

Рисунок 3 – Карта распределения относительных значений РВЭ образца с твердостью 30HRC

Можно сделать вывод, что, несмотря на теретически обоснованную взаимосвязь твердости и работы выхода электрона с поверхности металла, для реальных образцов, даже при тщательной предварительной подготовке их поверхности (как в описываемых исследованиях), влияние коррозионных явлений и поверхностных загрязнений многократно превосходит влияние физических факторов, таких как твердость и модуль Юнга. Поскольку реальные поверхности металлов всегда характеризуются неоднородностью распределения коррозионного потенциала и / или локальными загрязнениями, то визуализируемые методом сканирующего зонда Кельвина неоднородности

распределения КРП должны трактоваться как дефекты структуры и неоднородности химического состава поверхности образца, а не как различие механических свойств участков поверхности.

#### Литература

1. Hua, G. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals / G. Hua, D. Li // Applied Physics Letters. – 2011, V. 99. – P. 041907.
2. Hua, G. The correlation between the electron work function and yield strength of metals / G. Hua, D. Li // Phys. Status Solidi B. – 2012. – P. 1–4.
3. Lu, H. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function—An alternative parameter for materials design / H. Lu, G. Hua, D. Li // Applied Physics Letters. – 2013, V. 103. – P. 261902.
4. In Situ Time-Lapse SKPFM Investigation of Sensitized AA5083 Aluminum Alloy to Understand Localized Corrosion / Y. Liew [et al.] // J. Electrochem. Soc. – October 2020. – P. 1–28.
5. Steel Hardness Conversion Table [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.steelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion.html>.
6. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К. Л. Тявловский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2008, № 2. – С. 27–32.

УДК 621.383

### МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ФОТОТРАНЗИСТОРА

Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Свистун А. И., Тявловский А. К., Шадурская Л. И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Описана структура и основные характеристики мультипараметрического сенсора на основе полевого фототранзистора. Применение полупроводников с многозарядной примесью позволяет реализовать качественно новые преобразовательные характеристики.

**Ключевые слова:** полевой фототранзистор; полупроводник; многозарядная примесь; управление характеристикой чувствительности.

### MULTI -PARAMETRIC SENSORS BASED ON FIELD PHOTOTRANSISTOR

Tyavlovsky K., Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The structure and basic characteristics of the multi -parametric sensors based on field phototransistor are described. The use of semiconductors with a multi-charged admixture allows you to realize a qualitatively new composition of the transformative characteristics.

**Key words:** field phototransistor; semiconductor; multifaceted admixture; control of the characterization of sensation.

*Адрес для переписки: Тявловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Сенсоры должны избирательно преобразовывать измеряемую физическую величину в электрический сигнал в форме, удобной для передачи, обработки и сравнения с эталонной мерой. Однако в ряде случаев используются сенсоры, способные воспринимать и преобразовывать несколько физических величин с возможностью разделения одного измерительного сигнала путем использования специальных методик

и алгоритмов измерения [1]. Такие мультипараметрические сенсоры могут быть реализованы на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями [2], формирующими в запрещенной зоне несколько энергетических уровней (рисунок 1) с разными зарядовыми состояниями. Особенности процессов перезарядки различных энергетических

уровней одной примеси обеспечивают комплекс новых преобразовательных характеристик [2]. Использование в сенсорах в качестве приборной основы структуры полевого транзистора [3] обеспечивает низкое выходное и высокое входное сопротивления сенсора, что облегчает его согласование с узлами измерительного преобразователя. Возможность оптического управления параметрами канала транзисторной структуры расширяет функциональность и диапазоны преобразования сенсора, делает возможность мультиплицировать и разделять информационные сигналы, вызванные входными воздействиями различной физической природы [2, 4].

Необходимо отметить, что диапазон спектральной чувствительности таких сенсоров зависит не только от материала примеси и управляющего сигнала, но и от толщины активной и пассивной области сенсорной структуры под входным окном. Для разных требуемых диапазонов спектральной чувствительности может потребоваться толщина материала от 10 мкм до, в случае освещения с обратной стороны, полной толщины подложки.

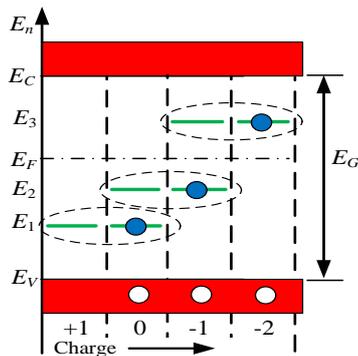


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями

Такие разные требования к толщине структуры могут быть решены, например, селективным утоньшением материала под активной областью сенсора (рисунок 2) путем травления, или изготовлением сенсорной структуры на сапфире [5].

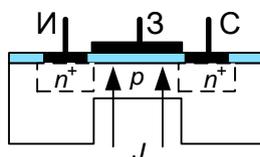


Рисунок 2 – Полевой фототранзистор с утоненной активной областью

При этом на одной сапфировой подложке, имеющей полосу пропускания от 0,2 до 6,0 мкм, могут быть размещены и сенсорная структура на основе кремния, и управляющие светодиоды на основе материалов  $A^3B^5$  (рисунок 3), нанесенные на сапфировую подложку эпитаксиальным способом.

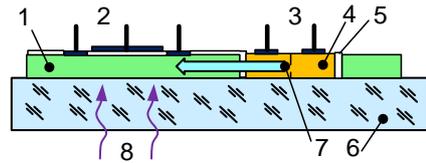


Рисунок 3 – Сенсорная структура на сапфире

Здесь 1 – это область полупроводника с многозарядной примесью, например,  $Si(Ni)$ , в которой сформирована структура полевого транзистора с индуцированным каналом и выводами 2; 3 – это выводы управляющего светодиода 4 на основе материалов  $A^3B^5$ ; 5 – изолирующие слои диэлектрика; 6 – подложка из сапфира; 7 – управляющее оптическое излучение; 8 – входной оптический сигнал.

Управляющее излучение позволяет управлять как электрическими характеристиками полевого фототранзистора, такими как напряжение отсечки и крутизна управления, так и оптическими – переключением «красной» границы спектральной чувствительности и поддиапазонами чувствительности на энергетической характеристике [6]. Пределы регулировки всех характеристик зависят от применяемых материалов основного полупроводника и примеси, ее концентрации, структуры и технологии изготовления сенсора. На рисунке 4 представлена зависимость порогов переключения поддиапазонов энергетической характеристики от концентрации многозарядной примеси в кремнии [4, 6].

Отметим, что выходной сигнал сенсора носит мультипликативный характер от воздействия входных факторов различной физической природы: электрического поля и освещения. Причем электрический потенциал на затворе, в свою очередь, может изменяться под действием разнообразных факторов, например, контакта с биологическим объектом через иммерсионную жидкость [3].

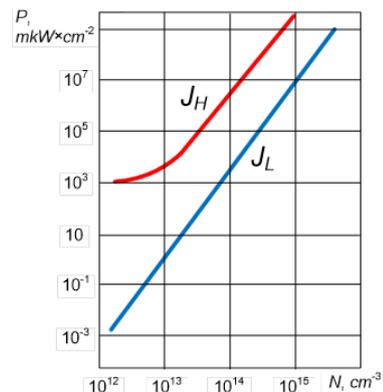


Рисунок 4 – Зависимость порогов переключения преобразовательной характеристики оптического сенсора от концентрации многозарядной примеси

Таким образом приборная структура одноэлементного сенсора реализует чувствительность к

нескольким входным факторам различной физической природы. Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники и измерительные преобразователи с заданными функциональными свойствами и характеристиками преобразования.

#### Литература

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О. К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
2. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements, – 2021, №2. – Pp. 108–116

3. Бурункова, Ю.Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова, – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.

4. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // Не разрушающий контроль и диагностика – 2023, № 1. – С. 37–45.

5. Масол, И. В. Информационные нанотехнологии / И. В. Масол, В. И. Осинский, О. Т. Сергеев. – Киев: изд-во Макрос, 2011. – 560 с.

6. Управление характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядной примесью / Воробей Р.И. [и др.] // Приборостроение: материалы 16 МНТК, Минск, 17–19 ноября 2023 г. / БНТУ. – Минск, 2023. – С. 39–40.

УДК 538.911; 538.958; 548.4; 620.3

### АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМИ СЕНСОРНЫМИ СИСТЕМАМИ

Филатов С. А.<sup>1</sup>, Гайкевич Д. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский Национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В работе рассматриваются технологические основы и ключевые аспекты применения адаптивных технологий применительно к распределенным сенсорным системам мониторинга и оценки экологических параметров окружающей среды с использованием Интернета вещей (IoT).

**Ключевые слова:** сенсор, адаптивное управление, Arduino

### ADAPTIVE CONTROL OF MICROPROCESSOR SENSOR SYSTEMS

Filatov S.<sup>1</sup>, Gaikovich D.<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The paper discusses the technological foundations and key aspects of the application of adaptive technologies in relation to distributed sensor systems for monitoring and assessing environmental parameters using the Internet of Things (IoT).

**Keywords:** sensor, adaptive control, Arduino

Адрес для переписки: Филатов С.А. П., ИТМО НАН Беларуси, Бровки, 15, г.Минск, 220072, Республика Беларусь e-mail: fil@hmti.ac.by

Современные сенсорные системы анализа окружающей среды представляют собой высокотехнологичные устройства и платформы, которые используются для мониторинга и оценки различных экологических параметров. Наиболее распространенными типами таких систем являются атмосферные сенсоры, которые измеряют параметры воздуха, такие как уровень загрязняющих веществ (например, диоксид углерода, монооксид углерода, озон, частицы PM10 и PM2.5), влажность, температуру и давление. Также широко используются сенсоры контроля качества воды, которые применяются для контроля водных источников и систем водоснабжения, позволяя измерять pH, уровень растворенного кислорода, мутность и концентрацию химических веществ. По

мере развития прецизионного земледелия растет интерес к сенсорам почвы, которые оценивают свойства почвы, включая влажность, температуру, содержание питательных веществ и уровень загрязнения и к сенсорам для мониторинга биоразнообразия, которые используют методы, такие как акустическое зондирование или фото и видеокамеры с системой распознавания, для оценки состояния экосистем и видовое разнообразие.

Технологической основой для развития многоэлементных распределенных сенсорных систем является Интернет вещей (IoT): многие сенсорные системы интегрируются с IoT, что позволяет собирать, передавать и анализировать данные в реальном времени через интернет. Так как объем анализируемых данных многократно растет при