себя изменение гаммы с яркостью окружения [2]:

$$\gamma = \gamma_{ref} k^{log_2(L_w/L_{ref})} \cdot \mu^{log_2\left(\frac{L_s}{L_{sref}}\right)}, \quad (4)$$

где $\gamma_{ref} = 1,2$, $\mu = 0,98$, а эталонная яркость окружения $L_{sref} = 5$ кд/м².

Для более яркого фона значение системной гаммы может быть уменьшено. Корректировка гаммы для SDR-контента довольно близка к корректировке для HDR-контента, поэтому формула гаммы расширенного диапазона, приведенная в BT.2100-2, также может быть адаптирована для расчета изменения гаммы для масштабированного SDR. Для удвоения отображаемой яркости со 100 до 200 кд/м² формула становится [2]:

$$\gamma_{adj} = k^{log_2 2}, \quad (5)$$

где $k = 1,111$.

Анализ показал, что большинство подходов ориентируется на пиковую яркость эталонных мониторов, эталонные условия и среду просмотра с применением цветовых пространств (PCSXYZ или PCSLAB). Согласно ITU-R BT.2020 «идеальная» OETF может быть логарифмической в высоких тонах и описываться гамма-законом при слабом освещении, что, по сути, является формой гибридного логарифмического OETF.

Литература

1. ICCExperts' Day on HDR Colour Imaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.color.org>. – Дата доступа: 5.093.2022.
2. T. Borer, Display of high dynamic range images under varying viewing conditions, Proc. SPIE 10396, Applications of Digital Image Processing XL, 103960H (19 September 2017). <http://dx.doi.org/10.1117/12.2274253>

УДК 681.772

КОМБИНИРОВАННЫЙ ТЕПЛОВИЗИОННО-НОЧНОЙ ПРИБОР
Свибович И.В., Шкадаревич А.П.

*Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе приведено описание современных приборов ночного видения, принцип работы которых основан на электронно-оптических преобразователях и на микроболометрических матрицах. Рассказано о преимуществах и недостатках данных приборов. Приведен прибор, который совмещает в себе все преимущества данных приборов, но при этом лишен их недостатков. Кратко рассказано о его принципе работы, технических характеристиках, касающихся дальностей обнаружения и распознавания объектов, приведен лучший мировой аналог.

Ключевые слова: электронно-оптический преобразователь, тепловизионный модуль, комбинированное изображение.

COMBINED THERMAL IMAGING-NIGHT DEVICE
Svibovich I., Shkadarevich A.

*Scientific and Technical Center LEMT of the BelOMO
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The paper describes modern night vision devices, the principle of operation of which is based on electron-optical converters and microbolometric matrices. The advantages and disadvantages of these devices are described. A device is given that combines all the advantages of these devices, but at the same time is devoid of their disadvantages. It is briefly described about its principle of operation, technical characteristics concerning the ranges of detection and recognition of objects, the best world analogue is given.

Key words: electron-optical converter, thermal imaging module, combined image (fusion).

*Адрес для переписки: Свибович И.В., ул. Макаенка, 23, корп. 1, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ilya_svibovich@mail.ru*

С момента своего изобретения, и до настоящего времени, приборы ночного видения применяются повсеместно (ведения скрытного наблюдения (разведки) в темное время суток и в темных помещениях, вождения машин без использования демаскирующего света фар и т. п.).

Принцип работы прибора ночного видения на электронно-оптическом преобразователе заключается в усилении видимого света при помощи электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Фотокатод преобразует слабые световые потоки (ближний инфракрасный диапазон (длина волн от 0,7 до 1,5 мкм), в потоки электронов. Эти электронные потоки усиливаются, после чего «бомбардируют» люминесцентный экран, на котором и воспроизводится усиленное изображение. Максимум спектра излучения таких экранов как правило приходится на 495–570 нм (зеленый цвет). Из-за этого усиленное изображение местности тоже зеленое (экраны могут быть и черно-белыми, и желтыми, здесь приведен пример зеленого, как наиболее распространенного). Но все же это изображение сохраняет привычный для человека вид, что позволяет достаточно быстро к нему привыкнуть в процессе эксплуатации.

В свою очередь работа неохлаждаемого тепловизионного прибора, в котором в качестве детектора используется микроболометр, построена на эффекте изменения электрического сопротивления

при попадании на него инфракрасного излучения с длинами волн от 7 до 14 мкм. Это изменение сопротивления измеряется и преобразуется в температуру, которая далее используется для создания изображения.

Получаемое изображение (выводится на дисплеи, микродисплеи) имеет непривычный для человека вид. В тепловой картинке теряются привычные детали, и появляются новые, которые зависят от температуры конкретных участков объекта наблюдения.

После краткого описания двух видов приборов наблюдения, опишем их преимущества и недостатки.

Из явных преимуществ приборов ночного видения следует выделить их способность видеть в темноте, в которой невооруженный глаз не смог бы ничего рассмотреть. Кроме этого, изображение, которое дает прибор при этом, достаточно привычно для человека, и позволяет без проблем понять, что или кто находится перед наблюдателем. Однако при всем этом прибору ночного видения все же необходим источник света. В ближнем инфракрасном диапазоне единственным естественным источником света является солнце. Поэтому для использования таких приборов в условиях отсутствия звездного неба либо света луны, необходимы специальные источники подсветки (инфракрасные прожекторы). Кроме того

дальность, на которой данные приборы могут обнаруживать и распознавать объекты, относительно невысокая.

В противовес им тепловизионные приборы лишены этого недостатка. Они позволяют вести наблюдение в условиях абсолютной темноты, так как работают в области длинами волн от 7 до 14 мкм. Так же дальности обнаружения объекта наблюдения в таких приборах на порядок выше. К минусам тепловизионных приборов стоит отнести непривычное человеческому глазу изображение местности. Идентифицировать конкретного человека, а в некоторых случаях и вообще объект наблюдения (легко спутать нагретый объект наблюдения с человеком или животным на определенном расстоянии) является сложной задачей даже для опытного пользователя. Кроме того, обычное стекло, прозрачное в видимом диапазоне спектра, является непрозрачным для тепловизоров. Из-за этого невозможно обнаружить кого-либо в здании за закрытыми окнами или в автомобиле.

С целью устранения недостатков приведенных выше приборов наблюдения, предложено использовать комбинированный прибор наблюдения, в котором нет недостатков, описанных выше, но при этом сохранены все преимущества.

На предприятии «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО» изготовлено и испытано несколько типов подобных приборов.

Один из них – комбинированный прибор наблюдения TN-KS/2M (рис. 1).

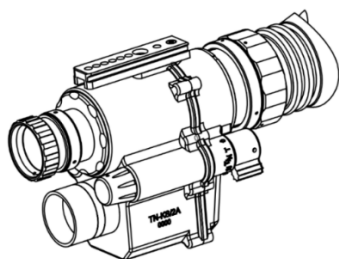


Рисунок 1 – Общий вид прибора TN-KS/2M

Данный прибор имеет два канала наблюдения – тепловизионный и ночной. Ночной канал построен на ЭОПе (возможна установка ЭОПов поколения 2+ и 3). Тепловизионный канал базируется на неохлаждаемой микроболометрической матрице (разрешение 384×288 либо 640×480, и размером пикселя 12 мкм). Принцип действия прибора основан на комбинировании эффекта тепловизионного изображения с традиционным усилением изображения, полученного в ближнем инфракрасном диапазоне. Изображение двух каналов сводится оптически внутри прибора, в результате чего получается общее изображение.

В дополнение ко всему тепловизионное изображение программным способом оконтуривает изображение ночного канала (пример изображения представлен на рис. 2).



Рисунок 2 – Пример комбинированного изображения с оконтуриванием

Прибор наблюдения TN-KS/2M благодаря ночному каналу сохранил возможность относительно простой идентификации объекта наблюдения, что является важным параметром, при ведении наблюдения в условиях быстро меняющейся обстановки. Также благодаря тепловизионному каналу прибор получил относительно большую дальность обнаружения объекта наблюдения. Это дает наблюдателю дополнительное время для принятия решения о своих действиях в случае обнаружения тех или иных объектов.

Дальности обнаружения и распознавания прибора наблюдения TN-KS/2M приведены в табл. 1.

Таблица 1. Дальности обнаружения и распознавания

Наименование параметра	Значение
Дальность обнаружения объекта 1,7×0,5 м (ночной канал)	200 м
Дальность распознавания объекта 1,7×0,5 м (ночной канал)	100 м
Дальность обнаружения объекта 1,7×0,5 м (тепловизионный канал)	600 м
Дальность распознавания объекта 1,7×0,5 м (тепловизионный канал)	250 м

Вывод. Комбинированный прибор наблюдения TN-KS/2M расширяет возможности применения приборов ночного видения. Его аналогом является прибор AN/PSQ-20 или ENVG американской компании ITT Exelis, Inc., созданный для армии США. Однако комбинированный прибор наблюдения TN-KS/2M не уступает ему по своим характеристикам. Современные технологии производства позволяют производить на предприятии «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО» высокотехнологичные приборы наблюдения, которые не уступают лучшим мировым аналогам.

УДК 535.07

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПАНКРАТИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИФРАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Стасилович В.А., Шишкин И.П., Шкадаревич А.П.

*Унитарное предприятие НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье представлены основные параметры влияющие на качество изображения создаваемое прицелом с оптическим элементов с дифракционной поверхностью, проведен анализ получаемого качества изображения панкратических прицелов с применением оптических элементов с применением дифракционных поверхностей. Представлен расчетный график результатов частотно-контрастной характеристики для прицелов без и с применением оптических элементов с дифракционной поверхностью.

Ключевые слова: оптический прицел, панкратическая система, частотно-контрастная характеристики, дифракционная поверхность.

EVALUATION OF THE IMAGE QUALITY OF A PANCRATIC SIGHT USING OPTICAL ELEMENTS WITH A DIFFRACTION SURFACE

Stasilovich V., Shishkin I., Shkadarevich A.

*Unitary Enterprise STC «LEMT» of the BelOMO
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The article presents the main parameters affecting the image quality created by the sight with optical elements with a diffraction surface, the analysis of the resulting image quality of pancratic sights with the use of optical elements with the use of diffraction surfaces. A calculated graph of the results of contrast transfer function for sights without and with the use of optical elements with a diffraction surface is presented

Key words: optical sight, pancratic system, contrast transfer function, diffraction surface.

*Адрес для переписки: Стасилович В.А. Макаёнка 23, Минск 220114, Республика Беларусь
e-mail: stasilovich19@gmail.co*

Высокоточная стрельба из снайперского оружия стала возможной благодаря прогрессу в развитии высокоточного снайперского оружия. Такая стрельба позволяет производить выстрелы с угловыми расстояниями друг относительно друга не более 0,5'. Для такой стрельбы применяются специально отобранные боеприпасы, которые будут иметь незначительные отличия в баллистиках.

При такой стрельбе от стрелка требуется высокая концентрация на изображении и крайне важно, чтобы напряжение при рассматривании изображения было минимальным или отсутствовало вовсе, т. е. изображение, поступающее к стрелку, имело высокое качество. Таким качеством обладают прицелы с изображением, имеющим высокий контраст мельчайших элементов, сопоставимых с угловыми размерами отдельных элементов цели, иными словами прицелы с высокой частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ).

Расчет панкратических прицелов с такими характеристиками сложная и кропотливая задача. Применения специальных компьютерных программ для расчета оптических систем позволяет упростить процесс создания такой оптической системы, однако ограниченность, возникающая при применении стекол только оптическими параметрами, которые вносят другие искажения, не способны в полной мере решить проблемы создания оптической системы с качеством оптического изображения близкому к дифракционному.

Причем точности размеров для оптических элементов достигают высоких требований к значениям параметров. Требуются высокие требования к толщине оптических элементов, где они достигают величин $\pm 0,05$ мм и меньше. Для параметра децентрировки оптического элемента относительно оптической оси требуются величины до $\pm 0,03$ мм – для неподвижных элементов и до $\pm 0,005$ мм для подвижных элементов панкратической системы.

Технологические нюансы изготовления прицелов обусловлены оптимизацией изготовления оптических и механических деталей, процесса сборки и юстировки, а также контроля качества. При этом создание технологичного прицела начинается во время разработки и конструирования прицела с учетом имеющегося оборудования обработки и контроля деталей, узлов и всего прицела в целом. Особая роль отводится выбору способа крепления деталей, оптимизации механических процессов нанесения как оптических, так и механических покрытий, а также обеспечения чистоты поля зрения и отсутствия осыпки на всех оптических элементах прибора. Однако вопрос высокого качества изображения оптических прицелов решается не только децентрировкой и наклоном оптических элементов относительно общей оптической оси, но также применением высококачественного стекла, высокой точности обработки оптических элементов, соответствие

положения оптических элементов панкратической системы расчетному при изменениях увеличения [1]. Для выполнения задачи построения высококачественного изображения требуется применять стекла с оптическими параметрами достигающими первой категории показателя преломления и коэффициента дисперсии, а поверхности таких оптических элементов должны иметь допусковую сферичность – N не более 3 и поле допуска формы – ΔN не более 0,3.

Изготовление таких оптических элементов весьма дорогостояще и трудозатратно, особенно для оптических элементов больших габаритных размеров – более 40 мм в диаметре, а также требует применения сложных и продолжительных технологических процессов при изготовлении оптической системы – индивидуальный пооперационный контроль параметров оптических элементов и специальные способы установки оптических элементов в корпус оптической системы.

Однако даже при соблюдении всех параметров – качество изображения на больших увеличениях не будет достигать дифракционных пределов.

Одним из путей решения данной проблемы является применение при расчете оптических систем элементов с дифракционными поверхностями [2]. Расчетные параметры ЧКХ для панкратических прицелов 5–25 без и с применением оптического элемента с дифракционной поверхностью представлены на рис. 1.

На рис. 1 показаны графики панкратических прицелов при увеличении изображения 25 крат по оптической оси прицела. Из графиков прекрасно

видно, что применение дифракционного элемента позволяет повысить контраст изображения панкратического прицела в 1,5–2 раза при разрешающей способности 1–2 штр/мрад.

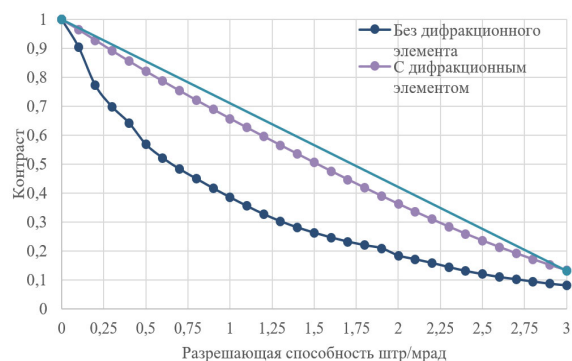


Рисунок 1 – Графики панкратических прицелов при увеличении изображения 25 крат по оптической оси прицела

Литература

1. Заварзин, В. А. Оптический прицел переменного увеличения / В. А. Заварзин // Вестник московского государственного технического университета им. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2009. – С. 11–21.
2. Степанов, С. А. Компьютерный расчет оптических систем в области аббераций высших порядков // Компьютерная оптика / С. А. Степанов, Г. И. Грейсух // Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» (Самарский университет). – 1996. – С. 9–12.

УДК 628.938, 628.981

СВЕТОДИОДНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДНЕВНОГО СВЕТА СЕРИИ «D»

Цвирко В.И., Острцов Е.Ф., Трофимов Ю.В., Лишик С.И.

Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты моделирования и исследований источников света, со спектрами близкими к стандартным осветителям серии «D». В качестве исходных излучателей были использованы коммерческие светодиоды в комбинации с люминофорными композициями. Разработан и исследован экспериментальный образец светодиодного модуля, близкий к стандартному осветителю D65, который может быть использован для контроля цвета в промышленности.

Ключевые слова: светодиод, люминофор, стандартный осветитель серии «D», индекс цветопередачи.

LED MODULES FOR STANDARD DAYLIGHT "D" SERIES ILLUMINANTS

Tsvirka V., Ostretsov E., Trofimov Y., Lishik S.

SE «Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus»
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of modeling and research of light sources with spectra similar to standard "D" series illuminants are presented. Commercial light-emitting diodes in combination with phosphor compositions were used as initial emitters. An experimental sample of the LED module, close to the standard D65 illuminant, has been developed and studied, which can be used for color control in industry.

Key words: LED, phosphor, standard "D" series illuminant, color rendering index.

Адрес для переписки: Цвирко В.И., Логойский тракт, 20, Минск 220090, Республика Беларусь
e-mail: vitalii.tsvirko@gmail.com

Стандартные источники света серии «D» (D50, D55, D65) используются для контроля цвета в полиграфии и промышленности. Ранее для создания стандартных источников света (ИС) серии «D» использовали гибридный подход (комбинация монохромных светодиодов, галогенных ламп и интерференционных фильтров) [1] или комбинацию коммерческих монохромных и белых светодиодов [2].

Нами предложен и успешно опробован способ создания ИС типа D65 на основе коммерческих светодиодов и люминофорных композиций. Использование люминофорных композиций позволяет более аккуратно проводить корректировку спектра излучения комбинации светодиодов с различными спектральными распределениями излучения. С этой целью были изготовлены около 30 образцов светодиодов на основе коммерческих синих, белых светодиодов и люминофорных композиций с зеленым, желтым и красным люминофорами и исследованы их характеристики ($t_c = 25^\circ\text{C}$, 105 мА).

Созданный светодиодный модуль (СМ) позволяет наиболее близко воспроизводить спектральную характеристику стандартного ИС CIE D65 в диапазоне длин волн от 400 нм до 660 нм, см. рис. 1. Расчетная модель ИС «D65» строилась на основе сложения экспериментальных данных шести моделей светодиодов с различными люминофорными композициями. Экспериментальный образец СМ создан на базе 36 светодиодов с типоразмером корпуса 30×30, компактно установленных на алюминиевой печатной плате, см. рис. 2. СМ имеет два вывода для подключения питания.

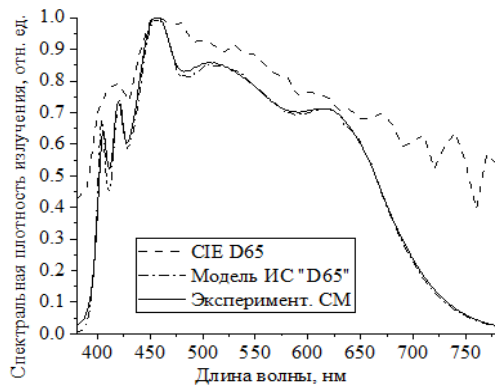


Рисунок 1 – Спектральные распределения излучения расчетной модели СМ, экспериментального образца СМ и стандартного ИС CIE D65

Рабочий ток изготовленного СМ составляет 700 мА, потребляемая мощность СМ – около 13 Вт; световой поток – 1300 лм; коррелированная цветовая температура – 6578 К; координаты цветности $x = 0,3116$, $y = 0,3272$; общий индекс цветопередачи $R_a = 98,7$; частные индексы цветопередачи: $R_1 = 98,1$; $R_2 = 98,8$; $R_3 = 99,4$; $R_4 = 98,3$; $R_5 = 98,4$; $R_6 = 98,1$; $R_7 = 99,0$; $R_8 = 99,3$; $R_9 = 98,8$; $R_{10} = 97,6$; $R_{11} = 96,7$; $R_{12} = 97,1$; $R_{13} = 98,1$; $R_{14} = 99,3$; $R_{15} = 98,8$; $R_{16} = 98,3$.

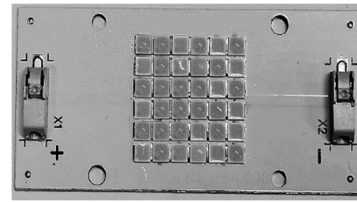


Рисунок 2 – Фотография экспериментального образца СМ для стандартного ИС D65

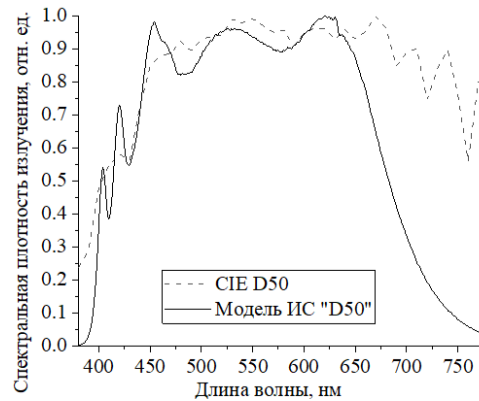


Рисунок 3 – Спектральные распределения излучения расчетной модели ИС «D50» и стандартного ИС CIE D50

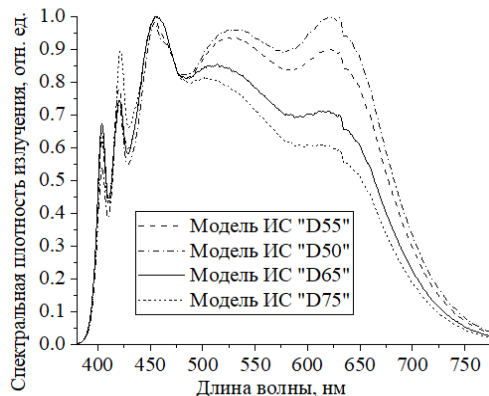


Рисунок 4 – Спектральные распределения излучения расчетных моделей ИС серии «D»

Полученные значения цветовых параметров говорят о высокой степени соответствия изготовленного СМ требованиям, предъявляемым к стандартному ИС типа D65.

Используя аналогичный набор светодиодных компонент и при условии сохранения общего количества светодиодов в СМ были рассчитаны спектральные распределения излучения модельных ИС близких к стандартным ИС D50, D55 и D75. В табл. 1 приведены значения общего и частных индексов цветопередачи модельных ИС. Для примера на рис. 3 приведены спектральные распределения излучения расчетной модели ИС «D50» и стандартного ИС CIE D50. Сравнение этих зависимостей позволяет говорить о высокой воспроизводимости расчетной модели ИС спектра ИС CIE D50 в диапазоне длин волн от 400 нм до 660 нм.

Таблица 1. Индексы цветопередачи модельных СИ для различных СИ серии «D»

Обозначение характеристики	СИ «D50»	СИ «D55»	СИ «D65»	СИ «D75»
Ra	98,8	98,2	99,1	99,4
R1	98,7	98,7	99,1	99,4
R2	98,8	98,7	99,5	99,9
R3	99,8	97,4	99,1	99,0
R4	99,2	97,1	99,1	99,2
R5	99,2	99,1	99,4	99,6
R6	98,2	98,3	98,8	99,2
R7	98,0	98,2	99,1	99,6
R8	98,1	98,2	98,6	99,1
R9	96,7	96,2	96,4	97,4
R10	98,1	97,3	98,8	99,5
R11	98,2	95,9	97,5	97,7
R12	94,0	98,2	96,2	96,9
R13	98,2	98,7	99,2	99,3
R14	99,4	98,3	99,4	99,3
КЦТ	5000	5500	6500	7550

На рис. 4 приведены спектральные распределения излучения расчетных моделей СИ серии «D», характеристики которых приведены в табл. 1.

УДК 681.785.554

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА «ВИЗИР»

Цикман И.М., Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Попков А.П.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Работа посвящена модернизации комплекса «Визир» для измерения двунаправленных коэффициентов отражения, включающей изменение оптической схемы регистрации отраженного оптического сигнала, в результате чего в несколько раз удалось повысить точность измерений двунаправленных коэффициентов отражения на проблемных участках – краях спектральных диапазонов спектрометров, используемых для регистрации данных.

Ключевые слова: коэффициент спектральной яркости, поле зрения, спектрометр.

UPGRADING OF THE «VIZIR» INSTRUMENT Tsykman I., Bruchkouski I., Litvinovich H., Popkov A.

A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The work is dedicated to the upgrading of the instrument "VIZIR" for measuring bidirectional reflectance function including a changes in it's optical scheme for recording an optical signal, as a result of which it was possible to increase the accuracy of measuring bidirectional reflection function in several times for the problem areas - the edges of the spectral ranges of spectrometers used for data recording.

Key words: bidirectional reflectance function, field of view, spectrometer.

Адрес для переписки: Цикман И.М., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: tsik02@bsu.by

Комплекс «Визир» [1] предназначен для измерения пространственного распределения спектральной яркости отражающей поверхности объектов природного или искусственного происхождения в спектральном диапазоне 0,35–2,5 мкм. При измерении спектральных отражательных ха-

Использованный нами подход позволяет разработать СИ, близкие к стандартным СИ серии «D», используя от 5 до 6 моделей светодиодов, на которые наносится 3 варианта люминофорных композиций на основе бирюзового, зеленого и красного люминофоров.

Таким образом возможно создание светодиодных модулей со спектрами, близкими к стандартным СИ серии «D» для задач колориметрии по разработанной нами технологии спектральной модификации светодиодов. Разработанные светодиодные модули могут найти применение для изготовления осветительных устройств, предназначенных для контроля цвета в промышленности.

Литература

1. Арапов, С. Ю. Гибридный лабораторный источник света для полиграфии, спектрально близкий к стандартным излучателям "D" / С. Ю. Арапов, С. П. Арапова, А. Г. Тягунов // Светотехника. – 2016. – № 2. – С. 24–28.
2. Мезенцева, С. Г. Автономный мобильный источник света для визуального цветового контроля / С. Г. Мезенцева, А. Н. Тюменев, С. Ю. Арапов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 4 (32). – С. 3–7.

рактеристик поверхности выполняется регистрация относительной величины отраженного излучения от объекта исследования (L) и от эталонной Ламбертовской поверхности (L_{MC}), в качестве которой используется пластина из молочного стекла марки MC-20 толщиной 10 мм. Коэффициент

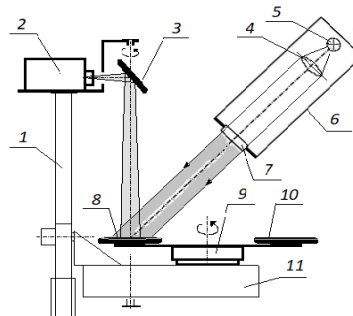
спектральной яркости (КСЯ) для одного направления (углов визирования) регистрации рассчитывается как отношение: $КСЯ = L / L_{МС}$.

При измерении КСЯ образцов природного или искусственного происхождения в спектральном диапазоне 0,35–2,5 мкм двумя спектрометрами возможна проблема «сшивки» данных двух приборов, поскольку на краях рабочих спектральных диапазонов спектрометров их чувствительность отличается. Кроме того для комплекса «Визир» возможными источниками погрешностей измерения КСЯ рассматривались: неоднородность материала образца, чувствительность спектрометров к поляризации, наложение на отдельные участки спектров высших порядков дифракции, спектральные диапазоны чувствительности спектрометров.

Первоначально измерительный модуль комплекса включал два спектрометра: один на спектральный диапазон 0,35–1,0 мкм, другой на диапазон 1,0–2,5 мкм. Спектрометры были расположены рядом друг с другом на одной платформе, имеющей подвижные регулировки, и для измерения одного и того же участка образца располагались под небольшим углом к вертикали, кроме того их входные щели были расположены под углом 90°, что при поляризационной анизотропии образца вносило дополнительный вклад в погрешность измерения. При измерении сыпучих образцов (песок) исследования показали, что погрешность до 2 % результата измерения КСЯ может зависеть от различного расположения неоднородных частиц составляющих образец. С целью повышения точности измерений для перекрытия спектральных диапазонов при регистрации данных, измерительный модуль комплекса был дополнен *третьим спектрометром* ПСР-700 с рабочим спектральным диапазоном 0,8–1,5 мкм.

Измененная оптическая схема комплекса «Визир» показана на рис. 1. Все три спектрометра (2) оснащались входными объективами, которые позволили реализовать размеры полей зрения спектрометров квазидинаковыми. Для совмещения трех полей зрения спектрометры расположены на общей платформе так, чтобы их оптические оси лежали в одной плоскости и пересекались в точке, где и устанавливалось подвижное *плоское зеркало* (3), ломающее оптическую ось под углом 90°. Платформа со спектрометрами и зеркалом (измерительный модуль) закреплена на качающейся штанге (1) комплекса и имеет возможность юстировки в двух осях. Поворачиваясь, плоское зеркало (3) направляет отраженное от поверхности образца излучение в каждый из спектрометров поочередно. Поворот зеркала осуществляется при помощи шагового двигателя, в качестве реперной точки используется датчик Холла. При юстировочных работах по сведению полей зрения спектрометров измерительного модуля использовался *красный лазер*, имитирующий оптическую ось комплекса, в результате чего угол поворота зеркала для наведения на каждый спектрометр осуществлялся

автоматически. Это значительно повысило удобство настройки и контроля положения полей зрения спектрометров. Таким образом, удалось реализовать квазидинаковую геометрию измерений для трех спектрометров и контролировать положение полей зрения при помощи лазера.



1 – качающаяся штанга с измерительным модулем;
2 – три спектрометра; 3 – плоское поворотное зеркало;
4 – линза коллиматора; 5 – галогенная лампа осветителя; 6 – бленда осветителя; 7 – моторизованная ирисовая диафрагма; 8 – исследуемый объект; 9 – оптический поворотный столик; 10 – эталонная поверхность; 11 – поворотная (несущая) платформа комплекса

Рисунок 1 – Схема измерения КСЯ

Для устранения влияния факторов внешней среды (температура, влажность), тепловых флуктуаций осветителя и приемников излучения прежней методики измерения [2] в данной работе применялась последовательная регистрация данных от образца и эталонной поверхности при неизменной геометрии визирования (для каждого нового углового положения). Для реализации новой методики измерения был сконструирован *блок для быстрой смены объекта* регистрации. Он представляет собой моторизованный оптический поворотный столик (9) с закрепленным на нем приспособлением для установки с одного края образца (8), с другого – МС 20 (10). Поочередная смена объектов регистрации выполняется автоматически по команде оператора.

Для исключения паразитной засветки также была выполнена модернизация блока осветителя комплекса.

Осветительная система комплекса (имитатор солнечного излучения) включает коллиматор (4), в фокальной плоскости которого расположена галогеновая лампа (5) мощностью 1300 Вт. Такой мощный источник светового излучения, находясь на расстоянии менее двух метров от объекта исследования при длительном воздействии вызывает нагрев объекта, что крайне нежелательно для растительных объектов. Для устранения длительного воздействия светового излучения на исследуемые образцы, блок освещения дополнен *блендой* (6) и моторизованной ирисовой *диафрагмой* (7) диаметром 90 мм. Бленда (6) ограничивает световой поток коллимированного излучения, тем самым уменьшая паразитные засветки. Диафрагма (7)

ограничивает время теплового воздействия на образец на период регистрации сигнала. Механизм открывания и закрывания ирисовой диафрагмы работает как в ручном режиме, так и автоматическом по заданию оператора. На рис. 2 представлен пример результата измерения КСЯ тремя спектрометрами по новой методике измерения.

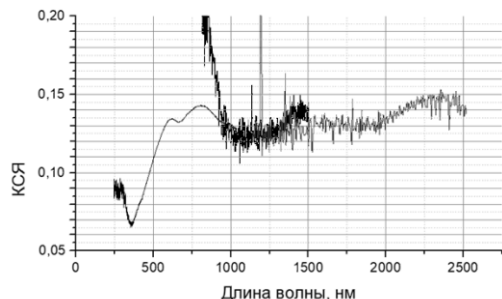


Рисунок 2 – Пример результата измерения КСЯ на комплексе «Визир»

Проведенная модернизация комплекса «Визир» позволила в несколько раз уменьшить погрешности в согласовании данных, полученных

разными спектрометрами, при расчете спектральных коэффициентов отражения поверхностей исследуемых растительных объектов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Президента Республики Беларусь – на разработку фотоспектрального аппаратно-программного комплекса в целях реализации технологической аэрокосмической диагностики состояния лесных территорий, а также в рамках ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2021–2025 гг.

Литература

1. Сизиков, А. С. Создание отечественного комплекса «Визир» для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов / А. С. Сизиков, Ю. В. Беляев, И. М. Цикман // СБОР «Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza / Safety & Fire Technique». – 2018. – № 2(50). – С. 28–37.

2. Определение спектрополяризационных характеристик загрязнений поверхности Земли, возникающих вследствие чрезвычайных ситуаций, с помощью измерительного комплекса «ВИЗИР» / А. С. Сизиков [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2019. – № 2(46). – С. 102–116.

УДК 535.37;620.3

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ (ЛЮТЕЦИЙ)-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТОВ И АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ

Юмашев К.В.¹, Хорт А.А.², Подболотов К.Б.³, Шиманский В.И.⁴

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Королевский технологический институт
Стокгольм, Швеция

³Физико-технический институт НАНБ

⁴Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы спектры люминесценции нанокристаллов иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов и алюмината гадолия, активированных ионами европия, которые синтезированы методом экзотермического горения в растворах. Определены координаты цвета CIE для исследуемых образцов, которые находятся в оранжевой области спектра.

Ключевые слова: спектры люминесценции, спектрометр.

LUMINESCENCE PROPERTIES OF YTTRIUM (LUTETIUM)-ALUMINUM GARNETS AND GADOLINIUM ALUMINATE DOPED WITH EUROPIUM IONS

Yumashev K.¹, Khort A.², Podbolotov K.³, Shimanski V.⁴

¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²KTH Royal Institute of Technology
Stockholm, Sweden

³Physical Technical Institute of NASB

⁴Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The luminescence spectra of europium-doped nanocrystals of yttrium-aluminum garnet, lutetium-aluminum garnet, and gadolinium aluminate synthesized by the solution combustion technique have been studied. The CIE color coordinates for the studied samples are determined which are located in the orange light region.

Key words: luminescence, spectrometer.

Адрес для переписки: Юмашев К.В., пр. Независимости, 65/17, Минск 220113, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

Нанокристаллы редкоземельных гранатов и алюминатов, активированные ионами европия, являются перспективными средами для порошковых и керамических люминофоров. Данные кристаллы отличаются достаточно хорошими механическими, теплофизическими, а также спектроскопическими свойствами, в частности, высоким квантовым выходом люминесценции и относительно большими временами жизни ионов европия в возбужденном состоянии. Температурно-зависимая люминесценция нанокристаллов редкоземельных гранатов с ионами европия используется в термографической люминофорной термометрии [1].

Отличительной особенностью ионов европия является сильная зависимость относительной интенсивности электрического ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ и магнитного ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ дипольных переходов от симметрии локального окружения. Это свойство ионов европия используется для детектирования изменений и искажений структуры исследуемого материала.

Люминофоры на основе нанокристаллов редкоземельных гранатов и алюминатов, активированных редкоземельными ионами, синтезируются различными методами. В частности, известны золь-гель метод [2], гидротермальный метод [3] и осаждения из растворов [4], метод твердофазного спекания.

В настоящей данной работе исследуются спектры люминесценции нанокристаллов иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия, которые синтезированы методом экзотермического горения в растворах. Данный метод, по сравнению с указанными выше, отличается низкой стоимостью, простотой, быстротой, высокой энергетической эффективностью и позволяет достичь более высокого структурного совершенства и однородности получаемых материалов [5].

Из полученных порошков синтезированных материалов после измельчения и последующей термообработки в течение одного часа при температуре 1300 °C приготавливались исследуемые образцы в виде таблеток.

Согласно данным рентгенофазового анализа исследуемые образцы представляют собой нанокристаллы алюмината гадолиния, содержащие ионы европия с концентрацией 10 ат.% [10 ат.% $\text{Eu}^{3+}:\text{GdAlO}_3$ (10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$)], имеющие орторомбическую сингонию (пространственная группа точечной симметрии P_{bnm}), и нанокристаллы иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов, содержащие ионы европия с концентрацией 20 и 10 ат.% соответственно [20 ат.% $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (20 ат.% $\text{Eu}:\text{YAG}$) и 11 ат.% $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$)], имеющие кубическую сингонию (пространственная группа

точной симметрии $Ia3d$). Средний радиус нанокристаллов составляет ~24 нм для 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$ и ~20 нм для 20 ат.% $\text{Eu}:\text{YAG}$ и 11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции исследуемых образцов в зелено-желто-красной области спектра, диапазоне длин волн 0,550 – 0,730 мкм (длина волны возбуждения составляла 0,400 мкм). Для образца 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$ наблюдаются полосы при 0,574, 0,590, 0,617, 0,650 и 0,691 мкм [рис. 1 (а)], которые относятся к переходам из метастабильного возбужденного состояния 5D_0 на энергетические уровни 7F_0 , 7F_1 , 7F_2 , 7F_3 и 7F_4 иона Eu^{3+} (рис. 2) соответственно.

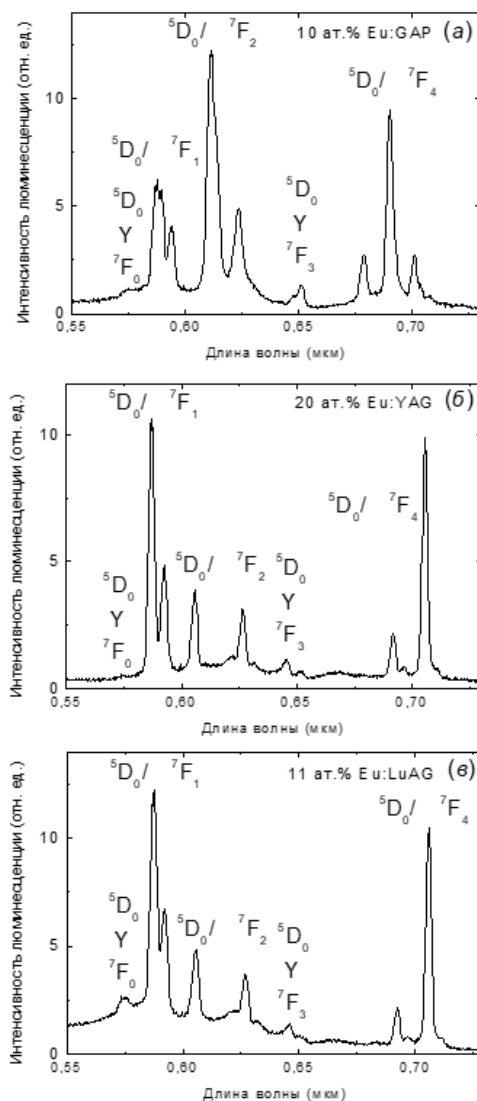


Рисунок 1 – Спектры люминесценции образцов (а) 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$, (б) 20 ат.% $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и (в) 11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$

Для образцов для 20 ат.% $\text{Eu}:\text{YAG}$ и 11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$ наблюдаются полосы при 0,574 (переход ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$ иона Eu^{3+}), 0,588 (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$), 0,616 (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$), 0,647 (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$) и 0,700 мкм (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$) [рис. 1 (б, в)].

Отношение $R = F_2/F_1$ интегральных интенсивностей полос красной (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$) и оранжевой (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$) люминесценции обычно рассматривается как мера симметрии позиции, в которой находится ион Eu^{3+} . Более низкие ($\theta < R < 1$) и более высокие ($R > 1$) значения R указывают соответственно на более высокую и более низкую симметрию позиции.

Для 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$ величина R больше единицы ($R = 2,2$). Это свидетельствует о том, что ионы Eu^{3+} занимают в узлах кристаллической решетки низкосимметричные позиции без центра инверсии, что согласуется с координацией ионов Gd^{3+} , которые замещаются ионами Eu^{3+} в кристалле GAP.

Значение R для 20 ат.% $\text{Eu}:\text{YAG}$ и 11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$ меньше единицы (0,45 и 0,43 соответственно) и указывает на то, что ионы Eu^{3+} занимают в решетке кристалла высокосимметричные позиции с центром инверсии. Это, в свою очередь, согласуется с координацией ионов Y^{3+} и Lu^{3+} , которые замещаются ионами Eu^{3+} в кристаллах YAG и LuAG.

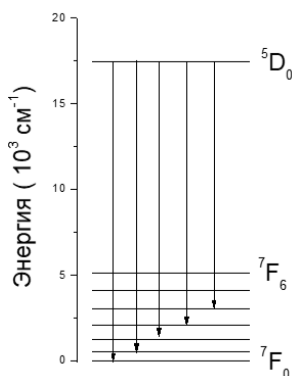


Рисунок 2 – Схема нижних уровней энергии свободного иона Eu^{3+}

По спектрам люминесценции рассчитаны координаты цвета CIE. Координаты цвета для исследуемых образцов [для 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$ $x = 0,63$, $y = 0,37$; для 20 ат.% $\text{Eu}:\text{YAG}$ $x = 0,61$, $y = 0,39$,

для 11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$ $x = 0,59$, $y = 0,41$] находятся в оранжевой области спектра (рис. 3), чистота цвета составляет более 99 %.

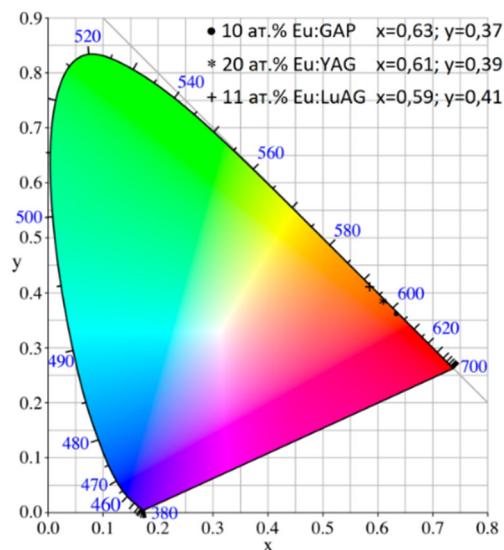


Рисунок 3 – Диаграмма цветности CIE, показывающая цвета для образцов 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GAP}$, 20 ат.% $\text{Eu}:\text{YAG}$ и 11 ат.% $\text{Eu}:\text{LuAG}$, возбуждаемых на длине волны 0,400 мкм

Литература

- Heyes, A. L. Thermographic phosphor thermometry-physical principles and measurement capability, in: C.H. Sieverding, J.-F. Brouckaert (Eds.), VKI Lecture Series on Advanced Measurement Techniques for Aero and Stationary Gas Turbines, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels, 2004.
- Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing, Characterization and Applications / Ed. Sumio Sakka, Springer, 2004. – 1980 p.
- Materials Research Bulletin / Y. Hakutaa [et al.]. – 2003. – P. 1257–1265.
- Viswanatha, R. Growth of nanocrystals in solution. Nanomaterials Chemistry: Recent Developments and New Directions / R. Viswanatha, D.D. Sarma // Wiley Online Library. – 2007. – P. 138–170.
- Chemistry – A European Journal / E. Carlos [et al.]. – 2020. – Vol. 26. – P. 9099–9125.

УДК 535.37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ В Yb-Er ФТОР-ФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ

Ясюкевич А.С.¹, Кулешов Н.В.¹, Колобкова Е.В.²¹НИЦ ОМТ, Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Изучены спектроскопические характеристики фтор-фосфатных стекол, соактивированных ионами Er³⁺ и Yb³⁺, проанализированы каналы переноса энергии возбуждения между ионами иттербия и эрбия. Проведено численное моделирование кинетик люминесценции в видимой и инфракрасной областях спектра и определены параметры переноса энергии.

Ключевые слова: фтор-фосфатные стекла, ионы Er³⁺, Yb³⁺, перенос энергии возбуждения.

EXCITATION ENERGY TRANSFER PARAMETERS STUDY IN Yb-Er FLUORIDE-PHOSPHATE GLASSES

Yasukevich A.¹, Kuleshov N.¹, Kolobkova E.²Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of BelarusITMO University
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. Spectroscopic characteristics of Yb-Er codoped fluoride-phosphate glasses were studied, channels of excitation energy transfer between ytterbium and erbium ions were analyzed. Numerical simulation of luminescence kinetics in visible and infrared spectral regions were performed and energy transfer parameters were determined.

Key words: fluoride-phosphate glasses, Er³⁺ and Yb³⁺ ions, energy transfer parameters.

Адрес для переписки: Ясюкевич А.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Стекла, активированные ионами иттербия и эрбия, широко применяются для создания различных устройств лазерной техники, приборов для отображения информации, температурных сенсоров и других. Фторидные стекла благодаря низкому значению энергии фононов обеспечивают эффективную ап-конверсионную люминесценцию в зеленой и красной областях спектра. Небольшое содержание, до 5 мол.%, фосфатных соединений во фторидных стеклах способствуют улучшению механических и оптических характеристик стеклянной матрицы и не оказывают существенного влияния на спектроскопические характеристики ионов-активаторов [1, 2]. Синтез стекла подробно описан в [1, 2]. В отличие от работ [1, 2] в исследуемых нами стеклах содержание ErF₃ фиксированно, 0,1 мол.%, а содержание YbF₃ изменяется в пределах 2 – 10 мол.%.

В данной работе подробно изучены абсорбционные и люминесцентные характеристики иттербий-эрбиевых стекол. Люминесценция в зеленой области спектра представлена двумя линиями ≈520 нм и ≈540 нм, переходы ²H(2)_{11/2}→⁴I_{15/2} и ⁴S_{3/2}→⁴I_{15/2}, соответственно. В красной области спектра присутствует полоса люминесценции в области 650 нм, переход ⁴F_{9/2}→⁴I_{15/2}.

Основное внимание было уделено исследованию кинетик люминесценции ионов Yb³⁺: ²F_{5/2}→²F_{7/2} (1040 нм); ионов Er³⁺: ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} (1550 нм), ⁴F_{9/2}→⁴I_{15/2} (650 нм), ²H(2)_{11/2}+⁴S_{3/2}→⁴I_{15/2} (540 нм). Отметим, что вследствие термической связи

между уровнями ²H(2)_{11/2} и ⁴S_{3/2}, они распадаются с одинаковой скоростью. Возбуждение люминесценции осуществлялось в полосу поглощения иттербия, 920 нм, импульсами длительностью ≈20 нс, генерируемыми параметрическим генератором.

Регистрация кинетик затухания люминесценции ионов иттербия проводилась в суспензии, для уменьшения влияния перепоглощения излучения люминесценции. Кинетики затухания люминесценции ионов Yb³⁺ имеют экспоненциальный характер. Это свидетельствует о том, что перенос энергии от ионов иттербия, доноров, к ионам эрбия, акцепторам, в данном случае является миграционно-ускоренным.

Затухание ап-конверсионной люминесценции, переходы ²H(2)_{11/2}+⁴S_{3/2}→⁴I_{15/2} и ⁴F_{9/2}→⁴I_{15/2}, носит также экспоненциальный характер. Вероятность дезактивации возбужденных уровней имеет зависимость от концентрации ионов иттербия, которая хорошо аппроксимируется линейной функцией. Это указывает на миграционно-ускоренный характер затухания ап-конверсионной люминесценции [3].

На рис. 1 а и б представлена схема уровней энергии ионов Yb³⁺ и нижних уровней Er³⁺, а также каналы переноса энергии возбуждения. На этом же рисунке указаны параметры, которые позволяют дать количественное описание скоростей заселения/дезактивации соответствующих уровней энергии.

Уровни энергии иона иттербия: 1 – ²F_{7/2}, 2 – ²F_{5/2}. Уровни энергии иона эрбия: 3 – ²I_{15/2},

4 – ${}^4I_{13/2}$, 5 – ${}^4I_{11/2}$, 6 – ${}^4F_{9/2}$, 7 – ${}^4S_{3/2}+{}^2H(2)_{11/2}$, 8 – ${}^4F_{7/2}$. Кросс-релаксационные схемы заселения и дезактивации уровней ионов эрбия показаны штриховыми и двойными линиями, соответственно. Сплошными линиями обозначены излучательные переходы ионов эрбия. Линиями серого оттенка обозначены переходы обусловленные внутрицентровой релаксацией возбужденных уровней энергии ионов эрбия и иттербия. Волнистыми линиями обозначены фононы матрицы, которые участвуют в процессах переноса энергии возбуждения.

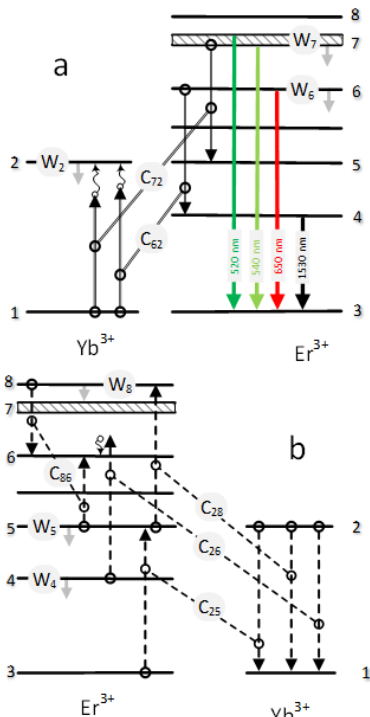


Рисунок 1 – Схема энергетических уровней ионов Er^{3+} и Yb^{3+} и каналы переноса энергии возбуждения

На основе анализа процессов переноса энергии возбуждения, схема которых представлена на рис. 1, была предложена система скоростных уравнений для случая импульсного возбуждения ионов иттербия. В силу своей громоздкости она здесь не приводится. Эти уравнения были использованы для аппроксимации кинетик люминесценции ионов иттербия на 1040 нм (переход 2→1), эрбия на 1550 нм (переход 4→3), на 540 нм (переход 7→3) и на 650 нм (переход 6→3). Мощность люминесценции на соответствующем переходе пропорциональна населенности верхнего уровня. При варьировании параметров переноса энергии и начальной населенности верхнего уровня ионов иттербия минимизировалось максимальное среднеквадратичное отклонение рассчитанных и экс-

периментальных кинетик люминесценции на четырех длинах волн. Такой метод был описан в работе [3], где он использовался нами для исследования процессов переноса энергии возбуждения в тулиевых материалах. Пример подгонки представлен на рис. 2.

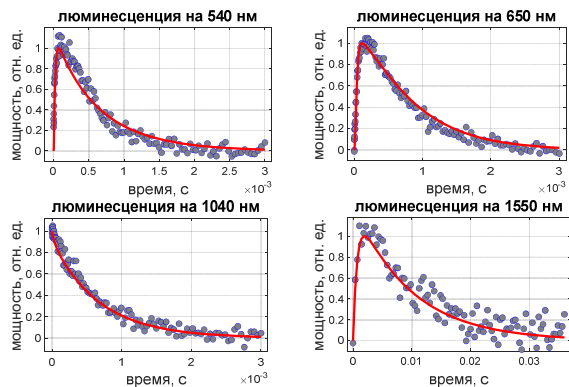


Рисунок 2 – Пример аппроксимации кинетик люминесценции стекла с содержанием ErF_3 – 0,1 мол % и YbF_3 – 2 мол %.

Такие расчеты были проведены для всех образцов стекол и были найдены параметры переноса энергии. В качестве иллюстрации на рис. 3 представлена зависимость параметра C_{26} от концентрации ионов иттербия.

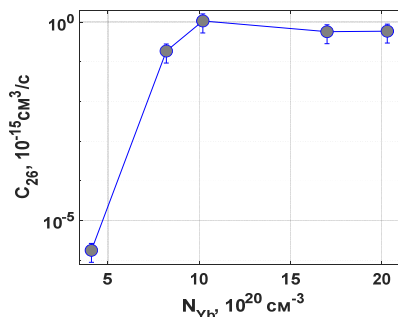


Рисунок 3 – Зависимость параметра C_{26} от концентрации ионов иттербия

Литература

1. Concentration dependence of upconversion luminescence of Er^{3+}/Yb^{3+} in the fluorophosphate glasses with small phosphates content / E. Kolobkova [et al.] // Optical Materials. – 2020. – Vol. 109. – P. 110279.
2. Spectroscopic and lasing properties of Er^{3+}/Yb^{3+} -doped fluorophosphate glass with small additives of phosphates / E. Kolobkova [et al.] // Optical Materials Express. – 2019. – Vol. 9, no. 9. – P. 3666–3679.
3. Yasukevich, A. Generalisation of the rate equations for modelling of pair donor-acceptor energy transfer in rare-earth-doped media / A. S. Yasukevich, N. V. Gusakova, N. V. Kuleshov // Journal of Luminescence. – 2022. – Vol. 242. – P. 11860.

УДК 535.24:53.084.42

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Яськов А.С., Никоненко С.В.

*Институт физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработано устройство для определения местоположения фотометрического центра источника оптического излучения. Устройство также позволяет определить расстояние измерений между источником оптического излучения со сложной формой излучающей поверхности и входной апертурой приемника оптического излучения.

Ключевые слова: источник излучения, фотометрический центр, местоположение, измерение.

DEVICE FOR LOCATION OF PHOTOMETRIC CENTER OF OPTICAL RADIATION SOURCE

Yascov A., Nikanenko S.

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A device for determining the location of the photometric center of an optical radiation source has been developed. The device also allows to determine the measurement distance between the optical radiation source with a complex form of the radiating surface and the input aperture of the optical radiation detector.

Key words: photometric center, measuring, location, radiation source.

*Адрес для переписки: Яськов А.С., пр. Независимости, 68-2, Минск 220070, Республика Беларусь
e-mail: Yascov64@gmail.com*

Введение. При выполнении измерений оптических характеристик и параметров источника излучения (ИИ) их положение относительно фотоприемника регламентируется нормативными документами [1, 2]. Однако точная установка ИИ в требуемое положение является довольно трудоемкой задачей [3]. Основная причина затруднений заключается в том, что при выполнении юстировки ИИ необходимо его установить на оптической оси таким образом, чтобы она проходила как через центр входной апертуры приемника излучения, так и через фотометрический центр (ФЦ) ИИ. Но фотометрический (световой) центр ИИ в общем случае определяется как точка, которая используется в фотометрических измерениях и расчетах как точка отсчета [4], т. е. понятие достаточно условное.

Существует несколько подходов в определении фотометрического центра ИИ:

1. Геометрический подход. ФЦ определяется как геометрический центр тела накала ИИ, исходя из его габаритных размеров.

2. Визуальный подход. При юстировке ИИ применяют различные вспомогательные технические средства для визуализации тела накала ИИ.

3. Гониофотометрический подход. В этом случае ФЦ тела накала ИИ устанавливаются по результатам измерения пространственного распределения интенсивности излучения ИИ.

Для каждого из этих подходов свойственны свои недостатки. В результате применения геометрического подхода реальное местоположение ФЦ тела накала может отличаться от геометрического центра ИИ. При визуальном подходе суще-

ствует необходимость каким-нибудь образом отмечать местоположение ФЦ для последующих измерений. Наиболее часто это реализуется в виде фотографии тела накала ИИ, на которой меткой отмечен ФЦ. Но точная установка местоположения ФЦ при последующих измерениях по-прежнему является достаточно трудоемкой. В третьем случае необходимы предварительные измерения пространственного распределения интенсивности излучения ИИ при последующих измерениях его фотометрических характеристик и параметров.

Для облегчения задачи точного установления эталонных ИИ производители (обычно) делают метку на колбе эталонного ИИ, или дополняют его специальным целеуказателем. У некоторых эталонных ИИ имеются также референсные поверхности, относительно которых выполняются измерения расстояния фотометрирования.

До недавнего времени преимущественным типами эталонных ИИ были лампы накаливания, дейтериевые или ксеноновые. Но в последние годы был проведен ряд исследований, в результате которых предлагается применять эталонные ИИ на основе светодиодов, в первую очередь по причине высокой стабильности их излучения [5, 6].

В этом случае при определении ФЦ возникает следующая проблема: светодиодные ИИ состоят из нескольких светодиодов, иногда десятков. Соответственно определение крайне сложно определить условное местоположение ФЦ на условной поверхности формируемой отдельными светодиодами, зачастую имеющие еще линзы. Т. к. отдельные светодиоды имеют разную пространственную ориентацию относительно оптической

оси и неоднородность пространственного распределения их излучения.

Устройство для определения местоположения ФЦ ИИ. Для решения этой задачи авторами было разработано устройство на основе метода параллакса. Метод в общем случае заключается в том, что, определяется местоположение каждой отдельной малой излучающей поверхности (отдельного сегмента ИИ), излучение которых попадает в пределах апертуры приемника оптического излучения и рассчитывается среднее местоположение для всех малых поверхностей.

На рисунке изображен макет устройства, который состоит из фотометрической скамьи 1, 2, 3, установленные на скамье ИИ 11, узконаправленный источник излучения 4, пластину с перекрестием 5, цифровые видеокамеры 6 и 7, маску 12, экран 13 и фотоприемник 8. Узконаправленный источник излучения 4, источник оптического излучения 11, пластина 5 и цифровая камера 7 располагаются на оптической оси 10. Источник излучения 11, маска 12, визуализирующий экран 13 и цифровая камера 6 располагаются на оптической оси 9. Фотометрическая скамья 3 предназначена для перемещения цифровой камеры 6 и фотоприемника 8. Маска устройства имеет щели, которые расположены периодически вдоль вертикальной и горизонтальной оси, а месте пересечения осей квадратное отверстие.

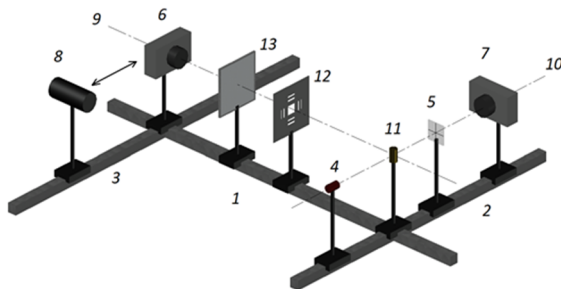


Рисунок – Устройство для определения местоположения ФЦ ИИ

Излучение от ИИ проходит через маску и обеспечивает проекцию на экран в виде отдельных линий и квадрата. Юстировка происходит наведением маски устройства, по направлению к ИИ с помощью квадратного отверстия маски. Центр квадрата в маске используют для юстировки устройства, путем совмещения его с центром изображения квадрата на экране. Проецируемые линии используются для определения расстояния до ИИ, по их отклонению от меток, расположенных на экране. Цифровая камера направлена на экран и передает его изображение в компьютер для последующих расчетов. Расчет

расстояния до источника оптического излучения производится по формуле:

$$L = l \cdot H \cdot n \cdot h^{-l}, \quad (1)$$

где n – порядок метки; h – отклонение луча от метки на экране соответствующего рядка, м; l – расстояние от маски до экрана устройства, м; H – период расположения штрихов маски, м; L – расстояние от маски устройства до ИИ, м.

Оценка диапазонов возможных расстояний измерений производится по критериям:

$$L \geq n \cdot l, \quad (2)$$

где n – последний порядок метки; l – расстояние от маски до экрана устройства, м.

$$L \leq H \cdot l \cdot e^{-l}, \quad (3)$$

где e – минимально измеримая единица, м.

При функционировании устройства учитывается фактор влияния габаритных размеров тела накала оцениваемый как

$$l < L \cdot (D \cdot p^{-l} - 1), \quad (4)$$

где D – размер тела накала, м; p – размер цели в маске, м.

Макет устройства функционирует под управлением программы созданной в среде LabVIEW и на языке Python в среде Jupyter Notebook Anaconda.

Выводы. Разработано устройство для определения фотометрического центра, позволяющее определить расстояние измерений между источником оптического излучения со сложной формой излучающей поверхности и входной апертурой приемника оптического излучения. Предлагаемое устройство может применяться также для юстировки ИИ различных типов.

Литература

- ГОСТ 10771-82. Лампы накаливания светоизмерительные рабочие. Технические условия. – М.: Мин. электротехн. пром-ти СССР, 1982. – 24 с.
- Measurement of LEDs // CIE 127:2007 Technical report. – Vienna, CIE Central Bureau, 2007. – 32 p.
- Устройство юстировки тела накала светоизмерительных ламп / В. А. Длугунович [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 148–155.
- Международный электротехнический словарь. Глава 845 Освещение. Publication 50(845) / Международный словарь по освещению. CIE Publ. № 17-4 / Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale. Genève, Suisse. – 1987. – 379 p.
- Скумс, Д. В. Эталонные лампы единиц силы света и светового потока на основе COB светодиодов / Д. В. Скумс, Б. В. Ерошенко // Светотехника. – 2021. – № 6. – С. 73–76.
- Reference UVC LED Source / S. Nikanenka [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – P. 2149.

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ В ЗОНДИРОВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

Поляков А.Ю., Швайко Е.П.

*Белорусская государственная академия авиации
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Автор посвятил работу рассмотрению и внедрению современных способов дистанционного зондирования сельскохозяйственных угодий. Внедрение инноваций в приборостроении является средством повышения эффективности производства продукции. Работа выявила перспективы использования беспилотного летательного аппарата, оснащенного мультиспектральной камерой в решении прикладных задач. Это ведет к снижению экономических расходов, производству высококачественной и конкурентоспособной продукции, улучшению процесса контроля посевов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, дистанционное зондирование, вегетационный индекс, мультиспектральная камера, приборостроение.

THE APPLICATION OF MULTISPECTRAL CAMERA IN AGRICULTURAL LAND SENSING

Polyakov A., Shvaiko A.

*Belarusian State Aviation Academy
Minsk, Republik of Belarus*

Abstract. The study aims to investigate and implement modern methods of remote agricultural land sensing. Implementation of innovations in instrument engineering is one of the ways to improve the efficiency of production. The author revealed the prospects of use of unmanned aerial vehicle equipped with a multispectral camera to resolve different applied tasks. This leads to reduction of economic expenses, to production of high quality and competitive products, as well as to improvement of crop control processes.

Key words: unmanned aerial vehicles, remote sensing, vegetation index, multispectral camera, instrument engineering

*Адрес для переписки: Поляков А.Ю., ул. Уборевича 77, Минск 220096, Республика Беларусь
e-mail: poliakou@yandex.by*

Введение. Аграрный сектор в большей мере нуждается в технологиях, так как используемые в настоящее время технологии несколько устарели, они менее эффективны, относительно времязатратны, трудоемки и, как следствие, неэкономичны, когда речь идет об обработке больших площадей земли.

Космическая съемка является актуальным методом дистанционного зондирования, но при возникновении потребности получения данных с большей периодичностью – беспилотные летательные аппараты (БЛА) становятся экономически выгодным и надежным решением.

В сельском хозяйстве БЛА способны охватывать большие расстояния, которые тяжело контролировать с помощью человеческого ресурса. БЛА, оснащенные оптическими приборами, позволяют получить детальные ортофотопланы сантиметровой точности, производить регулярный или внеплановый мониторинг участков, контролируя состояние растений.

Принцип работы оптических устройств. Оптические устройства работают по фотоэлектрическому принципу, при котором световая энергия преобразуется в цифровую информацию. Подробнее рассмотрим мультиспектральную камеру (МК).

Формирование изображений МК. Существуют различные способы получения мультиспектральных изображений. Один из них - при по-

мощи дифракции на призме, набора узкополосных оптических фильтров, расположенных на матрице камеры или многокамерной системы, когда каждая камера снимает в определенном спектральном диапазоне.

Электромагнитное излучение, например, видимый свет, проходит через объектив и, прежде чем зафиксироваться на матрице, сталкивается со светофильтром. Для сенсора он свой: красный, зеленый, синий, дальний красный или инфракрасный. Через фильтр проходит только один участок спектра: то есть, из всего электромагнитного пучка до матрицы добирается либо синий, либо красный и т.д. Таким образом, на сенсоре сохраняется цифровая информация только одного спектра.

Мультиспектральные изображения – это изображения, представленные в виде отдельных спектральных каналов или же как синтез отдельных каналов для получения цветного изображения. Где цвет – это набор участков, характеризующих интенсивность отражения света в этих спектральных диапазонах, другими словами, спектральная сигнатура. У объектов биологического происхождения в разных их состояниях есть явно выраженная спектральная сигнатура [2].

На основании спектральной сигнатуры появляется возможность отделить один объект от другого или разделить состояния объектов (рис 1).

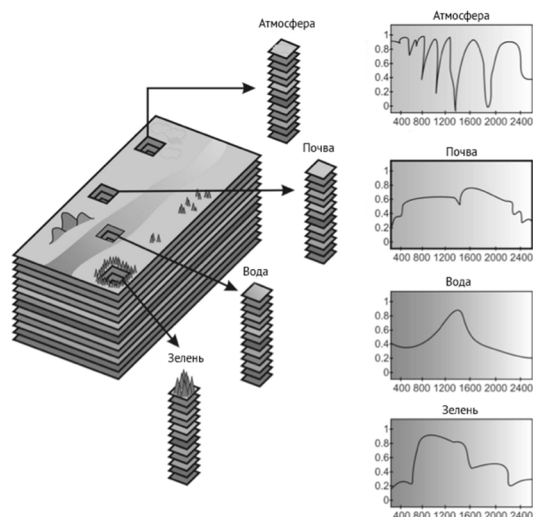


Рисунок 1 – Спектральные сигнатуры

Мультиспектральная камера способна производить съемку в следующих каналах (в скобках указана длина волны):

Дальний красный (RE, 730 нм ± 16 нм): в этом канале наиболее заметен пигмент хлорофилл, при участии которого происходит фотосинтез.

Инфракрасный (NIR, 840 нм ± 26 нм): канал используется для аналогичных целей.

Зеленый (G, 560 нм ± 16 нм): используется для визуализации вегетативной активности растений и процесса их старения, важен при созревании и подготовки к сбору с/х культуры.

Красный (R, 650 нм ± 16 нм): имеет первостепенное значение для анализа качества и состояния почвы.

Синий (B, 730 нм ± 16 нм): служит для отображения на снимках воды, а также для излучения дна водоемов,

Видимое излучение (RGB): стандартные фотографии

Вегетационные индексы. МК в зависимости от выбранных спектральных каналов формируют различные вегетационные индексы, например:

NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) вычисляется по результатам съемки в красном и ближнем инфракрасном каналах, находится в диапазоне от 0 до 1 и указывает относительный объем биомассы зеленых растений. В реальных условиях не может превышать 0,95. Значение индекса указывает на состояние здоровья растений и их развития.

GNDVI (зеленый нормализованный относительный индекс растительности) аналогичен

NDVI, но с использованием зеленого канала вместо красного. Применяется для поиска насаждений, испытывающих дефицит или переизбыток влаги.

GNDVI (зеленый нормализованный относительный индекс растительности) аналогичен NDVI, но с использованием зеленого канала вместо красного. Характеризует фотосинтетическую активность растений и применяется для поиска насаждений, испытывающих дефицит или переизбыток влаги, также определяются растения других видов (сорняки), находящиеся на территории сельскохозяйдий;

LCI (индекс цвета почвы) предназначен для оценки плодородности почвы.

NDR (нормализованный разностный индекс красного края) служит для определения концентрации азота в листьях путем оценки активности фотосинтеза. Используется при исследовании старых и находящихся в неудовлетворительном состоянии посевов.

Заключение. Оценка посевов предоставляется в виде карты распределения вегетационного индекса по полям. Здесь главное – это умение производить анализ изображений, так как мультиспектральные сигнатуры очень сильно зависят и от особенностей их получения в конкретной местности, и от особенности роста самих растений. Мультиспектральное изображение поля в разных местах будет отличаться.

Благодаря применению БЛА, отпадает необходимость личного присутствия на полях, так как с высоты видна полная картина происходящего на поле, что, в свою очередь, дает сделать вывод о последующих действиях на основе полученных изображений.

Литература

1. Загазежева, О. З., Инновационные технологии как фактор опережающего развития региона / О. З. Загазежева, А. Х. Мамбетов // Известия КБНЦ РАН. – 2017. – № 6-2 (80). – С. 97–101.
2. Применение мультиспектрального изображения при оценке состояния флоры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.secuteck.ru>. – Дата доступа: 06.05.2020.
3. Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях / Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. – 135 с.
4. Zmarz, A. Application of UAV in forestry to acquire image data, Ph.D. thesis, WULS-SGGW, Warszawa. – 2011.

Секция 5. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ

УДК 621.791.313.7

ТЕХНОЛОГИЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПРИЕМНИКОВ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

Видрицкий А.Э.¹, Ланин В.Л.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Известные преимущества инфракрасной техники по сравнению с оптическими (работающими в видимой части спектра), радиотехническими и радиолокационными системами привели в последнее десятилетие к резкому расширению применения ИК-систем и приборов в науке, технике, промышленности и в военном деле. В настоящей работе проведен анализ конструкции микроболометра, применяемые материалы, описана методика герметизации оснований корпусов.

Ключевые слова: микроболометр, вакуум, геттер, герметизация, преформа, германиевое окно.

SEALING TECHNOLOGY FOR IR RECEIVERS

Vidritsky A.¹, Lanin V.²

¹INTEGRAL JSC – Managing Company of INTEGRAL Holding

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The known advantages of infrared technology over optical (operating in the visible part of the spectrum), radio engineering and radar systems have led in the last decade to a dramatic expansion in the use of infrared systems and devices in science, technology, industry and the military. This paper analyzes the design of the microbolometer, the materials used, and describes the technique of sealing the bases of the housings.

Key words: microbolometer, vacuum, getter, sealing, preform, germanium window.

Адрес для переписки: Видрицкий А.Э., ул. Корженевского, 16, Минск 220108, Республика Беларусь

e-mail: AVidritskiy@integral.by

Микроболометры представляют собой фотоприемные устройства, в которых матрица чувствительных микроболометров, соединенная с кремниевым кристаллом считывания и предварительной обработки оптической информации, помещена в вакуумный корпус с окном, прозрачным в заданном спектральном диапазоне, имеющий электрические выводы для подсоединения к внешним устройствам для обработки видеосигналов с выходом на видеомонитор [1].

Правильный выбор конструкции корпуса микроболометра определяет его основные характеристики, такие как чувствительность и надежность. На раннем этапе изготовления микроболометров в основании корпуса предусматривалось наличие откачной трубки (рис. 1, а), с помощью которой производится дегазация микрообъема и затем герметизация заделкой откачной трубки, которая может быть осуществлена запайкой припоем, лазерной сваркой, напылением металла на откачное отверстие.

В настоящее время герметизация корпусов микроболометров проводится на специализированном технологическом оборудовании, благодаря которому отсутствует необходимость наличия откачной трубки в основании корпуса. Корпус микроболометра без откачной трубки представлен на рис. 1, б. Герметизация таких кор-

пусов проводится в высоком вакууме, что позволяет исключить попадание выделяющихся в процессе герметизации газов с поверхностей деталей в микрообъем корпуса.

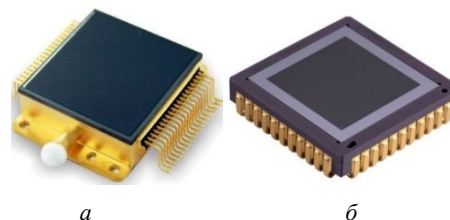


Рисунок 1 – Корпус микроболометра с откачной трубкой (а) и без нее (б)

Самым распространенным материалом для изготовления объективов тепловизионных приборов является монокристаллический германий. Германий сверхвысокой чистоты используется в изготовлении инфракрасной оптики. Из германия монокристаллического оптического (ГМО) изготавливают окна, пластины, линзы, обтекатели – колпаки, призмы и зеркала для ИК спектра.

ГМО – оптический материал с высоким показателем преломления. Френелевский коэффициент отражения от одной полированной грани равен 0,36 поэтому из германия изготавливают светоделители с пропусканием оптической детали порядка 50 % без нанесения светоделительного

покрытия. С другой стороны, высокий коэффициент отражения от полированной поверхности оптики из германия требует использования антибликового (просветляющего) покрытия.

Основным просветляющим покрытием для ГМО является ZnS, оно сочетает просветляющие качества с хорошими защитными свойствами от воздействия внешней среды и обладает очень высокой абразивной износостойкостью.

Для того чтобы обеспечить технологический процесс сборки и надежность изделия в целом, необходимо процесс герметизации проводить с использованием припоя, имеющим разницу температур плавления с припоем для монтажа кристалла не менее 70–100 °С. Характеристики материала преформы для герметизации должны учитывать следующие требования:

- обеспечение смачиваемости поверхности ободка корпуса материалом преформы;
- отсутствие пустот, микротрещин в паяном шве.

Наиболее оптимальными материалами в качестве преформ для герметизации являются индиевые сплавы, в частности сплав 80In15Pb5Ag.

Из-за явлений десорбции газов с внутренних поверхностей деталей, вакуум внутри таких устройств имеет тенденцию ухудшаться со временем и, в худшем случае, может повлиять на правильную работу устройства. Для поддержания вакуума внутри корпуса микроболометра, обеспечения длительного срока службы и надлежащих условий эксплуатации, геттеры являются технически проверенными и промышленно хорошо реализуемыми решениями.

Прежние конструкции геттера представляли собой наличие отдельного устройства в виде резистора в подкорпусном объеме. Активация геттера проводилась путем подачи на него напряжения 15 В. Более технологичным решением является формирование пленки геттера на внутренней стороне германиевого окна.

Геттер обладает функциональным свойством адсорбировать загрязнения, возникающие в результате газовой выделения на внутренних поверхностях. Основными газами, которые могут быть поглощены пленкой геттера, являются H_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 и O_2 . Геттер может быть активирован в процессе герметизации. Два наиболее важных параметра характеризуют эффективность любого геттера: сорбционная емкость и избирательность. Геттеры позволяют решить проблему сохранения стабильного давления внутри герметично корпусированных микроболометров, МЭМС, МОЭМС и прочих устройств микроэлектроники. Этот результат достигается за счет химического связывания молекул газов, составляющих основную часть остаточной атмосферы. Геттеры также полезны для удаления определенных компонентов атмосферы [2].

После определения режимов разработана программа и проведена герметизация микроболометров на высоковакуумной печи герметизации модели 3150 SST International (рис. 2) в вакууме с одновременным проведением двух стадийной активации геттера при температуре 400 °С, (процесс проводился в две стадии для более полного удаления защитных окислов с поверхности геттера и адсорбции их в объеме геттера, активация проверена по изменению уровня давления в рабочей камере).



Рисунок 2 – Высоковакуумная печь герметизации модели 3150

После получения экспериментальных образцов корпусов микроболометров (рис. 3), загерметизированных в вакууме по разработанной программе процесса, проведена оценка качества герметизации и получены следующие результаты:

- смещение окна относительно основания корпуса не более 50 мкм;
- внешний вид сварного шва на отсутствие утяжек и выплеска припоя;
- оценка качества сварного шва с помощью УЗ-микроскопа и рентгена;
- оценка герметичности (не более 10^{-7} мбар·л/с).

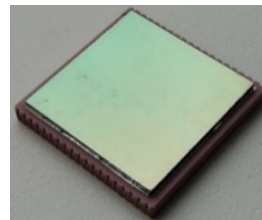


Рисунок 3 – Внешний загерметизированного корпуса микроболометра

Паяный шов экспериментального образца однородный и не имеет пор, всплесков припоя, подтеков. Результаты проведения оценки скорости натекания положительные (от $1,5 \cdot 10^{-8}$ до $2,9 \cdot 10^{-9}$ мбар·л/с).

Литература

1. Маслов, Д. М. Разработка неохлаждаемого болометра на основе пленок окислов ванадия : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.27.01 / Д. М. Маслов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, 2015. – 25 с.
2. Скупов, А. Вакуумное корпусирование на уровне пластины-геттеры / А. Скупов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес, 2016. – № 5. – С. 54–59.

УДК 004.942

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ МЭМС ДВОЙНИКОВ

Галацевич В.В., Чижик С.А., Люцко К.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Статья отражает актуальность использования цифровых двойников МЭМС и описывает применение двойников МЭМС для диагностики систем.

Ключевые слова: цифровой двойник, МЭМС, интернет вещей, виртуальная реальность, 3D-моделирование.

CREATING DIGITAL MEMS DOUBLES

Galatsevich V., Chizhik S., Liutsko K.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article reflects the relevance of the use of digital MEMS twins and describes the use of MEMS twins for system diagnostics.

Key words: digital double, MEMS, Internet of things, virtual reality, 3D-modeling.

Адрес для переписки: Галацевич В.В., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vika.galatsevich@mail.ru

Целью данной работы является исследование цифровых двойников МЭМС, разбор их основных видов и анализ программного обеспечения для создания данных двойников.

Цифровой двойник МЭМС – это виртуальная копия, которая ведет себя таким же образом, как реальная система. Он отражает все процессы, которые происходят с оригиналом в режиме реального времени. При этом погрешность между работой виртуальной модели и реальной системой, не должна превышать 5 %.

Существуют три вида цифровых двойников МЭМС:

- прототипы (Digital Twin Prototype, DTP);
- копии (Digital Twin Instance, DTI);
- агрегированные аналоги (Digital Twin Aggregate DTA).

Прототип цифрового двойника микросистемы – это виртуальная копия оригинальной системы. С прототипа можно извлечь информацию о разных характеристиках модели, в том числе данные о ее создании в реальном мире. В него могут входить:

- требования к производству;
- трехмерная модель системы;
- описание материалов и их специфики;
- требования к утилизации.

Копия цифрового двойника, в отличие от нашего прототипа, представляет данные, которые используются для описания реальной МЭМС. В копии должны присутствовать следующие сведения:

- трехмерная модель, которая носит информацию в себе о габаритных размерах и допусках системы;
- данные о материалах, которые использовались при создании МЭМС либо же планируются использоваться в будущем;
- результаты всех тестовых операций, которые проводились с системой;
- информация о процессах, происходящих в любой период времени в системе, в том числе и во время ее создания;

– оперативные данные о МЭМС, полученные от датчиков;

– запись проведенных ремонтов (плановых, внеплановых, профилактических), сменных деталей и компонентов.

Аналог цифрового двойника является системой, которая связывает все двойники и их реальные прототипы с целью сбора информации и обмена ею.

В целом, цифровой двойник МЭМС представляет собой программу, созданную с помощью 3D-технологий, виртуальной реальности или дополненной реальности. Чаще всего двойник отражает визуальное представление реально существующей системы и, в идеале, повторяет процесс работы в мельчайших деталях. А чтобы придать ему динамичности на помощь приходит интернет вещей (IoT). Суть интернета вещей в том, что интегрированные в систему датчики передают данные о ее текущем состоянии в режиме реального времени, что и отражается в цифровом двойнике.

Концепция цифрового двойника микроэлектромеханической системы предполагает получение информации не только для изучения в режиме реального времени, но и с целью его применения в будущем. Это может быть:

- разработка более эффективных и продуктивных систем;
- устранение трудностей с дизайном на ранних стадиях разработки;
- предоставление нужной информации, основанной на инновациях;
- обучение персонала виртуальной реальности, а также работе с реальной системой и т.д.

Преимущество двойников в том, что на них можно ставить всевозможные эксперименты. При постановке каких-либо условий, двойник реагирует таким же образом, как отозвался бы на это оригинал, и на основе полученных данных будет возможно оценить свойства и поведение оригинала, проверить свои ожидания, проиграть несколько сценариев развития событий и выбрать наиболее оптимальный.

Любая виртуальная модель содержит в себе информацию о техническом обслуживании, ремонте, реальном прототипе, особенностях его эксплуатации. Качественная обработка этих данных дает возможность рассчитать, как реальная система будет вести себя в будущем, данные могут относиться как к конкретным деталям, так и ко всей системе в целом либо всему предприятию.

В цифровом двойнике часто задействована технология машинного обучения, при которой система автоматически меняет определенные параметры собственной работы, опираясь на данные из различных источников:

- отчеты экспертных комиссий и экспертов;
- информация об аналогичных устройствах, их компонентах;
- наблюдения, проводимые физически [1].

В целом, цифровой двойник МЭМС это не одна технология, а комбинация разных существующих технологий, которые сейчас используются на промышленных предприятиях.

Можно выделить несколько этапов построения цифрового двойника МЭМС:

1. Создание виртуального наброска реальной системы. Для создания такой модели используют САПР-системы (ComputerAided Design – системы автоматизированного проектирования) для трехмерного моделирования.

2. Обработка информации для облегчения принятия проектных решений. На этом этапе информация из разных источников, анализируется, интегрируются и визуализируются для более наглядного представления.

3. Моделирование поведения оригинальной системы в виртуальной среде. Построение поведения

оригинальной МЭМС осуществляется с помощью технологий имитационного моделирования, а затем визуализируется в среде виртуальной реальности.

4. Управление реальной МЭМС с целью реализации нужного поведения. Датчики и актюаторы являются технологической базой физической части цифрового двойника МЭМС. С помощью датчиков можно принимать информацию от физического мира, в это время как актюаторы можно использовать для внесения желаемые изменений, которые запрошены цифровым двойником.

5. Установка двустороннего и безопасного соединения между физической МЭМС и виртуальным двойником в режиме реального времени. Для того чтобы найти решение этой проблемы, нужно прибегнуть к облачным вычислениям и хранению данных на удаленных серверах. В то же время необходимо уделить внимание на безопасность используемых решений.

6. Получение информации, связанной с готовыми системами, с разных источников. На данном этапе следует выделить данные о продукте [2].

Подводя итог вышесказанному, очевидно, что цифровые двойники МЭМС позволяет изучить текущее состояние оригинала вплоть до мельчайших нюансов и, таким образом, выявить потенциальные проблемы в работе до их возникновения и найти оптимальный способ их решения.

Литература

1. Digital double [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sciencealpha.com/digital-double/>
2. Цифровые двойники: почему все о них говорят и всем ли они нужны? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/factory5/blog/512364/>

УДК 621.3.049.774

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПАРОВ ВОДЫ В ПОДКОРПУСНОМ ОБЪЕМЕ ИС Ширяева В.Д.¹, Щербаклова Е.Н.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования содержания воды в корпусах интегральных схем 401.14-5М и 4153.20 при различных способах отжига. Исследования производились с использованием масс-спектрометрического комплекса МКМ-1.

Ключевые слова: интегральные микросхемы, содержание воды, масс-спектрометрические исследования.

MEASURING OF THE WATER CONTENT IN INTEGRATED CIRCUIT PACKAGE BY USING МКМ-1 ANALYZER

Shiryayeva V.¹, Shcherbakova E.²

¹"Integral" joint stock company

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of the study of the water content in the housings of the integrated circuits 401.14-5M and 4153.20 under different annealing methods are presented. The studies were carried out using the mass spectrometric complex МКМ-1.

Key words: integrated circuits, water content, mass spectrometric studies.

Адрес для переписки: Щербаклова Е.Н., ул.Я.Коласа,22, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Пары воды, адсорбированные на поверхности кристалла, способствуют возникновению различных механизмов отказа интегральных микросхем. Исследование их содержания в подкорпусном объеме интегральных микросхем помогает изучать механизмы отказов, анализ причин и источников попадания влаги в корпуса.

В данной работе для этих исследований используется МКМ-1 (масс-спектрометрический комплекс – 1). Он представляет собой вакуумный прибор, использующий физические законы движения заряженных частиц в магнитных и электрических полях для получения масс-спектра. Применяемый метод исследования является разрушающим. Главное требование заказчиков: значение паров воды не должно превышать 5000 ppm (или 0,5 объемного процента).

С целью снижения уровня содержания паров воды в подкорпусном объеме ИС были предложены:

- предварительный отжиг оснований корпусов 401.14-5М и 4153.20 при температуре $180 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 3 часов в среде азота;
- отжиг в устройстве ИК-нагрева;
- отжиг в вакуумной печи установки NAW-1105D.

Рассмотрим результаты значения уровня содержания паров до и после предварительного отжига оснований корпусов. В этом случае были взяты по 6 корпусов двух видов и произведено уровня содержания паров воды. Результаты представлены на рис. 1 и рис. 2.

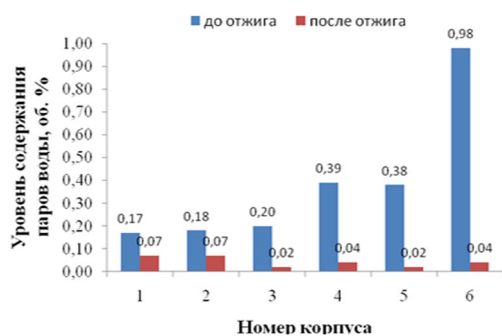


Рисунок 1 – значения уровня содержания паров воды внутри ИС до и после дополнительного отжига корпусов 401.14-5М

Во втором случае у нас был выбран определенный режим отжига в устройстве ИК-нагрева. Для испытания было отобрано по 5 корпусов. Герметизация корпусов происходила следующим образом:

- откачка устройства до $P \approx 40$ кПа, наполнение воздухом;
- откачка устройства до $P \approx 40$ кПа, наполнение воздухом;
- включение нагрева и выдержка микросхем в среде азота при $T = (150 \pm 5)^\circ\text{C}$ 25 ± 1 мин.;
- откачка нагретого азота до $P \approx 40$ кПа, выдержка в вакууме при $T = (150 \pm 5)^\circ\text{C}$ 25 ± 1 мин.;
- наполнение устройства азотом;

– остальные режимы в соответствии с действующим ТД.

Анализируя полученные результаты можно утверждать, что значения уровней содержания паров воды для образцов интегральных схем, прошедших дополнительный отжиг стабильны и воспроизводимы. Они находятся в пределах от 0,02 до 0,07 об.% для корпусов 401.14-5М и от 0,01 до 0,06 об.% для корпусов 4153.20, что существенно ниже, чем результаты проведенных ранее измерений по корпусу 401.14-5М без проведения предварительного отжига оснований (от 0,17 до 0,98 об.%).

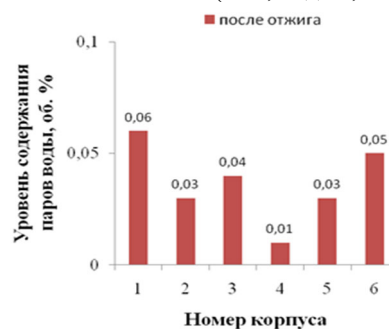


Рисунок 2 – значения уровня содержания паров воды внутри ИС после дополнительного отжига корпусов 4153.20

Результаты измерения значения уровней содержания паров воды предоставлены на рис. 3.

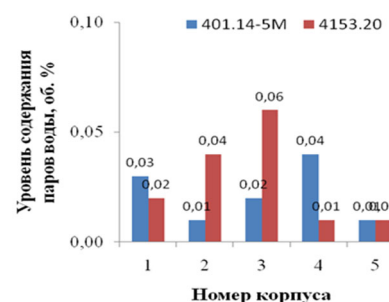


Рисунок 3 – значения уровней содержания паров воды при отжиге корпусов 401.14-5М и 4153.20 в устройстве ИК-нагрева

Из рис. 3 видно, что значения уровней содержания паров воды в подкорпусном объеме для образцов оснований корпусов 401.14-5М и 4153.20 стабильны и находятся в диапазоне 0,01–0,06 об. %. Значения образцов, герметизация которых прошла по действующим техническим документам, были получены ранее и находятся в диапазоне от 0,02 до 0,07 об. %.

Для того, чтобы оценить влияние режимов отжига в вакуумной печи установки NAW-1105D, была увеличена длительность термообработки образцов оснований корпусов. Она проводилась в течение 40 ± 1 мин. и в вакууме при $T = 150 \pm 5^\circ\text{C}$ (результаты измерения паров воды составляют от 0,01 до 0,06 об.% и представлены на рис. 4) и не привела к снижению содержания паров воды в сравнении с образцами, где термообработка перед

герметизацией составляла 25 ± 1 мин в среде азота и 25 ± 1 мин в вакууме при такой же температуре (результат измерения – от 0,01 до 0,05 об.%).

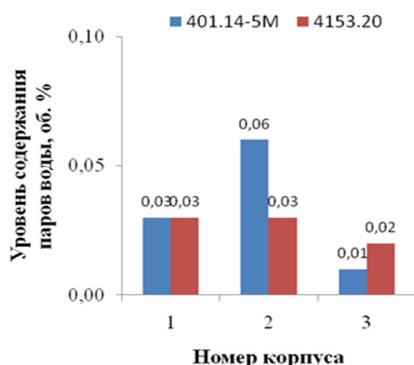


Рисунок 4 – значения уровня содержания паров воды при отжиге в вакуумной печи установки NAW корпусов 401.14-5М и 4153.20

Значения содержания паров воды в подкорпусном объеме сравнимы со значениями для образцов, загерметизированных в соответствии с требованиями действующей технической документации (от 0,01 до 0,04 об.%).

Обобщая все полученные результаты, приходим к следующим выводам:

- введение в техпроцесс предварительного отжига оснований корпусов в среде азота при температуре 180 ± 10 °С в течение 3 часов позволило снизить уровень содержания паров воды в подкорпусном объеме с 0,17-0,98 об. % до 0,02-0,7 об. % для корпуса 401.14-5М с обеспечением стабильности и воспроизводимости результатов

- изменение режимов проведения ИК-отжига корпусов на устройстве ИК-нагрева, отжига в печи установки герметизации NAW-1105D перед герметизацией не влияют на уровень содержания паров воды в подкорпусном объеме.

УДК 539.23

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ SiO_2 НА ГИДРОФИЛЬНО/ГИДРОФОБНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРФТОРДЕКАНОВОЙ КИСЛОТЫ, НАНЕСЕННЫХ НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ

Хабарова А.В.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Мельникова Г.Б.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом атомно-силовой микроскопии проведено изучение структуры и шероховатости пленок, модифицированных методом Ленгмюра-Блоджетт высшей фторированной перфтордекановой Ас кислотой, а также суспензией на ее основе с наночастицами SiO_2 , нанесенных на кремниевую подложку. Гидрофильно/гидрофобный баланс определяли методом капли с регистрацией краевого угла смачивания. Снижение шероховатости приводит к незначительному увеличению краевого угла смачивания и снижению полярной составляющей удельной поверхностной энергии поверхности кремния с нанесенной суспензией из высшей фторированной перфтордекановой Ас кислоты с наночастицами SiO_2 (концентрация 3 мг). Это приводит к увеличению гидрофобных свойств поверхности.

Ключевые слова: перфторированные амфифильные кислоты, SiO_2 , кремний, метод Ленгмюра-Блоджетт, атомно-силовая микроскопия.

INFLUENCE OF SiO_2 NANOPARTICLES ON THE HYDROPHILIC/HYDROPHOBIC PROPERTIES OF FILMS BASED ON PERFLUORODECANOIC ACID DEPOSITED ON A SILICON SUBSTRATE

Khabarava A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Melnikova G.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Atomic force microscopy was used to study the structure and roughness of films modified by the Langmuir-Blodgett method with the highest fluorinated perfluorodecanoic acid, as well as a suspension based on it with SiO_2 nanoparticles deposited on a silicon substrate. The hydrophilic/hydrophobic balance was determined by the drop method with registration of the contact angle. A decrease in roughness leads to a slight increase in the contact angle and a decrease in the polar component of the specific surface energy of the silicon surface with the applied suspension of higher fluorinated perfluorodecanoic acid with SiO_2 nanoparticles (concentration 3 mg). This leads to an increase in the hydrophobic properties of the surface.

Key words: perfluorinated amphiphilic acids, SiO_2 , silicon, Langmuir-Blodgett method, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Хабарова А.В., ул. П. Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: av.khabarova@mail.ru

Введение. Важная составляющая развития нанотехнологий связана с успехами химического синтеза полимерных материалов, физические свойства которых могут быть широко модифицированы прививкой к основной полимерной цепи различных боковых групп. Технология Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) позволяет создавать конденсированные упорядоченные мономолекулярные слои полимеров, управлять их структурой, конструировать мультислойные пленки и создавать композиты с включениями наночастиц. Применение технологии ЛБ экономически выгодно, поскольку нет необходимости в применении высокого вакуума, нет больших энергозатрат и других дорогостоящих факторов. Благодаря разнообразию свойств синтезируемых органических соединений, такие пленки могут найти применение не только в элементах молекулярной электроники, но в сенсорных, мембранных и других устройствах [1]. Поверхностно-активные вещества и полимеры, полученные с помощью перфторалкильных и полифторалкильных веществ (ПФАВ), методом ЛБ, широко используются в различных промышленных целях из-за химической и термической стабильности, в дополнение к гидрофобной и липофобной природе ПФАВ [2].

Целью работы было изучение структуры и гидрофильно/гидрофобных свойств пленок из перфторированных амфифильных кислот и суспензий на их основе с наночастицами SiO_2 , нанесенным методом ЛБ.

Материалы и методы исследований. Для формирования пленок использовали раствор перфтороктадекановой кислоты (AlfaAesar, 97 %, $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_{16}\text{CO}_2\text{H}$) в гексафтор-бензоле (99 %, Sigma-Aldrich) с концентрацией 0,5 мг/мл. Наночастицы диоксида кремния (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{--}20$ нм) добавляли в массовом соотношении 1, 2 и 3 мг на 1 мл раствора перфторированной кислоты. Для равномерного распределения неорганических наночастиц в течение 15 мин растворы кислот обрабатывали ультразвуком.

Для выделения пленок перфторированных амфифильных кислот использовали установку «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь).

Для нанесения пленок кремниевые подложки предварительно проходили процедуру гидрофобизации в пероксидно-аммиачном растворе в течение 15 мин при температуре 80 °С.

Морфологию, шероховатость, силу адгезии и удельную поверхностную энергию исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM стандартным кремниевым кантилевером типа CSG10_SS (TipsNano, Российская Федерация) с радиусом закругления острия 10,4 нм и жесткостью консоли 0,51 Н/м.

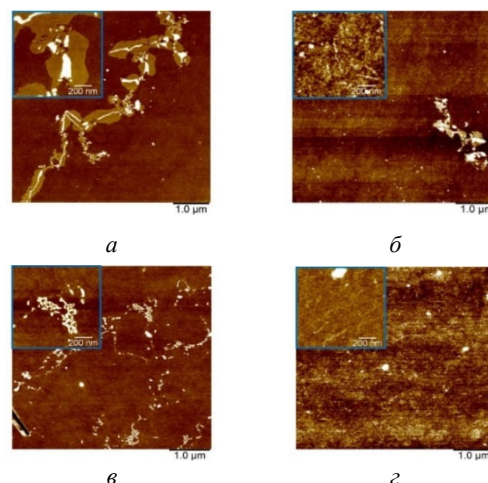
Краевой угол смачивания (КУС) измеряли на установке DSA 100 E (KRUSS, Германия) методом неподвижной капли. Значения удельной поверхностной энергии рассчитывали по модели ОВРК. В данной модели поверхностное натяжение рассматривается с точки зрения полярной и дисперсной составляющих.

Результаты исследований и обсуждения. При нанесении пленок перфтордекановой кислоты и суспензий на ее основе с наночастицами на поверхность кремния появляются конгломераты разных размеров (рис. 1, б и в), в которые собираются наночастицы диоксида кремния (исследуемые поля 1×1 мкм² и 5×5 мкм²).

При увеличении концентрации SiO_2 до 3 мг пленка распределяется по поверхности равномерно (рис. 1, з). На полях 1×1 мкм² видны структуры в виде цепочек. Нанесение перфтордекановой кислоты без SiO_2 приводит к появлению на поверхности структур неправильной формы с признаками многослойного расположения слоев (рис. 1, а).

Выявлено, что введение наночастиц в состав раствора приводит к смещению площади на молекулу от 0,66 до 0,4 нм² для перфтордекановой кислоты. Это свидетельствует о равномерном встраивании наночастиц в структуру пленки кислоты.

КУС с увеличением содержания наночастиц SiO_2 увеличивается (табл. 1) с 64,6 до 70,9°. Удельная поверхностная энергия и полярная составляющая уменьшаются с увеличением концентрации наночастиц в суспензии от 47,6 до 43,6 мДж/м² и от 11,1 до 8,3 мДж/м². Шероховатость поверхности немонотонно уменьшается (табл. 2). Удельная поверхностная энергия (АСМ) имеет максимум значений по концентрации наночастиц 1 мг $w = 99,5$ мДж/м². Модуль упругости при увеличении концентрации SiO_2 до 2 мг незначительно уменьшается, а затем значительно увеличивается при концентрации SiO_2 3 мг от 394,4 до 745,9 МПа.



а – Ас; б – Ас с 1 мг SiO_2 ;
в – Ас с 2 мг SiO_2 ; з – Ас с 3 мг SiO_2

Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности кремния с ЛБ-пленками из перфтордекановой кислоты исходной и с добавлением наночастиц SiO_2

Таблица 1. Влияние введения наночастиц на смачиваемость пленок на поверхностях, модифицированных перфтордекановой кислотой и суспензий на ее основе

Образец	KУС, вода	w, мДж/м ²	γ ^p , мДж/м ²
Ac	64,6	47,6	11,1
Ac с 1 мг SiO ₂	64,0	47,9	11,4
Ac с 2 мг SiO ₂	66,8	45,8	10,3
Ac с 3 мг SiO ₂	70,9	43,6	8,3

Таблица 2. Шероховатость, сила адгезии и удельная поверхностная энергия (АСМ) на поверхностях, модифицированных перфтордекановой кислотой и суспензий на ее основе

Образец	R _a , нм	R _q , нм	R _z , нм	F _{ад} , нН	w, мДж/м ²	E, МПа
Ac	0,45	0,92	0,89	5,645	86,6	418,9
Ac с 1 мг SiO ₂	0,24	0,62	0,57	6,487	99,5	394,4
Ac с 2 мг SiO ₂	0,27	0,69	0,83	6,467	99,2	375,8
Ac с 3 мг SiO ₂	0,21	0,39	0,50	6,102	93,6	745,9

УДК 681.586.7

ТОНКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ

Сапсалёв Д.В.^{1,2}, Мельникова Г.Б.¹, Аксютыц А.В.³, Толстая Т.Н.¹, Котов Д.А.³, Чижик С.А.^{1,4}¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси²Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники⁴Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена возможность модификации никелевых покрытий тонкими пленками полиметилметакрилата и нанокompозитами полиметилметакрилат–наночастицы диоксида кремния для создания емкостных датчиков анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде. Показано, что введение наночастиц диоксида кремния в структуру полимерной матрицы позволяет сформировать покрытия с более развитой поверхностью, что приводит к увеличению емкостных характеристиках датчика.

Ключевые слова: тонкие пленки полиметилметакрилата, нанокompозиты, атомно-силовая микроскопия, емкостные датчики.

THIN POLYMERIC FILMS BASED ON POLYMETHYL METACRYLATE FOR ANALYSIS OF HEAVY METAL CATIONS IN WATER

Sapsaliou D.^{1,2}, Melnikova G.¹, Aksyuchyts A.³, Tolstaya T.¹, Kotov D.³, Chizhik S.^{1,4}¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus²Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics⁴Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of modifying nickel coatings with thin films of polymethyl methacrylate and nanocomposites of polymethyl methacrylate–silicon dioxide nanoparticles to create capacitive sensors for analyzing the content of heavy metal cations in water is considered. It is shown that the introduction of silicon dioxide nanoparticles into the structure of the polymer matrix makes it possible to form coatings with a more developed surface, which leads to an increase in the capacitance characteristics of the sensor.

Key words: polymethyl methacrylate thin films, nanocomposites, atomic force microscopy, capacitive sensors.

Адрес для переписки: Сапсалёв Д.В., ул. Советская, 18, Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: dsapsalev@list.ru

Емкостные датчики широко используются в промышленности, медицине и экологии [1–3]. Несмотря на преимущества применения емкостных датчиков (экономическая эффективность, простота

Снижение шероховатости приводит к незначительному увеличению краевого угла смачивания и снижению полярной составляющей удельной поверхностной энергии, определенных методом капли. Т.е. эти изменения приводят к увеличению гидрофобных свойств поверхности.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 3.03.3 ГПНИ «Конвергенция–2025» на 2021–2025 гг.

Литература

1. Клечковская, В. В. Пленки Ленгмюра-Блоджетт – материалы нанотехнологий настоящего и будущего / Клечковская В. В., Фейгин Л. А. – Вестник РФФИ. – 2014. – № 2 (82). – С. 35–44.

2. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. Integr / R. C. Buck [et al.] // Environ. Assess. Manag. – 2011. – Vol. 7. – P. 513–541.

Для решения данной задачи могут быть использованы полимерные покрытия, например, полиметилметакрилата (ПММА) и композиционные полимер-неорганические материалы на их основе [4].

Экспериментальная часть. Емкостной датчик состоит из проводящего слоя никеля и селективных покрытий составов ПММА, ПММА–наночастицы диоксида кремния.

Предварительно проводили очистку ситалловых подложек ионным пучком (расход аргона 0,65 л/ч, напряжение разряда 1800 В, ток разряда 30 мА, время 10 мин).

Никелевое покрытие формировали методом ионно-лучевого распыления (установка ВУ-1БСп) в течение 30 мин при расходе рабочего газа 0,49 л/ч, напряжении разряда 3500 В и токе разряда 80 мА. Для формирования рисунка токопроводящего слоя заданной топологии на подложку предварительно закреплялась маска (расстояние от мишени никеля – 200 мм). Толщина сформированных никелевых покрытий составила 100 нм (микронтерферометр МИИ-4).

Пленки полиметилметакрилата (Sigma-Aldrich, $M_r \approx 10000$) наносили методом спин-коатинга из его раствора в хлороформе с концентрацией 1 мг/мл. Для этого аликвоту раствора полимера объемом 6 мкл прикапывали на подложки, вращающиеся со скоростью 3200 оборотов в минуту. Вращение не прекращали в течение минуты для удаления остаточных количеств растворителя.

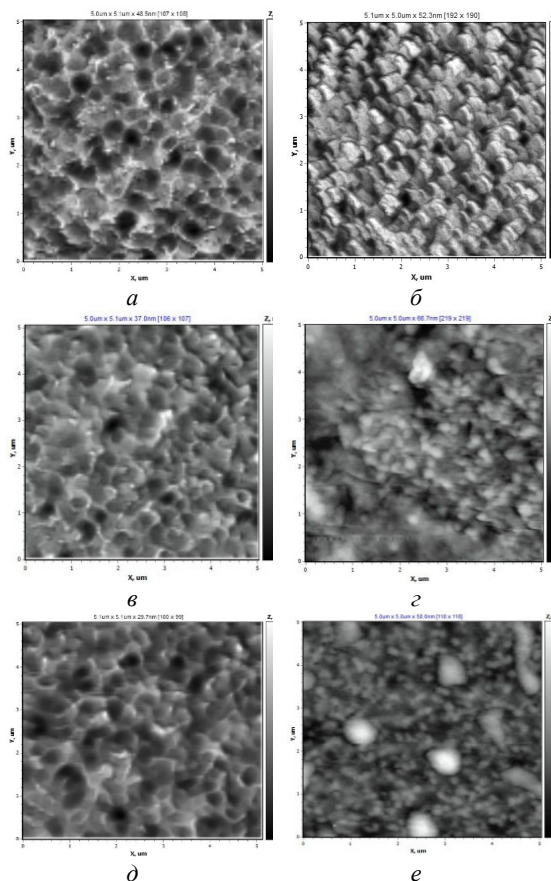
С целью получения пленок, обладающих более развитой поверхностью, в состав полимерных покрытий вводили наночастицы диоксида кремния. Для этого раствор ПММА ($c = 2$ мг/мл) смешивали с суспензией наночастиц SiO_2 (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{--}20$ нм) в хлороформе ($c = 1$ мг/мл), предварительно выдержанной в ультразвуковой ванне (10 мин).

В результате была получена суспензия наночастиц SiO_2 в растворе ПММА с массовым соотношением полимера и наночастиц 2:1 соответственно.

Исследования структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов FMG 01 (TipsNano, Российская Федерация).

Оценку емкостных характеристик датчика проводили на основании анализа зависимости емкости от частоты (измеритель иммитанса E7-25) при выдерживании в растворе сульфата никеля (II) в течение 10 минут.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных атомно-силовой микроскопии показал, что исходная ситалловая подложка и покрытия никеля, сформированные на ее поверхности, имеют однородную структуру (рис. 1, а и б).



а, в, д – ситалл; б, з, е – никель

Рисунок 1 – АСМ-структура ситалловой подложки (а), никелевого покрытия (б), пленок ПММА (в, з) и нанокompозитов ПММА– SiO_2 (д, е)

Формирование тонких пленок ПММА и композитов с наночастицами диоксида кремния на поверхности наноструктурированных никелевых слоев также приводит к получению однородных покрытий на ситалле. В структуре пленок, сформированных на никеле отмечается наличие сферических конгломератов размерами до 900 нм и 800–900 нм для покрытий составов ПММА и ПММА– SiO_2 соответственно (рис. 1, в–е).

Анализ зависимости емкости сформированных на поверхности датчиков покрытий на основе полиметилметакрилата показал, что композиты, имеющие в своем составе наночастицы SiO_2 , имеют более высокие значения емкости при одинаковой концентрации ионов тяжелых металлов в растворе (на примере ионов Ni^{2+}).

Разработанные датчики демонстрируют линейную зависимость емкости от концентрации ионов Ni^{2+} в диапазоне 0,01–20 мМ.

Таким образом, нанокompозиты на основе полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния имеют перспективы применения в качестве селективных покрытий для создания емкостных датчиков анализа содержания тяжелых металлов в воде.

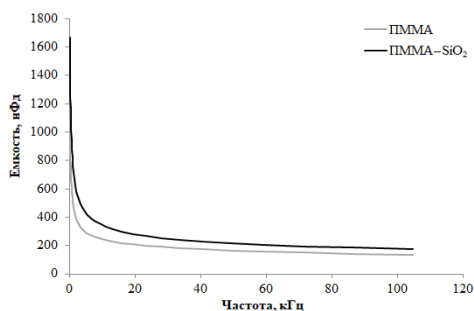


Рисунок 2 – Зависимость емкости сформированных покрытий от частоты в 20 мМ растворе NiSO₄ (время выдерживания датчика 10 мин)

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные

процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

Литература

1. Heavy metal ion detection using a capacitive micro-mechanical biosensor array for environmental monitoring / G. Tsekis [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2015. – Vol. 208. – P.628–635.
2. Rotake, D. Heavy Metal Ion Detection in Water using MEMS Based Sensor / D. Rotake, A. D. Darji // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – P. 1530–1536.
3. Resistive and capacitive strain sensors based on customized compliant electrode: Comparison and their wearable applications / T. Dong [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 326. – P. 112720.
4. A dielectric coating for improved performance of capacitive sensors in allpolymer microfluidic devices / C. Ofenzeller [et al.] // *Microelectronic Engineering*. – 2020. – Vol. 223. – P. 111220.

УДК 621.7.620.186

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРА В ПОКРЫТИИ Al-Cr-B-N НА МОРФОЛОГИЮ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Чижик С.А.^{1,2}, Вархолински Б.³, Гилевич А.³

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Кошалинский технологический университет

Кошалин, Польша

Аннотация. С помощью атомно-силовой микроскопии проведены исследования влияния содержания бора в покрытии Al-Cr-B-N на морфологию, шероховатость и силу адгезии поверхности. На поверхности покрытия без бора присутствует большое количество частиц и конгломератов. Добавление в покрытие бора (10 и 20 %) приводит к увеличению размеров ячеек на поверхности покрытия, снижению количества частиц, росту шероховатости и силы адгезии.

Ключевые слова: покрытие AlCrBN, катодно-дуговое испарение, концентрация, бор, морфология, шероховатость.

INFLUENCE OF BORON CONCENTRATION IN Al-Cr-B-N COATING ON MORPHOLOGY AND SURFACE ROUGHNESS

Lapitskaya V.^{1,2}, Kuznetsova T.^{1,2}, Khabarava A.¹, Chizik S.^{1,2}, Warcholinski B.³, Gilewicz A.³

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³Koszalin Technological University

Koszalin, Poland

Abstract. Atomic force microscopy was used to study the influence of the boron content in the Al-Cr-B-N coating on the morphology, roughness, and adhesion force of the surface. A large number of particles and conglomerates are present on the surface of the coating without boron. The addition of boron to the coating (10 and 20%) leads to an increase in the cell size on the coating surface, a decrease in the number of particles, and an increase in roughness and adhesion strength.

Key words: AlCrBN coating, cathode-arc evaporation, concentration, boron, morphology, roughness.

Адрес для переписки: Лапицкая В.А., ул. П. Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Введение. Нитриды переходных металлов обладают хорошими механическими и трибологическими свойствами, а также коррозионной стойко-

стью. Такие покрытия нашли широкое промышленное применение в качестве защитных покрытий. Наиболее известны покрытия на основе

хрома и титана. Двухкомпонентные покрытия, такие как CrN, вероятно, являются одними из наиболее широко используемых, однако отраслевые требования заставляют внедрять новые покрытия с еще лучшими характеристиками. Можно улучшить свойства покрытий, изменив их химический состав путем легирования металлическими (Ti, Al, V) или неметаллическими элементами (Si, B) [1–4]. В зависимости от концентрации алюминия покрытие Al-Cr-N может находиться в двух структурах: в метастабильной структуре B1 (ГЦК) CrN или в термодинамически стабильной структуре B4 AlN [1].

Особый интерес представляют четвертичные системы Al-Cr-N с титаном [2], кремнием [6] или бором [5]. Наличие бора уменьшает размер кристаллитов в покрытии, уменьшает параметр решетки [7] и улучшает их механические свойства [5].

Целью данной работы являлось исследование морфологии поверхности и шероховатости покрытий AlCrBN методом атомно-силовой микроскопии.

Материалы и методы исследования. С использованием установки TINA 900 M и метода катодно-дугового испарения наносились покрытия AlCrBN толщиной $4,4 \pm 0,1$ мкм на стальные подложки HS6-5-2 диаметром 32 мм и толщиной около 3 мм. Предварительно подложки полировали (параметр шероховатости R_a около 0,02 мкм) и подвергали промывке в щелочной ультразвуковой ванне. Для улучшения адгезии покрытия к подложке, на подложку наносили тонкий слой хрома толщиной около 100 нм. При нанесении покрытий использовалась реакционная атмосфера чистого азота с давлением 4 Па, напряжение смещения на подложке -100 В, ток дуги 80 А. Покрытия были следующие: Al₇₀Cr₃₀N, Al₅₀Cr₅₀N, Al₆₀Cr₃₀B₁₀N и Al₅₀Cr₃₀B₂₀N.

Морфологию и шероховатость поверхности покрытий AlCrBN проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM. Использовались стандартные кремниевые кантилеверы типа MPP21100-10 (Bruker, США) с радиусами закругления острия 10 нм, с жесткостью консоли 3 Н/м.

Результаты исследования. Результаты исследования морфологии поверхности покрытий на полях 3 мкм^2 приведены на рис. 1. У всех покрытий поверхность состоит из ячеек размером от 0,1 до 1,0 мкм. На поверхности покрытия Al₇₀Cr₃₀N также присутствует огромное количество частиц и конгломератов. Сила адгезии поверхности данного покрытия наименьшая по сравнению с другими исследуемыми покрытиями (таблица 1), а шероховатость при этом наибольшая. При увеличении концентрации хрома в покрытии (Al₅₀Cr₅₀N) количество частиц на поверхности значительно уменьшается.

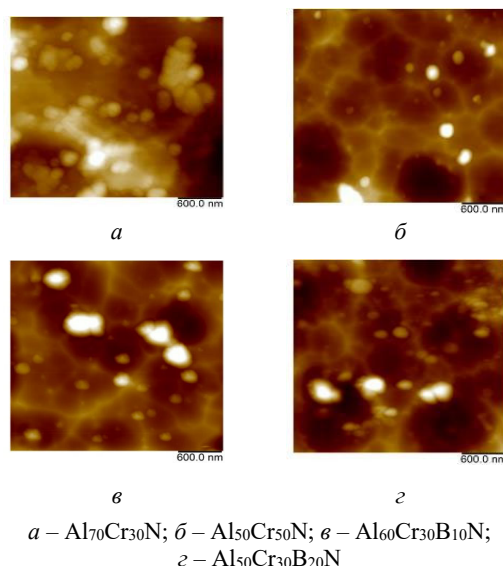


Рисунок 1 – АСМ-изображения (3 мкм^2) поверхности покрытий AlCrBN

Таблица 1. Шероховатость и адгезия поверхности покрытий

Покрытие	R_a , нм	R_q , нм	R_z , нм	$F_{адг}$, нН
Al ₇₀ Cr ₃₀ N	34 ± 2	43 ± 2	167 ± 8	$4,9 \pm 0,2$
Al ₅₀ Cr ₅₀ N	15 ± 1	21 ± 1	43 ± 2	$16,9 \pm 0,8$
Al ₆₀ Cr ₃₀ B ₁₀ N	22 ± 1	32 ± 2	92 ± 5	$16,5 \pm 0,8$
Al ₅₀ Cr ₃₀ B ₂₀ N	29 ± 2	38 ± 2	100 ± 5	$17,5 \pm 0,9$

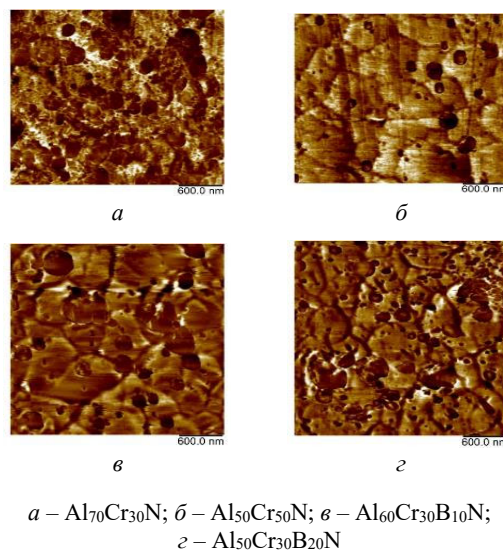


Рисунок 2 – АСМ-изображения (3 мкм^2) поверхности покрытий AlCrBN в режиме адгезионных сил

При сравнении покрытий с различной концентрацией бора (10 и 20 %) получено следующее: происходит увеличение размеров ячеек на поверхности (рис. 1, *v* и *z*), увеличивается шероховатость и сила адгезии поверхности (табл. 1). При анализе изображений поверхности покрытий, полученных в адгезионном контрасте, установлено, что частицы на поверхности и границы ячеек покрытия обладают наименьшей адгезией (рис. 2).

Заключение. Проведены исследования морфологии, шероховатости и силы адгезии поверхности покрытий AlCrN с различным содержанием бора.

Добавление бора приводит к росту шероховатости и силы адгезии поверхности. Увеличение содержания бора с 10 до 20 % приводит к увеличению размеров ячеек на поверхности покрытия системы AlCrBN.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № T21MC-029 и T22M-006.

Литература

1. Investigation of the properties of $Al_{1-x}Cr_xN$ coatings prepared by cathodic arc evaporation / A. E. Reiter [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 200. – P. 2114–2122.
2. Tribological and cutting performance of TiAlCrN films with different Cr contents deposited with multilayered

structure / F. Fernandes [et al.] // Tribology International. – 2018. – V. 119. – P. 345–353.

3. Corrosion and wear behaviors of PVD CrN and CrSiN coatings in seawater / L. Shan [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26. – P. 175–184.

4. Synthesis–structure–property relations for Cr-B-N coatings sputter deposited reactively from a Cr-B target with 20 at% B / K. P. Budna [et al.] // Vacuum. – 2008. – Vol. 82. – P. 771–776.

5. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al-Cr-B-N thin films / C. Tritremmel [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 213. – P. 1–7.

6. Tritremmel, C. Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al-Cr-Si-N thin films / C. Tritremmel [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 307. – P. 118–124.

7. Effects of boron contents on microstructures and microhardness in Cr_xAl_yN films synthesized by cathodic arc method / T. Sato [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201. – P. 348–351.

УДК 539.23; 66.081.6

СЕЛЕКТИВНЫЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ С АНИОННЫМИ КРАСИТЕЛЯМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН

Мельникова Г.Б.¹, Сапсалёв Д.В.^{1,2}, Толстая Т.Н.¹, Чижик С.А.^{1,3}, Корольков И.В.⁴, Здоровец М.В.⁴

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

⁴Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Нур-Султан, Республика Казахстан

Аннотация. Методом атомно-силовой микроскопии изучены структурные и локальные механические характеристики пленок Ленгмюра–Блоджетт перфтордекановой кислоты на поверхности полиэтилентерефталатных трековых мембран. Определены оптимальные условия модификации сформированных покрытий анионным красителем ксиленоловым оранжевым для создания мембран, имеющих перспективы применения в анализе содержания катионов металлов при фильтрации водных растворов.

Ключевые слова: полиэтилентерефталатные трековые мембраны, ксиленоловый оранжевый, перфтордекановая кислота, атомно-силовая микроскопия, метод Ленгмюра–Блоджетт.

SELECTIVE LAYERS BASED ON LANGMUIR–BLODGETT FILMS WITH ANIONIC DYES ON THE SURFACE OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE TRACK MEMBRANES

Melnikova G.¹, Sapsaliou D.^{1,2}, Tolstaya T.¹, Chizhik S.^{1,3}, Korolkov I.⁴, Zdorovets M.⁴

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus

²Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank

³Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

⁴L.N.Gumilyov Eurasian National University

Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

Abstract. The structural and local mechanical characteristics of Langmuir–Blodgett films of perfluorodecanoic acid on the surface of polyethylene terephthalate track membranes have been studied by atomic force microscopy. The optimal conditions for modifying the formed coatings with the anionic dye xylenol orange were determined to create membranes that have prospects for application in the analysis of the content of metal cations in the filtration of aqueous solutions.

Key words: polyethylene terphthalate track-etched membranes, xylenol orange, perfluorodecanoic acid, atomic force microscopy, Langmuir–Blodgett method.

Адрес для переписки: Мельникова Г.Б., ул. П. Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: galachka@gmail.com

Разработка способов модификации поверхности трековых мембран и изучение их структурно-функциональных свойств на наноуровне с применением современных методов анализа актуальна при создании новых мультисенсорных систем на основе трековых мембран (ТМ). Атомно-силовая микроскопия (АСМ) – один из основных методов, используемых при анализе структурных характеристик материалов нанометровой толщины, преимуществом которого является получение информации о локальных механических свойствах гетерогенного материала на микро- и наноуровне, а также детальное изучение структуры пленок нанометровой толщины.

Экспериментальная часть. Для формирования пленок использовали растворы перфтордекановой кислоты (ПФДК, $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_8\text{COOH}$, AlfaAesar) в растворителе Novac 7200 с концентрацией 1 мг/мл.

Монослойные пленки ПФДК формировали на поверхности ТМ с диаметрами пор 50 и 100 нм с использованием автоматизированного комплекса для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями (Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь). Поверхностное давление выделения (π) пленки выжирали на основании экспериментально полученных изотерм «поверхностное давление – площадь на молекулу» в области образования наиболее плотного слоя пленки (фазовое состояние «твердая пленка»).

Затем модифицированные ТМ выдерживали в водных растворах ксиленолового оранжевого (КО) с концентрациями красителя 0,01; 0,1 и 1 мг/мл в течение 10 мин, 1 ч и 1 сут. Образцы промывали в токе дистиллированной воды и высушивали на воздухе.

Структуру и механические свойства модифицированных мембран определяли методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, NT-206, ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов CSC 21 В (Mikromacsh, Эстония), жесткостью 2 Н/м.

Для контроля изменения гидрофильных свойств поверхности мембран после модифицирования измеряли значения краевых углов смачивания (КУС) на установке DSA 100E, (KRUSS, Германия) и рассчитывали удельную поверхностную энергию (w) с использованием двух контрольных жидкостей – дистиллированной воды и дийодометана, объем капли 2 мкл.

Результаты и их обсуждение. На основании данных АСМ-структуры установлено, что наиболее плотный слой красителя формируется после выдерживания ПЭТФ ТМ/ПФДК в водном растворе КО с концентрацией 1 мг/мл (согласно наименьшим значениям среднеквадратической шероховатости R_q). Поры мембран, после погружения в раствор красителя на 1 ч закрыты, после 1 сут на поверхности мембран образуются конгломераты размером до 1 мкм (рис. 1).

На основании определения локальных механических свойств методом АСМ, на примере мембран с диаметром пор 100 нм, показано, что с увеличением концентрации красителя от 0,1 до 1 мг/мл локальные механические свойства модифицированных мембран не изменяются.

С увеличением времени выдерживания значения модуля упругости и силы адгезии уменьшаются, что свидетельствует об увеличении толщины слоя красителя на поверхности мембраны (рис. 2).

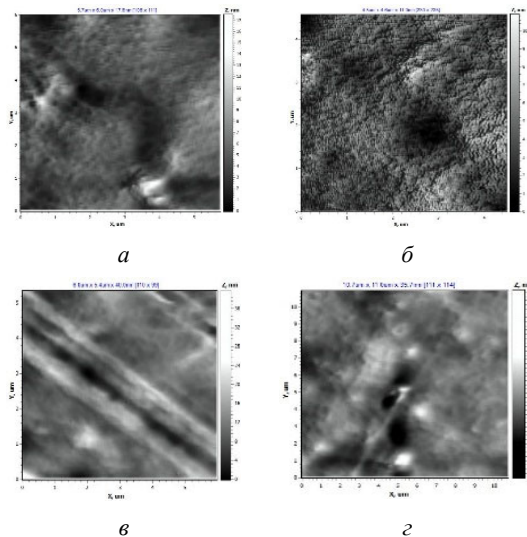


Рисунок 1 – АСМ-структура модифицированных монослоем ПФДК ПЭТФ-50 (а, б) и ПЭТФ-100 (в, г) мембран после выдерживания в водных растворах КО ($c = 1$ мг/мл) в течение 1 ч (а, в) и 1 сут (б, г)

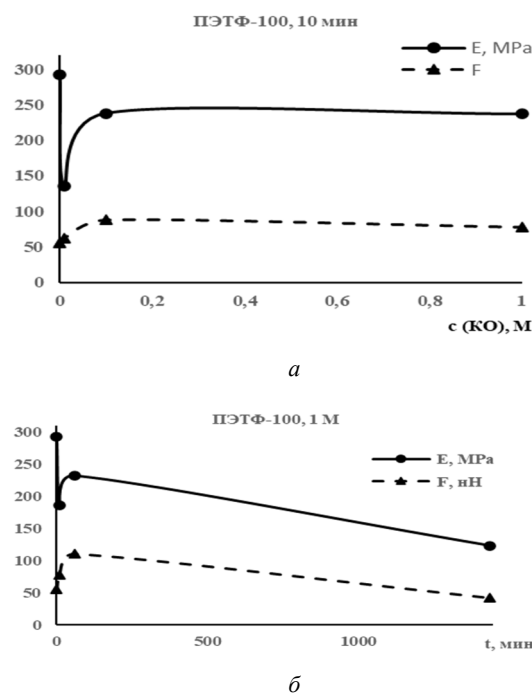


Рисунок 2 – Зависимость значений модуля упругости (E) и силы адгезии (F) ПЭТФ-100/ПФ ДК от: а – концентрации красителя (выдерживание 10 мин); б – времени выдерживания в 1 мг/мл растворе КО

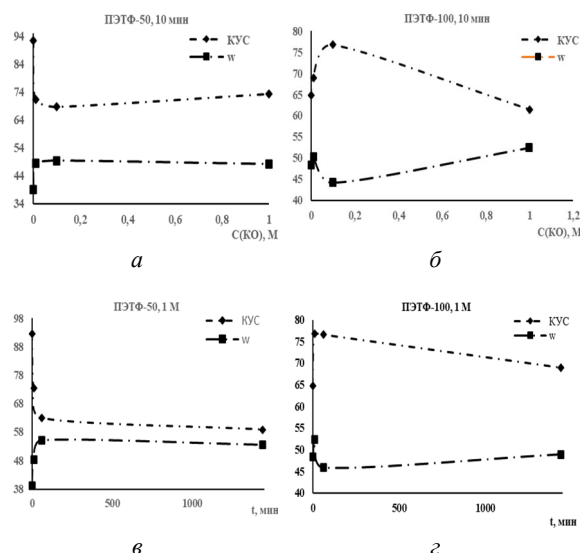


Рисунок 3 – Зависимость значений КУС и w (мДж/м²) образцов ПЭТФ-50 (а, в) и ПЭТФ-100 (б, з), модифицированных монослоем ПФДК от: а, б – концентрации красителя (время выдерживания 10 мин); в, з – времени выдерживания в 1 мг/мл растворе КО

Адсорбция красителя на поверхности мембран подтверждается и данными измерения смачиваемости поверхности – значения КУС уменьшаются с повышением концентрации КО в растворе. Увеличение времени выдерживания до 1 ч и 1 сут к значительным изменениям смачиваемости не приводит (рис. 3). Таким образом, на основании изучения структуры, локальных механических свойств и КУС показано, что оптимальными условиями формирования селективных тонких слоев на поверхности ПЭТФ ТМ с диаметрами пор 50 и 100 нм для ПФДК-монослоя методом Ленгмюра–Блоджетт является $\pi = 5$ мН/м; условия формирования слоя красителя КО методом послойного осаждения – концентрация 1 мг/мл, время выдерживания от 1 ч до 1 сут.

Полученные модифицированные мембраны могут быть использованы для определения содержания катионов металлов в процессе фильтрации водных растворов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Г22МС-029 от 04.05.2022).

УДК 621.317.39.084.2

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ В СОСТАВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ НА АЛЮМООКСИДНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Реутская О.Г.¹, Денисюк С.В.², Куданович О.Н.², Лугин В.Г.³

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

³Белорусский государственный технологический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Формирование газочувствительных слоев на алюмооксидных подложках обеспечивает воспроизводимость и стабильность характеристик, а также низкое энергопотребление сенсоров. Методики выбора режимов отжига и способа нанесения тонких пленок влияют на адгезионные свойства элементов конструкции. Получение развитых сплошных полупроводниковых слоев достигается многослойным нанесением оксидов металлов с применением капельных технологических приемов. Диапазон термообработки поверхности чувствительных элементов составляет от 100 °С до 800 °С.

Ключевые слова: полупроводниковый сенсор, газочувствительный слой, алюмооксидная подложка.

GAS SENSITIVE LAYERS AS PART OF SEMICONDUCTOR SENSORS ON ALUMINUM OXIDE SUBSTRATES

Reutskaya O.¹, Dzenisiuk S.², Kudanovich A.², Lugin V.³

¹Belarusian National Technical University

²SSPA «Optics, Optoelectronics, and Laser Technology»

³Belarusian State Technological University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The formation of gas-sensitive layers on aluminum oxide substrates ensures reproducibility and stability of characteristics, as well as low energy consumption of sensors. The methods of selecting annealing modes and the method of applying thin films affect the adhesive properties of structural elements. The production of developed solid semiconductor layers is achieved by multilayer deposition of metal oxides using drip technological techniques. The range of surface treatment of sensitive elements ranges from 100 °C to 800 °C.

Key words: semiconductor sensor, gas-sensitive layer, aluminium oxide substrate.

Адрес для переписки: Реутская О.Г., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: oreutskaya@bntu.by

Современные тенденции изготовления газовых сенсоров направлены на уменьшение энергопотребления, достижения высокой чувствительности и селективности при анализе окружающей среды. Выбор режимов работы и свойства газочувствительного материала определяют чувствительность и селективность сенсоров. Массовое применение таких устройств ограничено необходимостью обеспечения стабильности их рабочих характеристик при длительной эксплуатации. Миниатюризация полупроводниковых сенсоров позволяет снижать энергопотребление за счет тонкопленочной технологии и уменьшения размеров нагреваемых областей. Применение алюмооксидных подложек расширяет возможности полупроводниковых приборов благодаря широкому диапазону рабочих температур (до 800 °С) и высокой термомеханической прочности. Кроме подложки и газочувствительного слоя важными элементами конструкции сенсора являются нагреватель и измерительные электроды, выполненные в виде проводящих металлических пленок. В качестве материала электродов наилучшей адгезией и долговременной стабильностью выходных параметров обладает платина. Однако, необходимость снижения стоимости сенсоров для массового производства ставит задачу по поиску материалов для выбора другого материала для формирования элементов конструкции.

При проектировании и изготовлении газовых датчиков учитывают особенности полупроводниковых материалов. При формировании газочувствительных слоев следует принимать во внимание сорбционные механизмы, которые «срабатывают» на поверхности анализирующих пленок, а также в их объеме. Важным фактором, влияющим на величину выходного сигнала, является температура осаждения газочувствительного слоя на подложку. Как известно, адсорбция кислорода наиболее активно происходит при температурах 200–300 °С. В результате адсорбированные ионы вступают в реакцию с детектируемым газом и начинается процесс десорбции. Для повышения селективности сенсора необходимо разделять влияние детектируемого газа на электрофизические свойства газочувствительного слоя и других компонентов анализируемого воздуха.

Метод формирования пленок полупроводниковых металлов из золь-гелей относится к наиболее распространенным. Газочувствительные слои создают путем послойного наращивания из паст с последующим высокотемпературным отжигом. Сначала производят конденсацию наночастиц оксидов металлов, а затем наносят на поверхность сенсора слой в виде пасты. После его спекания образуется высокопористая развитая поверхность с хорошей адгезией к подложке [1].

В качестве газочувствительного слоя была выбрана композиция из оксидов олова и индия

($\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$) с 5 % содержанием второго компонента. Нанесение слоя осуществлялось в несколько стадий и слоев капельным путем с промежуточной термообработкой.

На рис. 1 представлена микрофотография сформированной пленки $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ на поверхности алюмооксидной подложки с подслоем в виде пленки из сплава нихром после термосушки и отжига при температуре 700 °С. Температурная обработка проводилась в течение 4 часов.

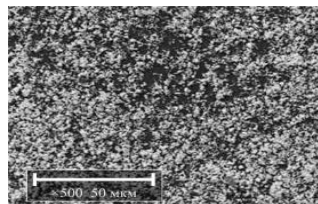


Рисунок 1 – Микрофотография поверхности однослойной пленки $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$

На рис. 2 представлено изображение поверхности газочувствительной пленки, состоящей из восьми слоев. Первый слой также подвергался термообработке (600 °С). Последующие слои высушивали при 100 °С в течение 40 мин. Снижение температуры обработки первого слоя связано с необходимостью достичь однородности пленки при минимальном числе дефектов.

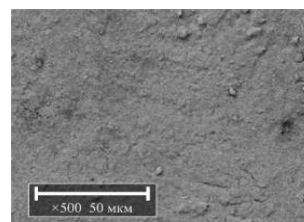
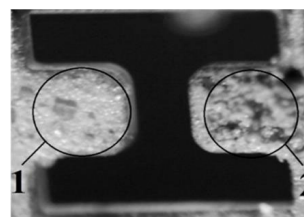


Рисунок 2 – Микрофотография поверхности многослойной пленки $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$



1 – пленка на чувствительном элементе № 1;
2 – неоднородная пленка на чувствительном элементе № 2

Рисунок 3 – Чувствительные элементы двухсенсорной газовой микросистемы с многослойными пленками

При нанесении одиночного слоя (рис. 1) наблюдается значительная неоднородность структуры, что может быть вызвано процессами высыхания капли золь-геля. Многослойная структура (рис. 2), в свою очередь, также содержит дефекты, однако имеет более развитую и однородную поверхность.

На рис. 3 представлено изображение чувствительных элементов полупроводникового сенсора

на алюмооксидной подложке с нанесенными газочувствительными слоями $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ на поверхность информационных электродов из платины, толщиной 0,5 мкм. Данные элементы отличаются числом газоаналитических слоев и режимами высокотемпературного отжига. На элементе № 1 нанесено десять слоев при температуре отжига первого слоя 700 °С, на элементе № 2 – двенадцать слоев (температура отжига первого слоя 850 °С).

Для чувствительных элементов сенсора (рис. 3) применялись разные температуры отжигов и наносилось разное число слоев пленок. В результате наблюдается увеличение числа дефектов на элементе № 2 и частичное разрушение газочувствительного слоя. Нарушение аналитической по-

верхности может приводить к выходу из строя сенсора и оказывать негативное влияние на его работоспособность при долговременной эксплуатации.

Применение золь-гель пасты позволяет получать высокоразвитую поверхность, как в случае полупроводниковой композиции $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$, что приводит к высокой газовой чувствительности сенсора при анализе состава воздуха.

Литература

1. Реутская, О. Г. Разработка газочувствительных сенсоров на основе алюмооксидных структур с низким энергопотреблением / О. Г. Реутская, Н. И. Мухуров, И. А. Таратын // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр.: в 2 ч. – Минск: БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 119–124.

УДК: 621.315.592

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Шарибаев Н.Ю., Джурраев Ш.С., Турсунов А.А., Муллабоева Н.Ш.

*Наманганский инженерно-технологический институт
Наманган, Республика Узбекистан*

Аннотация. Вероятности опустошения поверхностных состояний зависят от времени и от природы самого центра. Для определения плотности поверхностных состояний приводится сравнение функции вероятности опустошения энергетического уровня $\rho(t, E, T)$ со ступенчатой функцией Ферми-Дирака. Исследуется производная от функции $\rho(t, E, T)$ по энергии, и сравнивается дельта – функцией Дирака. Показано, что производная от вероятности опустошения энергетического уровня по энергии $GN(E_0, E, T)$ при низких температурах превращается в дельта – функцию Дирака. Использование этого факта дало возможность предложить математическую модель определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – диэлектрик в приборах с зарядовой связью ПЗС.

Ключевые слова: МОП-структура, энергетический уровень, дискретные уровни, плотность поверхностных состояний, дельта – функцией Дирака

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DETERMINING THE DENSITY OF SURFACE STATES

Sharibaev N., Dzhurraev Sh., Tursunov A., Mullaboeva N.

*Namangan Institute of Engineering and Technology
Namangan, Republic of Uzbekistan*

Abstract. The probabilities of emptying surface states depend on time and on the nature of the center itself. To determine the density of surface states, the comparison of the energy level depletion probability function $\rho(t, E, T)$ with the Fermi-Dirac step function is given. The derivative of the function $\rho(t, E, T)$ with respect to energy is investigated and compared with the Dirac delta function. It is shown that the derivative of the probability of depletion of the energy level with respect to energy $GN(E_0, E, T)$ at low temperatures turns into a Dirac delta function. The use of this fact made it possible to propose a mathematical model for determining the density of surface states at the semiconductor-dielectric interface in CCD devices with charge-coupling.

Keywords: MOS structure, energy level, discrete levels, density of surface states, Dirac delta function

*Адрес для переписки: Шарыбаев Н.Ю., ул. Касансай, 7, Наманган, Республика Узбекистан
e-mail: sharibayev_niti@mail.ru*

В идеализированной модели утверждается, что за время генерации $\tau = \tau(E)$, где $E = E_c - E$, из-за тепловой генерации все состояния с энергиями между E_c и E_v полностью освобождаются. И считается, что состояния с энергией ниже E_v полностью заполнены электронами. Вероятность опустошения уровня с энергией E имеет следующий вид [6]:

$$\rho(E) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau(E)}\right) \quad (1)$$

Здесь $\tau(E)$ определяется квантовыми процессами перехода между локализованными поверхностными состояниями и зоной проводимости. В общем случае, она является достаточно сложной функцией энергии и температуры, которая определяется природой исследуемого центра. Расчет

$\tau(E)$ требует довольно сложных вычислений [28]. Однако, известно, что $\tau(E)$ сильно зависит от энергии E и температуры kT . Как будет видно из дальнейшего, точное знание зависимости $\tau(E)$ не существенно, существенно то, чтобы $\tau(E)$ сильно возрастало с ростом энергии. Это требование необходимо для того, чтобы функция $GN(E)$ – производная от функции вероятности опустошения энергетических состояний, при $T \rightarrow 0$ описала δ – функцию Дирака.

Обычно для $\tau(E)$ используется следующая функция [3, 4]:

$$\tau(E, T, t) = \tau_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \quad (2)$$

где $\tau_0 = \frac{1}{\gamma_n N_c}$.

Из (1) и (2) получим следующее выражение для вероятности опустошения уровня с энергией E [1]:

$$\rho(E, T, E_0(t)) = 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{E_0 - E}{kT}\right)\right), \quad (3)$$

где $E_0(t) = kT \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right)$. (4)

Эти выражения связывают вероятности опустошения уровня E электронов с поверхностных состояний с температурой и временем.

Математическая модель процесса определения ППС на границе раздела диэлектрик – полупроводник. Число электронов $N(t)$, генерированных с поверхностных состояний за время t , при непрерывном распределении уровней по энергиям определяется следующим выражением [2]:

$$N(t) = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \rho(E) dE, \quad (5)$$

где $\rho(E)$ вероятность опустошения уровня с энергией E (1).

Если t заменим переменной $E_0(t)$ из (2) получим [1]

$$N(E_0) = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \rho(E_0, E, T) dE. \quad (6)$$

Продифференцировав выражения (2.18) по E_0 , получим [1]

$$\frac{\partial N_{ss}(E)}{\partial E_0} = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \frac{\partial \rho}{\partial E_0} dE, \quad (7)$$

где

$$\frac{\partial \rho}{\partial E_0} = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E - E_0)\right)\right), \quad (8)$$

при $T \rightarrow 0$ получаем [1]

$$\frac{\partial N_{ss}(E)}{\partial E_0} = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \delta(E - E_0) dE = N_{ss}(E_0) / \quad (9)$$

Количество электронов, покинувших дискретных поверхностных состояний, определяется следующим выражением

$$N(t) = \sum_i N_{ss}(E_i) \rho(E_i, T, t). \quad (10)$$

Продифференцировав выражение (10) по E_0 , получим

$$N_{ss}(E_0) = \sum_{i=1}^n N_{ss}(E_i) \frac{\partial \rho_i}{\partial E_0}, \quad (11)$$

выражение (11) имеет вид [1]

$$N_{ss}(E_0) = \sum_{i=1}^n N_{ss}(E_i) GN(E_0(t), E, T), \quad (12)$$

где

$$GN(E_0(t), E_i, T) = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0)\right)\right).$$

Это выражение удобно для обработки экспериментальных данных энергетической плотности поверхностных состояний. Исходным данным обработки с помощью модели является экспериментально определенный сплошной спектр плотности поверхностных состояний при температуре эксперимента T_0 .

С помощью подбора находим значения N_{ss} для каждого E_i при температуре T_0 так, чтобы значения $N_{ss}(E, T)$ построенные согласно математической модели и эксперименту максимально приоблизлились между собою. После этого вместо температуры T_0 подставляются, по возможности, низкие температуры T_1 и вычисляется дискретный спектр плотности поверхностных состояний.

Выводы. Определение плотности поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ в приборах с зарядовой связью дает возможность установить связь между энергией состояния и временем генерации электрона из этого состояния. Если $E_0 = kT \ln(nT_0/\tau_0)$, где время генерации определяется числом пропущенных нулей n и периодом переключений электродов прибора с зарядовой связью T_0 , то функция вероятности опустошений энергетических состояний $\rho(E_0(t), E, T) = 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{E_0 - E}{kT}\right)\right)$ является ступенчатой функцией, ее производная

$$\frac{\partial \rho}{\partial E} = GN(E_0(t), E, T) = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0)\right)\right).$$

при низких температурах описывает дельта – функцию Дирака.

Построена модель процесса определения плотности поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ разложением спектра плотности поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ в ряд по $GN(E_0, E, T)$ функции.

Литература

1. Гулямов, Г. Определение плотности поверхностных состояний границы раздела, полупроводник–диэлектрик, в МДП–структуре / Г. Гулямов, Н. Ю. Шарифаев // ФТП. – 2011. – Т.45, №2. – С. 178–182.
2. Носов, Ю. Р. Основы физики приборов с зарядовой связью / Ю. Р. Носов, В. А. Шилин. – Москва. Наука, 1986. – 362 с.

УДК 539.25; 538.91; 538.97

**ПЛЕНКИ SiN_x С НИЗКИМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ
ДЛЯ МИКРОСИСТЕМНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ICP-РЕАКТОРЕ**

Ковальчук Н.С.¹, Демидович С.А.¹, Комаров Ф.Ф.², Власукова Л.А.³, Пархоменко И.Н.³

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

²НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ

³Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Пленки SiN_x с механическими напряжениями в диапазоне от -10 до -625 МПа синтезированы в реакторе индуктивно-связанной плазмы (ICP) из смеси « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ ». Обогащение нитридных пленок азотом приводит к снижению механических напряжений до -10 МПа. При подъеме мощности ICP-источника механические напряжения возрастают вплоть до -625 МПа при 800 Вт. Варьирование температуры осаждения от 25 до 350 °С существенно не влияет на уровень напряжений и показатель преломления, а также на скорость роста SiN_x . Оценен дрейф остаточных напряжений в течение трех недель после осаждения, а также содержание кислорода в пленках SiN_x в зависимости от режима осаждения.

Ключевые слова: пленки SiN_x , смесь « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ », индуктивно-связанная плазма, механические напряжения, показатель преломления.

**LOW STRESS SiN_x FILMS FOR APPLICATIONS IN MICROSYSTEMS
SYNTHESIZED IN ICP-REACTOR**

Kovalchuk N.¹, Demidovich S.¹, Komarov F.², Vlasukova L.³, Parkhomenko I.³

¹Joint Stock Company “Integral”

²A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU

³Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. SiN_x films with the residual mechanical stresses from -10 to -625 MPa have been synthesized using “ $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ ” mixture in the inductively-coupled plasma (ICP) reactor. An enrichment of nitride films with nitrogen leads to a stress decrease to -10 MPa. An increase of ICP-source power results in a residual stress increase until to -625 MPa at 800 W. A deposition temperature variation from 25 to 350 °C does not affect substantially a stress level and refractive index as well as SiN_x growth rate. A stresses drift in SiN_x films measured during three weeks after deposition has been evaluated as well as the oxygen content in films deposited in different regimes.

Key words: SiN_x films, « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ » mixture, inductively-coupled plasma, residual mechanical stresses, refractive index.

Адрес для переписки: Власукова Л.А., ул. Кижеватова, 5, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: vlasukova@bsu.by

Введение. Нитрид кремния широко применяется в технологии интегральных микросхем и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Для ряда применений важно знать уровень остаточных механических напряжений в нитридных пленках. Так, для диэлектрических мембран МЭМС необходимы пленки с напряжениями ниже 200 МПа [1]. Пассивация структуры « $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ » для мощных СВЧ-транзисторов пленкой нитрида кремния позволяет уменьшить ток утечки по поверхности AlGaIn на несколько порядков [2]. Однако нанесение нитрида кремния приводит к сдвигу $C-V$ характеристик композиции « $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ » что негативно влияет на управляющие свойства затворов транзисторов. По данным [3] этот сдвиг обусловлен механическими напряжениями в нитридной пленке. Поэтому актуальным является установление зависимости между параметрами осаждения SiN_x и механическими напряжениями, а также оценка возможности регулирования напряжений.

Целью данной работы было исследование уровня механических напряжений в пленках SiN_x ,

полученных из смеси « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2$ », в зависимости от состава газовой смеси, мощности источника плазмы, температуры осаждения.

Материалы и методы исследования.

Пленки SiN_x выращивались на установке STE ICP200D (SemTEq, Санкт-Петербург). Перед осаждением пластины кремния обрабатывались в смесях КАРО и ПАР-5 и дополнительно очищались в реакторе в плазме Ar . Давление в камере было 2,5 Па. Поток SiH_4 (100 %) варьировался от 7,5 до 9,0 станд. $\text{cm}^3/\text{мин}$ (sccm), поток азота – от 4,5 до 14,5 sccm. В качестве газа-носителя использовался Ar или смесь Ar-He . Мощность ICP-электроды изменялась от 300 до 800 Вт при частоте 13,56 МГц, температура осаждения варьировалась от 25 до 350 °С.

Контролировались толщина пленки, механические напряжения (σ) и показатель преломления (n). Толщина измерялась на оптическом тонкопленочном рефлектометре FTR, механические напряжения оценивались на хроматическом датчике белого света CWL, коэффициент преломления измерялся на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3

M1. Показатель преломления позволяет косвенно оценить химический состав SiN_x . Для стехиометрического материала $n = 2,02 \pm 0,02$. Более высокие значения n соответствуют обогащению пленки кремнием, значения ниже – обогащению пленки азотом. Содержание кислорода в SiN_x определялось на рентгеновском микроанализаторе (EDX Bruker), совмещенном со сканирующим электронным микроскопом Hitachi S 4800.

Результаты и обсуждение. При варьировании температуры осаждения σ и n пленок изменялись незначительно, как и скорость роста нитрида, которая составляла 23–26 нм/мин. В то же время состав газовой смеси и уровень мощности генератора плазмы сильно влияют на свойства SiN_x . На рис. 1 представлены зависимости σ и n пленок SiN_x от соотношения расходов моносилана и азота (R) и мощности ICP-источника.

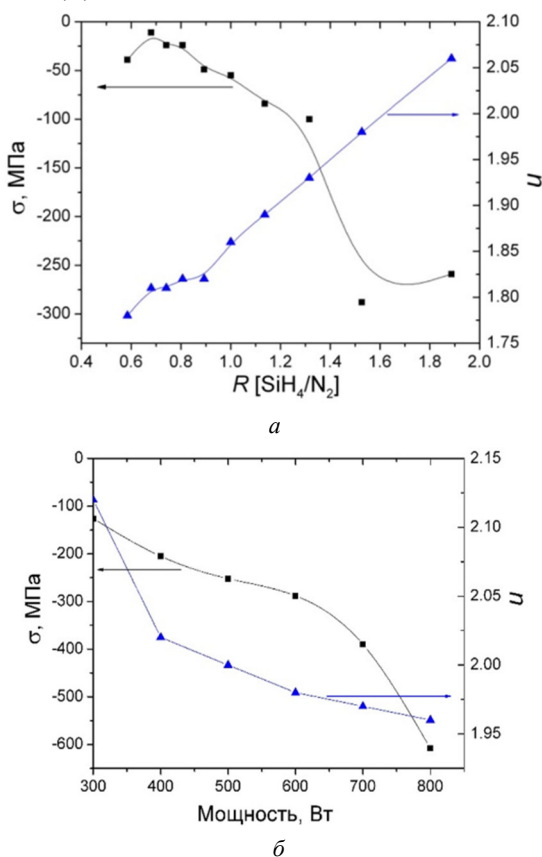


Рисунок 1 – Зависимости σ и n в пленках SiN_x от отношения расходов реагирующих газов R (а) и мощности ICP-источника (б) при расходе Ar 155 sccm

Измерения проводились для пленок толщиной 100–120 нм, осажденных при 300 °С. Все пленки характеризуются сжимающими напряжениями. При малых R (дефицит моносилана в газовой смеси) при прочих равных условиях напряжения минимальны и варьируют от –10 до –50 МПа. Подъем мощности ICP-источника от 300 до 800

Вт приводит к пятикратному увеличению напряжений. Для показателя преломления характерна обратная тенденция. При минимальном значении мощности $n = 2,12$. При возрастании мощности n снижается и достигает минимального значения 1,96 при мощности 800 Вт.

Дрейф остаточных напряжений в течение трех недель после осаждения оценивался для двух групп образцов нитрида с различным уровнем σ . Обнаружено, что остаточные напряжения заметно возрастают со временем для пленок с изначально низкими σ . В пленках с высокими остаточными напряжениями, полученных при высоком давлении в камере и/или высокой мощности ICP-источника, заметного дрейфа σ не наблюдается. Изменений показателя преломления SiN_x при хранении не выявлено.

Проведена оценка содержания в SiN_x примеси кислорода, который влияет на показатель преломления, устойчивость к фтористоводородной кислоте и др. В табл. 1 представлены данные по содержанию кислорода в пленках, полученных в различных режимах.

Таблица 1. Содержание кислорода в пленках SiN_x , осажденных в различных режимах

Давление в камере, Па	Мощность ICP, Вт	Температура осаждения, °С	Содержание кислорода, ат. %
1,5	700	150	4,32
1,5	700	250	4,19
2,5	700	150	2,24
1,5	1000	150	1,88

Примечание. Состав газовой смеси во всех случаях одинаков: $[\text{SiH}_4] = 15$ sccm, $[\text{N}_2] = 11$ sccm, $[\text{Ar}] = 75$ sccm, $[\text{He}] = 120$ sccm.

Измерения проводились через сутки после осаждения. Как видно, при увеличении давления и/или мощности ICP содержание кислорода в нитриде снижается. Повышение температуры подложки на уровень кислорода не влияет.

Благодарности. Работа поддержана ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.8.1).

Литература

- Zheng, Y. Deposition of Low Stress Silicon Nitride Thin Film and Its Application in Surface Micromachining Device Structures / Y. Zheng // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2013. – Vol. 1.
- Cho, S.-J. Impact of Stress in ICP-CVD SiN_x Passivation Films on the Leakage Current in AlGaIn/GaN HEMTs / S.-J. Cho // *Electron. Lett.* – 2018. – Vol. 54. – P. 947–949.
- Сейдман, Л. А. Плёнки SiN_x , полученные методом PECVD, в качестве пассивации AlGaIn/GaN HEMT / Л. А. Сейдман // *Электронная техника. Сер. 2.* – 2020. – Вып. 3. – С. 22–33.

УДК 538.9+539.23

СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Константинов С.В.¹, Комаров Ф.Ф.¹, Чижов И.В.², Зайков В.А.²

¹НИУ «Институт прикладной физики имени А.Н. Севченко» БГУ,

²Белорусский государственный университет,

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Сформированы нитридные покрытия TiAlCuN на подложках из монокристаллического кремния (100) и титана марки VT1-0 магнетронным методом. Проведены исследования элементного состава, структуры и механических свойств полученных покрытий. Установлено, что уменьшение степени реактивности α от значения $\alpha = 0,60$ до величины $\alpha = 0,47$ приводит к увеличению скорости осаждения покрытия TiAlCuN на 23 %. Полученные покрытия являются однородными, плотными и не содержат видимых дефектов по всей площади поверхности. Твердость покрытий TiAlCuN варьируется в диапазоне $H = 23\text{--}36$ ГПа, модуль Юнга – $E = 170\text{--}270$ ГПа, что удовлетворяет требованиям для покрытий, пригодных для эксплуатации в микромеханических приборах авиационной и космической техники.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия TiAlCuN, механические свойства, наноиндентирование, твердость, модуль Юнга.

PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED TiAlCuN NITRIDE COATINGS FOR MICROMECHANICAL DEVICES

Konstantinov S.¹, Komarov F.¹, Chizhov I.², Zaikov V.²

¹A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Nitride TiAlCuN coatings were formed on substrates made of single-crystal silicon (100) and titanium grade VT1-0 by magnetron method. Investigations of the elemental composition, structure and mechanical properties of the obtained coatings have been carried out. It has been found that a decrease in the degree of reactivity α from $\alpha = 0.60$ to $\alpha = 0.47$ leads to an increase in the deposition rate of the TiAlCuN coating by 23 %. The resulting coatings are homogeneous, dense and do not contain visible defects over the entire surface area. The hardness of TiAlCuN coatings varies in the range of $H = 23\text{--}36$ GPa, Young's modulus – $E = 170\text{--}270$ GPa, which meets the requirements for coatings suitable for use in micromechanical devices of aviation and space technologies.

Key words: nanostructured coatings TiAlCuN, mechanical properties, nanoindentation, hardness, Young's modulus.

Адрес для переписки: Константинов С.В., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: svkonstantinow@gmail.com mymail3000@tut.by

Введение. Создание современных приборов с прецизионными механическими узлами, в том числе для авиационной и космической техники, таких как: гироскопы, осевые и маятниковые акселерометры, датчики давления актуализирует вопрос разработки твердых и износостойких покрытий [1]. В ряде работ было показано, что керамические нитридные и карбонитридные покрытия демонстрируют высокую прочность в синергии с пластичностью, и, таким образом, обладают хорошей износостойкостью и ударной вязкостью [2].

Для улучшения механических характеристик нитридных и карбонитридных покрытий перспективным является добавление меди или серебра, которые способны снижать коэффициент трения и повышать износостойкость композиционного покрытия. Добавление меди или кремния в состав, например покрытия TiAlN, способно блокировать рост кристаллитов и препятствовать миграции границ зерен [3].

Материалы и методы исследования. Формирование покрытий TiAlCuN осуществлялось

методом реактивного магнетронного распыления. В качестве подложек использовался титан марки VT1-0 и монокристаллический кремний (100). Осаждение проводилось в режиме со стехиометрической концентрацией ($\alpha = 0,60$) и дефицитом реактивного газа ($\alpha = 0,47$).

Для изучения элементного состава покрытий был применен метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием специализированной приставки к электронному микроскопу Hitachi SU 3400. С использованием указанного оборудования изучена структура покрытий методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Исследования механических свойств были проведены по методике Оливера и Фарра [2] на приборе CSM Instruments (Швейцария) Nano Hardness Tester (NHT2) с алмазным индентором Берковича.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлен энергодисперсионный рентгеновский спектр, полученный от покрытия TiAlCuN, сформированного в режиме со стехиометрической

концентрацией азота ($\alpha = 0,6$). Концентрация кислорода находится в пределах погрешности измерения, что свидетельствует о высоком качестве полученных структур. Обнаружено, что уменьшение степени реактивности α от значения $\alpha = 0,60$ до величины $\alpha = 0,47$ приводит к увеличению скорости осаждения покрытия TiAlCuN на 23 %.

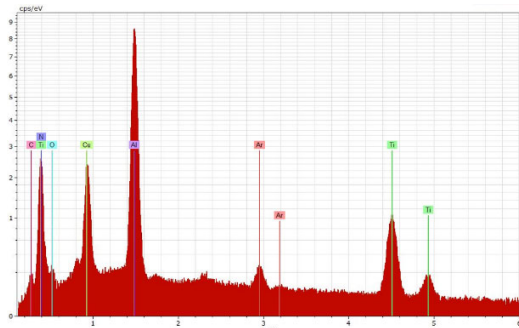
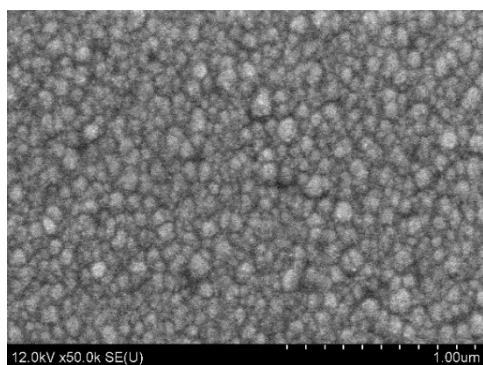
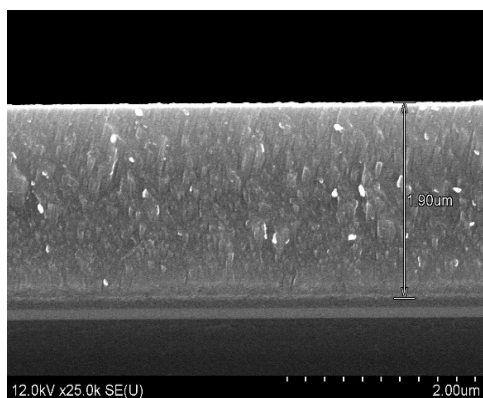


Рисунок 1 – Энергодисперсионный рентгеновский спектр от покрытия TiAlCuN

На рис. 2 представлены изображения поверхности (а) и поперечного сечения (б) покрытия TiAlCuN.



а



б

Рисунок 2 – СЭМ – микрофотографии поверхности (а) и поперечного сечения (б) покрытия TiAlCuN на кремнии

Поверхность всех образцов пленок TiAlCuN является гладкой и однородной. В структуре отсутствуют трещины и пустоты, способные оказывать негативное влияние на механические свойства покрытий.

На рис. 3 представлена кривая нагрузки-разгрузки индентора от покрытия TiAlCuN. Как следует из анализа результатов индентирования, где обнаружено отсутствие «ступеней» или разрывов на кривой нагрузки-разгрузки, сформированные покрытия однородны по толщине. Твердость их варьируется в диапазоне $H = 23\text{--}36$ ГПа, модуль Юнга – $E = 170\text{--}270$ ГПа, что удовлетворяет требованиям для покрытий, пригодных для эксплуатации в микромеханических приборах авиационной и космической техники.

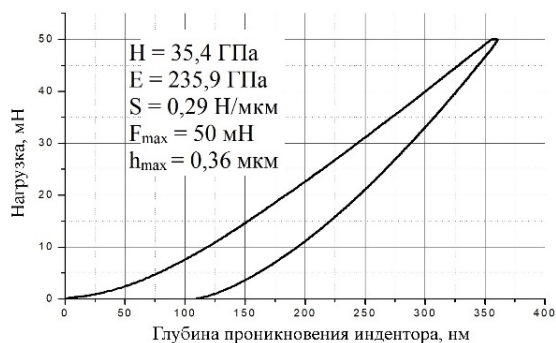


Рисунок 3 – Кривая нагрузки-разгрузки индентора от покрытия TiAlCuN

Заключение. Полученные покрытия TiAlCuN на подложках кремния Si (100) и титана VT1-0 являются однородными, плотными и не содержат видимых дефектов по всей площади поверхности. Установлено, что уменьшение степени реактивности α от значения $\alpha = 0,60$ до величины $\alpha = 0,47$ приводит к увеличению скорости осаждения покрытия TiAlCuN на 23 %. Твердость их варьируется в диапазоне $H = 23\text{--}36$ ГПа, модуль Юнга – $E = 170\text{--}270$ ГПа, что удовлетворяет требованиям для покрытий, пригодных для эксплуатации в космических условиях.

Литература

- Новиков, Л. С. Космическое материаловедение. Учебное пособие / Л. С. Новиков. – М.: Макс Пресс, 2014. – 448 с.
- Константинов, С. В. Радиационная стойкость наноструктурированных покрытий TiCrN / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, В. Е. Стрельницкий // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 412–421.
- Development and characterization of TiAlN (Ag, Cu) nanocomposite coatings deposited by DC magnetron sputtering for tribological applications / D. Perea [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 381. – P. 125095.

УДК 621.373

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК
ОКСИДОВ ЦИНКА И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ**

Лапицкая В.А.¹, Баган Н.П.², Венскевич Н.Н.², Козуля А.А.², Щербакowa Е.Н.², Юсупов Ф.Т.³

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Ферганский политехнический институт

Фергана, Республика Узбекистан

Аннотация. Сегодня ученые в ведущих мировых исследовательских центрах получают тонкие слои на основе полупроводниковых монокристаллических подложек, совершенствуют технологии получения, определяют их оптимальные условия, исследуют структурные и уникальные физические свойства полученных тонких слоев и ведут научные исследования, расширяют спектры поглощения света гетероструктур, чувствительных к газу, температуре и давлению, работают над созданием электронных устройств. В работе обсуждаются результаты исследования гетероструктур на основе оксидов цинка, полученных методом вакуумного испарения.

Ключевые слова: полупроводниковая подложка, оксид цинка, гетероструктура.

**TECHNOLOGY FOR OBTAINING AND STUDYING THE CHARACTERISTICS OF THIN FILMS
OF ZINC OXIDES AND HETEROSTRUCTURES BASED ON THEM**

Lapitskaya V.¹, Bagan N.², Vintskevich N.², Kozulya A.², Shcherbakova E.², Yusupov F.³

¹A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³Fergana Polytechnic Institute

Ferghana, Republic of Uzbekistan

Abstract. Today, scientists in the world's leading research centres produce thin layers based on semiconductor single-crystal substrates, improve production technologies, determine their optimal conditions, investigate the structural and unique physical properties of the resulting thin layers and conduct scientific research, expand the light absorption spectra of heterostructures sensitive to gas, temperature and pressure, work on creating electronic devices. The paper discusses the results of the study of heterostructures based on zinc oxides obtained by vacuum evaporation.

Keywords: semiconductor substrate, zinc oxide, heterostructure.

Адрес для переписки: Щербакowa Е.Н., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220013, Республика Беларусь

e-mail: scherbakova@bntu.by

Тонкие пленки металлов и их соединений, формируемые в вакууме, находят широкое применение в производстве дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС).

Получение высококачественных и воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных слоев является одним из важнейших технологических процессов формирования структур как дискретных диодов и транзисторов, так и активных и пассивных элементов ИМС. Поэтому надежность и качество микроэлектронных изделий, технический уровень и экономические показатели их производства во многом зависят от совершенства процесса нанесения пленки [1].

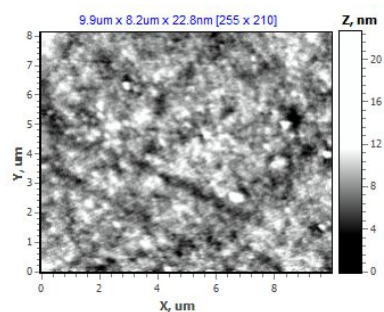
Важным этапом является контроль параметров пленки (скорости осаждения, толщины и однородности, поверхностного сопротивления), что осуществляется с помощью специального оборудования, либо во время отдельной технологической операции, либо в конце процесса.

Методика и результаты эксперимента. Для получения тонких пленок в данной работе

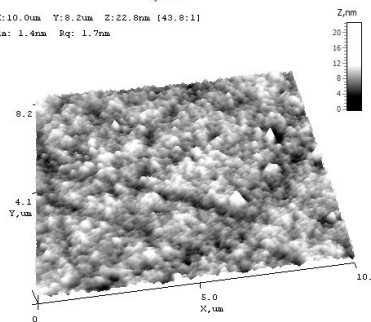
использовали вакуумный универсальный пост ВУП-5, который дает возможность для проведения резистивного испарения материалов, нагрева исследуемого вещества до высоких температур, получения многослойных покрытий, испарения многокомпонентных веществ. Установка с помощью механического и диффузионного насосов создает высокий вакуум, в условиях которого осуществляется испарение веществ путем их нагревания при пропускании тока через вольфрамовые испарители.

Пленки ZnO нанесены на подложки из никеля (Ni) или стекла в вакууме при температуре 2250–2400 °С. Температуру подложек варьировали в пределах 80–450 °С. Скорость формирования пленок при температурах испарения составляет 10–15 Å/с.

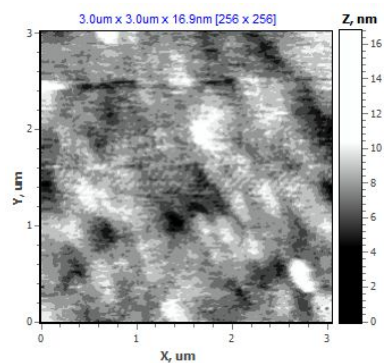
Электронно-графическим методом установлено, что свеженапыленные пленки обладают аморфной структурой, в которых при последующих отжигах при температуре 350–400 °С и в течение не менее 3 часов, возникают кристаллические фазы с гексагональной решеткой, параметры которой составляют; $a = 7,835$ Å и $c = 15,91$ Å.



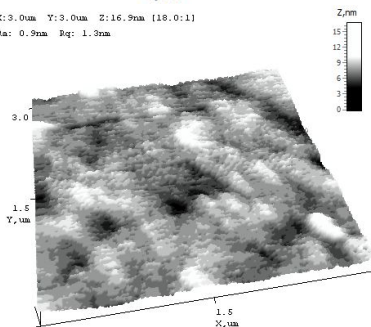
X: 10.0um Y: 9.2um Z: 22.8nm (43.8:11)
Ra: 1.4nm Rq: 1.7nm



a



X: 3.0um Y: 3.0um Z: 16.9nm (18.0:11)
Ra: 0.9nm Rq: 1.3nm



б

Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности пленок ZnO (*a*, *б* – в поле 10 мкм² и 3 мкм², соответственно

Исследование морфологии поверхности и толщины исследуемых образцов осуществлялось методами атомно-силовой микроскопии на АСМ НТ-206 (ОАО «Микротестмашины», г. Гомель, Беларусь) и стандартный кремниевый кантилевер NSC-11 (Микромаш, Эстония) с жесткостью консоли 3 Н/м и радиусом закругления острия 10 нм.

В ходе работы зонд устанавливался в держатель, настраивалась система детектирования, далее исследуемый образец размещался на предметном столике. Измерение проводилось в статическом режиме работы АСМ путем подвода исследуемой поверхности к зонду с использованием программы SurfaceScan. Для данного образца сканирование проводили в области 10, 5, 3 и 1,5 мкм.

Результаты исследования морфологии поверхности и толщины тонких пленок, в том числе и в 3D-изображении, показаны на рис. 1.

Результаты определения шероховатости приведены в табл. 1.

Таблица 1. Шероховатость поверхности пленок ZnO

Размер поля, мкм ²	Ra, нм	Rq, нм
10	1,4	1,7
5	1,1	1,4
3	0,9	1,3
1,5	0,8	1,2

Выводы. Методом термического напыления на установке ВУП – 5 получены тонкие пленки состава ZnO на подложке из (Ni) или стекла в вакууме при температуре 2250–2400 °С. Исследования проводились методами электронографии и атомно-силовой микроскопии.

Из анализа полученных результатов следует, что напыленные пленки имеют аморфную структуру, при дальнейшем отжиге до температур 350–400 °С с течением времени возникают кристаллические фазы с гексагональной решеткой. Определена шероховатость полученных пленок.

Литература

1. Структурно-фазовые состояния тонких интерметаллических пленок системы Cu-Sn: автореферат дис. кандидата физико-математических наук: 01.04.07 / А. Н. Макрушина. – Барнаул, 2017. – 23 с.

УДК 621.317;620.186

ОТ БИОНИКИ К МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ. ПАУЧИЙ ШЕЛК Люцко К.С., Козуля А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье проведен анализ научной литературы по теме «Бионика» с целью выявления материалов, использование которых в нано- и микроэлектронике существенно улучшают свойства и качество изготавливаемых конструкций. В данной работе рассматривается строение и характеристики паучьего шелка, его уникальность заключается в том, что показатели прочности и пластичности превышают не только самые лучшие современные искусственные волокна, но и сталь. В состав паутины входят три вещества, которые способствуют ее долговечности: пирролидин, гидрофосфат калия и нитрат калия.

Ключевые слова: Бионика, конструкции, пластика, прочность, паучий шелк.

FROM BIONICS TO ELECTRONICS. BIONIC WEB IN SCIENCE AND TECHNOLOGY Liutsko K., Kozulya A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article analyzes the scientific literature on the topic "Bionics" in order to identify materials, the use of which in nano- and microelectronics significantly improve the properties and quality of manufactured structures. In this paper, the structure and characteristics of the spider silk are considered, its uniqueness lies in the fact that the strength and ductility indicators exceed not only the best modern artificial fibers, but also steel. The composition of the web includes three substances that contribute to its durability: pyrrolidine, potassium hydrophosphate and potassium nitrate.

Key words: bionics, constructions, plastics, strength, spider silk.

Адрес для переписки: Люцко К.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

Бионическое поведение, вдохновленное изучением и наблюдением за природой, с древних времен играло жизненно важную роль в содействии развитию человека. В настоящее время человечество пришло к использованию своей первичной идеи – максимально точно перенести возможности живой природы в научно-технический прогресс. Что послужило фундаментом появления новой науки – бионики. Зарождение бионики произошло непосредственно в условиях производственной практики, наука возникла на стыке между биологией и техникой. Таким образом, бионика – это наука о создании искусственных систем, обладающих некоторыми характеристиками живых систем, она изучает законы структурного образования и формирования живой природы с целью объединения таких отраслей как биология и техника, для решения инженерно-технических задач.

В данной работе мы рассматривали строение, характеристики, а также механические свойства паучьего шелка, его уникальность заключается в том, что показатели прочности и пластичности превышают не только самые лучшие современные искусственные волокна, но и сталь.

Прочная шелковая нить (“dragline”) паука *Nephila clavipes* (рис. 1), которая служит для каркаса и “страховочного троса”, включает центральную часть и оболочку. Фибриллы диаметром ~ 100 нм, образующие центральную часть, состоят из белков спидроинов (от англ. spider – паук) двух

типов MaSp1 и MaSp2. Это очень длинные молекулы размером в несколько тысяч аминокислотных остатков. Спидроины по аминокислотному составу похожи на белки шелка фиброины, поэтому нити паутины называют паучьим шелком.



Рисунок 1 – Внешний вид паука *Nephila clavipes*

В состав паучьего шелка входят три вещества, которые способствуют его долговечности: пирролидин, гидрофосфат калия и нитрат калия. Еще одним, немаловажным свойством паучьего шелка является его максимальная упругость. Отдельные нити из паутиного шелка способны поглощать в три раза больше энергии, чем, например, кевлар – один из самых прочных материалов по соотношению веса (табл.1).

Отметим, что синтетические материалы обычно обладают более высокой жесткостью и прочностью по сравнению с натуральными волокнами, в то время как натуральные волокна более эластичны. Синтетические углеводные волокна, например, имеют предел текучести около 4 ГПа.

Это более чем в пять раз выше, чем у шелка насекомых.

Таблица 1. Механические свойства натуральных и синтетических волокон

Материал	Плотность, г*см ⁻³	Прочность, ГПа	Эластичность, %	Прочность, МДж * м ⁻³
Флаговый шелк	1,3	0,5	270	150
Нейлон 6.6	1,1	0,95	18	80
Кевлар 49	1,4	3,6	2,7	50
Углеродное волокно	1,8	4	1,3	25
Стали	7,8	1,5	0,8	6

Эластичность углеродных волокон, с другой стороны, лишь незначительна. Как только углеродное волокно удлиняется более чем на процент или изгибается до определенной степени, оно мгновенно ломается. Паучий шелк демонстрирует хорошо сбалансированное сочетание прочности и эластичности, поэтому механически превосходит другие натуральные волокна, а также синтетические нити при определенных обстоятельствах.

В мире натуральных волокон паучий шелк уже давно признан чудо-волокном за его уникальное сочетание высокой прочности и относительного удлинения при разрыве.

Раннее было исследовано, что паучий шелк имеет прочность до 1,75 ГПа при относительном удлинении, и разрыве более 26 % [1]. С ударной вязкостью более чем в три раза больше, чем у арамидных и других промышленных волокон, он продолжает привлекать внимание исследователей во всем мире.

В ходе изучения литературы было выявлено, что паучий шелк имеет широкое применение в медицине, а именно – хирургии. Так на основе паучьего шелка создан материал для заживления ран, использование которого активно внедряется в хирургической практике. Материал является абсолютно безопасным для человеческого организма. Его используют в качестве нитей для наложения швов после операций, с целью возможности быстрого отслеживания процесса заживления ран после зашивания. Ученые модифицировали натуральный паучий шелк флуоресцентными углеродными точками. Главным свойством которых является способность к свечению при поглощении света.

Помимо уникальных свойств материала, паучий шелк является естественным примером особого класса предварительно-напряженной системы, называемой тенсегрити (сохраняет целостность при растяжении) структуры [2]. Эти структуры представляют собой уникальное сочетание геометрических и механических параметров, приводящее к высокоэффективной структуре, благодаря оптимальному распределению конструкционной массы. Предварительное натяжение действительно немного изменяет жесткость. Тем не менее, это играет важную роль в задержке начала провисания струн паутины, таким образом, предотвращает нелинейность из-за ослабления струн. Самонапряженный характер, который обеспечивает их жесткость, задает паутине механизм для эффективного и экономичного способа балансировки напряжений. Изучение взаимодействия свойств и структурной геометрии паутины является большим прорывом в индустрии техники и технологий, дает возможность проектировать образцы следующего поколения – сверхлегкие, больших площадей.

Выводы. В данной работе мы рассмотрели строение, характеристики, а также механические свойства паучьего шелка. Выяснили, что его структуры представляют собой уникальное сочетание геометрических и механических параметров. Показатели прочности и пластичности превышают самые лучшие современные искусственные волокна. Отметим, что шелк паука имеет прочность до 1,75 ГПа при относительном удлинении, и разрыве более 26 %.

Благодаря своим уникальным характеристикам и свойствам, паучий шелк считается удивительно удобным материалом. Изучение наноструктуры паутины является перспективным направлением в микроэлектронике для производства датчиков, гибкой электроники и чувствительных покрытий.

Литература

1. Землин, Дж. К. Исследование механического поведения паутинных шелков; Технический отчет Натика армии США 69-29-СМ, 1968 Васильев А., Олихов И., Самотаев Н. Технология «нано-на-микро». Улучшение характеристик газовых сенсоров // Электроника НТБ. – 2011 – № 1(00107). – С. 36–44.
2. Мотро, Р. Системы Тенсегрити: современное состояние / Р. Мотро // Int. J. Space. – 1992. – № 7 (2).

УДК 681.2

К ИСТОРИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В ОБЛАСТИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ В БНТУ

Люцко К.С., Сервачинский И.Ю., Сернов С.П., Щербаклова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Статья посвящена открытию на приборостроительном факультете подготовки кадров в области микро- и наносистемной техники и истории кафедры «Микро и нанотехника», выпускающей для данной сферы высококвалифицированных специалистов.

Ключевые слова: микросистемная техника, приборостроение, кафедра, филиал, инженер.

ON THE HISTORY OF ENGINEERING PERSONNEL TRAINING IN THE FIELD OF MICROSYSTEM TECHNOLOGY AT BNTU

Liutsko K., Servachynski I., Sernov S., Shcherbakova E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article is devoted to the opening at the instrumentation engineering faculty of personnel training in the field of micro- and nanosystem technology and history of the Department of "Micro and Nanotechnology", which produces highly qualified specialists for this field.

Key words: microsystem technology, instrumentation, department, branch, engineer.

Адрес для переписки: Люцко К.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

Общемировые тенденции развития техники и технологий, их конкурентоспособность на мировых рынках все в большей степени связаны с уровнем оснащённости контрольно-измерительными системами, датчиками, сенсорами и другими приборами, позволяющими в непрерывном режиме контролировать скорость, температуру, потоки веществ и энергии, геопозицию, пространственную ориентацию и другие важные параметры. Комплекс возникающих при этом инженерных задач решается с помощью микроэлектромеханических систем (МЭМС), сенсоров и датчиков различного функционального назначения. Продукция отечественного машиностроения – тракторы, комбайны, наземная и воздушная техника гражданского и военного назначения – остро нуждаются в вышеназванной микросистемной технике.

Задачи импортозамещения вызвали необходимость организации производств компонентов отечественной элементной базы, что в свою очередь потребовало начала подготовки в стране соответствующих инженерных кадров. В этой связи ректор БНТУ академик Б.М. Хрусталёв во время научно-практической конференции, проходившей в июле 2006 года в Гродно и посвященной 70-летию академика А.И. Свириденка, прослушав доклад члена-корреспондента Ю.М. Плескачевского о передовых разработках в области наноматериалов и нанотехнологий, предложил Юрию Михайловичу создать и возглавить в БНТУ на приборостроительном факультете соответствующую выпускающую кафедру. Весь последующий год ушел на подготовку аргументированного обоснования необходимости создания подобной

кафедры (готовили обоснование Ю.М. Плескачевский и академик С.А. Чижик), разработку проектов двух образовательных стандартов (по специальностям 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники» и 1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника», разработчики – профессор Ю.М. Плескачевский и доцент С.П. Сернов), подбор кадрового «ядра» новой кафедры (Ю.М. Плескачевский, С.А. Чижик, д.т.н. А.Л. Зайцев и сотрудники перешедшие с кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» профессор В.А. Сычик, доценты Е.Ф. Карпович, А.В. Ковалевская, Т.В. Колонтаева, С.П. Сернов). Были проведены перепланировка и ремонт учебных, лабораторных и общекафедральных помещений (благодаря декану приборостроительного факультета профессору В.И. Шамкаловичу и сменившему его на этом посту декана профессору О.К. Гусеву). Все потенциальные сотрудники кафедры были привлечены к написанию курсов лекций и рабочих программ по вновь вводимым дисциплинам (общее редактирование, взаимодополняющую увязку, название более 20 новых дисциплин, соответствие их содержания мировому уровню и согласование в вышестоящих инстанциях осуществлял Ю.М. Плескачевский).

Ректор Б.М.Хрусталев согласился с аргументами Ю.М. Плескачевского, что в инженерном ВУЗе, коим является БНТУ, конечной целью работы выпускающей кафедры должен быть выпуск технических специалистов, инженеров, способных не только разрабатывать наноматериалы и владеть нанотехнологиями, но и создавать конечный рукотворный технически ценный продукт.

Так утвердилось нынешнее название кафедры – «Микро- и нанотехника».

Приказ о создании новой кафедры был подписан 25 июня 2007 года, ее полнокровная работа началась с 1 сентября.

В основу формирования кадрового комплектования кафедры был положен принцип сочетания опытных педагогических работников с профессионалами из производства, академической и отраслевой науки. В результате такого подхода к работе на кафедре в начальные и последующие годы были привлечены научные сотрудники институтов НАН Беларуси (профессора В.В. Хатько и А.Л. Зайцев, академик С.А. Чижик, доктор технических наук В.А. Зеленин, доценты Е.Н. Щербаклова, А.С. Филатов и Т.В. Кузнецова, младший научный сотрудник В.А. Лапицкая), Минского НИИ радиоматериалов Госкомвоенпрома Республики Беларусь (кандидаты технических наук А.П. Гринчук и И.А. Таратын), ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (кандидат технических наук С.А. Ефименко), ОАО «Планар» (кандидат технических наук И.Б. Петухов).

Важным этапом в развитии практикоориентированного инженерного образования на кафедре явилось создание ее филиалов в Минском НИИ радиоматериалов Госкомвоенпрома Республики Беларусь, Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, ОАО «Интеграл» и ОАО «Планар-СО» Минпрома Республики Беларусь. Диктуемые жизнью требования по более тесной интеграции образования с наукой и производством привели к созданию по инициативе руководства ОАО «Планар» (С.М. Аваков, С.Б. Школык) и определяющей поддержке ректора, доктора технических наук С.В. Харитончика и декана факультета, кандидата технических наук А.И. Свистуна при кафедре в 2019 году Отраслевой научно-исследовательской лаборатории инновационных приборов МЭМС-технологий, руководить которой стала выпускница аспирантуры при кафедре кандидат технических наук О.Г. Реутская.

За истекшие 15 лет кафедрой подготовлено более 300 инженеров по специальностям «Микро- и наносистемная техника» и «Технология материалов и компонентов электронной техники», которые сегодня успешно работают на ведущих предприятиях страны: ОАО «ИНТЕГРАЛ», ЗАО «АТ-ЛАНТ», Минский НИИ радиоматериалов, ОАО «КБТЭМ-ОМО», ООО «Экран», ОАО «Планар-СО», ОАО «Завод ЭЛЕКТРОНМАШ», Белорусский Государственный институт метрологии, ОАО «Пеленг» и в таких институтах НАН Беларуси как: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова, Физико-технический институт, ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Объединенный институт машиностроения, Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого и др.

О высоком уровне подготовки специалистов на кафедре свидетельствует то, что за 15 лет выпускниками и сотрудниками было защищено 7 кандидатских и 35 магистерских диссертаций. Некоторые из них продолжают работу на кафедре (кандидат технических наук Д.В. Балохонов, кандидат технических наук О.Г. Реутская, магистры К.С. Люцко и М.А. Шабура). Студенты и магистранты кафедры неоднократно становились именными стипендиатами, удостоивались президентской стипендии за особые заслуги в учебе, науке и общественной деятельности.

Результаты научных исследований и разработок Ю.М. Плескачевского в области материаловедения функциональных композитов в 2018 году удостоены престижной премии Российской академии наук и Национальной академии наук Беларуси.

За истекшие годы сотрудниками кафедры, аспирантами, магистрантами и студентами опубликовано более 700 статей в научных отечественных и зарубежных журналах и сборниках, получено около 100 патентов Республики Беларусь, ЕАЭС и Российской Федерации.

Кафедра неоднократно становилась призером смотра-конкурса БНТУ среди выпускающих кафедр, занимая почетные места: 1 место – в 2008–2009 учебном году, 2 место – в 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012, 2012–2013, 2013–2014 учебных годах, 3 место – в 2014–2015 учебном году.

Руководство кафедры совместно с деканом профессором О.К. Гусевым выступили инициаторами и организаторами проведения на базе факультета первых, впоследствии ставших ежегодными, международных научно-технических конференций «Приборостроение» и «Новые направления развития приборостроения», а также издания на базе БНТУ международного научно-технического журнала «Приборы и методы измерений». Такое название журнала было предложено Ю.М. Плескачевским.

Все это в совокупности способствовало впервые определению отрасли «Приборостроение» в качестве приоритетной в Программах социально-экономического развития Республики Беларусь на текущую и предыдущую пятилетки.

В феврале 2021 года член-корреспондент Ю.М. Плескачевский вышел на пенсию и кафедру микро- и нанотехника возглавил доктор технических наук, профессор, академик Сергей Антонович Чижик. Успешное развитие кафедры микро- и нанотехники продолжается.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за предоставленные исторические факты доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси, заслуженному деятелю науки Республики Беларусь Юрию Михайловичу Плескачевскому.

УДК 577.2.08

БИОСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСУДИСТОЙ ГЕМОДИНАМИКИ Люцко К.С.¹, Филатов С.А.²

¹Белорусский национальный технический университет²Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описывается разработка биосенсорной микропроцессорной диагностической системы с открытой архитектурой для мониторинга сосудистой гемодинамики для измерения локальной концентрации кислорода и глюкозы, температуры и уровня кровотока методами оптической спектроскопии и фотометрии в видимой и ближней ИК областях.

Ключевые слова: биосенсор, мониторинг, гемодинамика.

BIOSENSOR SYSTEM FOR VASCULAR HEMODYNAMICS MONITORING Liutsko K.¹, Filatov S.²

¹Belarusian National Technical University²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The development of biosensor microprocessor-based diagnostic system with an open architecture for monitoring vascular hemodynamics for measuring local oxygen and glucose concentrations, temperature, and blood flow levels by optical spectroscopy and photometry in the visible and near-IR regions is described.

Key words: biosensor, monitoring, hemodynamic.

Адрес для переписки: Люцко К.С. пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

Оптические биосенсоры, основанные на изменении поглощения или флуоресценции индикаторных веществ и соединений, таких как оксигемоглобин или глюкоза, получают растущее применение в диагностике заболеваний и оценке микроциркуляции в тканях и сосудах человека, так как мониторинг состояния микроциркуляции крови является одной из важных проблем современной медицинской диагностики [1]. Это связано с тем, что многие заболевания, такие как заболевания сердечно-сосудистой системы, атеросклероз, сахарный диабет, хроническая венозная недостаточность и другие, вызывают функциональные и морфологические изменения в микроциркуляторном русле. Однако современные клинические методы мониторинга кровотока в сосудах, включая ангиографию, магнитно-резонансную томографию, ультразвуковую доплерографию и катетеризацию, дают узкие и неполные представления о состоянии сосудов из-за ограниченного периода наблюдений. Кроме того существующие системы мониторинга являются, как правило стационарными системами используемыми в системе здравоохранения. Недавняя эпидемия коронавируса, приведшая к большой нагрузке на системы здравоохранения всех стран, продемонстрировала потенциал систем неинвазивных мониторинга, которые могут использоваться пациентами самостоятельно, вне клиники.

Целью настоящей работы является разработка биосенсорной микропроцессорной диагностической системы с открытой архитектурой для мониторинга сосудистой гемодинамики основанной на одновременной оценке локальной концентрации

кислорода и глюкозы в тканях, температуры и уровня кровотока методами оптической спектроскопии и фотометрии в видимой и ближней ИК областях.

В разрабатываемой системе, в качестве биосенсоров для оценки насыщенности тканей кислородом использовались интегрированные сенсоры MAX30101 и MAX30102 [2], рис. 1.

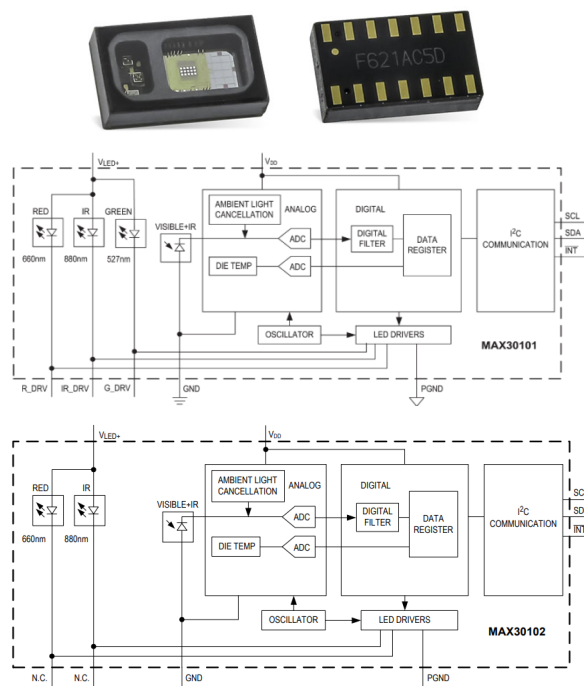


Рисунок 1 – Общий вид датчика MAX30101 и функциональные диаграммы сенсоров MAX30101 и MAX30102

Базовая оптическая схема датчиков включает в себя два источника излучения – 660 нм и 940 нм (в МАХ30101 используется и светодиод 527 нм). Фотодетектор регистрирует уровень излучения после поглощения части оптического потока тканями и компонентами крови, рис. 2, а микропроцессор анализирует полученные результаты и определяет насыщенность крови кислородом и частоту сердечных сокращений.

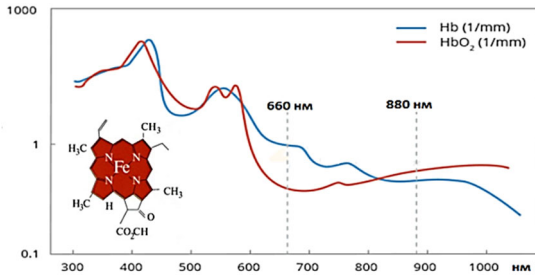


Рисунок 2 – Зависимость поглощения оксигемоглобина от длины волны

Содержание кислорода в крови определяется, как отношение насыщенного кислородом гемоглобина (HbO_2) к общему содержанию гемоглобина ($\text{HbO}_2 + \text{RHb}$) и передается в управляющий микроконтроллер, одновременно с рассчитанной частотой сердечных сокращений и температурой тканей с разрешением $0,06^\circ\text{C}$.

Еще одним важным параметром при оценке гемодинамики может стать определение уровня глюкозы и концентрации гликированного гемоглобина HgBA1C [3?4]. В отличие от биосенсорных тест полосок, требующих травмирующих процедур, в разрабатываемой системе осуществляется оценка уровня глюкозы на основе бесконтактного анализа спектра пропускания исследуемых тканей человека. В ИК спектре пик поглощения глюкозы 940 нм достаточно хорошо выделяется, рис. 3, и для расчета концентрации глюкозы можно использовать методики многоволновой спектроскопии детектирующих излучение 530 нм, 660 нм, 850 нм и 940 нм.



Рисунок 3 – Типичный спектр поглощения глюкозы и меланина кожи

Проблема точного определения концентрации обусловлена тем, что количество молекул глюкозы в тканях человека почти на 4 порядка меньше количества молекул воды, и на 2 порядка

меньше количества молекул гемоглобина, что требует проведения измерений на референсных длинах волн. Тем не менее в наших предварительных экспериментах возможность создания оптического биосенсора для измерения концентрации глюкозы была подтверждена. В настоящее время аналогичная техника используется в Combo Glucometer компании CNOGA Medical.

Регистрация и обработка сигналов оптических датчиков, регистрируемых в аналоговой и цифровой форме, осуществлялась с помощью микроконтроллера Arduino Uno.

Программное обеспечение с открытым исходным кодом, используемое для управления этим устройством, разработано на языке Python. Для создания системы с минимальным потреблением энергии и максимальной длительностью автономной работы была разработана специализированная плата регистрации данных на основе микроконтроллера PIC 18F4550 и среды программирования PINGUINO.

При использовании системы Arduino подключается к стандартному USB-порту ноутбука или настольного компьютера для подачи питания и регистрации (отображения) данных. В такой конфигурации для оценки локального кровотока дополнительно используется методика капиллярной веб-микроскопии.

Особенностью создаваемой системы мониторинга является открытая архитектура и использование как доступных коммерческих биосенсоров, так и биосенсоров оригинальной конструкции. Мультиплексирование оптических биосенсоров позволяет говорить о перспективах применения систем непрерывного мониторинга гемодинамики, как для клинических приложений, так и для развития технологий биопринтинга и применения в смежных областях.

Литература

1. Дунаев, А. В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики / А. В. Дунаев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23. – № 4. – С. 77–91.
2. Comparison of Bi-Wavelength and Tri-Wavelength Photoplethysmography Sensors Placed on the Forehead / S. K. Longmore [et al.] // 2019 Int. Conf. on Electrical Engineering Research & Practice. – 2019. – P. 1–4.
3. A Review of Non-Invasive Optical Systems for Continuous Blood Glucose Monitoring / B. Alsunaidi [et al.] // Sensors. – 2021. – № 21. – P. 6820.
4. Kumar, D. A. Review on Non-Invasive Blood Glucose Measurement Techniques. In Proceedings of the 2020 / D. A. Kumar, T. Jayanthi // IEEE International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2020, Chennai, India, 28–30 July. – 2020. – P. 981–986.
5. The Evolution of Non-invasive Blood Glucose Monitoring System for Personal Application / N. A. Abd Salam [et al.] // J. Telecommun. Electron. Comput. Eng. – 2016. – Vol. 8. – P. 59–65.

УДК 573.6

СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ МИКРОБИОМАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ШЕЛКА ПАУКА

Люцко К.С.¹, Чижик С.А.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье проведен анализ научной литературы по биоматериалам, часто превосходящим по своим свойствам искусственные материалы. Шелк паука – почти полностью состоящий из крупных белков волокнистый биоматериал, обладающий прочностью на растяжение, эластичностью. Является противомикробным, гипоаллергенным и полностью биоразлагаемым материалом. В данной работе рассматривается взаимосвязь структуры и функций натурального высокоэффективного волокна.

Ключевые слова: биоматериал, биомиметика, фолдинг белков, шелк паука.

STRUCTURE AND FUNCTIONS OF MICROBIOMATERIAL ON THE EXAMPLE OF SPIDER SILK

Liutsko K.S.¹, Chizhik S.A.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article analyzes the scientific literature on biomaterials, often superior in their properties to artificial materials. Spider silk is a fibrous biomaterial almost entirely composed of large proteins, which has tensile strength and elasticity. It is antimicrobial, hypoallergenic and fully biodegradable. In this paper, the relationship between the structure and functions of natural high-performance fiber is considered.

Key words: biomaterial, biomimetics, protein folding, spider silk.

Адрес для переписки: Люцко К.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by

На протяжении тысячелетий паучий шелк привлекает внимание людей из-за своей пластичности и прочности, а также потому, что не вызывает воспалительных процессов и аллергических реакций.

В природе пауки используют свой шелк для нескольких целей: обертывание добычи, защита своего потомства, паутина, обеспечение безопасного бегства от хищников.

В отличие от насекомых, например, таких как шелкопряды, в основном использующих свой шелк для изготовления коконов, разнообразие его использования у пауков гораздо больше.

Для ловли добычи примерно 50 % различных видов пауков используют паутину, имеющую более 130 различных форм. Паутины-круги, состоящие из нескольких типов шелка – одна из наиболее изученных паутин.

Рассмотрим типы шелка на примере паука *Araeneus diademantus*. Каркас и радиусы полотна выполнены из достаточно жесткого и прочного шелка. Лежащие в основе белки вырабатываются в больших ампульных железах и называются МА-шелком. Он используется пауками в качестве веревочной нити для защиты от хищников. Только из одного типа белка состоит спираль захвата паутины круга, который вырабатывается во флаговой железе пауков. Флаговый шелк хорошо рассеивает энергию удара добычи и обладает высокой эластичностью (до 300 %). Имея диаметр 1–5 мкм, может выдержать удар насекомого с массой тела 120 мг и максимальной скоростью полета около 3,1 м/с и кинетической энергией около 0,55 мДж.

Пауки-кругопряды используют еще два вида шелка для создания паутины. В малой ампулярной железе вырабатываются белки для шелковых волокон, использующихся при построении вспомогательной спирали (стабилизирует тело полотна и служит шаблоном для захватной спирали). Прикрепление каркаса паутины к субстрату и соединительные соединения каркаса паутины выполнены из сложного шелкового цемента, состоящего из белков, вырабатываемых грушевидной железой.

Флаговый шелк не липкий, а для удержания добычи в паутине вокруг нитей захвата наносится дополнительный «клей». Специальное шелковое волокно – крибеллатный шелк, эволюционно является первым «клеем». Он обладает адгезивными свойствами, основанными в основном на большой сумме сил Ван-дер-Ваальса, обеспечиваемых огромной площадью поверхности, аналогично принципу адгезии лап геккона. У другого вида пауков выработалась иная стратегия склеивания. Водный слой, содержащий соли, жирные кислоты, органические молекулы и мелкие гликопротеины, вырабатывающиеся в агрегатной железе пауков, покрывает специфическую шелковую нить. В нем содержатся небольшие пептиды, действующие как хелаторы ионов металлов, способствующих ингибированию роста микробов на шелковых нитях. Мокрый «клей» по времени и энергии является более экономичным в сравнении с системой кибеллата и используется большинством современных пауков.

Сборка паучьего шелка в основном начинается с внутренне развернутыми белками в очень высоких концентрациях, а не с глобулярно свернутых белковых мономеров. Для достижения и поддержания высоких концентраций белков шелка (до 50 % вес/объем) в железе необходимы следующие механизмы: гликозилирование внешней поверхности свернутых белков шелка, фазовое разделение, индуцированное фосфолипидным поверхностно-активным веществом и лиотропную жидкую кристалличность. Белки шелка быстро собираются при прохождении через прядильный проток, в результате чего структура шелка становится нерастворимой в воде. Точный контроль условий окружающей среды и бистабильный фолдинг задействованного белка обеспечивают строго контролируемое поведение при сборке.

Успешная сборка шелка основана на удлинении, выравнивании и упаковке отдельных белков шелка в ламинарном потоке внутри прядильного канала. Гидрофобные остатки выравниваются при мультимеризации, инициируемой концевыми доменами и, кроме того, силами сдвига во вращающемся канале. Таким образом эти полиаланиновые сегменты обнажают все более гидрофобную поверхность, которая запускает образование В-складчатых структур с многочисленными внутрицепочечными и межцепочечными водородными связями.

Были предложены две теории механизма сборки шелковых волокон. Один основан на кристаллическом выравнивании нижележащих белков в ламинарном потоке внутри вращающегося канала. Момеры или мультимеры с дисульфидной связью проходят по прядильному каналу в очень плохих концентрациях. Выравнивание в одном направлении вместе с высокой концентрацией приводит к жидкокристаллическому поведению прядильного раствора, являющегося основой для формирования межмолекулярных взаимодействий типа сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей между соседними молекулами. При дальнейшей потере растворителя конформационное преобразование завершается, и шелковое волокно может быть вытянуто из прядильной трубы. Во второй модели белки шелка сначала собираются в небольшие мицеллы диаметром около 100–200 нм из-за их амфифильных свойств внутри прядильного раствора. Множество этих мицелл образуют глобулы диаметром в микрометровом диапазоне. Силы сдвига, возникающие при прохождении через вращающийся канал, заставляют эти глобулы принимать удлиненную форму, что в конечном итоге приводит к образованию волокон.

Основным механическим свойством паучьего шелка является его максимальная упругость.

Хорошо сбалансированное сочетание прочности и эластичности часто превосходит другие натуральные волокна, а также синтетические нити. МА-шелк демонстрирует память формы при кручении, предотвращающую скручивание и не требует дополнительных стимулов для полного восстановления после поворота из исходного положения. Из-за высокого коэффициента демпфирования почти не колеблется после скручивания. Паучий шелк показывает высокую скорость сокращения. Впитывание воды приводит к усадке и стягиванию нити. Этот процесс важен для обеспечения жесткости паутины в течение ее жизни и, как полагают, вызван организацией и расположением отдельных белков шелка.

Шелк паука часто сравнивают с шелком насекомых, предпочтительно взятым из *Bombix mori*. Имеющийся в продаже шелк тутового шелкопряда получают из коконов куколок гусениц. Этот процесс лишь незначительно оптимизировался на протяжении веков и является очень экономичным. Шелк паука можно получить, вручную вытянув шелковую нить из прядильной бородавки обездвиженных пауков. Однако этот процесс подходит только для МА-шелка, он требует много времени и очень дорог.

Различия между шелками насекомых и пауков очевидны на всех уровнях, от вовлечения молекул до структурного расположения белков и механических свойств нити. На молекулярном уровне шелк насекомых содержит большое количество белков серицина, которых нет в шелке пауков. Белки, ответственные за фибриллярную структуру, в отличие от спидроинов шелка пауков, состоят из аналогов легкой и тяжелой цепи. Механически шелк тутового шелкопряда намного слабее и менее растяжим по сравнению, например, с МА-шелком пауков. В зависимости от условий прядения шелк тутового шелкопряда бывает либо прочным, либо эластичным, тогда как шелк паука сочетает в себе оба свойства.

Хотя механические свойства обоих типов шелка в решающей степени зависят от условий прядения, реальную разницу в первую очередь имеют задействованные белки. Поэтому уже давно разрабатываются методы рекомбинантного производства и инженерии натуральных белков шелка пауков.

Пауки в основном используют шелк в качестве линейной нити. Однако белки шелка пауков обладают гораздо большим потенциалом, потому что они могут собираться во всех трех измерениях, создавая различные макроскопические структуры. В настоящее время предпринимается несколько попыток использовать протеины шелка в качестве биополимера для новых материалов.

УДК 534-16:534-8:534.6.08:621.9.048.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЭМС-МИКРОФОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКА

Степаненко Д.А., Киндрук А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ эффективности использования МЭМС-микрофонов и контактных пьезоэлектрических датчиков для определения собственных частот колебаний кольцевых концентраторов ультразвука интегральным методом свободных колебаний. На основе результатов экспериментальных исследований установлено, что недостатком МЭМС-микрофонов является сравнительно низкая чувствительность к собственным частотам звукового диапазона. Однако в случаях, когда эти частоты не представляют интереса, использование МЭМС-микрофонов дает по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками такие преимущества как бесконтактный характер измерений, возможность многократного использования датчика и воспроизводимость результатов измерений.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, частотная характеристика, кольцевой концентратор, МЭМС-микрофон

APPLICATION OF MEMS-MICROPHONES FOR THE STUDY OF FREQUENCY RESPONSES OF RING-SHAPED ULTRASONIC HORNS

Stepanenko D., Kindruk A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article presents comparative analysis of efficiency of MEMS-microphones and contact piezoelectric sensors in determination of natural vibration frequencies of ring-shaped ultrasonic horns by means of integral method of free vibrations. On the basis of experimental studies it was shown that the main drawback of MEMS-microphones is their relatively low sensitivity to the natural frequencies of the audible range. However in the cases, when these frequencies are not of interest, MEMS-microphones provide with regard to piezoelectric sensors such advantages as non-contact nature of measurements, possibility of repeated use of the sensor and reproducibility of measurements.

Key words: ultrasonic vibrations, frequency response, ring-shaped horn, MEMS-microphone

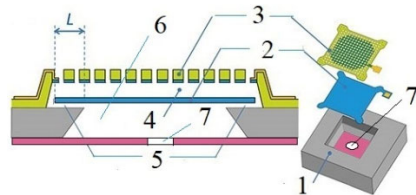
*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

Исследование частотных характеристик концентраторов ультразвуковых колебаний является актуальной практической задачей в связи с широким применением низкочастотного ультразвука в технике и медицине. Для эффективной работы колебательной системы одна из собственных частот колебаний концентратора должна быть согласована с рабочей частотой ультразвукового электроакустического преобразователя, используемого для генерации колебаний, что требует точного экспериментального определения этих частот. В неразрушающем контроле для определения собственных частот колебаний используют интегральный метод свободных колебаний, суть которого состоит в регистрации отклика контролируемого объекта на кратковременное ударное воздействие. Так как ударное воздействие создает возбуждение объекта в широкой полосе частот, ширина которой обратно пропорциональна длительности воздействия, то в контролируемом объекте одновременно возникают затухающие колебания на нескольких собственных частотах, зарегистрировав которые с помощью датчика, можно по их спектру определить набор собственных частот.

В качестве объекта измерений использовался кольцевой концентратор из среднеуглеродистой

стали со следующими геометрическими параметрами: наружный диаметр 45,5 мм; внутренний диаметр 40 мм; эксцентриситет 0,75 мм; толщина в осевом направлении 3,5 мм. Ударное воздействие производилось с помощью шарика диаметром 3,2 мм из закаленной стали ШХ15, свободно падающего по направляющей из стеклянного капилляра. Для моделирования свободных граничных условий концентратор устанавливался на подвесе в виде тонкой горизонтальной нити. Регистрация отклика концентратора производилась двумя способами: с помощью пленочного пьезоэлектрического преобразователя и с помощью микроэлектромеханического микрофона (МЭМС-микрофона). Для измерения деформаций концентратора был использован контактный пьезоэлектрический датчик модели FDT1-052K фирмы TE Connectivity (США) из поливинилиденфторида (ПВДФ). Общая толщина датчика составляет 85 мкм, что позволяет обеспечить его конформное закрепление на криволинейной поверхности концентратора. Крепление датчика выполнялось с помощью цианакрилатного клея. Регистрация звукового поля, создаваемого концентратором при ударном воздействии, производилась с помощью бесконтактного МЭМС-микрофона модели

SPU0410LR5H-QB фирмы Knowles Acoustics (США). Конструктивно микрофон изготовлен в виде SMD-элемента с размерами корпуса $3,76 \times 3 \times 1,13$ мм и имеет защиту от электромагнитных наводок. Чувствительный элемент микрофона представляет собой конденсатор, один из электродов которого выполнен в форме мембраны, деформирующейся под действием звукового давления, а второй – в форме перфорированной жесткой пластины (рис. 1).



1 – кремниевая подложка; 2 – мембрана;
3 – перфорированный электрод; 4 – воздушный зазор;
5 – вентиляционные каналы; 6 – передняя камера;
7 – акустический канал

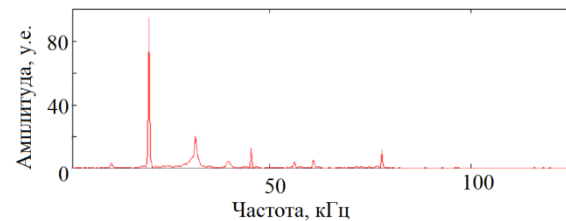
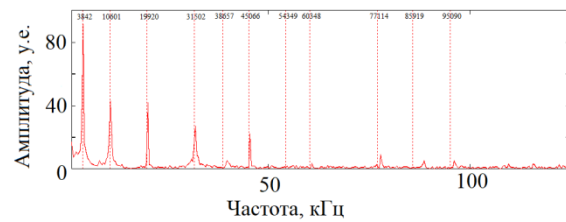
Рисунок 1 – Чувствительный элемент МЭМС-микрофона

Наличие микроперфораций в электроде позволяет минимизировать эффект демпфирования сжатой пленкой (squeezed-film damping), приводящий к возникновению собственных шумов и обусловленный движением тонкого слоя воздуха в зазоре между электродами при деформациях мембраны [1]. По краю мембраны выполняются вентиляционные каналы, служащие для выравнивания статического давления между окружающей средой и воздушным зазором.

Запись сигналов датчика и МЭМС-микрофона производилась с помощью цифрового запоминающего осциллографа, а расчет их спектров – с помощью программы Mathcad. Результаты расчета спектров представлены на рис. 2.

Числовые значения, соответствующие вертикальным линиям, представляют собой значения собственных частот, определенные методом конечных элементов с помощью программы Comsol Multiphysics. Как следует из сравнения приведенных спектров, МЭМС-микрофон обладает сравнительно низкой чувствительностью к собственным частотам звукового диапазона. Это объясняется тем, что кривая чувствительности микрофона имеет несколько максимумов в ультразвуковом диапазоне, в частности, на частотах около 20 кГц и 46 кГц. Причиной возникновения максимума чувствительности на частоте около 20 кГц является акустический резонанс в чувствительном

элементе микрофона: акустический канал в совокупности с передней камерой сенсорного элемента образуют резонатор Гельмгольца с собственной частотой, заключенной в ультразвуковом диапазоне.



а – для пьезоэлектрического датчика;
б – для МЭМС-микрофона

Рисунок 2 – Спектры сигналов

Низкая чувствительность в звуковом диапазоне не является критической проблемой для рассматриваемых в данной статье измерений, так как с точки зрения практического применения представляют интерес собственные частоты концентратора, лежащие в ультразвуковом диапазоне. Преимуществами использования МЭМС-микрофона по сравнению с пьезоэлектрическим датчиком являются бесконтактный характер измерений и более низкая стоимость. В отличие от МЭМС-микрофонов пьезоэлектрические датчики не дают возможности их многократного использования, так как монтируются на контролируемом объекте с помощью цианакрилатного клея. Пьезоэлектрические датчики более подвержены влиянию электромагнитных наводок, а на воспроизводимость измерений с их помощью влияет такой трудно контролируемый фактор, как толщина клеевого слоя между датчиком и объектом измерения.

Таким образом, в случаях, когда собственные частоты звукового диапазона не представляют интереса, использование МЭМС-микрофонов дает ряд преимуществ по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками.

Литература

1. Tadashi, I. Study and development of low-noise MEMS acoustic sensors / I. Tadashi [et al.] // OMRON Technics. – 2019. – Vol. 50, article 012. – 7 p.

УДК 621.317

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАЗОВЫЙ СЕНСОР С НАГРЕВАТЕЛЕМ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Таратын И.А.¹, Горох Г.Г.², Лозовенко А.А.², Кевра Е.В.¹¹Белорусский национальный технический университет²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследований полупроводникового газового сенсора с нагревателем кремниевым из монокристаллического кремния. Приведены вольтамперные и температурные зависимости кремнивого нагревателя. Максимальное значение химического отклика на воздушную смесь с содержанием 0,49 об% CH₄ получено при мощности нагревателя 108,12–111,47 мВт.

Ключевые слова: монокристаллический нагреватель, полупроводниковый газовый сенсор, вольтамперные характеристики

SEMICONDUCTOR GAS SENSOR WITH MONOCRYSTAL SILICON HEATER

Taratyn I.¹, Gorokh G.², Lazavenka A.², Kevra E.¹¹Belarusian National Technical University²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of studies of a semiconductor gas sensor with a silicon heater made of single-crystal silicon are presented. The current-voltage and temperature dependences of the silicon heater are given. The maximum value of the chemical response to 0.49 vol% CH₄ was obtained at a heater power of 108.12–111.47 mW.

Key words: monocrystalline heater, semiconductor gas sensor, current-voltage characteristics.

Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П. Бровки, 6, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by

Полупроводниковые металлооксидные пленки, электропроводность которых сильно меняется в зависимости от состава и состояния поверхности, нашли широкое применение в качестве материалов чувствительных слоев газовых сенсоров [1]. Наиболее энергозатратной частью химических сенсоров является их чувствительный элемент, так как для обеспечения работы сенсора требуется его нагрев до температур в пределах 250–500 °С в зависимости от типа детектируемого газа. Снижение энергопотребления обеспечивается в сенсоре путем уменьшения размеров области нагрева газочувствительного слоя и уменьшения потерь при рассеивании тепла. При всех оптимизированных параметрах, успешное функционирование современных сенсоров, возможно только при правильном и контролируемо управляемом температурном режиме, обеспечивающем температурные номиналы в заданном диапазоне. В первую очередь это связано с конструкцией нагревателя и материала из которого он сделан. Использование в полупроводниковом сенсоре нагревателя из монокристаллического кремния значительно влияет на выходные характеристики сенсора при детектировании газов, что связано с нелинейностью вольтамперной характеристики нагревательного элемента сенсора [2, 3].

В данной работе рассмотрены электрофизические характеристики полупроводникового сенсора в качестве нагревателя которого используется монокристаллический кремний.

В качестве нагревателя был использован кристалл кремния р-типа проводимости ориентации (100) с размерами 0?25×0?25×0?15мм. Контакты были сформированы из платиновой проволоки диаметром 20 мкм методом термокомпрессии. В качестве газочувствительного слоя использовалась керамика состава In₂O₃ с SnO₂(5 %) с формированием стабильной структуры при T = 700°С в течении двух часов. Измерение характеристик сенсора проводились в режиме постоянного тока. Вольтамперные характеристики сенсора измерялись на воздухе и в смеси искусственного воздуха CH₄(0,49 об%). Сенсорный отклик $\Delta U = U_{\text{газа}} + U_0$ определялся как разность между напряжением на сенсоре при взаимодействии с газом и напряжением сенсора на воздухе.

На рис. 1 представлена зависимость температуры сенсора от величины мощности, подаваемой на кремниевый резистор. Измерения температуры сенсора проводились с помощью пирометра IP-140.

Зависимость выходного напряжения от времени в течение 768 часов при токе I = 71 мА что соответствует температуре T = 350 °С представлена на рис 2.

Вольтамперная характеристика сенсора с газочувствительным слоем представлена на рис. 3. Линейный участок рассматриваемой зависимости соответствует токам нагрева до 50 мА, что соответствует температуре около 300 °С, в диапазоне токов от 50 до 60–65 мА наблюдается резкое увеличение зависимости напряжения от тока, что со-

ответствует переходу в область примесной проводимости. Последующий вид характеристики определяется зависимостью сопротивления кремниевого нагревателя р-типа проводимости с $\rho = 0.3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (концентрация $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и низкоомного газочувствительного слоя $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$, представляющего полупроводник n-типа проводимости, от температуры.

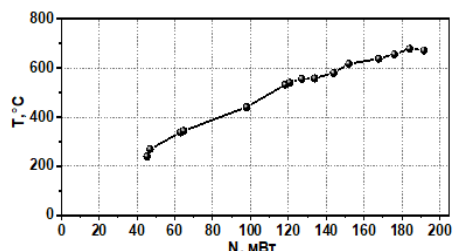


Рисунок 1 – Зависимость температуры сенсора от величины мощности, подаваемой на кремниевый резистор

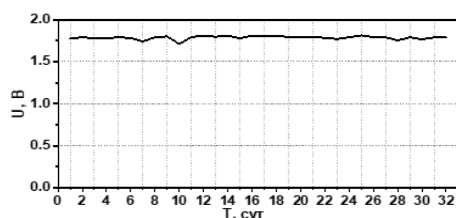


Рисунок 2 – Зависимость среднего значения напряжения на нагревателе от времени (1 ед. соответствует 24 часам)

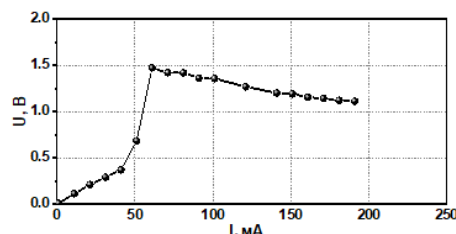


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика сенсора с газочувствительным слоем $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$

На рис. 4 представлена зависимость изменения выходного сигнала сенсора $\Delta U = U_{\text{газа}} + U_0$ от величины тока, подаваемого на Si-резистор для

$\text{CH}_4 = 0,49 \text{ об\%}$. Максимальное значение сигнала получено при токе $I = 68\text{--}71 \text{ mA}$ при напряжении $U = 1,59\text{--}1,57 \text{ В}$ что соответствует мощности $108,12\text{--}111,47 \text{ мВт}$.

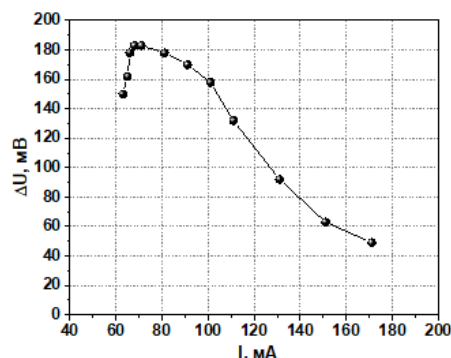


Рисунок 3 – Зависимость $\Delta U = U_{\text{газа}} - U_0$ при воздействии $\text{CH}_4 = 0,49 \text{ об\%}$ от величины тока нагрева

Представленные результаты показали, что применение монокристаллического резистора в качестве нагревателя тонкопленочного полупроводникового сенсора является весьма перспективным, так как такой конструктивный элемент является весьма простым в изготовлении и дешевым по сравнению с платиновым нагревателем, обеспечивает стабильные температурные характеристики в течение длительного непрерывного времени работы, а также хорошую чувствительность к малым концентрациям горючих газов при относительно невысоких температурах, и следовательно, при небольшой потребляемой мощности.

Литература

1. Dey, A.. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review / A. Dey // Materials Science & Engineering B. – 2018. – Vol. 229. – P. 206–217.
2. Таратын, И. А. / Каталитический газовый сенсор с нагревателем из монокристаллического кремния / И. А. Таратын, В. В. Хатько // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – С. 9–17.
3. Таратын, И. А. Особенности сенсорного отклика термокаталитического сенсора с нагревателем из монокристаллического кремния / И. А. Таратын, В. В. Хатько // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – Вып. 12. – С. 119–122.

УДК 621.317.39.084.2

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ НАГРЕВАТЕЛЯ НА ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАТАЛИТИЧЕСКИХ СЕНСОРАХ ПРИ МИНИМАЛЬНОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИИ Таратын И.А.¹, Горох Г.Г.², Лозовенко А.А.², Реутская О.Г.¹, Федосенко В.С.², Иджи М.М.²

¹Белорусский национальный технический университет²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследований теплообменных процессов в каталитических сенсорах с разными вариантами тонкопленочных нагревателей, обеспечивающими оптимальные температурные параметры при минимальном энергопотреблении.

Ключевые слова: каталитический сенсор, тонкопленочный нагреватель, вольтамперные характеристики.

INFLUENCE OF HEATER TOPOLOGY ON HEAT EXCHANGE PROCESSES IN CATALYTIC SENSORS WITH MINIMUM ENERGY CONSUMPTION

Taratyn I.¹, Gorokh G.², Lazavenka A.², Reutskaya O.¹, Fedosenko V.², Iji M.²¹Belarusian National Technical University²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of studies of heat exchange processes in catalytic sensors with different versions of thin-film heaters that provide optimal temperature parameters with minimal power consumption are presented.

Key words: catalytic sensor, thin-film heater, current-voltage characteristics.

Адрес для переписки: Горох Г.Г., ул. П. Бровки, 6, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: gorokh@bsuir.by

Одним из наиболее используемых типов сенсоров при контроле токсичных и взрывоопасных газов является термокаталитический сенсор [1]. Конструкция такого сенсора представляет собой нагреватель с нанесенным на него газочувствительным слоем с катализатором из благородных металлов, активирующим экзотермическое окисление горючего газа [2]. Обладая очевидными достоинствами, такими как, возможность детектирования широкого перечня токсичных и взрывоопасных газов, простота конструкции, позволяющая обходиться без эталонных газов, и низкая стоимость изготовления, термокаталитические сенсоры характеризуются большим энергопотреблением, ограниченным сроком службы и низкой надежностью [3]. Поэтому весьма актуальной является задача по повышению стабильности и улучшению рабочих характеристик термокаталитических сенсоров. Улучшение этих параметров возможно за счет совершенствования технологии изготовления чувствительного элемента [4] и оптимизации процессов теплообмена, происходящих в области нагревателя. Обеспечение же эффективного нагрева и управление процессами теплообмена возможно путем оптимизации конструкции сенсора и нагревателя.

В настоящей работе мы анализируем варианты конструкции каталитических сенсоров, имеющие три разные топологии нагревателя, в которых обеспечиваются оптимальные теплообменные процессы при минимальном энергопотреблении, в частности, линейная температурная зависимость от тока нагрева и величина диапазона изменения токов при измерениях.

Конструкция сенсора представляла собой Si подложку площадью 1,35×1,35 мм и толщиной 0,38 мм, в центре которой сформирована диэлектрическая мембрана размером 500×500×1,2 мкм, состоящая из 0,3 мкм слоя Si_xN_y и 0,9 мкм слоя АОА. На планарной стороне мембраны сформирован Pt нагреватель и информационные электроды к чувствительному слою. Толщина слоя платины составляла 300 нм. Нагревательные элементы были выполнены в форме меандров, но имели разную топологию и длину резисторов.

Первый вариант нагревателя представлял меандр шириной 100 мкм и длиной 460 мкм, состоящий из шести последовательных петель, с шириной проводника 30 мкм и зазором между ними 5 мкм. Внешний вид топологии нагревателя и его структура приведены на рис. 1.

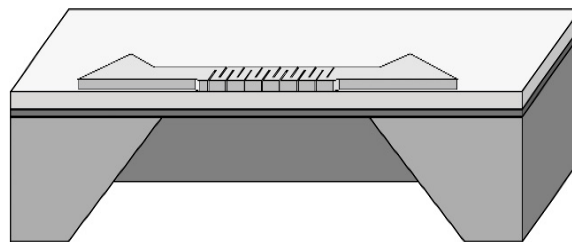


Рисунок 1 – Первый вариант топологии нагревателя сенсора на двухслойной мембране

Второй вариант нагревателя состоял из двух параллельно размещенных меандров аналогичных по размерам первому варианту. Этот вариант нагревателя предусматривал параллельное и последовательное подключение (рис. 2, а). Третий

вариант нагревателя представлял собой трехпетельный меандр, укороченный в два раза по сравнению с первым вариантом (рис. 2, б). Оценку степени нагрева сенсора проводили путем измерения вольт-амперных характеристик при пропуске через нагреватели тока, возрастающего с шагом 10 мА, при этом визуально регистрировали степень разогрева рабочей области от темно-красного до ярко-красного свечения и фиксировали величины токов, при которых возникало свечение. Была проведена аппроксимация полученных зависимостей и оценка линейности температурных характеристик.

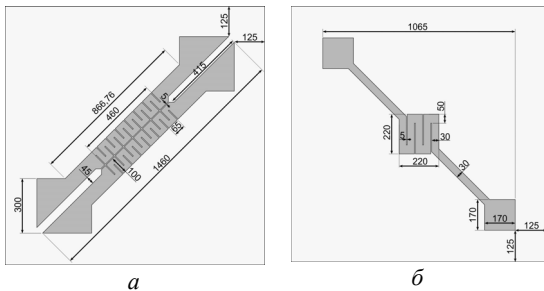
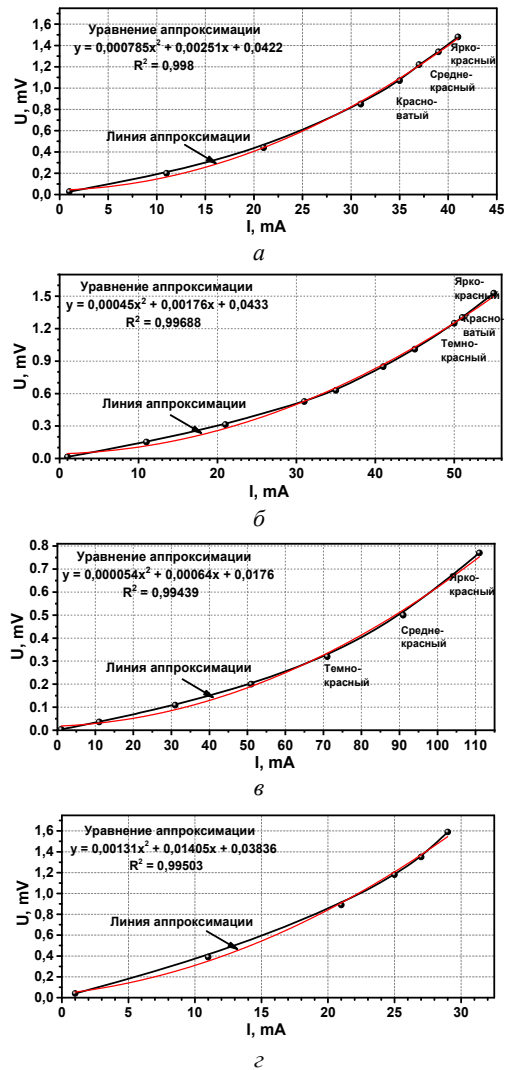


Рисунок 2 – Второй вариант (а) и третий (б) варианты топологии нагревателя сенсора на двухслойной мембране $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$

На рисунке 3,а приведена ВАХ нагревателя с одним протяженным меандром, которая имеет нелинейный вид и описывается уравнением, представленным на зависимости. Темно-красное свечение появлялось при токе 33 мА и переходило в ярко-красное при 45 мА, что соответствовало рассеиваемой мощности 35 мВт. На рисунке 3,б приведена ВАХ составного нагревателя, в котором оба меандра были соединены последовательно. Свечение рабочей области сенсора, ограниченной площадью $0,04 \text{ мм}^2$, изменяется от темно-красного при токе 48 мА до ярко-красного при токе 71 мА. При параллельном включении двойного меандра ВАХ имеет наиболее близкую к линейной, что является важным требованием к рабочей характеристике каталитического сенсора. Для данного включения темно-красная область появляется уже при мощности 25 мвт, средне-красная при 35 мвт, а ярко-красная при 90 мВт (110мА). Для данного варианта включения наблюдается более широкий диапазон регулирования температуры путем изменения тока нагревателя от 70 мА до 110 мА. Для третьего варианта топологии нагревателя ВАХ имеет максимальную нелинейность, темно-красное свечение появляется при минимальной мощности 30 мВт (25 мА) и переходит в ярко красное уже при 30 мА.

Анализ трех вариантов топологии нагревателей каталитического сенсора показал, что наиболее равномерный нагрев в широком токовом диапазоне обеспечивает нагреватель при параллельном включении двух меандров.



а – 1-й вар топологии 1 меандр;
б – 2-й вар топологии, 2 меандра соединены последовательно; в – 2-й вар топологии, 2 меандра соединены параллельно; г – 3-й вар топологии нагревателя

Рисунок 3 – ВАХ и сенсоров с разными топологиями нагревателя

Литература

1. A fast and sensitive catalytic gas sensors for hydrogen detection based on stabilized nanoparticles as catalytic layer / E. Brauns [et. al] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2014. – Vol. 193. – P. 895–903.
2. Work function analysis of gas sensitive WO_3 layers with Pt doping / G. Halek [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – Vol. 187. – P. 379–385.
3. Таратын, И. А. Особенности сенсорного отклика термокаталитического сенсора с нагревателем из монокристаллического кремния / И. А. Таратын, В. В. Хатько // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – Вып. 12. – С. 119–122.
4. A miniaturized catalytic gas sensor for hydrogen detection based on stabilized nanoparticles as catalytic layer / E. Brauns [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – Vol. 187. – P. 420–425.

УДК 539.231

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ Fe-Si ПРИ ОТЖИГЕ В ПЛАЗМЕ

Щербакowa Е.Н.¹, Баган Н.П.¹, Венскевич Н.Н.¹, Козуля А.А.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}¹Белорусский национальный технический университет²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты комплексных исследований методами электронографии и атомно-силовой микроскопии тонкопленочных систем на основе железа и кремния при отжиге в плазме дугового разряда. Определены оптимальные режимы обработки для формирования пленок дисилицида железа β -модификации.

Ключевые слова: тонкие пленки, силициды, атомно-силовая микроскопия.

COMPLEX INVESTIGATIONS OF THIN-FILM SYSTEMS BASED ON Fe-Si BY PLASMA ANNEALING

Shcherbakova E.¹, Bagan N.², Venskevich N.², Kozulya A.², Lapitskaya V.^{1,2}¹Belarusian National Technical University²A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The results of complex studies using electronography and atomic force microscopy of thin-film systems based on iron and silicon during treatment in an arc discharge plasma are presented. Optimal treatment modes for the formation of thin films of iron disilicide of beta modification have been determined.

Keywords: thin films, silicides, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Щербакowa Е.Н., ул. Я. Коласа, 22, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Дисилицид железа β -FeSi₂ является перспективным материалом для применения в различных электронных устройствах. В силу своих электрофизических, оптических и теплофизических свойств он находит применение в солнечных элементах для повышения их коэффициента полезного действия, в источниках излучения с $\lambda \sim 1.5$ мкм, в волоконно-оптических линиях связи. На его основе создают термоэлектрические элементы для термоэлектрических генераторов и резистивные материалы с низким температурным коэффициентом сопротивления [1].

В данной работе для формирования пленок β -FeSi₂ использовали обработку тонкопленочных систем на основе железа и кремния в плазме аргона. Исходные системы формировались электронолучевым напылением, как показали ранее проведенные расчеты, оптимальным для формирования дисилицида железа является соотношение толщины слоев 50 нм -30 нм-50 нм для Si-Fe-Si [2]. Далее образцы подвергали стационарному отжигу в плазме дугового разряда в среде аргона при температурах 500°, 600° и 700° в течение 15 минут.

Определение фазового состава производилось на электронографе ЭМР-102. Для идентификации расшифрованных электронограмм использовали базу данных of the International Centre for Diffraction Data.

Результаты электронографических исследований представлены на рис. 1 и приведены в табл. 1

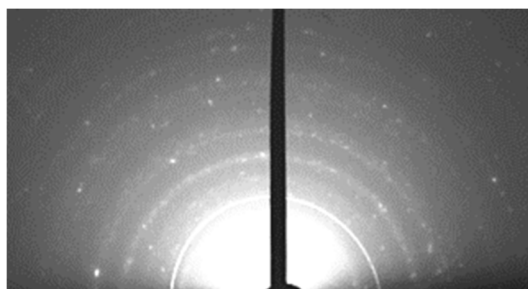


Рисунок 1 – Электронограммы от тонкопленочной системы Si-Fe-Si после обработки в плазме аргона при 700° в течение 15 минут

Таблица 1. Результаты расшифровки электронограмм от тонкопленочной системы Si-Fe-Si после обработки в плазме аргона в течение 15 минут

d, нм	hkl	Температура, °C		
		500	600	700
0.331	112	-	-	β -FeSi ₂
0.319	110	FeSi	FeSi	-
0.285	221	-	-	β -FeSi ₂
0.247	400	-	-	β -FeSi ₂
0.241	222	-	-	β -FeSi ₂
0.217	023	-	-	β -FeSi ₂
0.201	210	FeSi	FeSi	-
0.184	211	FeSi	FeSi	-

Для исследования морфологии поверхности образцов использовали атомно-силовой микроскоп (АСМ) НТ-206 (ОАО «Микротестмашины», г. Гомель, Беларусь) и стандартный кремниевый

кантилевер NSC-11 (Микромаш, Эстония) с жесткость консоли 3 Н/м и радиусом закругления острия 10 нм.

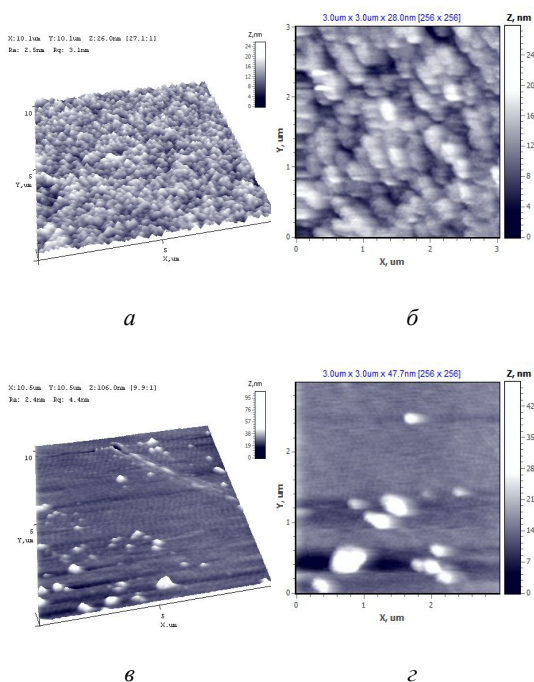


Рисунок 2 – АСМ-изображения: *a, б* – исходной тонкопленочной системы, *в, г* – после обработки в плазме аргона; *a, в* – поле 10 мкм²; *б, г* – поле 3 мкм²

Структура исходной поверхности кремния с нанесенной на него тонкопленочной системой

приведена на рис. 2 *a, б*. Как видно, структура исходной системы зернистая. Размер зерна составляет около 100–300 нм.

Как показал анализ изображений, шероховатость поверхности на поле размером 10 мкм² составила $Ra = 2,5$ нм, $Rq = 3,1$ нм.

После обработки в плазме структура ставится более гладкой. На поверхности присутствуют частицы размером от 300 до 700 нм.

Шероховатость поверхности пленки на поле размером 10 мкм² по сравнению с исходной поверхностью кремния практически не изменилась и составила $Ra = 2,4$ нм, $Rq = 4,4$ нм (рис. 2 *в, г*).

Таким образом, при плазменном отжиге системы Si-Fe-Si при $T = 500\text{--}600^\circ$ на ее поверхности происходит формирование силицида железа с низким содержанием кремния FeSi. При увеличении температуры обработки до 700° наблюдается формирование дисилицида железа $\beta\text{-FeSi}_2$. Данные соединения образуются в результате взаимной диффузии железа и кремния с последующим взаимодействием. Шероховатость поверхности остается практически неизменной.

Литература

1. Experimental investigation of the band edge anisotropy of the $\beta\text{-FeSi}_2$ semiconductor / M. Marinova [et al.] // Solid State Sciences. – 2008. – Vol. 10. – P. 1369–1373.
2. Маркевич, М. И. Влияние импульсного фотонного отжига на структуру и фазовый состав тонкопленочных систем на основе кремния и переходных металлов // М. И. Маркевич, А. М. Чапанов, Е. Н. Щербакова // Наука и техника. – № 5. – 2012. – С. 13–16.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Харитончик С.В.</i> ПРИВЕТСТВИЕ УЧАСТНИКАМ 15-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2022»	5
<i>Кернасовский Ю.М., Моспанов А.Н., Таратын И.А.</i> РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДАТЧИКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	6
<i>Чижик С.А., Чихунов В.В., Лапцкая В.А.</i> ПРОБЛЕМЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МИКРОМЕХАНИКЕ.....	9
<i>Багдюн А.А., Соломахо В.Л., Макаревич В.Б.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В НАНОМЕТРОВЫМ ДИАПАЗОНЕ.....	10
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В.</i> НОВЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СИСТЕМЫ С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ НА ИХ ОСНОВЕ: РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ	13

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Антошин А.А., Галузо В.Е., Пинаев А.И.</i> ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОЖАРНЫЕ ИЗВЕЩАТЕЛИ В СИСТЕМАХ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ	15
<i>Баранова В.С., Спиридонов А.А., Лешкевич С.В., Ушаков Д.В., Саечников В.А.</i> УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАНЫХ	16
<i>Громыко И.Л., Белькин В.О.</i> ДИАГНОСТИКА МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРАХ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРНОГО УЧЕТА ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	18
<i>Горин А.В.</i> КРИТЕРИИ ОПТИМУМА ПРИ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ СИГНАЛОВ	20
<i>Дудчик Ю.И., Субач А.А.</i> ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ	22
<i>Ермакович С.А.</i> СРАВНЕНИЕ АППАРАТОВ РЕО В РАЗРЕЗЕ МОБИЛЬНОГО МОНИТОРИНГА	24
<i>Ефименко С.А., Смолич В.А.</i> КЛАССИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭКБ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР	25
<i>Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Шевченко А.В.</i> МОДУЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ	27
<i>Зуб Е.А., Романов А.Ф., Ходасевич А.И.</i> ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРВЕРА В ТЕХНОЛОГИИ «УМНЫЙ ДОМ»	29
<i>Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Зеленко В.В.</i> МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ КОНТРОЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.....	31
<i>Сушко А.А., Перевитый Е.П., Ситница А.С., Исаев А.В.</i> ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ АДРЕСНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛЕНТ В СИСТЕМАХ ОПОВЕЩЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ	33
<i>Исаев А.В., Суходолов Ю.В.</i> ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН СПОСОБАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБМОТКАХ.....	35
<i>Кайкы М.Н., Иванюк А.А.</i> СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФНФ СТАТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛИС И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИКРОСХЕМ	37
<i>Каликанов А.В., Стрельцов Д.С., Матвеев В.В., Лихошерст В.В., Погорелов М.Г.</i> ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ ВОЛНЫ	39

<i>Кольчевская И.Н., Кольчевский Н.Н., Трапенко Н.В.</i> ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЗС-КАМЕР	41
<i>Лисенков Б.Н.</i> МЕТОД ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА	43
<i>Малай И.М., Титаренко А.В., Озеров М.А.</i> РАЗРАБОТКА АНТЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ РАДИОКОЛЛИМАТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	45
<i>Абгарян Ж.С., Дулуб Я.В., Лихошерст В.В.</i> АНАЛИЗ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ	47
<i>Матвеев В.В., Колесникова А.Г., Стрельцов Д.С.</i> ЗАДАЧА ОРИЕНТАЦИИ В БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ.....	49
<i>Мацук А.С., Савкова Е.Н.</i> МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	51
<i>Медведев Н.В.</i> ПРОФИЛЬ ЗАЩИТЫ БОРТОВОГО ШЛЮЗА ГРАЖДАНСКОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА	53
<i>Мисюкевич Н.С., Шабан Е.И.</i> НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА РЕАЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ В СИСТЕМАХ ПОЖАРОТУШЕНИЯ	55
<i>Невдах В.В.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАДИИ ПОЛНОГО ОХВАТА ПОМЕЩЕНИЯ ПЛАМЕНЕМ	57
<i>Савёлов П.И., Яцына Ю.Ф., Щавлев А.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА	59
<i>Тявловский А.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Цедик Л.В.</i> ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА	61
<i>Субач А.А.</i> ПОЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ 3-D ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ.....	63
<i>Дедович Н.Н., Кучинский П.В., Романов А.Ф., Ходасевич А.И.</i> ТЕХНОЛОГИЯ УЧЕТА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ».....	64
<i>Чжан Ю., Савкова Е.Н., Счастливая Н.И., Ницецки Л.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	66
<i>Крень А.П., Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Мацулевич О.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТПЕЧАТКА ПРИ УДАРНОМ ВНЕДРЕНИИ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ	68
<i>Комиссарчик А.В., Тыдыкова О.В., Сушко А.А., Климов М.А., Исаев А.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕССА	70
<i>Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.</i> СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	72
<i>Сычик В.А., Уласюк Н.Н.</i> УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ	74
<i>Мальцев А.Г., Сычик В.А., Уласюк Н.Н.</i> АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОНОННЫХ ПОТОКОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ	76
<i>Уласюк Н.Н., Сычик В.А.</i> СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА	77
<i>Микитевич В.А., Свистун А.И., Воробей Р.И., Тявловский К.Л., Пантелеев К.В.</i> АДАПТИВНЫЙ ПРИВОД ОКНА И ЖАЛЮЗИ ДЛЯ «УМНОЙ АУДИТОРИИ»	79
<i>Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Кутепов А.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕНАПОЛНЕННОГО ПОЛИАМИДА.....	81

<i>Белов Д.А., Белов Ю.В.</i> ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНЦИРОВАНИЯ НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАТЕНТНЫХ ДОКУМЕНТОВ.....	83
<i>Горячева В.А.</i> ОБЪЕКТИВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ	85
<i>Клявдо М.А., Савкова Е.Н.</i> ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ В БИОДИНАМИЧЕСКИХ СВЕТИЛЬНИКАХ	87
<i>Матвеев В.В., Хомячкова А.Н., Кирсанов М.Д.</i> СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ВОЛНОВЫМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМ ГИРОСКОПОМ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ.....	89
<i>Малютин Д.М., Адякин Ю.Н.</i> ДИНАМИКА КАНАЛА ВЫСОТЫ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА	91
<i>Ризноокая Н.Н., Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Касьмин В.Ю., Красневский Д.Ю.</i> ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ НА СТАЛИ С АКРИЛОВЫМ ПОКРЫТИЕМ.....	94
<i>Пантелеев К.В., Воробей Р.И., Тявловский А.К., Гусев О.К., Жарин А.Л.</i> ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ	96
<i>Сопряков В.И., Рубин Д.С.</i> ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ	98
<i>Глинская Е.В.</i> МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	100
<i>Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	102
<i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ МЕЖЭЛЕМЕНТНОГО КОНТРАСТА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ДЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ	104
<i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО СПЕКЛ-АНАЛИЗА МИКРОВИБРАЦИЙ И СМЕЩЕНИЙ	106
<i>Микитевич В.А., Свистун А.И., Исаев А.В., Воробей Р.И., Тявловский К.Л., Тявловский А.К.</i> УЧЕБНАЯ АУДИТОРИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ПРОЕКТУ «УМНЫЙ КЛАСС»	108
<i>Мороз А.С., Тявловский А.К.</i> КОМПЛЕКСНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС ТЕРМОПАР	110
<i>Бусько В.Н.</i> ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ	112
<i>Микитевич В.А., Жарин А.Л.</i> СИНУСОИДАЛЬНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТО-ЭДС	115
<i>Гарелик Д.Г., Жерносеков Р.А.</i> ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛОВ 1 PPS И ЧАСТОТЫ 10 МГц ДЛЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ.....	117
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Жуковский П.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> КОМБИНИРОВАННЫЙ ОПТИКО-МАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	119
<i>Антошин А.А., Галузо В.Е., Пинаев А.И.</i> ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ	121
<i>Хапкин Д.Л., Феофилов С.В., Козырь А.В.</i> СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ГАРАНТИЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА	122
<i>Ворсин Н.Н., Маркевич К.М.</i> ТРЕХФАЗНЫЙ ТЕСТЕР ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.....	124

<i>Жарин А.Л., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Пантелеев К.В.</i> ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ОКИСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ	126
<i>Козырь А.В., Феофилов С.В.</i> СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ЗОНОЙ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ	128
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ОПТИКО-МАГНИТНЫМ ДАТЧИКОМ	130
<i>Гейс Э.А., Морозов О.О.</i> ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ АГЕНТОВ РОЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТА ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ АТОМОВ	132
<i>Тявловский А.К., Воробей Р.И., Свистун А.И., Скребцов О.Ю., Рачицкий А.М.</i> ОСНАЩЕНИЕ СОВМЕСТНОЙ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ»	134

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

<i>Акиншева И.В., Микулич С.В.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	136
<i>Алешкевич Н.Н., Гринчук А.П., Громыко А.В., Кныш В.П.</i> ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ РАССЕЙЯНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ	138
<i>Алешкевич Н.Н., Гринчук А.П., Громыко А.В., Кныш В.П.</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АНТЕНН. ОБЩИЙ ПОДХОД	140
<i>Берлович Т.И., Спесивцева Ю.Б.</i> ОЦЕНКА УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ УСЛУГАМИ МЕТРОПОЛИТЕНА	142
<i>Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Черный В.В., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В.</i> ИНДЕНТИРОВАНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ ПЛЕНОК ПОЗИТИВНЫХ НОВОЛАЧНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ НА КРЕМНИИ	144
<i>Бринкевич Д.И., Бумай Ю.А., Киевицкая А.И., Кийко А.Н., Крот В.О.</i> ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ γ - и β -ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ	146
<i>Василевская А.А.</i> ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА	148
<i>Гринчук А.П., Громыко А.В., Кныш В.П.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОВ СФЕРИЧЕСКИХ ГАРМОНИК ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ АНТЕНН	149
<i>Громыко И.Л., Галушко В.Н.</i> ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ФИГУР ЛИССАЖУ	151
<i>Гузаревиц И.А., Домениковский Э.И., Спесивцева Ю.Б.</i> ИНСТРУМЕНТЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА	153
<i>Джураев Т.Д., Рахимов Ф.К., Мирзоева Б.М.</i> ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИКВИДУСА ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Au-Ge-Sb МЕТОДОМ СИМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ	155
<i>Коробко Ю.С., Булыга Д.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА КАЛИБРОВКИ КОНТРОЛЬНЫХ СИТ	157
<i>Дудяк А.И., Хвасько В.М., Сахнович А.Д.</i> ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСОЛЬНОЙ БАЛКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ ТОРЦЕВ КОНСОЛИ	159
<i>Ковалёнок А.А., Коробко Ю.С.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	160

<i>Козаченков С.А.</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ В УСЛОВИЯХ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ПРЕЦИЗИОННОСТИ	162
<i>Романчак В.М., Серенков П.С.</i> МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕАДДИТИВНОЙ ВЕЛИЧИНЫ (ТЕОРИЯ РЕЙТИНГОВ)	164
<i>Романчак В.М., Серенков П.С.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	166
<i>Саечников И.В., Скакун В.В., Чернявская Э.А.</i> ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОТСЛЕЖИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	168
<i>Самохвал П.М., Бельский И.В.</i> ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОСАНКИ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТА	170
<i>Сандомирский С.Г., Валько А.Л., Руденко С.П.</i> РАЗРАБОТКА ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ ПО ВИККЕРСУ НА НЕ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	172
<i>Сергиевич О.А., Попов Р.Ю., Богдан Е.О., Дятлова Е.М., Щербанев Е.Н.</i> АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАОЛИНОВОГО СЫРЬЯ БЕЛОРУССКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «СИТНИЦА»	174
<i>Серенков П.С., Бережных Е.В., Сильчук В.А.</i> ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАЙЦЕН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССАМ	176
<i>Серенков П.С., Бережных Е.В., Сильчук В.А.</i> РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СМК В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ	178
<i>Серенков П.С., Романчак В.М.</i> АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	180
<i>Сернов С.П., Балохонов Д.В., Колонтаева Т.В., Тадэуш Н.Н., Коницева Л.М.</i> ВОПРОСЫ СЕРТИФИКАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДНЕГО ОСВЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	182
<i>Соколовский С.С., Гомма М.А., Алешевич Д.Д.</i> СПЕЦИФИКА КАЛИБРОВКИ 3D-ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ	184
<i>Соколовский С.С., Сергей Е.Г.</i> АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ	185
<i>Тарасов Д.С., Самцов М.П., Малюшкова Е.В., Хлудеев И.И., Семак И.В.</i> МЕТОДИКА АНАЛИЗА ГЕЛЬ-ЭЛЕКТРОФОРЕГРАМ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ	187
<i>Токарь О.В., Серенкова Е.П.</i> СЕМАНТИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛ КАК СПОСОБ СУБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	189
<i>Трухан Р.Э., Латицкая В.А., Хабарова А.В., Кузнецова Т.А., Чижики С.А., Торская Е.В., Муравьёва Т.И., Мерзин А.М., Самардак В.Ю.</i> НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ.....	191
<i>Уласевич А.О., Минченя В.Т., Савченко А.Л.</i> СВАРКА НИТИНОЛОВЫХ ПРОВОЛОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТЕНТ-ГРАФТАХ	193
<i>Хвистик М.Д., Серенков П.С.</i> ПРОБЛЕМЫ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СМК НА ЭТАПЕ ПРИМЕНЕНИЯ	195
<i>Цитович Б.В., Соломахо В.Л.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРЕОБРАЗУЮЩИХ СИГНАЛ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ	197
<i>Якуть Ю.П., Ленкевич О.А.</i> ПОВЫШЕНИЕ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	199

Коробко Е.В., Радкевич Л.В., Журавский Н.А., Кузьмин В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....201

Богдан П.С., Савченко А.Л., Минченя В.Т. ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ НА ЖЕСТКОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИТИНОЛА.....203

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Анисович А.Г., Маркевич М.И., Акула И.П., Чекан Н.М., Щербакова Е.Н., Кевра Е.В. МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СМЕСОВОЙ ТКАНИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛАСТЕРАМИ УГЛЕРОДА И ТИТАНА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВЫДЕРЖКОЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ205

Поляк Н.И., Шарипов Ш.Д., Шальга А.В., Анищик В.М., Лигачев А.Е., Понарядов В.В. МИКРОТВЕРДОСТЬ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ БрБ2, ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ УГЛЕРОДА СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ207

Анищик А.А., Минченя В.Т., Ситник А.А., Дежес В.И. МОДИФИКАЦИЯ БЛОКИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ОСТЕСИНТЕЗА ПЕРЕЛОМОВ ДИСТАЛЬНОГО МЕТАЭПИФИЗА ЛУЧЕВОЙ КОСТИ.....209

Бобученко Д.С. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТОНКОГО ОБРАЗЦА МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАГРЕВА.....211

Богдан П.С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАНОВКИ РОТОРА ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ213

Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И. ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА215

Бодяк Д.А., Вечорко А.В., Минченя В.Т. ПРОЦЕСС ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ САМОРАСШИРЯЮЩЕГОСЯ СТЕНТА217

Бойправ О.В., Богуш Н.В., Павленок М.В. ГИБКИЕ СЛОИСТЫЕ РАДИОПОГЛОТИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....219

Козерук А.С., Филонова М.И., Сухоцкий А.А., Богдан Д.Ю. УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШАРОВИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.....221

Бокуть Л.В., Деев Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ СООБЩЕНИЙ223

Филонова М.И., Бондаренко В.А. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ.....225

Бурак В.А. ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ227

Вечорко А.В., Бодяк Д.А., Минченя В.Т. АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ БАЛЛОНРАСШИРЯЕМЫХ СТЕНТОВ.....229

Гацкевич Е.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ С ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ231

Горох Г.Г., Тураходжаев Н.Д., Лозовенко А.А., Федосенко В.С., Худойкулов Ш.У. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТАНТАЛОВЫХ НАНОСТРУКТУР В ПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПОЛИМЕРАМИ.....233

Грузд Н.А., Филонова М.И. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ В ПРОТЕЗОСТРОЕНИИ.....235

Грузд Н.А., Монич С.Г. ИНВАЗИВНЫЙ ИНТЕРФЕЙС БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА.....237

Гундина М.А., Юхновская О.В., Каменко Д.А. РЕАЛИЗАЦИЯ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ИНЖЕНЕРИИ239

<i>Гундина М.А., Жданович М.Н., Каменко Д.А.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РАССТОЯНИЯ МАХАЛАНОВИСА	241
<i>Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Каменко Д.А.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБОРКИ В WOLFRAM MATHEMATICA.....	243
<i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г., Гусакова С.В.</i> ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СИЛУМИНОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ	245
<i>Ермакович О.Л.</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ SI – ФЭУ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАССЕЯНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА	247
<i>Ермакович О.Л.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ И ЗОЛЬНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО И ПРОХОДЯЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	249
<i>Жевняк О.Г.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВЛИЯНИЯ РАССЕЯНИЯ НА ФОНАХ И ИОНАХ ПРИМЕСИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ.....	251
<i>Журавлёв В.И., Наумович Н.М., Корневский С.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОБРАЗЦА АВТОМОБИЛЬНОГО РАДАРА	253
<i>Запольская К.В., Коляда Е.А., Монич С.Г.</i> ЮВЕЛИРНАЯ ПРОДУКЦИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ГРАФИКЕ	255
<i>Ибрагимов Ш.Б., Бабажанов Б.А., Номозова Н.З.</i> ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В СОЕДИНЕНИЯХ $M_3Ln(EO_4)_2$ И $M_2MLn(EO_4)_2$	257
<i>Бокуть Л.В., Каменко Д.А.</i> ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫМ МЕТОДОМ	259
<i>Бокуть Л.В., Климович Т.А.</i> АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ПЛАНА ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ	261
<i>Князев М.А., Климович Т.А.</i> НЕЛИНЕЙНОЕ УРАВНЕНИЕ, ДОПУСКАЮЩЕЕ РАЗЛИЧНЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ.....	263
<i>Пархоменко И.Н., Власукова Л.А., Комаров Ф.Ф., Романов И.А., Альжанова А.Е., Демидович С.А., Ковальчук Н.С.</i> ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕГО ОКСИДНОГО СЛОЯ В ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ	265
<i>Кондратьева Н.А., Линкевич С.В., Плиско Р.Г.</i> ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ATMEL STUDIO И ARDUINO IDE	267
<i>Ксенофонтов М.А., Васильева В.С., Выдумчик С.В., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ СРЕДСТВ РЕАБИЛИТАЦИИ ИЗ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ.....	269
<i>Хацкевич А.Д., Ланин В.Л.</i> МОНТАЖ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПО ТЕХНОЛОГИИ FLIP-CHIP С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА	271
<i>Храмкова А.С., Филонова М.И.</i> ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ В МЕДИЦИНЕ	272
<i>Холов Ф.Б., Луговой В.П., Мирзоалиев И.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ МНОГОДИСКОВОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ	275
<i>Чикичев А.Д.</i> СИСТЕМА ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРОВ	277
<i>Шепелевич В.Г., Гольцев М.В., Гусакова О.В., Гусакова С.В.</i> ТЕКСТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ ОЛОВА, ИНДИЯ, ВИСМУТА И ИХ СПЛАВОВ	278
<i>Ювченко В.Н., Комаров А.Ф., Мискевич С.А., Ермолаев А.П.</i> МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ	280

<i>Юник А.Д., Соловьёв Я.А., Шидловский А.Г.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЕВ p-GaN и AlGaN В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ТИПА p-GaN/AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.....	282
<i>Литвинович Г.С., Бручковский И.И.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА DEVI ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ SO ₂	284
<i>Луговой В.П., Денис А.</i> ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА СТЕРЖНЕЙ КОЛЬЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА УПРУГИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ	286
<i>Луговой В.П., Луговая И.С.</i> КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ	287
<i>Лушакова М.С., Тихон О.И., Мадвейко С.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРЫ НА РЕЖИМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЧ РАЗРЯДА	289
<i>Монич С.Г., Храмова А.С., Бондаренко В.А.</i> ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИСКУССТВЕННОГО СЕРДЦА И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ	291
<i>Манего С.А.</i> ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ГАЛЛИЙ-ИНДИЙ-МЫШЬЯК.....	294
<i>Матюшев М.В., Минченя В.Т.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МАСОК ОТ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ	296
<i>Комаров Ф.Ф., Пархоменко И.Н., Мильчанин О.В., Моховиков М.А., Ивлев Г.Д., Власукова Л.А., Альжанова А.Е., Ван Тин</i> ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ГИПЕРДОПИРОВАННОГО СЕЛЕНОМ ДЛЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ ВИДИМОГО И ИК ДИАПАЗОНОВ	298
<i>Кочурова Д.Н., Калугин А.И., Алашкин А.С., Альес М.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА НА ВЕЛИЧИНУ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ОТРАЖЕНИЯ	300
<i>Петухов И.Б., Шепелевич А.В.</i> СОГЛАСОВАНИЕ ВОЛНОВОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МОНТАЖА ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ	302
<i>Прусова И.В., Прихач Н.К.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ Nd-СОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ SiO ₂ -Al ₂ O ₃	303
<i>Корзюк В.И., Рудько Я.В.</i> ЗАДАЧА О ПРОДОЛЬНОМ УДАРЕ ПО УПРУГОМУ СТЕРЖНЮ С УПРУГИМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ ОДНОГО ИЗ КОНЦОВ	305
<i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Роговцова А.С., Сатторов С., Августинovich А.Л.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НИТИНОЛА В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ.....	307
<i>Савченко А.Л., Муминбоев А.Д.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА	309
<i>Саечников А.В., Чернявская Э.А., Саечников В.А.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ МАТРИЦЕЙ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	311
<i>Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Самсонова А.С., Пантелеенко Ф.И.</i> ТЕРМОСТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА	313
<i>Олешкевич А.Н., Сернов С.П., Долматов В.Ю., Лапчук Т.М., Лапчук Н.М.</i> ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭПР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К УФ И ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЯМ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВ НАНОАЛМАЗА.....	315
<i>Колонтаева Т.В., Шабура М.А.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА.....	317
<i>Афанасьев М.Р., Шик Д.В., Монич С.Г.</i> СТОЛ МОДУЛЬНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ.....	318
<i>Кузнецов В.В., Марко А.Ф., Карпович С.Е.</i> ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	320

<i>Сандомирский С.Г.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ В АЛГОРИТМЕ СВЯЗИ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРОМ И ТВЕРДОСТЬЮ СТАЛИ	322
<i>Свирина Л.П.</i> ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ОДНОМОДОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА	324
<i>Сергиевич О.А., Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Богдан Е.О., Колонтаева Т.В.</i> ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАОЛИНОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	326
<i>Савич В.В.</i> ПСЕВДОСПЛАВЫ: ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД ТРАДИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ	328
<i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Деленковский Н.В., Левкович Н.В.</i> ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ ОГРАНИЧЕННОЙ ТОЛЩИНЫ.....	331
<i>Есьман Г.А., Габец В.Л., Карамышев А.Е.</i> СТЕНД ИСПЫТАНИЙ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ	333
<i>Рыжневич А.А., Балыкин И.В., Мащенко А.Г., Казак Н.С.</i> ПАРАМЕТРЫ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НУЛЕВОГО И ПЕРВОГО ПОРЯДКОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ СРЕДУ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ВО ВРЕМЕНИ ОПТИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ	335
<i>Бука А.В., Дятлова Е.М., Колонтаева Т.В., Шевченко А.А.</i> ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МАНГАНИТОВ РЗЭ	337
<i>Свито И.А., Ксеневич В.К., Бондаренко Е.А., Хорошко Л.С., Кулак А.И., Стрельцов Е.А., Мазаник А.В.</i> ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСОСУЛЬФИДА И ТИОИОДИДА ВИСМУТА: СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ	339
<i>Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н., Ермолаев А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	341
<i>Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.</i> АНИЗОТРОПИЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ОЦЕНКА ЕЕ НЕОДНОРОДНОСТИ	343
<i>Баев А.Р., Бабук Е.П., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В.</i> ОБ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ И ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ	345
<i>Камышан А.С., Пилько В.В.(ст.), Пилько В.В.</i> ПРЯМОПОТОЧНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	347
<i>Степаненко А.И., Минченя В.Т., Матюшко А.В., Михневич В.В.</i> СОЗДАНИЕ КОСМЕТОЛОГИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО АППАРАТА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА	349
<i>Субочев П.В.</i> ПРИБОРЫ ДЛЯ РАЗНОМАСШТАБНОЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕНН	351

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Malyarevich A.M., Yumashev K.V., Dymshits O.S., Alekseeva I.P., Zhilin A.A.</i> OPTICAL PROPERTIES OF SPINEL BASED GLASS-CERAMICS OF THE ZnO-Al ₂ O ₃ -Ga ₂ O ₃ -SiO ₂ SYSTEM DOPED WITH Co ²⁺ IONS.....	353
<i>Gorbachenya K.N., Yasukevich A.S., Lazarchuk A.I., Kisel V.E., Shishko T.A., Volkova E.A., Maltsev V.V., Koporulina E.V., Yapaskurt V.O., Kuzmin N.N., Ksenofontov D.A., Mitina D.D., Jiliaeva A.I., Kuleshov N.V.</i> CRYSTAL GROWTH AND SPECTROSCOPIC CHARACTERIZATION OF Yb:YMgB ₅ O ₁₀	355
<i>Yumashev K.V., Trusova E.E., Guretskii S.A., Karpinsky D.V., Trukhanova K.L., Kuleshov N.V., Malyarevich A.M.</i> THERMAL EXPANSION OF KYb _x Y _{1-x} (WO ₄) ₂ CRYSTALS	357

<i>Yumashev K.V., Malyarevich A.M., Hertsova A.V., Goman V.I., Pavlovski L.K.</i> THERMO-OPTIC COEFFICIENTS OF MONOCLINIC $\text{Er}^{3+}:(\text{GdY})_2\text{SiO}_5$ CRYSTAL	359
<i>Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П., Юран С.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ЗАДАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	361
<i>Антонов Е.А., Куприянов А.А., Калугин А.И., Зарипов М.Р.</i> МЕТОД МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПУТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ СОСТАВУ	363
<i>Артюхина Н.К., Самбрано Лус Фабиола, Шанчук В.А.</i> КОРРЕКЦИЯ ХРОМАТИЗМА В ОБЪЕКТИВЕ ШМИДТА.....	365
<i>Артюхина Н.К., Чергейко С.В., Марчик В.А.</i> МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ИК ВАРИООБЪЕКТИВА В ПП ОРТИСSTUDIO	367
<i>Бельков М.В., Борисевич Д.А., Кацалап К.Ю., Ходасевич М.А.</i> ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ С, Mn, Si, Cr, Ni И Cu В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	369
<i>Богданов А.А., Гавриш С.В., Марциновский А.М., Столярков И.И.</i> БЕЗРУТУННЫЕ ЦЕЗИЕВЫЕ ЛАМПЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА (ИПР) ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ	371
<i>Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В., Ушаков Р.М.</i> НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С САПФИРОВОЙ ОБОЛОЧКОЙ.....	373
<i>Юран С.И., Зарипов М.Р., Вершинин М.Н.</i> ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНИЗМЫ.....	375
<i>Гавриш С.В., Пучнина С.В., Ушаков Р.М.</i> СПАИ САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК С МЕТАЛЛАМИ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМПАХ.....	377
<i>Горбаченя К.Н., Ясюкевич А.С., Кисель В.Э., Толстик Н.А., Тараченко А.А., Шишко Т.А., Гоман В.И., Павловский Л.К., Орлович В.А., Волкова Е.А., Япаскурт В.О., Кулешов Н.В.</i> Er, Yb:YGGdSiO_5 – ПЕРСПЕКТИВНАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5–1,6 МКМ	379
<i>Ермалицкая К.Ф.</i> ПОСЛОЙНОЕ СКАНИРОВАНИЕ РЖАВЧИНЫ С МИКРОННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ СЛОЯ ДВУХИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ ЛАЭМС	381
<i>Зарипов М.Р., Алексеев В.А., Офицерова А.В., Антонов Е.А., Куприянов А.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В КОЛЬЦЕВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ.....	384
<i>Збышинская М.Е.</i> СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	386
<i>Киль И.А., Погорелов М.Г.</i> ПРИМЕНЕНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО КАНАЛА В СОСТАВЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	388
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И., Кулешов Н.В.</i> УСЛОВИЯ И РЕЖИМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ КОРУНДА, АКТИВИРОВАННОГО Tl^{3+} , ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ	390
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гурецкий С.А., Кулешов Н.В.</i> ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ В КРИСТАЛЛАХ $\text{Yb:KY(WO}_4)_2$ НА ВЕЛИЧИНУ НЕАКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ	392
<i>Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнецик В.О., Али-заде Э.Р., Шевченко В., Якубович Т.С.</i> ОБРАБОТКА КОНИЧЕСКИХ ЛИНЗ	394
<i>Кравченко В.М., Конойко А.И., Кузьмицкая А.С., Малютин-Бронская В.В.</i> МАТРИЦА РЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКЕ	396
<i>Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Ломако А.А., Хомицевич А.Д., Домарацкий А.В.</i> ПОРТАТИВНЫЙ АЛЬБЕДОМЕТР ДЛЯ РАБОТЫ В УДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ	398

<i>Малютина-Бронская В.В., Сорока С.А., Сенькевич Д.В., Ермаков О.В.</i> ДЕТЕКТОРЫ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	400
<i>Мандик Н.С., Фёдорцев Р.В., Нупрейчик А.О.</i> ОПТИКО-ВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА ПОДВОДА ОПОРНОГО СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В БЛОКЕ ВИЗИРНО-ДАЛЬНОМЕРНОМ ТАНКОВОГО ПРИЦЕЛА.....	402
<i>Павлюковец Е.Ю., Артюхина Н.К., Кузнецик В.О.</i> МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА	404
<i>Поляков А.В., Королёва Е.А.</i> УМЕНЬШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ОДНОМОДОВЫМИ ВОЛОКОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ	406
<i>Романов Д.В., Фёдорцев Р.В.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ИЗМЕРЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОЭА ДЛЯ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА	408
<i>Савкова Е.Н.</i> ГАММА-КОМПЕНСАЦИЯ И МАСШТАБИРОВАНИЕ КАК ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	410
<i>Свибович И.В., Шкадаревич А.П.</i> КОМБИНИРОВАННЫЙ ТЕПЛОВИЗИОННО-НОЧНОЙ ПРИБОР.....	412
<i>Стасилович В.А., Шишкин И.П., Шкадаревич А.П.</i> ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПАНКРАТИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИФРАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	414
<i>Цвирко В.И., Острецов Е.Ф., Трофимов Ю.В., Лишик С.И.</i> СВЕТОДИОДНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДНЕВНОГО СВЕТА СЕРИИ «D»	415
<i>Цикман И.М., Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Попков А.П.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА «ВИЗИР»	417
<i>Юмашев К.В., Хорт А.А., Подболотов К.Б., Шиманский В.И.</i> СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ (ЛЮТЕЦИЙ)-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТОВ И АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ	419
<i>Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., Колобкова Е.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ В Y ^b -Er ФТОР-ФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ.....	422
<i>Яськов А.С., Никоненко С.В.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	424
<i>Поляков А.Ю., Швайко Е.П.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ В ЗОНДИРОВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ.....	426

Секция 5. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ

<i>Видрицкий А.Э., Ланин В.Л.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПРИЕМНИКОВ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	428
<i>Галацевич В.В., Чижик С.А., Люцко К.С.</i> СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ МЭМС ДВОЙНИКОВ	430
<i>Ширяева В.Д., Щербакова Е.Н.</i> СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПАРОВ ВОДЫ В ПОДКОРПУСНОМ ОБЪЕМЕ ИС.....	431
<i>Хабарова А.В., Латицкая В.А., Мельникова Г.Б., Кузнецова Т.А., Чижик С.А.</i> ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ SiO ₂ НА ГИДРОФИЛЬНО/ГИДРОФОБНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРФТОРДЕКАНОВОЙ КИСЛОТЫ, НАНЕСЕННЫХ НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ	433
<i>Сапсалёв Д.В., Мельникова Г.Б., Аксючиц А.В., Толстая Т.Н., Котов Д.А., Чижик С.А.</i> ТОНКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ.....	435
<i>Латицкая В.А., Кузнецова Т.А., Хабарова А.В., Чижик С.А., Вархолински Б., Гилевич А.</i> ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРА В ПОКРЫТИИ Al-Cr-B-N НА МОРФОЛОГИЮ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ	437

<i>Мельникова Г.Б., Сапсалёв Д.В., Толстая Т.Н., Чижик С.А., Корольков И.В., Здоровец М.В.</i> СЕЛЕКТИВНЫЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ С АНИОННЫМИ КРАСИТЕЛЯМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН	439
<i>Реутская О.Г., Денисюк С.В., Куданович О.Н., Лугин В.Г.</i> ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ В СОСТАВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ НА АЛЮМООКСИДНЫХ ПОДЛОЖКАХ.....	441
<i>Шарибаев Н.Ю., Джурсаев Ш.С., Турсунов А.А. Муллабоева Н.Ш.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ	443
<i>Ковальчук Н.С., Демидович С.А., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н.</i> ПЛЕНКИ SiN _x С НИЗКИМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ДЛЯ МИКРОСИСТЕМНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ICP-РЕАКТОРЕ.....	445
<i>Константинов С.В., Комаров Ф.Ф., Чижов И.В., Зайков В.А.</i> СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	447
<i>Лапицкая В.А., Баган Н.П., Венскевич Н.Н., Козуля А.А., Щербакова Е.Н., Юсупов Ф.Т.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ЦИНКА И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ	449
<i>Люцко К.С., Козуля А.А.</i> ОТ БИОНИКИ К МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ. ПАУЧИЙ ШЕЛК.....	451
<i>Люцко К.С., Сервачинский И.Ю., Сернов С.П., Щербакова Е.Н.</i> К ИСТОРИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В ОБЛАСТИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ В БНТУ	453
<i>Люцко К.С., Филатов С.А.</i> БИОСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСУДИСТОЙ ГЕМОДИНАМИКИ.....	455
<i>Люцко К.С., Чижик С.А.</i> СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ МИКРОБИОМАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ШЕЛКА ПАУКА	457
<i>Степаненко Д.А., Киндрок А.Н.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЭМС-МИКРОФОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКА	459
<i>Таратын И.А., Горох Г.Г., Лозовенко А.А., Кевра Е.В.</i> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАЗОВЫЙ СЕНСОР С НАГРЕВАТЕЛЕМ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	461
<i>Таратын И.А., Горох Г.Г., Лозовенко А.А., Реутская О.Г., Федосенко В.С., Иджи М.М.</i> ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ НАГРЕВАТЕЛЯ НА ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАТАЛИТИЧЕСКИХ СЕНСОРАХ ПРИ МИНИМАЛЬНОМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИИ	463
<i>Щербакова Е.Н., Баган Н.П., Венскевич Н.Н., Козуля А.А., Лапицкая В.А.</i> КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ Fe-Si ПРИ ОТЖИГЕ В ПЛАЗМЕ	465

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2022

Материалы

15-й Международной научно-технической конференции

(16–18 ноября 2022 года
Минск, Республика Беларусь)

Ответственный за выпуск *Н.Н. Ризноокая*
Оформление и компьютерная верстка *О.Л. Чабаровой*

Подписано в печать 14.11.2022. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 55,45. Уч.-изд. л. 44,67. Тираж 100. Заказ 695.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.