

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.391; 621.383.92

ЗЕНЕВИЧ
Андрей Олегович

**ОДНОКВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИЕМА
И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

Минск, 2013

Работа выполнена в Учреждении образования «Высший государственный колледж связи» на кафедре математики и физики

Научный консультант	Гулаков Иван Романович, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей физики Белорусского государственного университета
Официальные оппоненты:	Лыньков Леонид Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой защиты информации Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»; Матюшков Владимир Егорович, д-р техн. наук, профессор, главный инженер научно-производственного республиканского унитарного предприятия «КБТЭМ-ОМО»; Маляревич Александр Михайлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, декан приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета
Оппонирующая организация:	Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И. Степанова»

Защита состоится «10» января 2014 г. в 14¹⁵ на заседании совета по защите диссертации Д02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, кор. 1, ауд. 202). Тел. ученого секретаря (8-017) 293-95-17; e-mail: aantoshyn@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » декабря 2013 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
канд. физ.-мат. наук, доцент

Антошин А.А.

© Зеневич А.О., 2013

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в оптике и квантовой электронике широко используется квантово-статистический подход, который позволил создать теорию, достаточно точно описывающую физические процессы и явления, протекающие в источниках, средах распространения и приемниках оптического излучения. Одним из основных методов экспериментальной проверки этой теории является статистический одноквантовый метод (метод счета фотонов). Оптическое излучение, которое может быть зарегистрировано в режиме счета фотонов, относится к слабому или малой интенсивности.

Традиционно приемниками слабых световых потоков видимого участка спектра являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и передающие телевизионные трубки мгновенного действия – диссекторы. Однако данные типы фотоприемников обладают рядом недостатков: они имеют высокое напряжение питания, большие габариты, низкую механическую прочность, малую чувствительность в ближней инфракрасной области спектра.

Одноквантовая регистрация может осуществляться также гибридными системами, представляющими собой комбинации электронно-оптических усилителей яркости и электровакуумных фотоприемников. Эти системы достаточно сложно реализовать и они имеют высокую стоимость базовой аппаратуры.

В последние годы разработаны счетчики фотонов на сверхпроводниковых одноквантовых приемниках. Использование таких детекторов позволяет реализовывать одноквантовую регистрацию оптического излучения в среднем инфракрасном диапазоне от 5 до 10 мкм. Режим одноквантовой регистрации на этих фотоприемниках реализуется при сверхнизких температурах от 4,2 до 1,7 К, что затрудняет их практическое использование.

В настоящее время для реализации одноквантовой регистрации оптического излучения малой интенсивности все чаще используются твердотельные фотоприемники, обладающие внутренним усилением. Примерами таких фотоприемников являются лавинные фотодиоды и структуры металл-резистивный слой-полупроводник (МРП). Фотоприемники данного типа обладают малыми размерами, небольшими напряжениями питания, достаточно большой чувствительностью в ближней инфракрасной области спектра, по сравнению с ФЭУ.

На базе структур МРП созданы полупроводниковые многоэлементные фотоприемники, работающие в режиме одноквантовой реги-

страции при комнатных температурах, такие, как Si-ФЭУ (кремниевые фотоумножители).

В последние годы большой интерес к одноквантовым системам регистрации вызван интенсивным развитием такого направления защиты информации, как квантовая криптография. Наиболее часто методы квантовой криптографии применяют для защиты оптических каналов связи. В этом случае передача секретного ключа осуществляется состояниями отдельных фотонов. Для приема секретного ключа используют системы одноквантовой регистрации. К таким системам предъявляют достаточно высокие требования по быстродействию, уровню собственных шумов и темновых импульсов, вероятности ошибочной регистрации фотона.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют достаточно полно разработанные модели фотоэлектрических явлений в лавинных фотоприемниках (ЛФП), работающих в режиме одноквантовой регистрации. Физические процессы, вносящие вклад в формирование характеристик ЛФП в режиме одноквантовой регистрации, недостаточно изучены. Также не разработаны способы и устройства, позволяющие передавать и принимать информацию оптическими сигналами малой интенсивности, содержащими в среднем от одного до десяти фотонов в импульсе. Поэтому в предлагаемой диссертационной работе выполнены исследования фотоэлектрических процессов в кремниевых лавинных фотоприемниках, работающих в режиме одноквантовой регистрации, а также разработаны способы и устройства приема и передачи оптической информации отдельными фотонами, обеспечивающие конфиденциальность информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема диссертации соответствует утвержденному научному плану работ Учреждения образования «Высший государственный колледж связи» и следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь:

5. Информационно-коммуникационные, авиационные и космические технологии и аппаратура:

5.5. Методы, средства и технологии обеспечения информационной безопасности при обработке, хранении и передаче данных с использованием криптографии, квантово-криптографические системы;

5.6. Средства контроля параметров систем и средств связи и телекоммуникаций;

6. Лазерные, оптические, оптико-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы:

6.7. Научные основы создания и функционирования оптико-электронных микросистем, устройств молекулярной электроники и кремниевой фотоники, электронных и оптических систем обработки информации на спиновых эффектах; нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике;

6.9. Принципы схемотехнического построения и технологии создания интегральных, в том числе трехмерных, микросхем, устройств функциональной и СВЧ-электроники, опто- и микроэлектромеханических систем, светодиодных и фоточувствительных приборов, высокоэффективных солнечных элементов;

6.10. Оптико-электронные методы и средства измерений физических величин, контроля технологии и параметров производства полупроводниковых приборов и интегральных схем, размерного контроля.

Результаты, полученные в диссертационной работе, связаны с выполнением научно-исследовательских работ.

Программа 18.03р «Диагностика» тема № 92-1054 – № 93-1054 «Разработка методики определения содержания нефтепродуктов в природных, технологических и сточных водах и модернизация флуоресцентных детекторов РОВ» (1992 – 1993 гг.).

Тема ГБЦ № 93-3061 «Исследование фотоэлектрических явлений в кремниевых лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации» (1993 – 1994 гг.).

Тема ГБЦ № 95-3098 «Разработка методов и датчиков для контроля нормируемых органических примесей в природных, технологических и сточных водах» (1995 – 1996 гг.).

Тема ГБЦ № 96-3068 «Исследование аналитических возможностей оптических методов диагностики нефтепродуктов в сточных водах» (1996 – 1997 гг.).

Тема «Исследования фотоэлектрических процессов, влияющих на быстродействие кремниевых лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации», договор с БРФФИ № T02M-085 от 15 марта 2002 г., госрегистрация №200354 (2002 – 2004 гг.).

ГПНИ «Электроника» тема НИР «Разработка технологий и конструкций конкурентоспособных оптоэлектронных приборов на основе тонкопленочных соединений и кремния», задание № 1.27, госрегистрация №20064719 (2006 – 2010 гг.).

ГНТП «Микроэлектроника» тема НИР «Провести исследования и разработать базовые конструкции и методы формирования кремниевых лавинных фотодиодов для высокочувствительных оптоэлектронных систем», задание 1.2.7, госрегистрация № 20065070 (2006 – 2008 гг.).

Тема «Особенности использования полупроводниковых фотоприемников в сцинтилляционных счетчиках» (2010 г., х/д № 02-10).

Тема «Выбор оптимальных способов стабилизации сцинтилляционных устройств, регистрирующих непрерывное, кратковременное и импульсное гамма- и рентгеновское излучение» (2011 г., х/д № 4-11).

Тема «Высокоскоростные приемники информации для квантовых криптографических систем», договор с БРФФИ №Т11ОБ-043 от 15 марта 2011 г., госрегистрация №20113593 (2011 – 2013 гг.).

Тема «Квантовые информационные системы на лавинных фотоприемниках», договор с БРФФИ № Т13-018 от 15 марта 2011 г., госрегистрация №20131392 (2013 – 2015 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель работы состоит в разработке принципов построения аппаратуры для передачи, приема и обработки оптической информации импульсами, содержащими в среднем от одного до десяти фотонов, а также методов регистрации оптического излучения малой интенсивности в видимой и ближней инфракрасной областях спектра на основе создания физической теории фотоэлектрического преобразования в лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие взаимосвязанные задачи:

1) изучить физические процессы фотоэлектрического преобразования в лавинных фотоприемниках, определяющие эффективность регистрации оптического излучения малой интенсивности на квантовом уровне;

2) построить физические и математические модели одноквантовой регистрации излучения малой интенсивности лавинными фотоприемниками, учитывающие их спектральные, амплитудные и временные характеристики;

3) выяснить источники и механизмы формирования темновых импульсов и послеимпульсных явлений в лавинных фотоприемниках в режиме одноквантовой регистрации, а также определить влияние на эти механизмы типа структуры фотоприемников;

4) создать методики, алгоритмы и экспериментальную аппаратуру для измерения основных характеристик лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации;

5) предложить методы и алгоритмы выбора напряжения обратного смещения, порога амплитудной селекции выходных импульсов лавинного фотоприемника для получения максимальной чувствительности счетчика фотонов;

6) теоретически обосновать и экспериментально подтвердить основные принципы приема и обработки оптической информации счетчиками фотонов на основе лавинных фотоприемников, передаваемой оптическими импульсами, содержащими в среднем от одного до десяти фотонов;

7) разработать алгоритмы и аппаратуру для приема и передачи оптической информации импульсами, содержащими в среднем от одного до десяти фотонов.

Положения, выносимые на защиту

1. Физическая модель и закономерности преобразования фотонов оптического излучения в поток электрических импульсов лавинными фотоприемниками, работающими в режиме одноквантовой регистрации, учитывающие влияние на этот процесс количества каналов микроплазменного пробоя и геометрических размеров каналов, концентрации доноров и акцепторов в области $p-n$ -перехода, длины свободного пробега носителей заряда в области микроплазменного пробоя, а также таких факторов, как температура, интенсивность оптического излучения, напряжение обратного смещения лавинного фотоприемника, позволившие дать рекомендации по уменьшению, учету и компенсации влияния нестабильности этих факторов на основные характеристики фотоприемников, а также уменьшить погрешности, вносимые фотоприемником в измерение статистических параметров оптического излучения более чем на 30%.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что уменьшение температуры от 295 до 260 К и изменение разности между напряжением обратного смещения лавинного фотоприемника и напряжением пробоя его $p-n$ -перехода от 0,0 до 0,6 В приводит к росту математического ожидания и дисперсии амплитудного распределения одноквантовых и темновых импульсов фотоприемников за счет увеличения коэффициента умножения электронов и дырок в канале микроплазменного пробоя и появления дополнительных каналов микроплаз-

менного пробоя, при этом средняя амплитуда импульса имеет линейную зависимость от температуры и напряжения обратного смещения.

3. Физическая и математическая модели образования послеимпульсов в лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации оптического излучения, учитывающие влияние геометрических размеров и электрической емкости канала микроплазменного пробоя, тип и время жизни носителей электрических зарядов, захваченных на ловушечные уровни, и эффект мертвого времени на вероятность образования послеимпульсов, позволяющие получить статистические распределения числа одноквантовых и темновых импульсов фотоприемников с послеимпульсами и определить влияние вероятности образования послеимпульсов всех поколений на величину пороговой мощности фотоприемника и погрешности измерения квантовой эффективности регистрации, что позволило повысить точность определения квантовой эффективности регистрации (на 25 % для вероятности образования послеимпульсов 0,2).

4. Структура фотоприемника с гетеропереходом, содержащая подложку из монокристаллического кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см и нанесенными последовательно на ее фронтальную поверхность слоями нелегированного широкозонного полупроводника n -типа из оксида цинка и прозрачного проводящего покрытия n^+ -типа, представляющего собой легированный алюминием (2%) оксид цинка, а также два низкоомных металлических электрода, один из которых расположен на тыльной стороне полупроводниковой подложки, а второй является контактом к прозрачному проводящему слою. На основании этой структуры создан лавинный фотоприемник, работающий в режиме одноквантовой регистрации при комнатных температурах (от 290 до 300 К), имеющий малый темновой ток (менее 1 нА) и более чем в десять раз большую площадь фоточувствительной поверхности (7 мм²), по сравнению с известными лавинными фотоприемниками, реализующими режим одноквантовой регистрации в том же диапазоне температур.

5. Способы для измерения параметров оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с мощностью меньшей 10⁻¹² Вт лавинными фотоприемниками, работающими в режиме одноквантовой регистрации, которые учитывают ошибки измерения оптического излучения, связанные с наличием темновых импульсов, эффектом мертвого времени, послеимпульсами, наложением одноквантовых импульсов и шумов, что позволило повысить точность определения мощности и интенсивности оптического излучения более чем в 2 раза.

6. Принципы передачи, приема и обработки оптической информации, основанные на кодировании информации двумя состояниями и (или) количеством фотонов (в среднем не более 10), регистрации этой информации счетчиками фотонов на базе лавинных фотоприемников, позволяющие определять изменение состояния и (или) числа фотонов при передаче бита информации, обеспечивающие передачу конфиденциальной информации, обнаружение несанкционированных пользователей и дефектов волоконно-оптических линий связи.

Личный вклад соискателя

Изложенные в диссертации результаты отражают личный вклад автора. В работах, выполненных в соавторстве, автор принимал участие в выборе направлений исследований, обосновании и постановке конкретных научных задач, выработке методических путей их решения, выборе объектов исследования, разработке теоретических принципов, создании экспериментальных установок и проведении измерений, получении и интерпретации основных результатов, а также в создании новых способов и устройств. Все описанные эксперименты проводились автором лично или с его непосредственным участием.

Соавторами В.С. Малышевым, В.Б. Залеским, Т.Р. Леоновой, Н.Н. Корытко были разработаны технологии изготовления лавинных фотоприемников для одноквантовой регистрации с МРП и p^+n-v-n^+ структурами.

Соавтором В.А. Сизюком была построена модель протекания лавинного пробоя в кремниевых лавинных фотодиодах в режиме одноквантовой регистрации по методу Монте - Карло.

С.К. Комаровым и А.М. Тимофеевым оказана помощь при построении математических моделей каналов связи.

С соавторами работ И.Р. Гулаковым (научным консультантом), В.В. Апанасовичем, Е.В. Новиковым, О.К. Барановским и А.М. Тимофеевым были поставлены ряд научных задач.

Со всеми соавторами совместно проводился анализ и обсуждение полученных результатов.

Результаты, полученные другими соавторами, не вошли в диссертационную работу.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на научной конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, докторантов, аспирантов, студентов, посвященной 30-летию деятельно-

сти коллектива БГУИР, Минск, Беларусь, 1994; республиканской конференции молодых ученых по квантовой электронике, Минск, Беларусь, 1994 г.; Naukowatechniczna konferencja «Mechatronika-94», Warszawa, Poland, 1994; научно-технической конференции «Современные методы обработки сигналов в системах измерения, контроля, диагностики и управления», Минск, Беларусь, 1995 г.; IV Konferencja Naukowa «Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne», Szczyrk, Poland, 1996, V Scietific Conference «Optoelectronic and Electronic Sensor», Gdansk, Poland, 1998, 5th Internartion Conference «Mechatronics 2004», Warsaw, Poland, 2004; IV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов стран СНГ, Алматы, Казахстан, 2002 г.; XIX, XX, XXI и XXII Международных научно-технических конференциях по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, Россия, 2006, 2008, 2010, 2012 гг.; IV, V, VI, VII, VIII, X, XI, XIV, XV и XVI Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи», Минск, Беларусь, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011 гг.; I, II, III, IV, V, VII VIII, IX, X Белорусско-российских научно-технических конференциях «Технические средства защиты информации», Минск, Беларусь, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012 гг.; III и V Международных научно-технических конференциях «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», Новополоцк, Беларусь, 2004, 2008 гг.; XVI Научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик-2004»», Судак, Украина, 2004.

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 70 работ, в том числе 1 монография, 25 статей в научных реферируемых журналах и 32 тезиса и материалов докладов. Получено 12 патентов Республики Беларусь на изобретение. Результаты диссертационной работы также вошли в 10 отчетов о НИР.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий Республики Беларусь, составляет 30,5 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения и биб-

лиографического списка. Полный объем диссертации составляет 311 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 97 рисунков на 54 страницах, 9 таблиц на 3 страницах. Библиографический список занимает 27 страниц и состоит из 239 наименований использованных источников и списка собственных публикаций соискателя из 70 наименований на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена область исследований. В общей характеристике работы обоснована актуальность исследований, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор физических принципов одноквантовой регистрации оптического излучения лавинными фотоприемниками.

На основании анализа литературных источников было получено, что при рассмотрении вопросов формирования выходных импульсов одноквантовых лавинных фотоприемников не учтены особенности структуры этих фотоприемников, место образования электронно-дырочной пары в полупроводнике, длина волны регистрируемого оптического излучения, время восстановления электрического поля в области p - n -перехода, а также типы ловушечных уровней в области p - n -перехода и время жизни на этих уровнях захваченных носителей заряда.

Рассмотрены теоретические принципы умножения носителей заряда в p - n -переходе лавинного фотоприемника при одноквантовой регистрации оптического излучения. Определено, что неравномерное распределение электрического поля в запиорном слое p - n -перехода приводит к развитию ударной ионизации лишь в активной части (микроплазме) этого перехода, где напряженность электрического поля максимальна. Остальная часть запиорного слоя играет роль балластного сопротивления, снижающего по мере роста электрического тока напряженность поля и интенсивность ударной ионизации. Во время развития лавинного пробоя это балластное сопротивление составляет основную часть дифференциального сопротивления p - n -перехода. Величина этого сопротивления зависит от распределения ионов примеси в области p - n -перехода, определяющего изменение электрического поля вдоль запиорного слоя на пороге лавинного пробоя, а также от параметров, характеризующих генерацию и движение носителей заряда в запиорном слое при ударной ионизации.

На основании рассмотренных теоретических принципов умножения носителей заряда удалось получить условие для плотности тока i , протекающего через p - n -переход во время микроплазменного пробоя. Плотность тока зависит от ширины области умножения ω , типа полупроводника, разности концентраций акцепторных и донорных ионов примеси в полупроводнике N_c , дрейфовой скоростью носителя заряда v :

$$eN_c v - \varepsilon_0 v \frac{E_{i\partial}}{\omega} < i \quad \text{или} \quad eN_c v - 2\varepsilon_0 v \frac{U_{i\partial}}{\omega^2} < i, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды, e – заряд электрона, U_{np} – напряжение пробоя p - n -перехода, E_{np} – напряженность электрического поля при пробое p - n -перехода.

Аналитический обзор литературы показал, что при рассмотрении вопроса умножения носителей заряда в лавинных фотоприемниках, работающих в режиме одноквантовой регистрации, не учитывались пространственное распределение электрического поля в p - n -переходе, геометрические размеры микроплазменных каналов, а также процессы, приводящие к образованию носителей зарядов в области микроплазменного пробоя за исключением ударной ионизации.

По литературным источникам выполнен анализ погрешностей, вносимых фотоприемниками при одноквантовой регистрации в измерение статистических параметров оптического излучения. Получено, что к появлению погрешностей приводят: собственные флуктуации процесса детектирования, возникающие вследствие случайного характера образования фотоносителей заряда, которые наблюдаются даже тогда, когда интенсивность падающего на детектор оптического излучения неизменна; флуктуации интенсивности падающего на фотоприемник излучения; мертвое время и послеимпульсы.

Выполненный обзор работ по изучению статистики фотонов и одноквантовых импульсов показал, что при рассмотрении статистического распределения одноквантовых импульсов не учитывается влияние послеимпульсов на эту статистику. Статистические распределения, применяемые для описания статистики одноквантовых импульсов фотоприемников с постоянным мертвым временем, при некоторых значениях среднего числа одноквантовых импульсов приводят к вероятностям появления одноквантового импульса $P(N_c) < 0$ и $P(N_c) > 1$. Поскольку вероятность появления какого-либо события не может быть больше единицы, а

также быть отрицательной величиной, то эти выражения не всегда могут быть использованы для описания статистики одноквантовых импульсов.

На основании проведенного аналитического обзора дано обоснование выбора направления исследования.

Во второй главе представлено описание объекта исследования, способов, устройств и экспериментальных установок, применяемых при проведении исследований, в том числе и разработанных автором.

Разработано новое устройство одноквантовой регистрации оптического излучения на базе лавинного фотоприемника, включенного по схеме со стробированием прямоугольными импульсами, которое, в отличие от ранее используемых, позволяет осуществлять стабилизацию рабочего напряжения питания и исключать темновые импульсы из результатов измерения в автоматическом режиме. Использование дифференциального усилителя устраняет помехи, связанные с поступлением импульсов стробирования на вход амплитудного дискриминатора. Все это дало возможность повысить точность измерения интенсивности стационарных оптических потоков более чем в 2 раза. Также это устройство позволяет использовать различные типы лавинных фотоприемников без переналадки схемы.

Впервые предложен способ определения мертвого времени фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации, основанный на сравнении интенсивностей оптического излучения источника с использованием ослабляющего нейтрального светофильтра и без него, позволяющего определить не только длительность мертвого времени, но и его тип. Использование этого способа повышает точность измерения длительности мертвого времени, по сравнению с существующими способами.

Впервые предложен способ определения мертвого времени лавинного фотоприемника, работающего в режиме одноквантовой регистрации, который основан на сравнении скоростей счета темновых импульсов при включении фотоприемника по схемам пассивного и активного гашения лавины. Способ позволяет упростить измерения длительности мертвого времени за счет исключения дополнительного внешнего источника оптического излучения и набора калиброванных нейтральных светофильтров.

Разработан способ определения динамического диапазона фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации, основанный на использовании источника оптического излучения со статистикой фотонов, подчиняющейся распределению Пуассона, а также на учете погрешности, вносимой в отклонение от линейной зависимости между интенсив-

ностью оптического излучения и скоростью счета одноквантовых импульсов мертвым временем фотоприемника. Способ позволяет учесть тип мертвого времени фотоприемника и повысить точность измерения динамического диапазона в 2 раза, по сравнению с ранее известными способами.

Создано устройство измерения скорости счета одноквантовых импульсов, реализующее новый способ определения числа одноквантовых импульсов за некоторый промежуток времени на основании определения вероятности нулевого события появления импульса на выходе фотоприемника. Это устройство позволяет повысить точность измерения скорости счета одноквантовых импульсов, определяет вероятность образования послеимпульсов.

Впервые предложен способ измерения временных характеристик фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации, основанный на измерении статистического распределения временных интервалов между соседними импульсами и сравнении этого распределения с экспоненциальным распределением, рассчитанным теоретически. Способ позволяет, в отличие от существующих, определить в комплексе длительность мертвого времени фотоприемника и его тип, вероятность образования послеимпульсов и время, в течение которого они наблюдаются.

Впервые предложен способ определения мертвого времени фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации, который позволяет на основании измеренного числа одноквантовых импульсов на выходе фотоприемника, общего количества временных интервалов измерения и числа временных интервалов измерения, на которых не зарегистрировано ни одного одноквантового импульса, определить мертвое время фотоприемника и вероятность образования послеимпульсов. Этот способ позволяет повысить точность измерения интенсивности оптического излучения за счет устранения погрешностей, вносимых эффектом мертвого времени и темновыми импульсами.

Разработаны способ измерения статистического распределения одноквантовых импульсов фотоприемника и устройство его реализующее. Сущность способа заключается в измерении статистических распределений темновых импульсов и смеси темновых и одноквантовых импульсов и вычислении на основании полученных распределений статистического распределения одноквантовых импульсов. Предлагаемый способ позволяет повысить точность измерения статистического распределения за счет устранения погрешности, вносимой темновыми импульсами.

Представлены достаточно простые в реализации схемы корреляторов для исследования потока выходных импульсов фотоприемника: реального времени, позволяющего измерять усеченную корреляционную функцию; с разделением во времени операций сохранения информации и последующей ее обработкой.

Коррелятор реального времени выполняет измерения корреляционных функций с максимальным количеством точек – 8, при этом ширина канала может изменяться от 0,4 до 3,2 мкс, а длительность интервала корреляции варьируется от 3,2 до 25,6 мкс.

Коррелятор с разделением во времени операций сохранения информации и последующей ее обработкой позволяет изменять интервалы выборки в пределах от 1 мкс до 100 мс; осуществлять максимальную входную загрузку 20 МГц. Число каналов коррелятора может изменяться от 1024 до 4096, интервал измерения от 1 мс до 400 с.

Рассмотрены применяемые в настоящее время источники одиночных фотонов, которые можно разделить на три основные группы:

- 1) источники одиночных фотонов, получаемые ослаблением оптического излучения;
- 2) источники одиночных фотонов, получаемые при помощи генерации коррелированных пар фотонов;
- 3) одиночные квантовые системы (атомы, молекулы, квантовые точки).

Дано обоснование выбора источника одиночных фотонов, основанного на ослаблении оптического излучения. Достоинством таких источников является простота реализации, они не требуют использования мощного лазерного излучения, низких температур, а также позволяют обеспечить направленность оптического излучения. Поэтому при проведении экспериментов использовались эти источники одиночных фотонов.

В третьей главе выполнено исследование фотоэлектрических явлений и процессов, вносящих определяющий вклад в формирование квантовой эффективности регистрации оптического излучения лавинных фотоприемников.

На основании выполненного анализа физических процессов, протекающих в лавинных фотоприемниках в режиме одноквантовой регистрации, было установлено, что квантовая эффективность регистрации определяется вероятностью превышения одноквантовыми импульсами порога срабатывания регистратора, величиной квантового выхода фотоприемника, вероятностью образования микроплазмы фотогенерированным носителем заряда.

Показано, что при правильном выборе порога регистрации и напряжения обратного смещения лавинного фотоприемника удастся получить вероятность превышения амплитудой микроплазменного импульса порога регистрации $P_{пор} \approx 0,95$. На величину квантового выхода влияют такие процессы, как отражение оптического излучения от границы

воздух–фотоприемник, поглощение излучения в фотоприемнике и рекомбинация носителей заряда. Установлено, что вероятность образования микроплазмы фотогенерированным носителем заряда определяется вероятностью попадания носителя заряда в область микроплазменного пробоя и возможностью создания им электронно-дырочной пары.

Впервые получена формула для квантовой эффективности регистрации η , позволяющая учитывать геометрические размеры области микроплазменного пробоя, длину свободного пробега носителя заряда в области микроплазменного пробоя λ_c , а также коэффициент поглощения оптического излучения веществом β , френелевское отражение K , величину порога регистрации, напряженность электрического поля E :

$$\eta = (1 - \hat{E})(1 - \exp(-\beta w)) \frac{S_{ie} P_{i\delta}}{S} \exp\left(-\frac{3W_\delta W_{i\delta}}{(\hat{a}E\lambda_c)^2}\right), \quad (2)$$

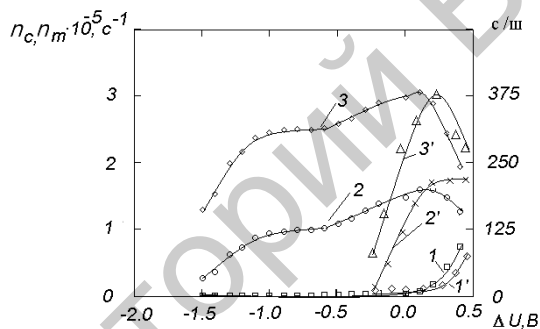
где $S_{мк}$ – площадь микроплазменного пробоя, S – площадь p - n -перехода, w – толщина области пространственного заряда, W_ϕ – энергия фонона, $W_{пор}$ – энергия, необходимая для образования электронно-дырочной пары.

Впервые разработана физическая модель образования темновых импульсов в лавинном фотоприемнике в режиме одноквантовой регистрации, которая учитывает поступление носителей заряда из квазинейтральной области, прилегающей к каналу микроплазменного пробоя вследствие диффузии, термогенерацию носителей в канале микроплазмы, туннелирование носителей в микроплазменный канал. Модель позволяет учитывать, какой прямозонный или непрямоzonный полупроводник использован для изготовления фотоприемника.

На основании этой модели получено, что скорость счета темновых импульсов для всех типов лавинных фотоприемников зависит от температуры, напряжения обратного смещения, геометрических размеров микроплазменного канала, причем с увеличением всех этих величин растет скорость счета темновых импульсов.

Впервые показана возможность реализации одноквантовой регистрации на кремниевых лавинных фотоприемниках с площадью фоточувствительной поверхности 7 мм^2 при комнатных температурах. Выполненное сравнение отношений сигнал/шум в режиме одноквантовой регистрации и токовом режиме работы этих фотоприемников показало, что при одинаковых условиях эксперимента для одноквантовой регистрации отношение сигнал/шум приблизительно в 10 раз больше, чем в токовом режиме. При этом фотоприемники демонстрировали характеристики, сравнимые с серийно выпускаемыми кремниевыми лавинными фотодиодами ФД-115Л, имеющими площадь фоточувствительной поверхности $0,03 \text{ мм}^2$.

Выполнены исследования характеристик кремниевых лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации, включенных по схеме пассивного гашения лавины (рисунок 1).



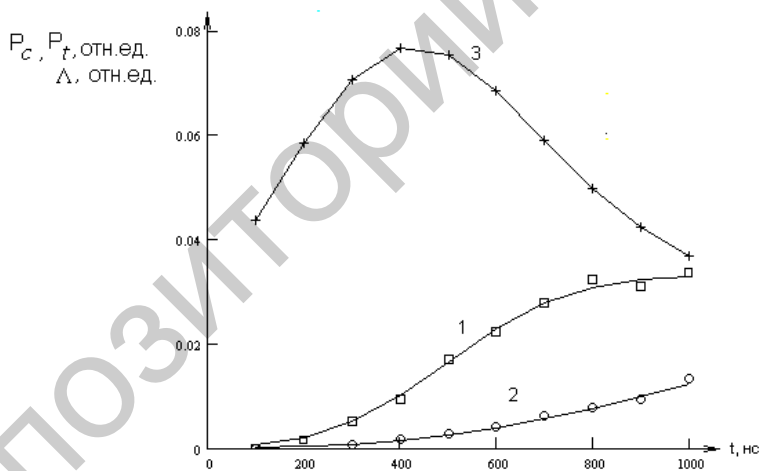
1,1' – темновые импульсы; 2,2' – одноквантовых импульсов;
3,3' – отношение сигнал/шум (1,2,3 – лавинный фотоприемник
с площадью фоточувствительной поверхности 7 мм^2 , 1',2',3' – ФД-115Л)

Рисунок 1 – Зависимости скорости счета темновых импульсов n_m , скорости счета одноквантовых импульсов n_c и отношения сигнал/шум $c/ш$ от величины перенапряжения ЛФП

Получено, что зависимости скоростей счета темновых и одноквантовых импульсов, отношения сигнал/шум от напряжения питания имеют одинаковый вид для всех типов лавинных фотоприемников. Поскольку для различных ЛФП напряжения пробоя U_{np} различны, то при сравнении зависимостей их характеристик от напряжения питания U_{nut} использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U_{nut} - U_{np}$.

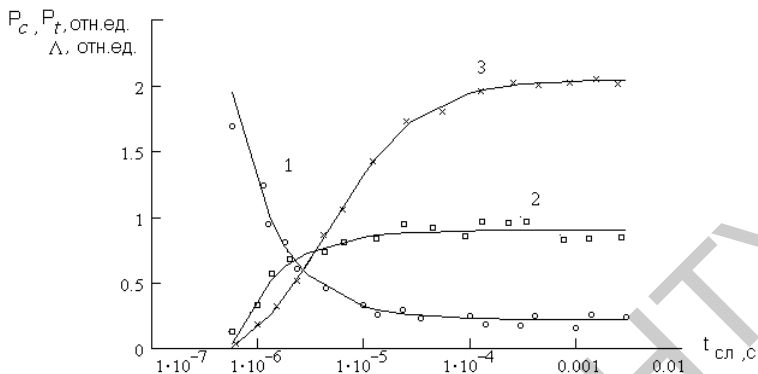
С увеличением перенапряжения растет скорость счета темновых импульсов. Скорость счета одноквантовых импульсов при увеличении перенапряжения вначале растет, а затем наблюдается насыщение. Зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения имеет максимум, который наблюдается при напряжениях питания, близких к напряжению пробоя $p-n$ -перехода лавинного фотоприемника. На основании этой зависимости удалось провести оптимизацию напряжения питания лавинного фотоприемника с целью достижения максимальной чувствительности. В качестве критерия оптимизации выбиралось отношение сигнал/шум.

Проведенные исследования промышленных кремниевых лавинных фотодиодов ФД-115Л в режиме одноквантовой регистрации, включенных по схеме со стробированием их прямоугольными импульсами, показали, что максимальное значение отношения правдоподобия Λ достигается при длительности импульса стробирования 0,4 мкс и периоде следования импульсов стробирования t_{cl} большем или равном 10^{-4} с (см. рисунки 2 и 3).



1 – одноквантовые импульсы; 2 – темновые импульсы;
3 – отношение правдоподобия

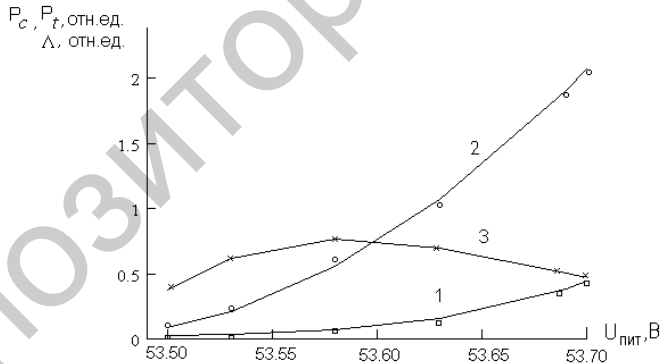
Рисунок 2 — Зависимости вероятностей регистрации темновых импульсов P_t , одноквантовых импульсов P_c и отношения правдоподобия лавинного фотоприемника от длительности импульса стробирования



1 – для темновых импульсов; 2 – для одноквантовых импульсов; 3 – отношение правдоподобия (длительность импульса стробирования 0,4 мкс)

Рисунок 3 – Зависимости вероятностей регистрации темновых P_t и одноквантовых импульсов P_c от периода следования импульсов стробирования

Показано, что амплитуду импульсов стробирования необходимо выбирать 0,4 В потому, что в этом случае обеспечивается максимальная чувствительность лавинного фотоприемника (рисунок 4).



1 – темновые импульсы; 2 – одноквантовые импульсы;
3 – отношение правдоподобия; $U_{np} = 53,70$ В

Рисунок 4 – Зависимости вероятностей регистрации темновых импульсов P_t , одноквантовых импульсов P_c и отношения правдоподобия от постоянного напряжения питания лавинного фотоприемника

Выполненное сравнение схем включения лавинных фотоприемников для реализации режима одноквантовой регистрации (пассивного гашения и активного гашения лавины) показало, что наибольшее быстродействие удалось получить для схемы активного гашения лавины (рисунок 5).

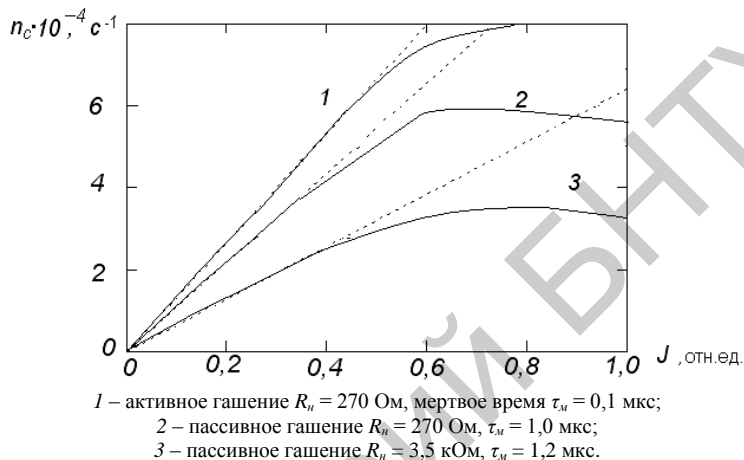


Рисунок 5 – Зависимость скорости счета одноквантовых импульсов от интенсивности оптического излучения для различных схем включения лавинных фотоприемников

В схеме активного гашения лавины, по сравнению со схемой пассивного гашения, увеличиваются длина линейного участка зависимости скорости счета одноквантовых импульсов n_c от интенсивности оптического излучения J и угол его наклона к оси, вдоль которой отложена интенсивность. Это связано с тем, что при активном гашении происходит уменьшение длительности мертвого времени фотоприемника и увеличение квантовой эффективности регистрации. При одинаковой скорости счета одноквантовых импульсов при активном гашении через лавинный фотоприемник протекает меньший ток, по сравнению с пассивным гашением. Это приводит к меньшему разогреву фотоприемника при протекании в нем электронной лавины и улучшению стабильности его работы.

Проведенные исследования влияния изменения температуры на характеристики лавинных фотоприемников при одноквантовой регистрации оптического излучения показали, что с изменением температу-

ры напряжение пробоя p - n -перехода фотоприемника меняется по линейному закону. Получено, что наиболее сильную зависимость напряжения пробоя от температуры имеют лавинные фотоприемники с наибольшей концентрацией примесей в слаболегированной области. С понижением температуры увеличивается последовательное сопротивление микроплазменного пробоя. Это связано с тем, что оно зависит от удельного сопротивления полупроводника, которое имеет тенденцию к увеличению при охлаждении. С уменьшением температуры понижается скорость счета темновых импульсов, что обусловлено уменьшением числа термогенерированных носителей заряда в фотоприемнике. Также понижение температуры и повышение напряжения обратного смещения приводят к росту квантовой эффективности регистрации, что связано с увеличением объема микроплазменного пробоя за счет увеличения толщины обедненного слоя при понижении температуры. Уменьшение температуры приводит к увеличению отношения сигнал/шум.

Квантовая эффективность регистрации для лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации зависит от области засветки фоточувствительной поверхности (рисунок 6).

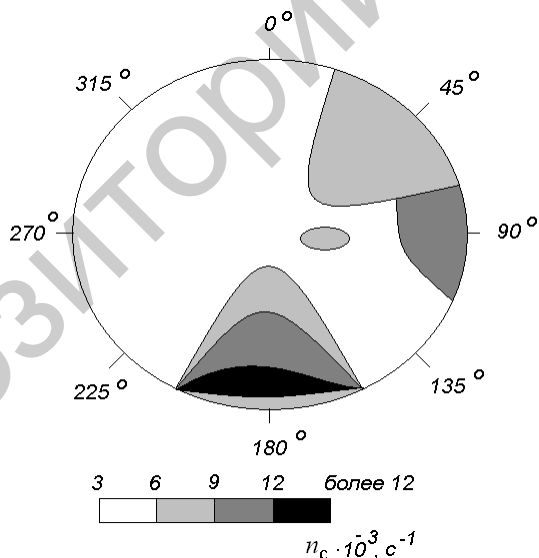


Рисунок 6 – Диаграмма зонной чувствительности лавинного фотоприемника с МРП-структурой

Для фотоприемников с площадью фоточувствительной поверхности, большей или равной 7 мм^2 , отклонение квантовой эффективности регистрации для различных точек засветки фоточувствительной поверхности от ее среднего значения составляет 1,2–2, что лучше чем для фотоэлектронных умножителей, у которых такое отклонение достигает 5–10.

В четвертой главе выполнены исследования фотоэлектрических процессов, влияющих на формирование амплитуды выходных импульсов лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации.

Проведен анализ физических процессов, приводящих к образованию выбросов на выходе ЛФП, а также факторов, влияющих на коэффициент умножения носителей заряда в микроплазменном канале.

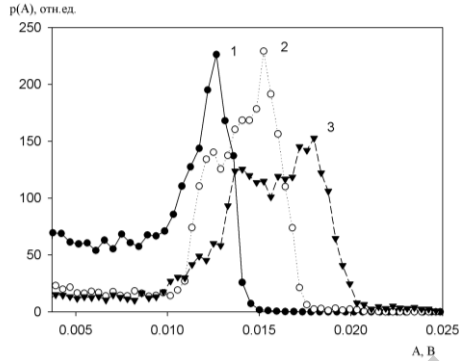
Разработана физическая модель формирования импульсов на выходе лавинного фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации. Отличием этой модели от других является то, что она позволяет учесть выбросы, создаваемые тепловыми и дробовыми шумами, в амплитудном распределении импульсов лавинного фотоприемника, а также наличие нескольких каналов микроплазменного пробоя p - n -перехода. На основании этой модели получено выражение для описания амплитудного распределения импульсов лавинного фотоприемника:

$$p(A) = \left(1 - \sum_{i=1}^{m_{\text{мк}}} P I_i\right) p_a(A) + \sum_{i=1}^{m_{\text{мк}}} P I_i p_{\text{иi}}(A), \quad (3)$$

где $P I_i$ – вероятность попадания носителя заряда в i -ый микроплазменный канал, $p_{\text{мi}}(A)$ – амплитудное распределение импульсов i -ого микроплазменного канала, $p_a(A)$ – амплитудное распределение выбросов, $m_{\text{мк}}$ – количество микроплазменных каналов.

Это позволило объяснить наличие нескольких пиков и экспоненциальной ветви в амплитудном распределении выходных импульсов ЛФП (рисунок 7).

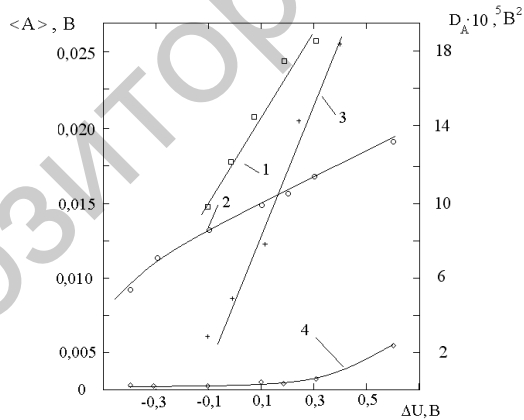
Выполнены исследования процессов, протекающих в лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации, влияющих на формирование амплитуды темновых и одноквантовых импульсов. Было получено, что увеличение перенапряжения приводит к уменьшению низкоамплитудной части амплитудного распределения и уширению его пиков. Определено, что такое изменение связано с тем, что с ростом перенапряжения для все большего числа микроплазменных каналов



1 – $\Delta U = -0,3$ В; 2 – $\Delta U = -0,1$ В; 3 – $\Delta U = 0,1$ В; А – амплитуда импульса

Рисунок 7 – Амплитудное распределение темновых импульсов лавинных фотоприемников с МРП структурой при разных перенапряжениях

величина напряжения обратного смещения становится большей их напряжения пробоя. Повышение перенапряжения лавинного фотоприемника приводит к росту средней амплитуды импульса и увеличению дисперсии амплитудного распределения (рисунок 8).



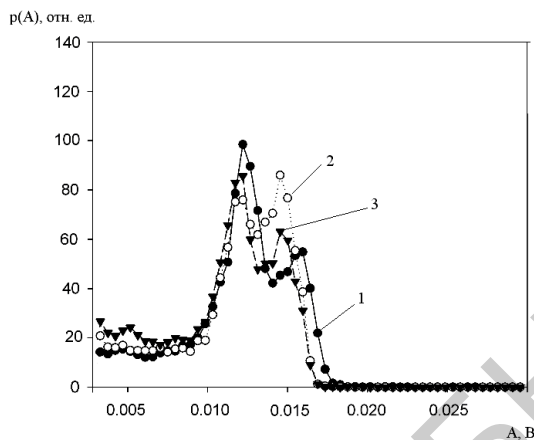
1, 3 – средняя амплитуда и дисперсия для ФД-115Л1 соответственно;
2, 4 – средняя амплитуда и дисперсия для МРП-фотоприемников соответственно

Рисунок 8 – Зависимости средней амплитуды импульса $\langle A \rangle$ и ее дисперсии D_A от перенапряжения

Амплитудные распределения для темновых и одноквантовых импульсов при скоростях счета, для которых не проявляется эффект мертвого времени, практически одинаковы. Скорость счета импульсов лавинного фотоприемника при этом не превышала $3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, небольшая интенсивность засветки (до 10^{-11} Вт/см^2) не влияет на амплитуду импульсов. При повышении интенсивности регистрируемого оптического излучения начинает проявляться эффект мертвого времени и происходит изменение амплитудного распределения. Наиболее заметное проявление данного эффекта наблюдалось при скоростях счета, больших $3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Мертвое время фотоприемника составляло примерно 10^{-6} с . Изменение амплитудного распределения характеризовалось ростом вероятности образования импульсов с низкой амплитудой.

На основании проведенных исследований зависимости амплитуды темновых и одноквантовых импульсов от температуры установлено, что увеличение температуры приводит к уменьшению амплитуды импульсов. Средняя амплитуда импульса имеет линейную зависимость от температуры. Величина отношения изменения средней амплитуды импульса к изменению температуры определяется типом структуры лавинного фотоприемника. Она имеет наибольшее значение для структур с наиболее сильной зависимостью напряжения пробоя $p-n$ -перехода от температуры. Понижение температуры может приводить к изменению формы амплитудного распределения, связанного с появлением дополнительных пиков. Это объясняется увеличением коэффициента умножения носителей заряда в канале микроплазменного пробоя и появлением дополнительных каналов микроплазменного пробоя при уменьшении температуры.

Установлено, что на вид амплитудного распределения и среднюю амплитуду импульса влияет место образования фотогенерированного носителя заряда. Если место образования носителей заряда совпадает с областью микроплазменного пробоя, это приводит к росту вероятности появления импульсов с определенной амплитудой, соответствующей этому микроплазменному каналу. При этом происходит изменение формы амплитудного распределения, связанного с ростом одного из пиков амплитудного распределения, по сравнению с амплитудным распределением темновых импульсов или импульсов, полученных при равномерной подсветке всей фоточувствительной поверхности (рисунок 9).



1 – темновые импульсы; 2 и 3 – одноквантовые и темновые импульсы при засветке различных областей фоточувствительной поверхности; А – амплитуда импульса

Рисунок 9 – Амплитудные распределения выходных импульсов при $\Delta U = 0,0$ В для разных областей засветки фоточувствительной поверхности ЛФП

Впервые предложен способ автоматической стабилизации напряжения питания лавинного фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации без потери измерительного времени на калибровочный цикл. Способ позволяет устранить погрешность измерений интенсивности оптического потока, обусловленную нестабильностями напряжения питания. Сущность этого способа заключается в контроле вероятности превышения амплитудой темновых или одноквантовых импульсов некоторого заданного порога амплитудной селекции. Создано устройство, реализующее этот способ.

Разработано двухпороговое устройство, позволяющее повысить точность регистрации интенсивности оптического излучения за счет устранения ошибки измерения, связанной с наложением импульсов друг на друга и шумов на импульсы, а также упростить измерения, позволяя получить информацию о количестве одноквантовых импульсов сразу на выходе устройства без дополнительных математических вычислений.

В пятой главе представлены исследования процессов и механизмов образования послеимпульсных явлений в лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации.

Выполнен анализ фотоэлектрических процессов, которые могут приводить к образованию послеимпульсов. К таким процессам относятся: взаимодействие микроплазменных пробоев; захват свободных носителей заряда на долгоживущие ловушечные уровни с последующей их реэмиссией электронов в зону проводимости, а дырок в валентную зону. Установлено, что взаимодействие микроплазменных пробоев может осуществляться посредством: эмиссии носителей заряда из соседних каналов микроплазменного пробоя; поступления носителей заряда из нейтральных базовых областей; разогрева области, окружающей канал микроплазменного пробоя; излучения света во время микроплазменного пробоя. Захват носителей заряда с последующей их реэмиссией может происходить через ловушечные уровни, относящиеся к центрам прилипания, которые делятся на кулоновские центры притяжения, нейтральные и кулоновские центры отталкивания.

Оценка времени протекания этих процессов показала, что основной вклад в образование послеимпульсов для лавинных фотоприемников с мертвым временем, большим 0,1 мкс, вносит захват носителей заряда на кулоновские центры отталкивания с последующей их реэмиссией.

Впервые разработана физическая модель образования послеимпульсов на основе формализации процессов захвата свободных носителей заряда на ловушечные уровни с последующей их реэмиссией с этих уровней в зону проводимости электронов и в валентную зону дырок. Эта модель учитывает влияние на процесс образования послеимпульсов внутренних свойств структуры лавинного фотоприемника таких, как площадь микроплазменного пробоя и его емкость, количество ловушечных уровней в канале микроплазменного пробоя и эффективных сечений захвата электронов и дырок ловушечными уровнями. Она определяет влияние на вероятность образования послеимпульсов таких внешних факторов, как напряжение обратного смещения лавинного фотоприемника и температуры окружающей среды. Показывает, что к увеличению образования послеимпульсов приводит понижение температуры и повышение напряжения обратного смещения лавинного фотоприемника. Модель учитывает влияние на время образования послеимпульсов типа носителя заряда, захваченного на ловушечный уровень, а также процесса восстановления электрического поля в микроплазменном канале после его пробоя.

Получена зависимость вероятности образования послеимпульсов Z от времени:

$$Z = \frac{P_0 P_e C_{i\bar{e}} \Delta U}{e} \frac{1}{S_{i\bar{e}}} \left[P_p P_{pr} \sum_{i=1}^{N_{d\bar{e}}} \sigma_{pi} \left(1 - \frac{1}{1 + g^{-1} \exp \left[\frac{W_{pi} - W_F}{k_d T} \right]} \right) \exp \left(- (t + \tau_i) / \tau_{ei} \right) + \right. \\ \left. + P_e P_{er} \sum_{i=1}^{N_{p\bar{e}}} \sigma_{ei} \left(1 - \frac{1}{1 + g^{-1} \exp \left[\frac{W_{ei} - W_F}{k_d T} \right]} \right) \exp \left(- (t + \tau_i) / \tau_{ei} \right) \right], \quad (4)$$

где P_{er} и P_{pr} – вероятность реэмиссии электрона и дырки с ловушечного уровня в зону проводимости или валентную соответственно, σ_{ei} и σ_{pi} – эффективное сечение захвата электронов и дырок на i -ый ловушечный уровень соответственно, W_{ei} и W_{pi} – энергия i -го ловушечного уровня захвата электронов и дырок соответственно, τ_{ei} и τ_{oi} – время жизни электрона и дырки на i -ом ловушечном уровне, τ_m – длительность мертвого времени, t – время, T – температура, k_d – постоянная Больцмана, W_F – энергия Ферми, C_{mk} – емкость микроплазменного канала, ΔU – перенапряжение, N_{el} и N_{pl} – концентрация ловушек, на которые происходит захват электронов и дырок соответственно, P_0 – вероятность возникновения темновых или одноквантовых импульсов в начальный момент времени t_0 , P_u – вероятность того, что на промежутке времени от t_0 до t не произойдет образование темнового или одноквантового импульса.

Предложена математическая модель фотоприемника в режиме одноквантовой регистрации с послеимпульсами, которая, в отличие от ранее существующих моделей, позволяет учитывать послеимпульсы всех поколений. В результате чего получены статистическое распределение числа одноквантовых и темновых импульсов лавинного фотоприемника с послеимпульсами

$$\begin{cases} P(0) = 1 - \eta, m = 0 \\ P(m) = \eta Z^{m-1} (1 - Z), m > 0; \end{cases} \quad (5)$$

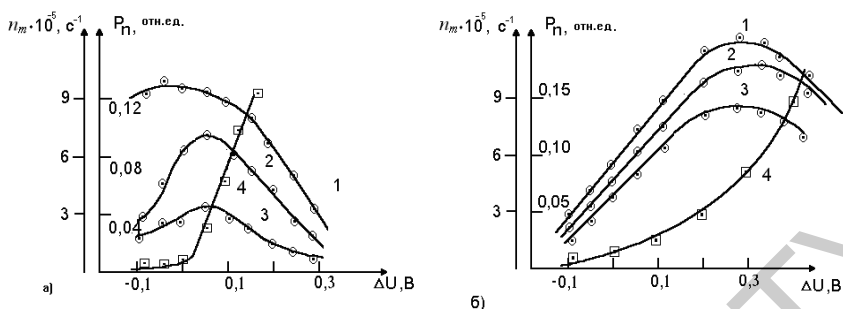
выражение для определения отношения сигнал/шум, которое учитывает дисперсию падающих на фотоприемник фотонов оптического излучения D_ϕ , дисперсию темновых импульсов D_T , а также вероятность образования послеимпульсов

$$\bar{n}/\phi = \frac{(1-Z) \langle N_c \rangle}{\sqrt{\frac{Z+(1-\eta)}{(1-Z)} \langle N_c \rangle + \frac{\eta^2}{(1-Z)^2} D_\delta + D_\delta}}, \quad (6)$$

где $\langle N_c \rangle$ - среднее число одноквантовых импульсов.

По результатам моделирования определено, что ограничиться послеимпульсами только первого поколения можно при значениях вероятности образования послеимпульсов, меньших 0,05. Получено, что с ростом вероятности образования послеимпульсов увеличивается дисперсия одноквантовых импульсов фотоприемника, по сравнению с их средним значением. При среднем числе одноквантовых импульсов, меньшем 500, и вероятностях образования послеимпульсов, меньших 0,1, послеимпульсы можно не учитывать при определении отношения сигнал/шум.

Выполнены исследования факторов, влияющих на образование послеимпульсов в лавинных фотоприемниках, работающих в режиме одноквантовой регистрации. Определено, что вероятность образования послеимпульсов P_n может изменяться в пределах от 0,01 до 0,2 в зависимости от условий эксплуатации (напряжения обратного смещения, температуры, длины волны и интенсивности регистрируемого оптического излучения) и различна для разных экземпляров фотоприемника, приводящих к образованию ловушечных уровней. Полученный рост вероятности образования послеимпульсов с увеличением длины волны оптического излучения свидетельствует о том, что вероятность образования послеимпульсов электронами больше, чем дырками. Это связано с тем, что концентрация ловушечных уровней в области образования дырок меньше, чем в области образования электронов. Установлено, что понижение температуры приводит к увеличению вероятности образования послеимпульсов за счет увеличения времени жизни на ловушечных уровнях, захваченных носителей заряда. При увеличении перенапряжения вначале наблюдается рост вероятности образования послеимпульсов, а затем ее уменьшение. Уменьшение вероятности образования соответствует таким напряжениям, для которых наблюдалась достаточно высокая скорость счета темновых импульсов $n_m \geq 10^5 \text{c}^{-1}$, т.е. для которых проявлялся эффект мертвого времени (рисунок 10).



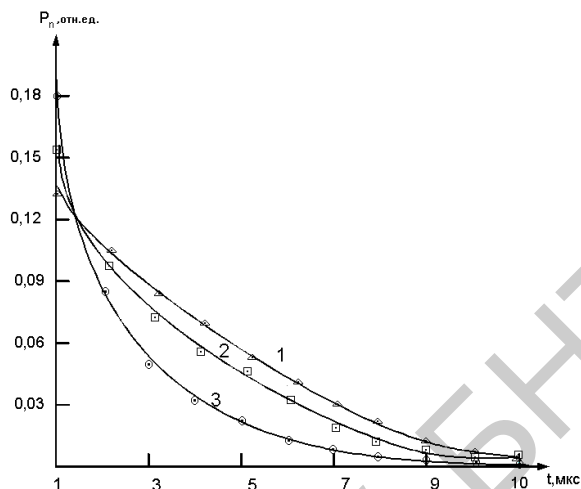
1 – длина волны оптического излучения 0,93 мкм; 2 – 0,68 мкм;
3 – 0,53 мкм; 4 – скорость счета импульсов;
а) $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; б) $T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 10 – Зависимость вероятности образования послеимпульсов от величины перенапряжения лавинного фотодиода ФД-115Л для различных длин волн оптического излучения

На основании анализа кинетики затухания послеимпульсов получено, что время жизни электронов на ловушечных уровнях меньше времени жизни дырок, так как с уменьшением длины волны регистрируемого излучения увеличивается время затухания послеимпульсов. Также определено, что время образования послеимпульсов t для кремниевых лавинных фотоприемников при комнатной температуре не превышает 10 мкс для темновых и одноквантовых импульсов (рисунок 11).

Впервые предложен способ определения квантовой эффективности регистрации фотоприемника, позволяющий учитывать погрешности, вносимые послеимпульсами и темновыми импульсами, и устройство, реализующее этот способ. Сущность способа заключается в использовании двух источников оптического излучения для подсветки фотоприемника. Первый источник с пуассоновской статистикой фотонов, а второй источник со статистикой фотонов, для которой дисперсия фотонов больше пуассоновской в $k > 1$ раз, но с той же интенсивностью, что и первый. Первый источник используется для определения вероятности образования послеимпульсов, а второй – для определения квантовой эффективности регистрации.

Разработанное устройство позволяет повысить точность измерения квантовой эффективности регистрации фотоприемника.



1 – длина волны оптического излучения 0,53 мкм, 2 – 0,68 мкм, 3 – 0,93 мкм

Рисунок 11 – Кинетика затухания послепульсов в лавинном фотодиоде ФД-115Л при одноквантовой регистрации

В шестой главе выполнены исследования временных и статистических распределений импульсов лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации.

Проведенный анализ литературных источников показывает, что быстродействие лавинных фотоприемников зависит от следующих параметров: времени пролета носителей заряда через область пространственного заряда; постоянной времени фотоприемника, определяемой емкостью микроплазменных каналов p - n -перехода и их последовательным сопротивлением; времени диффузии носителей заряда через необремененный слой лавинного фотоприемника; времени, затрачиваемого на процесс умножения носителей заряда в канале микроплазменного пробоя. Получено, что определяющий вклад в быстродействие вносят время умножения носителей заряда в канале микроплазменного пробоя и постоянная времени фотоприемника. Показано, что при коэффициенте умножения электрического заряда, большего 10^6 , величина времени умножения носителей заряда в канале микроплазменного пробоя преобладает над постоянной времени. При меньших значениях коэффициента умножения преобладает постоянная времени.

Определено время пролета носителей заряда через область пространственного заряда для исследуемых типов лавинных фотоприемников, оно составило: 150-200 пс – для МРП структуры; 300-500 пс – для $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ структуры и фотодиодов ФД -115Л. Изменение температуры от 263 до 293 К приводит к незначительному увеличению времени пролета через область пространственного заряда. Проведенные исследования показали, что время пролета носителей заряда зависит от величины перенапряжения ЛФП. С увеличением этой величины растет напряженность электрического поля в области пространственного заряда, что и приводит к уменьшению времени пролета.

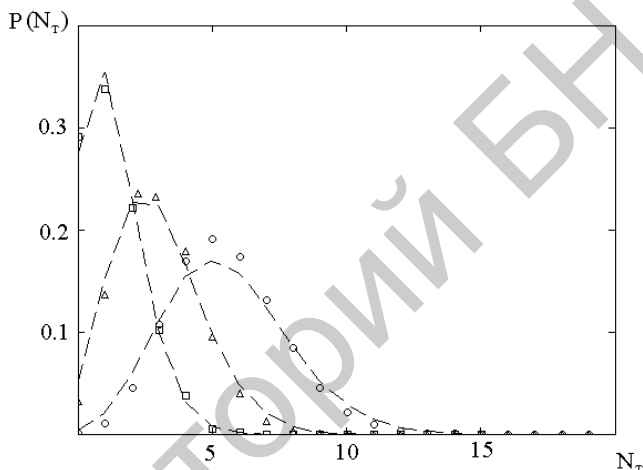
Выполнены исследования статистического распределения времени отклика ЛФП на одноквантовый сигнал (аппаратурной функции). Показана необходимость оптимизации напряжения обратного смещения и порога амплитудной селекции с целью получения минимальной длительности аппаратурной функции лавинных фотоприемников при одноквантовой регистрации. Получено, что минимальная длительность аппаратурной функции на полувысоте для лавинного фотодиода ФД-115Л составляла 450 пс, а для фотоприемника со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ – 600 пс, что меньше длительности аппаратурной функции временного фотоэлектронного умножителя ЭЛУ-128 (1 нс). Это позволяет утверждать, что использование лавинных фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации, для измерения кинетики затухания флуоресценции, определения повреждений оптических линий связи и в других приложениях обеспечит улучшения временного разрешения, по сравнению с ФЭУ.

Установлено, что аппаратурные функции лавинных фотоприемников имеют небольшой экспоненциальный «хвост». Этот «хвост» имеет длительность 1 нс для фотоприемников со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ и 600 пс для фотодиодов ФД-115Л, а соответствующая ему площадь – около 5% от площади под всей кривой. Появление этого «хвоста» вызвано электронами, которые образуются фотонами регистрируемого излучения в нейтральном слое лавинного фотоприемника и достигают обедненного слоя посредством диффузии.

Получены статистические распределения временных интервалов между соседними темновыми и одноквантовыми импульсами на выходе лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации. На основании этих распределений определено время разрядки собственной емкости лавинного фотоприемника, время восстановления до максимального значения напряженности электрического поля в области $p\text{-}n$ -перехода после протекания микроплазменного пробоя, а также времен-

ной интервал, на котором образуются послеимпульсы. Установлено, что для лавинных фотоприемников со структурами p^+n-v-n^+ и $n^+p-\pi-p^+$ максимальный временной интервал, на котором наблюдались послеимпульсы, составлял 0,8 и 1,4 мкс соответственно. Каждое из распределений содержало экспоненциальный участок. Постоянная времени такого участка уменьшается с ростом перенапряжения.

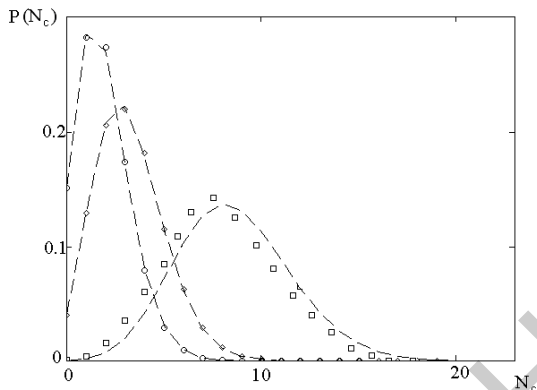
Выполнено сравнение статистических распределений числа темновых $P(N_T)$ и одноквантовых $P(N_c)$ импульсов со статистикой Пуассона (рисунок 12 и 13).



— — распределения, соответствующие статистике Пуассона; \square — для $\Delta U = 0,1$ В скорость счета импульсов $n_m = 8,3 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$; \circ — для $\Delta U = 0,4$ В скорость счета импульсов $n_m = 1,2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$; Δ — для $\Delta U = 1,0$ В скорость счета импульсов $n_m = 6,8 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$;
 N_T — число темновых импульсов

Рисунок 12 — Типичные статистические распределения темновых импульсов

Получено, что вид статистических распределений и их изменения в зависимости от величины перенапряжения были одинаковыми как для темновых, так и для одноквантовых импульсов независимо от типа структуры фотоприемника. С ростом перенапряжения фотоприемника увеличивается отклонение статистических распределений темновых и одноквантовых импульсов от статистики Пуассона. При небольших



— — распределения, соответствующие статистике Пуассона; $\circ - n_c = 9 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$;
 $\diamond - n_c = 4,1 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$; $\square - n_c = 8,7 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$; N_c — число одноквантовых импульсов

Рисунок 13 – Типичные статистические распределения одноквантовых импульсов ЛФП для различных интенсивностей оптического излучения

перенапряжения дисперсия статистического распределения больше по величине математического ожидания. Дальнейшее увеличение напряжения питания приводит к тому, что дисперсия становится меньше математического ожидания, а также уменьшается ширина статистического распределения импульсов, по сравнению с распределением Пуассона. Установлено, что такое поведение связано с проявлением двух эффектов, один из которых заключается в том, что с увеличением перенапряжения увеличивается вероятность появления темновых импульсов и эффективность регистрации; другой связан с мертвым временем лавинного фотоприемника.

Получено, что при увеличении интенсивности регистрируемого оптического излучения пик статистического распределения одноквантовых импульсов смещается в сторону нулевых событий, по сравнению с распределением Пуассона, что связано с проявлением эффекта мертвого времени при высоких скоростях счета одноквантовых импульсов.

Проведены исследования автокорреляционных функций выходных импульсов лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации. Вид этих функций и их изменения от напряжения питания и интенсивности подсветки одинаковы для всех видов структур лавинных фотоприемников. Получена автокорреляционная функция одноквантовых импульсов лавинного фотоприемника, регистрирующего

оптическое излучения от источника с пуассоновской статистикой. Определено, что при увеличении напряжения питания вначале появляется максимум, а затем «провал» в первом канале автокорреляционной функции. Такое поведение автокорреляционных функций связано с проявлением двух эффектов: при небольших перенапряжениях появление максимума обусловлено образованием послеимпульсов; при увеличении перенапряжения начинает проявляться мертвое время фотоприемника. «Провал» в первом канале автокорреляционной функции наблюдается и при увеличении интенсивности подсветки, что также связано с проявлением эффекта мертвого времени.

Определены процессы в лавинных фотоприемниках, которые приводят к погрешностям измерений корреляционных характеристик оптических потоков. Такими процессами являются захват свободных носителей заряда на ловушечные уровни с последующей их реэмиссией в зону проводимости электронов или в валентную зону дырок, а также процесс восстановления электрического поля в области $p-n$ -перехода после протекания микроплазменного пробоя.

В седьмой главе разработаны принципы построения квантовых систем передачи информации импульсами малой интенсивности.

Разработаны новые способы построения асинхронных квантовых информационных систем: с кодированием информации длительностью передаваемого оптического импульса, числом фотонов в оптическом импульсе, состояниями фотонов, модуляцией фазы фотонов, что позволяет осуществлять передачу данных на сверхдальние расстояния без ретрансляции сигнала.

Созданы устройства синхронной передачи оптической информации отдельными фотонами, в которых в качестве приемника информации используется счетчик фотонов. Устройства реализуют как многофотонную, так однофотонную передачу данных. Выполнена оценка максимальной скорости передачи информации (пропускной способности) таких устройств. Получено, что эти устройства позволяют обеспечить большую пропускную способность, по сравнению с асинхронными устройствами.

Впервые предложены способы синхронной однофотонной передачи информации, в которых передача импульсов синхронизации и данных осуществляется на одной длине волны и по одной линии связи. Один из способов заключается в том, что синхроимпульсы передаются мощными оптическими сигналами, а данные – однофотонными импульсами. Причем данные передаются с некоторой временной задержкой после окончания синхроимпульса. Для приема синхроимпульсов ис-

пользуется лавинный фотоприемник, работающий в токовом режиме, а для приема данных фотоприемник переводится в режим однофотонной регистрации. Сущность другого способа заключается в том, что на передающей стороне оптической линии связи располагается регулируемая линия задержки, формирователь данных и источник синхроимпульсов. На принимающей стороне размещается источник и приемник данных. Данные передаются так же, как и в предыдущем способе.

Разработаны модели многофотонных синхронных и асинхронных каналов квантовых информационных систем, а также однофотонных квантовых информационных систем. На основании этих моделей получены выражения для оценки пропускной способности таких систем с приемным модулем, содержащим счетчик фотонов. Определено, что с увеличением скорости счета темновых импульсов пропускная способность квантовой информационной системы уменьшается. Подбор оптимального порогового уровня регистрации для различных значений скорости счета темновых импульсов позволяет обеспечить максимально возможную пропускную способность при заданной скорости счета темновых импульсов. Для квантовых информационных систем с меньшей скоростью счета темновых импульсов необходима меньшая мощность оптического излучения, используемого для передачи данных, и достижения максимальной пропускной способности, чем для систем с большей скоростью счета темновых импульсов.

Для разработанного устройства, реализующего многофотонную синхронную передачу оптической информации, получено, что для обеспечения максимального значения пропускной способности необходимо подбирать оптимальные напряжение обратного смещения лавинного фотоприемника, мощность оптического сигнала. Достигнуто максимальное значение пропускной способности $C_u \approx 100$ кбит/с при мощности оптического сигнала $W = 3,0 \cdot 10^{-12}$ Вт, подаваемого на лавинные фотоприемники со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$, и $C_u \approx 90$ кбит/с при $W = 3,3 \cdot 10^{-12}$ Вт для фотоприемников со структурой $p^+n\text{-}v\text{-}n^+$.

Создано однофотонное устройство приема информации, работающее в синхронном режиме. Получено выражение для определения пропускной способности оптического канала связи этого устройства. Экспериментально получена пропускная способность для такого канала связи $C_u \approx 0,8$ Мбит/с.

Выполненные исследования квантовых информационных систем с асинхронной передачей данных показали, что для получения максимального значения пропускной способности системы необходимо осуществлять подбор напряжения обратного смещения лавинного фотопри-

емника, интенсивности оптического излучения, используемого для передачи символов «0» и «1», а также длительность передачи одного бита информации. Максимальное значение пропускной способности в этих системах соответствует напряжению обратного смещения, при котором динамический диапазон счетчика фотонов имел наибольшую величину. При этом следует выбирать интенсивность передачи символа «1» такой, чтобы ей соответствовала максимальное значение скорости счета одноквантовых импульсов для линейного участка зависимости скорости счета одноквантовых импульсов от интенсивности подсветки, а интенсивность передачи символа «0» – такой, для которой скорость счета одноквантовых импульсов была равной корню квадратному из дисперсии темновых импульсов, измеренных за единицу времени.

Впервые разработана математическая модель канала связи квантовой информационной системы, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем. Расчеты, проведенные с использованием этой модели, показывают, что проявление эффекта мертвого времени в счетчиках фотонов приводит к увеличению мощности оптического излучения, при которой достигается максимальное значение скорости передачи информации, по сравнению со счетчиками фотонов, для которых этот эффект не проявляется. Получено, что для обеспечения одинакового значения скорости передачи информации большая мощность оптического излучения потребуется для счетчиков фотонов, обладающих продлевающим типом мертвого времени, чем для счетчиков фотонов с постоянным типом мертвого времени.

Разработан способ определения мощности оптического излучения, необходимой для достижения максимальной скорости передачи данных в квантовой информационной системе, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов.

Предложен принцип передачи данных в квантовых информационных системах, основанный на использовании нескольких каналов связи. В основу этого принципа положено то, что все биты слова могут передаваться по одному оптическому волокну, но на разных длинах волн и с различной поляризацией оптического излучения.

Реализация этого принципа позволяет повысить скорость передачи данных в квантовых системах, по сравнению с одноканальными принципами, в $2n$ раз (где n – число каналов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Выполнены комплексные исследования фотоэлектрических явлений в лавинных фотоприемниках, работающих в режиме одноквантовой регистрации, что позволило получить ряд принципиально новых результатов в области установления физических принципов регистрации оптического излучения малой интенсивности в видимой и ближней инфракрасной областях спектра; разработаны физические и математические модели одноквантовой регистрации; предложены принципы построения квантовых информационных систем, в которых информация передается оптическими импульсами, содержащими в среднем от одного до десяти фотонов; разработаны и нашли практическое применение способы измерения интенсивности оптического излучения в видимом и инфракрасном диапазонах, временных и корреляционных характеристик этого излучения, статистики фотонов; предложены и реализованы устройства измерения характеристик лавинных фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационного исследования направлены на концептуальную разработку нового научного направления оптоинформатики, связанного с приемом и передачей оптической информации отдельными фотонами.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработана физическая модель и установлены закономерности преобразования фотонов оптического излучения в поток электрических импульсов лавинными фотоприемниками, работающими в режиме одноквантовой регистрации, учитывающие влияние на этот процесс количества каналов микроплазменного пробоя и геометрических размеров каналов, концентрации доноров и акцепторов в области p - n -перехода, длины свободного пробега носителей заряда в области микроплазменного пробоя, а также таких факторов, как температура, интенсивность регистрируемого оптического излучения, напряжение обратного смещения лавинного фотоприемника, позволившие дать рекомендации по уменьшению, учету и компенсации влияния нестабильности этих факторов на основные характеристики фотоприемников, а также уменьшить погрешности, вносимые фотоприемником в измерение статистических параметров оптического излучения более чем на 30%. На основании разработанной модели получено выражение для определения квантовой эф-

фективности регистрации лавинного фотоприемника, работающего в режиме одноквантовой регистрации [4, 6, 7, 12, 13, 19].

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние на формирование амплитуды одноквантовых и темновых импульсов на выходе лавинного фотоприемника числа каналов микроплазменного пробоя и выбросов теплового и дробового шумов, а также температуры, интенсивности регистрируемого оптического излучения, напряжения обратного смещения лавинного фотоприемника. Получено, что уменьшение температуры от 295 до 260 К и изменение разности между напряжением обратного смещения лавинного фотоприемника и напряжением пробоя его $p-n$ -перехода от 0,0 до 0,6 В приводит к росту математического ожидания и дисперсии амплитудного распределения одноквантовых и темновых импульсов фотоприемников за счет увеличения коэффициента умножения электронов и дырок в канале микроплазменного пробоя и появления дополнительных каналов микроплазменного пробоя. При этом средняя амплитуда импульса имеет линейную зависимость от температуры и напряжения обратного смещения [5, 8, 14, 15].

3. Построены физическая и математическая модели образования послеимпульсов в лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации оптического излучения, учитывающие влияние геометрических размеров и электрической емкости канала микроплазменного пробоя, тип и время жизни носителей электрических зарядов, захваченных на ловушечные уровни, и эффект мертвого времени на вероятность образования послеимпульсов, позволяющие получить статистические распределения числа одноквантовых и темновых импульсов фотоприемников с послеимпульсами и определить влияние вероятности образования послеимпульсов всех поколений на величину пороговой мощности фотоприемника и погрешности измерения квантовой эффективности регистрации. На основании этих моделей были разработаны способы измерения интенсивности оптического излучения и определения квантовой эффективности регистрации фотоприемника, которые повышают точность измерений этих параметров (на 25 % для вероятности образования послеимпульсов 0,2) [16, 20, 22].

4. Разработана структура фотоприемника с гетеропереходом, содержащая подложку из монокристаллического кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см и нанесенными последовательно на ее фронтальную поверхность слоями нелегированного широкозонного полупроводника n -типа из оксида цинка и прозрачного проводящего покрытия n^+ -типа, представляющего собой легированный

алюминием (2%) оксид цинка, а также два низкоомных металлических электрода, один из которых расположен на тыльной стороне полупроводниковой подложки, а второй является контактом к прозрачному проводящему слою. На основании этой структуры создан лавинный фотоприемник, работающий в режиме одноквантовой регистрации при комнатных температурах (от 290 до 300 К), имеющий малый темновой ток (менее 1 нА) и более чем в десять раз большую площадь фоточувствительной поверхности (7 мм^2), по сравнению с известными лавинными фотоприемниками, реализующими режим одноквантовой регистрации в том же диапазоне температур. Созданные фотоприемники демонстрировали характеристики, сравнимые с серийно выпускаемыми кремниевыми лавинными фотодиодами ФД-115Л, имеющими площадь фоточувствительной поверхности $0,03 \text{ мм}^2$ [12].

5. Выявлено и изучено влияние послеимпульсных явлений и эффекта мертвого времени на статистику темновых и одноквантовых импульсов и автокорреляционную функцию выходного потока импульсов лавинного фотоприемника. Разработаны рекомендации по выбору величины напряжения обратного смещения лавинного фотоприемника и интенсивности оптического излучения с целью уменьшения погрешности, вносимой темновыми импульсами, послеимпульсами и эффектом мертвого времени в измерения статистики одноквантовых импульсов и корреляции фотонов [3, 19, 26].

6. Предложены способы для измерения параметров оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с мощностью меньшей 10^{-12} Вт лавинными фотоприемниками, работающими в режиме одноквантовой регистрации, и устройства реализующие их: а) измеритель интенсивности потока сигналов, позволяющий повысить точность измерений за счет устранения погрешности вносимой послеимпульсами; б) счетчик фотонов на базе лавинного фотоприемника, позволяющий повысить точность измерения интенсивности оптического излучения за счет устранения погрешностей, вносимых темновыми импульсами и нестабильностью напряжения питания; в) устройство регистрации одиночных фотонов на базе лавинного фотоприемника, позволяющее повысить точность измерения интенсивности и мощности оптического излучения за счет стабилизации величины разности между напряжением питания и напряжением пробоя лавинного фотоприемника без потери измерительного времени; г) счетчик фотонов для измерения интенсивности оптического излучения, позволяющий повысить точность измерения за счет устранения ошибки измерения, связанной с

наложениями импульсов друг на друга и шумов на одноквантовые импульсы.

Реализация этих способов и устройств позволила учесть ошибки измерения оптического излучения, связанные с наличием темновых импульсов, эффектом мертвого времени, послеимпульсами, наложением одноквантовых импульсов и шумов, что повышает точность определения мощности и интенсивности оптического излучения более чем в 2 раза [2, 3, 6, 9-11, 22, 26].

7. Принципы передачи, приема и обработки оптической информации, основанные на кодировании информации двумя состояниями и (или) количеством фотонов (в среднем не более 10), регистрации этой информации счетчиками фотонов на базе лавинных фотоприемников, позволяющие определять изменение состояния и (или) числа фотонов при передаче бита информации, обеспечивающие передачу конфиденциальной информации, обнаружение несанкционированных пользователей и дефектов волоконно-оптических линий связи [17, 18, 21, 23, 24].

8. На разработанных установках продемонстрирована возможность использования счетчиков фотонов в качестве приемного модуля в квантовых информационных системах при передаче информации отдельными фотонами [21, 23, 25].

Рекомендации по практическому использованию

Применение разработанных способов и устройств [27-38] позволит получить новые научные результаты в ряде разделов современной физики таких, как спектрофотометрия слабых навигационных звезд, метрология оптических излучений малой интенсивности, статистическая оптика, квантовая механика, квантовая информатика, квантовая криптография, люминесцентный анализ, оптическая связь, а также при разработке лавинных фотоприемников для одноквантовой регистрации.

В частности:

- разработанная модель фотоэлектрического преобразования фотонов оптического излучения в поток электрических импульсов может быть использована при разработке лавинных фотоприемников для одноквантовой регистрации оптического излучения;

- в экспериментах по изучению статистических свойств оптического излучения и определению корреляции фотонов могут найти применение разработанные автором устройства для измерения статистического распределения одноквантовых импульсов и корреляторы;

- созданные лавинные фотоприемники могут найти применение при спектрофотометрии слабых навигационных звезд, для создания

сцинтилляционных счетчиков, в квантовых системах приема и передачи информации;

- разработанные способы и устройства регистрации оптического излучения могут быть использованы при проведении метрологических измерений оптического излучения малой интенсивности;

- предложенные способы измерения характеристик лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации могут быть использованы при производстве одноквантовых лавинных фотоприемников для контроля и определения характеристик этих фотоприемников;

- разработанные способы и устройства для передачи оптической информации импульсами, содержащими в среднем от одного до десяти фотонов, могут найти применение в квантовой криптографии, системах конфиденциальной связи, позволяющих в автоматическом режиме определять наличие несанкционированного пользователя, а также для передачи данных на сверхдальние расстояния без ретрансляции сигнала (например, в связи с космическими объектами или между ними);

- предложенные модели каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов, могут найти применение при проектировании оптических систем и сетей связи, в которых для передачи данных используются отдельные фотоны или оптические импульсы малой интенсивности.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в настоящее время, что подтверждается следующими актами внедрения: в учебный процесс УО «Высший государственный колледж связи» при разработке типовой программы по дисциплине «Оптоэлектроника» и подборе материала для проведения практических и лекционных занятий; в ОАО «Интеграл» при реализации режима одноквантовой регистрации на разработанных кремниевых лавинных фотодиодах со структурой p^+n-v-n^+ ; в ОАО «Гипросвязь» при выполнении проектно-исследовательских работ и создании проектно-сметной документации систем защиты информации волоконно-оптических линий связи; в ОАО «Промсвязь» для расчета оптического бюджета при построении оптоволоконных сетей; в ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» при проведении научно-исследовательских работ для измерения квантовой эффективности регистрации лавинных фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации; в УП «АТОМТЕХ» для создания сцинтилляционных счетчиков на основе сочетания «сцинтиллятор-фотодиод».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Гулаков, И.Р. Фотоприемники квантовых систем: монография / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах

2. Анализатор временных и корреляционных характеристик случайных потоков сигналов / В.В. Апанасович, И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, Е.В. Новиков, С.В. Пальцев // Приборы и техника эксперимента. – 1994. – № 2. – С. 201–202.

3. Лавинные фотодиоды для измерения корреляции фотонов / И.Р. Гулаков, Е.В. Новиков, А.О. Зеневич // Оптический журнал. – 1997. – Т. 64, № 1. – С. 55–57.

4. Оптоэлектронные процессы, вносящие вклад в формирование квантовой эффективности регистрации лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, В.Б. Залесский // Вестник белорусского государственного университета. Сер. 1. Физика. – 1998. – № 1. – С. 29–33.

5. Зеневич, А.О. Влияние фотоэлектрических процессов в кремниевых лавинных фотодиодах в режиме одноквантовой регистрации на амплитудные распределения выходных импульсов / А.О. Зеневич, В.А. Сизюк // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2000. – № 2. – С. 95–99.

6. Гулаков, И.Р. Одноквантовая регистрация с использованием стробируемого кремниевого лавинного фотодиода / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 4. – С. 137–139.

7. Температурные характеристики кремниевых фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации / И.Р. Гулаков, В.Л. Козлов, А.О. Зеневич, Е.В. Новиков // Доклады БГУИР. – 2003. – № 2. – С. 29–33.

8. Влияние температуры на одноквантовые характеристики лавинных фотоприемников / И.Р. Гулаков, В.Л. Козлов, А.О. Зеневич // Доклады БГУИР. – 2004. – № 4(8). – С. 21–25.

9. Зеневич, А.О. Система регистрации корреляционных характеристик случайных потоков сигнала / А.О. Зеневич, В.Л. Козлов, Е.В. Новиков

// Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Фундаментальные науки. – 2004. – № 11. – С. 37–39.

10. Зеневич, А.О. Система автокорреляционного анализа дискретного сигнала / А.О. Зеневич, В.Л. Козлов, Е.В. Новиков // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 1. – С. 155–156.

11. Зеневич, А.О. Исследование одноквантовых лавинных фотоприемников, включенных по схеме активного гашения / А.О. Зеневич, Е.В. Новиков // Доклады БГУИР. – 2006. – № 1 (13). – С. 27–31.

12. Исследование лавинных фотоприемников с большой фоточувствительной площадью в режиме счета фотонов / И.Р. Гулаков, В.Б. Залесский, А.О. Зеневич, Т.Р. Леонова // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 112–115.

13. Зеневич, А.О. Исследование зонной чувствительности лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации / А.О. Зеневич, Е.В. Новиков // Прикладная физика. – 2007. – № 5. – С. 76–79.

14. Амплитудные характеристики одноквантовых фотоприемников с большой фоточувствительной поверхностью / О.К. Барановский, И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич [и др.] // Доклады БГУИР. – 2007, № 3(19). – С. 57–61.

15. Исследование амплитудных характеристик одноквантовых фотоприемников с большой площадью фоточувствительной поверхности / О. К. Барановский, И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, В.Б. Залесский // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 2. – С. 126–130.

16. Гулаков, И.Р. Влияние послеимпульсов на отношение сигнал/шум фотоприемников в режиме счета фотонов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич // Доклады БГУИР. – 2008. – № 2(32). – С. 19–25.

17. Пропускная способность оптического канала связи при передаче сообщения сигналами малой мощности / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, С.К. Комаров // Доклады БГУИР. – 2009. – № 8(46). – С. 22–27.

18. Гулаков, И.Р. Оценка пропускной способности оптического канала связи, содержащего счетчик фотонов с мертвым временем / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, С.К. Комаров, А.М. Тимофеев // Доклады БГУИР. – 2010. – № 5(51). – С. 82–87.

19. Исследование статистического распределения одноквантовых импульсов лавинных фотоприемников / И.Р. Гулаков, В.Б. Залесский, А.О. Зеневич, Н.Н. Корытко, В.С. Малышев // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 4. – С. 92–97.

20. Гулаков, И.Р. Влияние послеимпульсов фотодетектора на точность определения пороговой чувствительности счетчика фотонов /

И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Доклады БГУИР. – 2010. – № 4(50). – С. 5–10.

21. Зеневич, А.О. Пропускная способность оптического канала связи при передаче сообщения отдельными фотонами / А.О. Зеневич, С.К. Комаров, А.М. Тимофеев // Электросвязь. – 2010. – № 10. – С. 14–16.

22. Зеневич, А.О. Статистическое распределение временных интервалов между импульсами лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5(59). – С. 61–66.

23. Гулаков, И.Р. Исследование скорости передачи информации по оптическому каналу связи с приемником на основе счетчика фотонов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 4. – С. 31–40.

24. Зеневич, А.О. Исследование пропускной способности оптического канала связи, в котором для детектирования сигнала используется счетчик фотонов / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Доклады БГУИР. – 2011. – № 7(61). – С. 5–9.

25. Гулаков, И.Р. Пропускная способность квантовой оптической системы связи / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 104–109.

26. Гулаков, И.Р. Исследование автокорреляционной функции потока импульсов одноквантовых лавинных фотодиодов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 5. – С. 83–87.

Патенты на изобретение

27. Счетчик фотонов на базе лавинного фотодиода: пат. 10468 Респ. Беларусь, МПК(2006) G 01J 1/44 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, Е.В. Новиков; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20060729; заявл. 17.07.06; опубл. 28.02.07 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2008. – №2. – 6 с.

28. Измеритель интенсивности потока сигналов: пат. 9518 Респ. Беларусь, МПК(2006) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, Е.В. Новиков; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20050474; заявл. 17.05.05; опубл. 30.12.05 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2007. – №4. – 5 с.

29. Способ определения квантовой эффективности фотоприемника: пат. 11775 Респ. Беларусь, МПК(2006) G 01R 31/00 / И.Р. Гулаков,

А.О. Зеневич; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20070871; заявл. 11.07.07; опубл. 28.02.08 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2009. – №2. – 6 с.

30. Устройство регистрации одиночных фотонов на базе лавинного фотодиода: пат. 12708 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 01J 1/44 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20080377; заявл. 27.03.2008; опубл. 30.10.2008 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2009. – №6. – 5 с.

31. Способ определения мертвого времени фотоприемника, работающего в режиме одноквантовой регистрации при измерении интенсивности оптического излучения: пат. 14127 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20090119; заявл. 25.11.10; опубл. 30.06.09 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – №1. – 7 с.

32. Способ получения статистического распределения фотоотчетов оптического излучения фотоприемником, работающим в режиме счета фотонов: пат. 14764 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20091046; заявл. 10.07.09; опубл. 28.02.10 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – №4. – 6 с.

33. Счетчик фотонов: пат. 15045 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/44 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20091827; заявл. 21.12.2009; опубл. 30.06.2010 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 5. – 7 с.

34. Способ определения мертвого времени лавинного фотодиода, работающего в режиме счета фотонов: пат. 15846 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20100640; заявл. 27.04.10; опубл. 30.04.12 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №2. – С. 140.

35. Способ определения типа мертвого времени фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов: пат. 15925 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20100513; заявл. 05.04.10; опубл. 30.06.12 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №3. – С. 158.

36. Способ определения порогового уровня регистрации фотоприемника и мощности оптического излучения заданной длины волны, соответствующих максимальной скорости передачи данных по оптическому каналу связи: пат. 16151 Респ. Беларусь, МПК (2006.01)

G 01J 1/00, G 01R 23/10 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20101016; заявл. 02.07.2010; опубл. 30.08.2012 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №4. – С. 132.

37. Способ определения временных характеристик счетчика фотонов: пат. 16655 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20101781; заявл. 09.12.2010; опубл. 30.12.2012 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №6. – С. 140–141.

38. Устройство передачи данных по оптическому каналу связи: пат. 17012 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) H 04B 10/04, H 04B 10/06 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20110919; заявл. 30.06.2011; опубл. 30.04.2013 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2013. – №2. – С. 145–146.

Тезисы и материалы докладов на конференциях

39. Apanasowicz, W. Korelator strumienia fotonow promieniowania swietnego o niewielkim natezeniu / W. Apanasowicz, I. Gulakow, A. Zenevich, E. Nowikow // Prace naukowe Krajowa Konferencja naukowe techniczna Mechatronica 94: Materialy nauk. konf., Warszawa, 22-23 wiz. 1994 г. / Politech; editorial board: R. Jablonski [et al.]. – Warszawa, 1994. – P. 26–27.

40. Гулаков, И.Р. Анализатор временных характеристик случайных потоков сигналов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, Е.В. Новиков // Науч. конф. профес.-преп. состава, сотрудников, докторантов, аспирантов, студентов, посвященная 30-летию деятельности коллектива БГУИР: материалы докладов, Минск, 15-18 февр. 1994 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.М. Ильин [и др.]. – Минск, 1994. – С. 58–59.

41. Зеневич, А.О. Оценка влияния электрического тока микроплазменного пробоя на одноквантовые характеристики лавинных фотоприемников / А.О. Зеневич, В.Л. Козлов // Современные средства связи: материалы докладов VIII Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, 29 сент. - 3 окт. 2003 г. / Высш. гос. колледж связи, Известия Белорусской инженерной академии; редкол.: В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск, 2003. – С. 184–187.

42. Гулаков, И.Р. Лавинные фотодиоды для регистрации фотонных корреляций / И.Р. Гулаков, Е.В. Новиков, А.О. Зеневич // Современные методы обработки сигналов в системах изменения, контроля,

диагностики и управления: материалы докладов науч.-техн. конф., Минск, 18-22 дек. 1995 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т, Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, Ин-т технической кибернетики академии наук Беларуси; редкол.: А.Ф. Чернявский [и др.]. – Минск: БГУИР, 1995. – Ч. 2. – С. 95–99.

43. Gulakow, I. Fotodiody lawinowe do pomiarow korelacij fotonow / I. Gulakow, A. Zieniewich // IV Konferencja Naukowa Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne: materialy nauk. konf., Gdansk, 13-16 maja 1996 / Szczyrk; editorial board: J. Zakrzewski [et al.]. – Gdansk, 1996. – P. 332–334.

44. Зеневиц, А.О. Амплитудные распределения выходных импульсов лавинных фотодиодов, работающих в режиме одноквантовой регистрации / А.О. Зеневиц, В.А. Сизюк // II Межгос. науч.-техн. конф. по квантовой электронике: материалы докладов, Минск, 23–23 нояб. 1998 г. / БГУ; редкол.: И.С. Манак [и др.]. – Минск, 1998. – С. 49–51.

45. Гулаков, И.Р. Одноквантовые лавинные фотодиоды с субнаносекундным разрешением / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневиц // Современные средства связи: материалы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, 20-24 сент. 1999 г. / Высш. гос. колледж связи, Известия Белорусской инженерной академии. Спец. вып.; редкол.: В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск, 1999. – С. 125–127.

46. Гулаков, И.Р. Влияние послеимпульсных явлений на статистическое распределение выходных импульсов лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневиц // Современные средства связи: материалы докладов V Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, 25-29 сент. 2000 г. / Высш. гос. колледж связи, Известия Белорусской инженерной академии. Спец. вып.; редкол.: В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск, 2000. – С. 129–130.

47. Гулаков, И.Р. Одноквантовая регистрация с использованием кремниевого лавинного фотодиода с активным гашением лавинного пробоя / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневиц, В.А. Козлов, Е.В. Новиков // Современные средства связи: материалы докладов VI Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, 1-5 окт. 2001 г. / Высш. гос. колледж связи, Известия Белорусской инженерной академии. Спец. вып.; редкол.: В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск, 2001. – С. 208–211.

48. Зеневиц, А.О. Исследование быстродействия кремниевых лавинных фотодиодов, работающих в режиме одноквантовой регистрации / А.О. Зеневиц, В.Л. Козлов // АИЭС: материалы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов стран

СНГ, Алматы, 16-19 сент. 2002 г. / АИЭС; редкол.: Е.В. Малишевский [и др.]. – Алматы, 2002. – С. 357–359.

49. Зеневич, А.О. Исследование влияния температуры на быстродействие лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации / А.О. Зеневич, В.Л. Козлов // Современные средства связи: материалы докладов VIII Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, 29 сент. – 3 окт. 2003 г. / Высш. гос. колледж связи, Известия Белорусской инженерной академии. Спец. вып.; редкол.: В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск, 2003. – С. 184–185.

50. Гулаков, И.Р. Использование твердотельных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации для квантовой криптографии / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, В.Л. Козлов // Технические средства защиты информации: материалы докладов Российско-белорусская науч.-техн. конф., Нарочь, 19-23 мая 2003 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2003. – С. 12.

51. Гулаков, И.Р. Исследования послепульсных явлений в кремниевых лавинных фотоприемниках в режиме одноквантовой регистрации / И.Р. Гулаков, В.Л. Козлов, А.О. Зеневич // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик 2004»: материалы докладов XVI Междунар. науч.-техн. конф., Судак, 24-31 мая 2004 г. / МГИЭМ; редкол.: А.М. Тихонов [и др.]. – М.: МГИЭМ, 2004. – С. 333–335.

52. Zenevich, A. Afterpulse phenoma in silicon avalanche photodetectors in the photon-counting mode/ A. Zenevich, E. Novikov, V. Kazlov // Mechatronics 2004: materials 5th Internation Conference, Warsawa, 23-25 Sept. 2004 г. / Warsaw University of Technology, Brno University of Techology, Elektronika; editorial board: Z. Dunajski [et al.]. – Warsawa, 2004. – P. 311–313.

53. Зеневич, А.О. Регистратор корреляционных характеристик случайных потоков событий / А.О. Зеневич, В.Л. Козлов, Е.В. Новиков // III Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств, Новополоцк, 26-28 мая 2004 г. / Полоцкий государственный университет; редкол.: А.П. Достанко [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2004. – 262–264.

54. Гулаков, И.Р. Приемный модуль квантооптического канала связи / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, В.Л. Козлов // Технические средства защиты информации: материалы докладов и краткие сообщения II Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь,

17-21 мая 2004 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2004. – С. 31–32.

55. Зеневич, А.О. Лавинные фотоприемники с большой площадью фоточувствительной площадки, работающие в режиме одноквантовой регистрации при комнатных температурах / А.О. Зеневич // Современные средства связи: материалы докладов X Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, 26-30 сент. 2005 г. / Высш. гос. колледж связи, Известия Белорусской инженерной академии. Спец. вып.; редкол.: В.А. Чердынцев [и др.]. – Минск, 2005. – С. 129–132.

56. Гулаков, И.Р. Анализ квантовых оптических каналов связи / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич // Технические средства защиты информации: материалы докладов и краткие сообщения III Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 23-27 мая 2005 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2005. – С. 94–95.

57. Зеневич, А.О. Применение лавинных фотоприемников с большой площадью фоточувствительной поверхности для одноквантовой регистрации оптического излучения / А.О. Зеневич, Е.В. Новиков // Фотоэлектроника и приборы ночного видения: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23-26 мая 2006 г. / Федеральное гос. унитарное предприятие НПО «ОРИОН»; редкол.: А.М. Филачев [и др.]. – Москва, 2006. – С. 60.

58. Зеневич, А.О. Оценка пропускной способности квантового криптографического канала связи / А.О. Зеневич, И.И. Гулаков // Технические средства защиты информации: материалы докладов и краткие сообщения IV Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 29 мая – 2 июня 2006 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2006. – С. 58–59.

59. Baranouski, A. Silicon quantum detectors with large photosensitive surface / A. Baranouski, A. Zenevich, E. Novikov // Mechatronics 2007: materials 7th Internartion Conference, Warsawa, 19-21 Sept. 2007 г. / Recent Advances in Mechatronics; editorial board: R. Jablonski [et al.]. – Warsawa, 2007. – P. 679–683.

60. Барановский, О.К. Характеристики кремниевых фотодиодов для задач квантовой генерации случайных чисел / О.К. Барановский, А.О. Зеневич // Технические средства защиты информации: материалы докладов и краткие сообщения V Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28 мая – 1 июня 2007 г. / Белорус. гос. ун-т информатики

и радиоэлектроники; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2007. – С. 82–83.

61. Зеневич, А.О. Фотонный счетчик с детектором на лавинном фотодиоде / А.О. Зеневич, Е.В. Новиков // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы докладов V Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 28-30 мая 2008 г. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: А.П. Достанко [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т. 1. – С. 77–81.

62. Зеневич, А.О. Амплитудные и статистические характеристики одноквантовых фотоприемников / А.О. Зеневич // Фотоэлектроника и приборы ночного видения: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 27-30 мая 2008 г. / Федеральное гос. унитарное предприятие НПО «ОРИОН»; редкол.: А.М. Филачев [и др.]. – Москва, 2008. – С. 93.

63. Гулаков, И.Р. Пропускная способность оптического канала связи при передаче сообщения сигналами малой мощности / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, С.К. Комаров // Современные средства связи: материалы докладов XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29 сент. – 1 окт. 2009 г. / Высш. гос. колледж связи; редкол.: М.А. Баркун [и др.]. – Минск, 2009. – С. 50.

64. Зеневич, А.О. Оценка скорости передачи информации по квантовому криптографическому каналу связи / А.О. Зеневич // Технические средства защиты информации: материалы докладов VII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 23-24 июня 2009 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2009. – С. 41.

65. Зеневич, А.О. Исследование скорости передачи информации по оптическому каналу, содержащему в качестве приемного модуля счетчик фотонов / А.О. Зеневич, А.А. Пашкевич, А.М. Тимофеев // Технические средства защиты информации: материалы докладов VIII Междунар. Белорусско-российской науч.-техн. конф., Браслав, 24-28 мая 2010 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2010. – С. 18–19.

66. Зеневич, А.О. Автокорреляционные функции потока импульсов одноквантовых фотодиодов / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Современные средства связи: материалы докладов XVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27-29 сент. 2011 г. / Высш. гос. колледж связи; редкол.: А.О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2011. – С. 86.

67. Зеневич, А.О. Влияние мертвого времени на пропускную способность оптического канала связи / А.О. Зеневич, С.К. Комаров, А.М. Тимофеев // Технические средства защиты информации: материалы докладов VIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Браслав,

24-28 мая 2010 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2010. – С. 19.

68. Зеневич, А.О. Обнаружение несанкционированного доступа в каналах связи при одноквантовой передаче данных / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев, С.И. Акулич // Технические средства защиты информации: материалы докладов IX Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28-29 июня 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 14–15.

69. Зеневич, А.О. Анализ пропускной способности оптического канала связи, использующего счетчик фотонов на базе лавинного фотодиода / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев, С.И. Акулич // Технические средства защиты информации: материалы докладов IX Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28-29 июня 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 65–66.

70. Гулаков, И.Р. Устройство асинхронной квантовой передачи информации / Гулаков, И.Р., А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Приборостроение – 2012: материалы докладов 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 нояб. 2012 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 56–57.

РЭЗІЮМЭ

Зяневіч Андрэй Алегавіч

АДНАКВАНТАВЫЯ СІСТЭМЫ ДЛЯ ПРЫЕМУ І АПРАЦОЎКІ АПТЫЧНАЙ ІНФАРМАЦЫІ

Ключавыя словы: аднаквантавая рэгістрацыя, лічыльнік фатонаў, лавінны фотапрыёмнік, мікраплазменны прабой, карэляцыя фатонаў, хуткасць перадачы інфармацыі, мертвае час, пасляімпульсы, квантавыя інфармацыйныя сістэмы.

Аб'ект даследавання: крэмніевыя лавінныя фотапрыёмнікі, якія працуюць у рэжыме аднаквантавай рэгістрацыі, і прылады прыёму аптычнай інфармацыі, распрацаваныя на іх аснове.

Прадмет даследавання: фотаэлектрычныя з'явы і працэсы, якія працякаюць у крэмніевых лавінных фотапрыёмніках, што працуюць у рэжыме аднаквантавай рэгістрацыі.

Мэта работы: распрацоўка прынцыпаў пабудовы апаратуры для перадачы, прыёму і апрацоўкі аптычнай інфармацыі імпульсамі, якія змяшчаюць у сяроднім ад аднаго да дзясятка фатонаў, а таксама метадаў для рэгістрацыі аптычнага выпраменьвання малой інтэнсіўнасці ў бачнай і блізкай інфрачырвонай абласцях спектру на аснове стварэння фізічнай тэорыі фотаэлектрычнага пераўтварэння ў лавінных фотапрыёмніках пры аднаквантавай рэгістрацыі.

Метады даследавання: метады рэалізацыі аднаквантавай рэгістрацыі на лавінных фотапрыёмніках, метады сінхроннага дэтэктавання фатонаў, старт-стопавы метады рэгістрацыі фатонаў, метады статыстычнага і карэляцыйнага аналізу, метады атрымання крыніцы адзіночных фатонаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваныя мадэлі фотаэлектрычнага пераўтварэння ў лавінных фотапрыёмніках, якія дазваляюць вызначыць працэсы пераўтварэння слабога аптычнага выпраменьвання ў струмень аднаквантавых імпульсаў. Распрацаваныя новыя метады, алгарытмы і эксперыментальная апаратура для вымярэння параметраў аптычнага выпраменьвання і характарыстык лавінных фотапрыёмнікаў, якія працуюць у рэжыме аднаквантавай рэгістрацыі, дазваляюць павысіць дакладнасць вызначэння інтэнсіўнасці аптычнага выпраменьвання і такіх характарыстык фотапрыёмніка, як працягласць мёртвага часу і квантавая эфектыўнасць рэгістрацыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: атрыманыя вынікі ўкаранёныя ў навучальны працэс, выкарыстоўваюцца ў навуковых і навукова-вытворчых арганізацыях Рэспублікі Беларусі. Галіна прымянення – оптыка, оптаэлектроніка, прыборабудаванне, сувязь, квантавая крыптаграфія.

РЕЗЮМЕ

Зеневич Андрей Олегович

ОДНОКВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ключевые слова: одноквантовая регистрация, счетчик фотонов, лавинный фотоприемник, микроплазменный пробой, корреляция фотонов, скорость передачи информации, мертвое время, послеимпульсы, квантовые информационные системы.

Объект исследования: кремниевые лавинные фотоприемники, работающие в режиме одноквантовой регистрации, и устройства приема оптической информации, разработанные на их основе.

Предмет исследования: фотоэлектрические явления и процессы, протекающие в кремниевых лавинных фотоприемниках, работающих в режиме одноквантовой регистрации.

Цель работы: разработка принципов построения аппаратуры для передачи, приема и обработки оптической информации импульсами, содержащими в среднем от одного до десятка фотонов, а также методов для регистрации оптического излучения малой интенсивности в видимой и ближней инфракрасной областях спектра на основе создания физической теории фотоэлектрического преобразования в лавинных фотоприемниках при одноквантовой регистрации.

Методы исследования: методы реализации одноквантовой регистрации на лавинных фотоприемниках, метод синхронного детектирования фотонов, старт – стоповый метод регистрации фотонов, методы статистического и корреляционного анализа, метод получения источника одиночных фотонов.

Полученные результаты и их новизна: разработаны модели фотоэлектрического преобразования в лавинных фотоприемниках, позволяющие определить процессы преобразования слабого оптического излучения в поток одноквантовых импульсов. Разработаны новые методы, алгоритмы и экспериментальная аппаратура для измерения параметров оптического излучения и характеристик лавинных фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации, позволяющие повысить точность определения интенсивности оптического излучения и таких характеристик фотоприемника, как длительность мертвого времени и квантовая эффективность регистрации.

Рекомендации по использованию и область применения: полученные результаты внедрены в учебный процесс, используются в научных и научно-производственных организациях Республики Беларусь. Область применения – оптика, оптоэлектроника, приборостроение, связь, квантовая криптография.

SUMMARY

Zianeovich Andrey Olegovich

ONE-QUANTUM SYSTEMS USED FOR RECEIVING AND PROCESSING OF OPTICAL DATA

Key words: one-quantum registration, photon counter, avalanche photodetector, microplasmous breakdown, photon correlation, information rate, dead time, afterpulses, quantum information systems.

Object of research: silicon avalanche photodetectors, operating in one-quantum registration mode and devices for optical data reception developed on the basis of silicon avalanche photodetectors.

Subject of investigation: photoelectric phenomena and processes running in silicon avalanche photodetectors that operate in one-quantum registration mode.

Purpose of research: to develop principles for arrangement of equipment for transmission, receiving and processing of optical data with pulses containing upon the average from one to ten photons, as well as methods for registration of low-level optical radiation in visible and nearby infrared spectral regions on the basis of creating a physical theory for photoelectric conversion in avalanche photodetectors with one-quantum registration.

Methods of investigation: methods of one-quantum registration based on avalanche photodetectors, method of synchronous detection of photons, start-stop method of photons registration, methods of statistical and correlated analysis, methods for production of the single photons source.

Obtained results of investigation and their novelty: architecture for photoelectric transformation in avalanche photodetectors has been developed that allows to define transformation processes of low-level optical radiation into a flow of one-quantum pulses. New methods, algorithms and experimental equipment for measurement of optical radiation parameters and characteristics of avalanche photodetectors operating in one-quantum registration mode have been designed that allow to enhance precision of optical radiation intensity and some characteristics of a photodetector including a dead time duration and quantum registration.

Guidelines on use and the field of application: obtained results have been implemented in an educational process, as well as in scientific and scientific-industrial organizations of the Republic of Belarus. The field of application: optics, optoelectronics, instrument engineering, communications, quantum cryptography.

Научное издание

ЗЕНЕВИЧ Андрей Олегович

**ОДНОКВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИЕМА
И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

Подписано в печать 27.11.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,36. Тираж 60. Заказ 1278.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический
университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.