

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права
УДК 621.391; 621.383.92

КОЧЕРГИНА
Ольга Викторовна

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ
КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ
ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 380 – 940 нм**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусская государственная академия связи».

Научный руководитель

Зеневич Андрей Олегович, доктор технических наук, профессор, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия связи»

Официальные оппоненты:

Емельянов Виктор Андреевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, главный специалист управления персонала открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Хорошко Виталий Викторович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

Открытое акционерное общество «Планар»

Защита состоится «12» октября 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 7 » сентября 2023 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 02.15.03
кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получила такая беспроводная технология передачи данных, как *Wi-Fi*. Данная технология основана на использовании радиоволн и имеет несколько существенных недостатков, связанных в основном со сложной электромагнитной обстановкой. Поэтому развиваются такие технологии передачи данных как *Li-Fi* и квантовые коммуникации, которые используют оптическое излучение видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона с длинами волн от 380 до 940 нм. Открытые системы оптической связи имеют несомненное преимущество перед проводными в ситуациях, когда один или несколько объектов подвижны, а также на небольших расстояниях в случаях невозможности прокладки кабеля. При реализации технологии *Li-Fi* требуются фотоприемники, чувствительные к оптическому излучению в видимом и ближнем ИК диапазоне. Достаточно часто для регистрации оптического излучения применяются вакуумные фотоэлектронные умножители, фотодиоды и лавинные фотоприемники. Однако все они обладают рядом недостатков, которые не позволяют обеспечить необходимое отношение сигнала к шуму и высокие скорости передачи информации. В последние годы появился новый тип фотоприемников для регистрации оптического излучения – кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ), которые относятся к классу твердотельной электроники, превосходят вакуумные фотоэлектронные умножители, фотодиоды и лавинные фотоприемники по ряду параметров. Однако не установлено, какие ограничения по диапазону регистрируемой интенсивности и пропускной способности вносят SiФЭУ в оптический канал связи, если они используются в качестве регистрирующего элемента в технологии *Li-Fi*. Также не установлено, как изменяется пропускная способность такого канала связи в условиях изменения внешних факторов, особенно фоновой засветки. Поскольку SiФЭУ имеют достаточно высокий коэффициент усиления фототока, они могут работать в режиме счета фотонов и одноквантовой регистрации. Это дает возможность их использования для регистрации оптического излучения источников одиночных фотонов, применяемых в квантовых криптографических системах. Однако при создании источников одиночных фотонов не решены вопросы стабилизации оптического излучения на уровне одного фотона в импульсе при изменении внешних условий.

Диссертация посвящена разработке способов исследования SiФЭУ, установлению закономерностей поведения характеристик серийных моделей КЕТЕК РМ 3325, ON Semi FC 30035 и опытного прибора производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» при изменении внешних факторов, таких как температура, внешняя освещенность, и напряжение питания SiФЭУ, а также новых оптоэлектронных устройств и приборов на квантовых эффектах на их основе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг. п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика», утвержденному Указом Президента Республики Беларусь № 6 от 07.05.2020.

Часть результатов, представленных в диссертационной работе, получена в ходе проведения следующих научно-исследовательских работ, выполнявшихся на кафедре физических и математических основ информатики в соответствии с планом научных работ учреждения образования «Белорусская государственная академия связи»:

1) «Система передачи секретного ключа на основе протоколов квантовой криптографии» БРФФИ на 2021 – 2022 гг. (№ г.р. 20212626);

2) «Системы квантовой сигнализации для обеспечения информационной безопасности волоконно-оптических линий связи» ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» на 2021 – 2025 гг. (№ г.р. 20212714);

3) «Аппаратно-программная система обеспечения информационной безопасности и энергетической эффективности беспроводной цифровой передачи данных на основе технологий поколения 5G и метода нелинейной динамики» ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» на 2021 – 2022 гг. (№ г.р. 20220041);

4) «Беспроводная система передачи данных для обеспечения безопасной связи устройств интернета вещей на основе технологии *Li-Fi*» ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» на 2021 – 2022 гг. (№ г.р. 20220060).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является разработка оптоэлектронных устройств, включающих комбинированный датчик температуры и освещенности, источник однофотонных импульсов и устройство регистрации оптического излучения для спектрального диапазона 380 – 940 нм на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей с учетом воздействия на них таких внешних факторов, как температура, внешняя освещенность, длина волны оптического излучения и напряжение питания.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие *задачи*:

– определить требования к фотоприемникам для регистрации оптического излучения в спектральном диапазоне 380 – 940 нм при реализации технологий *Li-Fi* и квантовых коммуникаций;

– разработать способ определения числа фотонов в оптическом импульсе и устройство, позволяющее сформировать электрический импульс, энергия которого идентична энергии одного фотона, на основе SiФЭУ, принцип действия которого основан на ослаблении оптического излучения в среднем до одного фотона в импульсе;

– установить факторы, влияющие на величину динамического диапазона SiФЭУ, и разработать методику определения динамического диапазона SiФЭУ в условиях изменения температуры окружающей среды, напряжения питания фотоприемника и длины волны оптического излучения;

– установить факторы, влияющие на скорость передачи информации по оптическому каналу связи с SiФЭУ при реализации технологии *Li-Fi* и разработать структуру оптоэлектронного устройства на основе SiФЭУ для регистрации информационного сигнала в условиях фонового оптического излучения при реализации технологии *Li-Fi*;

– разработать структуру комбинированного датчика контроля температуры и освещенности помещения на основе SiФЭУ.

Объект исследования – кремниевые фотоэлектронные умножители.

Предметом исследования является изучение характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей при регистрации оптического излучения в зависимости от температуры окружающей среды, напряжения питания фотоприемника и фонового оптического излучения.

Научная новизна

1. Установлены при регистрации оптических импульсов зависимости уровня шума SiФЭУ от длительности 1 – 10 мкс и энергетической экспозиции оптических импульсов $10^{-13} - 10^{-11}$ Дж/см², а также от температуры окружающей среды 233 – 313 К, что позволило оценивать изменения амплитуды импульсов SiФЭУ при влиянии указанных факторов.

2. Экспериментально установлены зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности SiФЭУ β_s [Вт⁻¹мм⁻²] от температуры в диапазоне 233 – 313 К, длины волны оптического излучения 380 – 940 нм и перенапряжения от –1,0 до 1,0 В, что позволяет разработать способ определения числа фотонов в оптическом импульсе в условиях изменения внешней среды, в котором по известным значениям интенсивности, длины волны оптического излучения и средней амплитуды сформированных импульсов рассчитывается удельный коэффициент амплитудной чувствительности β_s [Вт⁻¹мм⁻²] и определяется среднее число фотонов в импульсе.

3. Разработана методика определения динамического диапазона SiФЭУ, не требующая предварительных измерений пороговой чувствительности, полосы пропускания и уровня шума от величины внешнего воздействия на фотоприемник, в котором определяются последовательно $J_{кр}$ – критическая интенсивность, [Вт/см²]; J_0 – среднеквадратическое значение интенсивности оптического излучения, [Вт/см²]; U_{ϕ} – падение напряжения на сопротивлении нагрузки в результате воздействия оптического излучения, [В]; $U_{ш}$ – напряжение шума [В], а затем рассчитывается динамический диапазон.

4. Экспериментально установлена зависимость критической и пороговой интенсивности оптического излучения от приложенного напряжения от –1,0 до 1,0 В, а также зависимости динамического диапазона и чувствительности от температуры окружающей среды 233 – 313 К, длины волны 380 – 940 нм и интенсивности оптического излучения для SiФЭУ в диапазоне $10^{-9} – 10^{-5}$ Вт/см².

5. Экспериментально доказано, что наибольшее значение пропускной способности оптического канала связи соответствует значению напряжения смещения, равному напряжению пробоя SiФЭУ для всех исследуемых температур, при этом увеличение температуры приводит к снижению их пропускной способности, что позволило оценить возможности реализации технологии *Li-Fi* в условиях изменения внешних факторов.

6. Экспериментально установлена зависимость пропускной способности оптического канала связи, в котором в качестве фотоприемника используется SiФЭУ, от уровня фонового оптического излучения от 1 до 400 лк, определены уровни фонового оптического излучения, необходимые для «ослепления» этого фотоприемника.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ контроля за количеством фотонов в оптическом импульсе при помощи кремниевого фотоэлектронного умножителя, работающего в режиме счета фотонов, для диапазона длин волн оптического импульса 380 – 940 нм позволяющий идентифицировать количество фотонов в импульсе по амплитуде электрического сигнала на выходе кремниевого фотоэлектронного умножителя.

2. Экспериментально установленные зависимости пропускной способности оптического канала связи на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей от перенапряжения для температурного диапазона 233 – 313 К, которые являются обоснованием предложенной методики восстановления пропускной способности такого канала до 30 Мбит/с в условиях фонового оптического излучения до 400 лк в системе передачи данных *Li-Fi*.

3. Комбинированный датчик для определения температуры и освещенности на основе измерения темнового тока и контроля фототока кремниевого фотоэлектронного умножителя, позволяющий регистрировать температуру окружающей

среды в интервале от 233 до 313 К и контролировать уровень освещенности в интервале от 1 до 400 лк.

Личный вклад соискателя ученой степени.

В диссертационной работе представлены результаты, которые были получены автором лично. Вклад автора в коллективные работы заключается в определении методик исследований, постановке и обосновании конкретных научных задач, создании экспериментальных установок и проведении измерений, объяснении полученных экспериментальных данных, а также в создании новых методов и устройств. Экспериментальные исследования, описанные в работе, выполнялись автором лично или при его непосредственном участии. Совместно с соавторами работ д. т. н., проф. А. О. Зеневичем (научный руководитель) и к. т. н., доцентом Е. В. Новиковым был поставлен ряд научных задач. Соавторами д. т. н., проф. И. Р. Гулаковым, д. т. н., проф. Е. В. Ташмановым, к. т. н. А. С. Асаёнок, к. т. н. В. В. Хатамовым, к. т. н. В. Б. Залесским, С. А. Сорокой, А. А. Лагутик, А. М. Лемешевской, В. С. Цымбалом, С. А. Гоибовым, Т. А. Матковской оказана помощь в получении и обработке результатов. Обсуждение и анализ данных, полученных в работе, проводился совместно со всеми соавторами. В диссертационную работу не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные полученные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXV, XXVI, XXVII Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Минск, 22 – 23 октября 2020 г., 21 – 22 октября 2021 г., 27 – 28 октября 2022 г.); XX, XXI, XXII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи» (Минск, 12 – 13 мая 2020 г., 12 – 13 мая 2021 г., 11 – 12 мая 2022 г.); 26-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 25 – 27 мая 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации, цифровые технологии при обеспечении общественной безопасности: проблемы и решения» (Ташкент, 8 июня 2022 г.).

Результаты исследований использованы в производственном процессе ОАО «ПРОМСВЯЗЬ» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также внедрены в образовательный процесс УО «Белорусская государственная академия связи». По результатам исследований получено 2 патента.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 научных работах, в том числе 12 статей в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

(общим объемом 9,6 авторского листа), 2 статьи в других рецензируемых журналах, 8 статей в сборниках материалов научных конференций, 1 статья в сборниках тезисов докладов научных конференций и 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 116 страниц. Диссертация содержит 37 рисунков на 36 страницах, 13 таблиц на 13 страницах, приложения. Список использованных источников содержит 146 наименований, включая 25 публикаций соискателя ученой степени на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

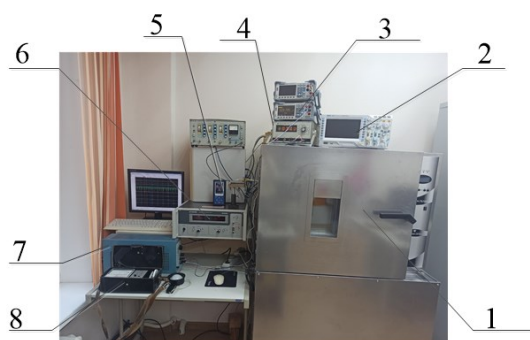
В **первой главе** сформулированы требования, которым должны соответствовать фотоприемники оптического излучения при реализации технологии *Li-Fi*. Таким требованиям наиболее соответствуют SiФЭУ. SiФЭУ представляют собой элементы твердотельной электроники (фотоприемники) на основе упорядоченного набора (матрицы) *p-n*-переходов, выполненного на общей кремниевой подложке. Они компактны, обладают низким напряжением питания (до 30 В), хорошей механической прочностью, высокой чувствительностью (до 10^6 А/Вт) в видимой и ближней ИК области спектра, имеют большие коэффициенты усиления (до 10^6), низкую стоимость и большие площади (до 36 мм²) фоточувствительной поверхности. Поэтому исследуемые SiФЭУ по ряду параметров превосходят электровакуумные фотоумножители и лавинные фотоприемники, которые тоже используются для реализации технологии *Li-Fi*.

Показано, что возможности регистрации оптического излучения исследуемыми фотоприемниками зависят от ряда внешних воздействий, таких как напряжение питания $U_{\text{пит}}$, температура T , длина волны λ и интенсивность оптического излучения J . Поскольку исследуемые SiФЭУ имеют разные напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$, то для сравнения их характеристик используется перенапряжение, определяемое как $\Delta U = U_{\text{пит}} - U_{\text{пр}}$. Однако в настоящее время не установлено, какие ограничения по диапазону регистрируемой интенсивности и пропускной способности вносят SiФЭУ в оптический канал связи, если они используются в качестве регистрирующего элемента в таких системах, а также как изменяется пропускная способность в условиях изменения внешних факторов, особенно фоновой засветки.

Показано, что SiФЭУ являются наиболее подходящими фотоприемниками для регистрации оптического излучения источников одиночных фотонов в режиме одноквантовой регистрации, поскольку они обладают большим усилением до 10^6 , что позволяет выделить сформированные однофотонные импульсы на фоне шу-

мов. Матричная многоэлементная структура SiФЭУ обеспечивает регистрацию фотонов в импульсе независимо от быстродействия фотоприемника и позволяет создавать приборы на квантовых эффектах.

Во второй главе показано, что матричная многоэлементная структура SiФЭУ позволяет определять среднее число фотонов $N_{ф.ср}$ за время длительности импульса по средней амплитуде электрических импульсов $A_{ср}$ в амплитудном распределении импульсов на выходе SiФЭУ. Предложен способ определения числа фотонов в оптическом импульсе, который можно реализовать следующим образом: на фотоприемник подается импульс оптического излучения заданной интенсивности, регистрируются сформированные на нагрузочном сопротивлении электрические импульсы, измеряются амплитуды сформированных электрических импульсов, вычисляется среднее значение амплитуды зарегистрированных электрических импульсов, по известным значениям интенсивности, длины волны оптического излучения и средней амплитуды сформированных импульсов рассчитывается удельный коэффициент амплитудной чувствительности β_s [$Вт^{-1}мм^{-2}$] и вычисляется среднее число фотонов в импульсе.

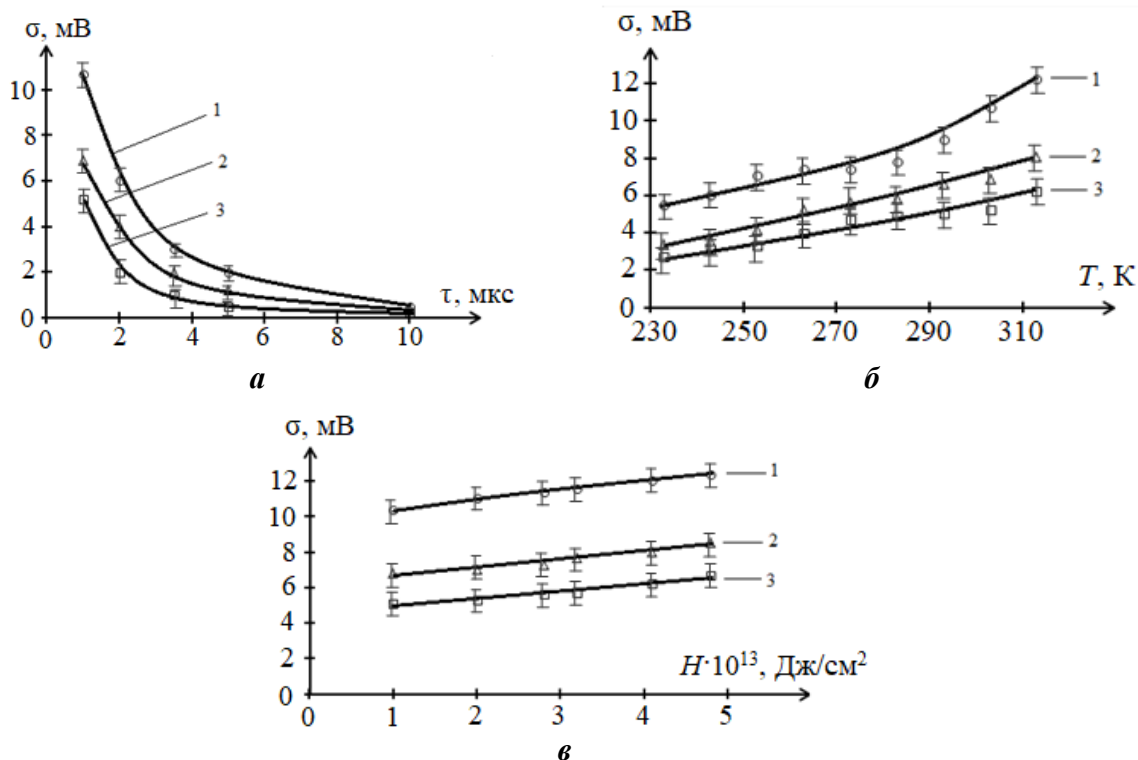


- 1 – камера тепла и холода;
- 2 – цифровой осциллограф;
- 3, 4 – вольтметры; 5 – лазерный дозиметр; 6 – импульсный генератор;
- 7 – источник постоянного напряжения; 8 – люксметр

Рисунок 1 – Внешний вид экспериментальной установки

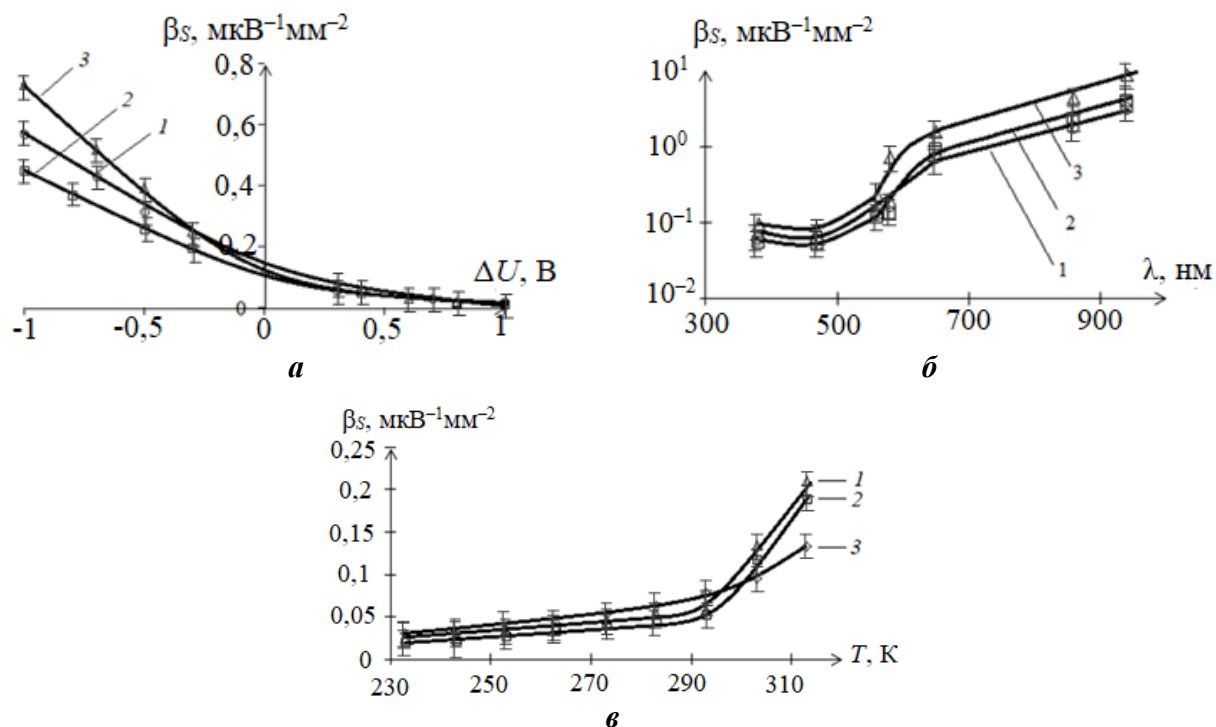
Разработана экспериментальная установка (рисунок 1) для проведения исследований. В установку входит камера тепла и холода КТХ-74-75/180 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия), вольтметры АКИП-2101 (SIGLENT, Китай) и В7-27А/1 («БЕЛВАР», Беларусь), источник импульсного напряжения Г5-54 («Мытищинский электротехнический завод», Россия), лазерный дозиметр ЛД-07 («НТМ – ЗАЩИТА», Россия), осциллограф RIGOL DS2302A («OWON», Китай), источник постоянного напряжения Б5-8 («РИАП», Россия), люксметр Ю116 («МП Вибратор», Россия).

Экспериментальным путем получены зависимости среднеквадратического отклонения амплитуды фотоотклика (рисунок 2) и коэффициента амплитудной чувствительности (рисунок 3) SiФЭУ при регистрации оптического излучения от внешних воздействий.



1 – КЕТЕК РМ 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Рисунок 2 – Зависимости среднеквадратического отклонения амплитуды фотоотклика σ SiФЭУ от длительности оптического импульса (а); температуры (б); энергетической экспозиции (в)



1 – КЕТЕК РМ 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ»

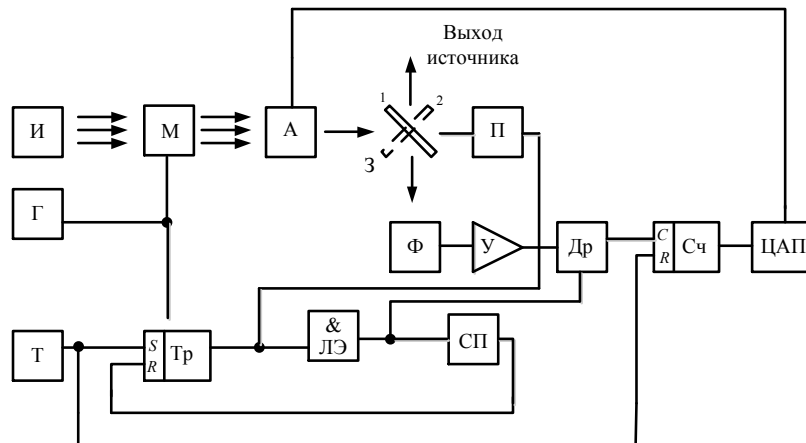
Рисунок 3 – Зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности от перенапряжения (а); длины волны оптического излучения (б); температуры (в)

Получено, что уменьшение температуры окружающей среды в интервале от 313 до 233 К при постоянных прочих параметрах приводит к уменьшению среднеквадратического отклонения амплитуды электрических импульсов, сформированных на выходе SiФЭУ.

Уменьшение длительности оптических импульсов в диапазоне от 1 до 10 мкс при постоянной энергетической экспозиции и увеличение энергетической экспозиции при постоянной длительности импульса приводит к росту среднеквадратического отклонения амплитуды импульсов. Определено, что минимальное значение коэффициента амплитудной чувствительности соответствует длине волны 470 нм. Увеличение напряжения питания или уменьшение температуры приводит к уменьшению коэффициента амплитудной чувствительности, и соответственно, к увеличению чувствительности SiФЭУ в режиме счета фотонов.

Показана возможность регистрации одного фотона при длительности фототклика 1 мкс, длине волны 470 нм и температуре окружающей среды 233 К.

На основании полученных результатов разработан прибор на квантовом эффекте (рисунок 4), который обладает высокой чувствительностью, при температуре 233 К и длине волны оптического излучения светодиода 470 нм регистрирует минимальный оптический сигнал, энергия которого эквивалентна воздействию одного фотона.



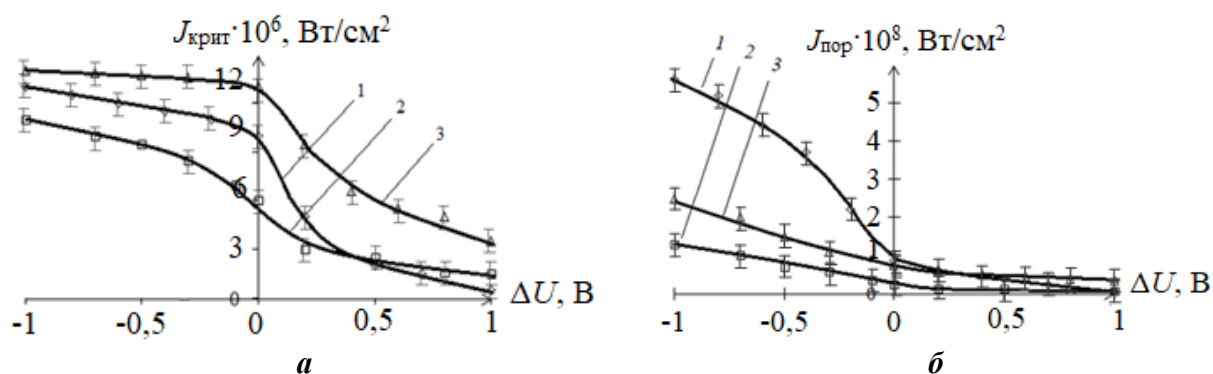
И – источник оптического излучения; **М** – модулятор; **А** – аттенюатор;
П – привод зеркала; **Г** – генератор прямоугольных электрических импульсов;
Ф – SiФЭУ; **У** – усилитель; **Д** – стробируемый амплитудный дискриминатор;
Т – таймер; **Сч** – счетчик; **Тр** – триггер; **ЛЭ** – логический элемент «И»; **З** – зеркало;
1, 2 – положения зеркала; **СП** – схема пересчета; **ЦАП** – цифроаналоговый преобразователь

Рисунок 4 – Схема электрическая структурная устройства для формирования однофотонных импульсов

Основным отличием его от известных аналогов является наличие контроля за числом фотонов в сформированном оптическом импульсе и функци-

ей стабилизации его параметров путем компенсации флуктуации интенсивности оптического излучения, вызванных нестабильностью параметров отдельных элементов, а также изменением условий внешней среды.

В третьей главе установлено, что величина динамического диапазона SiФЭУ D , которая определяется значениями критической и пороговой интенсивности оптического излучения, зависит от таких внешних факторов, как температура, напряжение питания и длина волны оптического излучения. Получены зависимости критической и пороговой интенсивности от напряжения питания (рисунок 5). Наименьшее значение пороговой интенсивности $0,8 \text{ нВт/см}^2$ получено для ON Semi FC 30035 при перенапряжении $\Delta U = 1,0 \text{ В}$. Установлено, что зависимость величины динамического диапазона от перенапряжения имеет максимум. Для всех типов исследуемых SiФЭУ этот максимум соответствует напряжению пробоя или $\Delta U = 0,0 \text{ В}$.



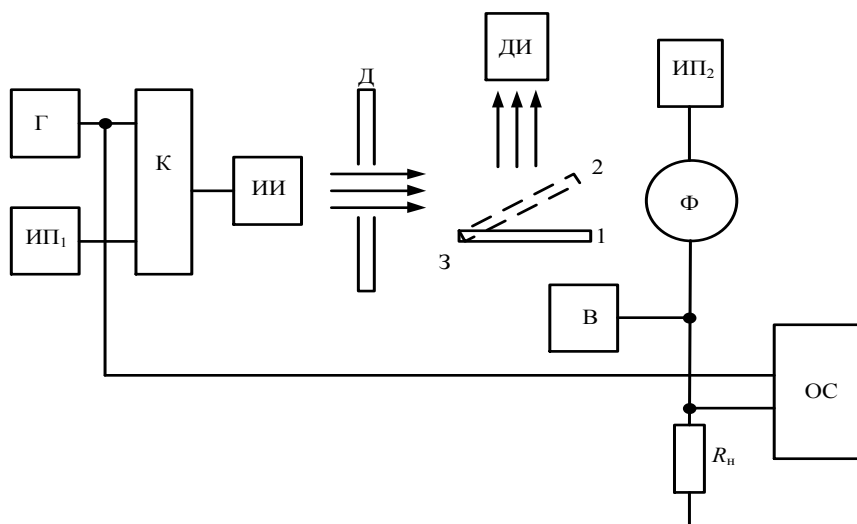
1 – ON Semi FC 30035; 2 – КЕТЕК РМ 3325; 3 – SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Рисунок 5 – Зависимость критической (а) и пороговой (б) интенсивности оптического излучения от величины перенапряжения

Определено, что повышение температуры от 233 до 313 К приводит к росту величины критической и пороговой интенсивностей регистрируемого оптического излучения. Более высокая стабилизация температуры необходима для регистрации оптического излучения на длине волны 470 нм, соответствующей максимуму спектральной чувствительности исследуемых фотоприемников.

Показано, что увеличение напряжения питания приводит к увеличению чувствительности исследуемых фотоприемников. Наиболее сильно зависимость проявляется при перенапряжении $\Delta U > 0,0 \text{ В}$. Определено, что максимум спектральной чувствительности SiФЭУ сдвинут в коротковолновую область и соответствует длине волны оптического излучения 470 нм. Предложена методика определения динамического диапазона фотоприемника, которая позволяет получить такие же численные значения, как и при использовании уже существующих методик. При этом, предложенная методика является более простой по сравнению с уже используемыми, не требует предварительных измерений и пригодна для работы при изменении внешних условий. Для реализации методики выпол-

няют последовательное определение величин в формуле $D = (J_{кр} U_{\phi}) / (J_0 U_{ш})$, где $J_{кр}$ – критическая интенсивность, [Вт/см²]; J_0 – среднеквадратическое значение интенсивности оптического излучения, [Вт/см²]; U_{ϕ} – падение напряжения на сопротивлении нагрузки в результате воздействия оптического излучения, [В]; $U_{ш}$ – напряжение шума, [В]. Функциональная схема для реализации методики определения динамического диапазона SiФЭУ представлена на рисунке 6.



Г – генератор пилообразных импульсов; **ИП₁** – источник питания источника оптического излучения; **К** – коммутатор; **ИИ** – источник оптического излучения; **Д** – диафрагма; **ОС** – двухканальный цифровой осциллограф; **ИП₂** – источник питания фотоприемника; **В** – вольтметр; **R_н** – сопротивление нагрузки; **ДИ** – дозиметр оптического излучения; **З** – зеркало

Рисунок 6 – Схема электрическая функциональная устройства для реализации методики определения динамического диапазона SiФЭУ

С помощью двухканального цифрового осциллографа определяется минимальное значение напряжения питания источника излучения U_{min} , это такое напряжение, для которого величина напряжения фотоотклика еще остается линейной (рисунок 7). Интенсивность, соответствующую U_{min} будем считать критической. После определения U_{min} соответствующее этой величине напряжение выставляется на выходе источника питания ИП₁ и формируется оптическое излучение постоянной интенсивности, которое направляют на дозиметр оптического излучения ДИ, позволяющий определить $J_{кр}$. После измерения величины $J_{кр}$ напряжение на выходе источника питания ИП₁ понижают до величины $0,9U_{min}$. Измеряют величину интенсивности, соответствующую напряжению $0,9U_{min}$. Полученное значение интенсивности соответствует J_0 . При закрытой диафрагме по двухканальному цифровому осциллографу определяют напряжение шума $U_{ш}$. После этого вычисляется D .

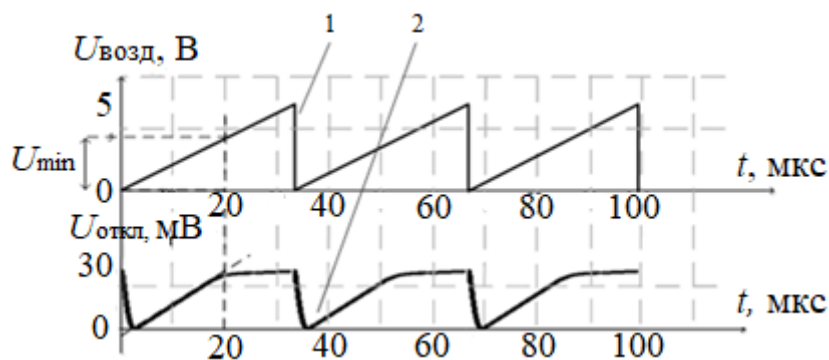
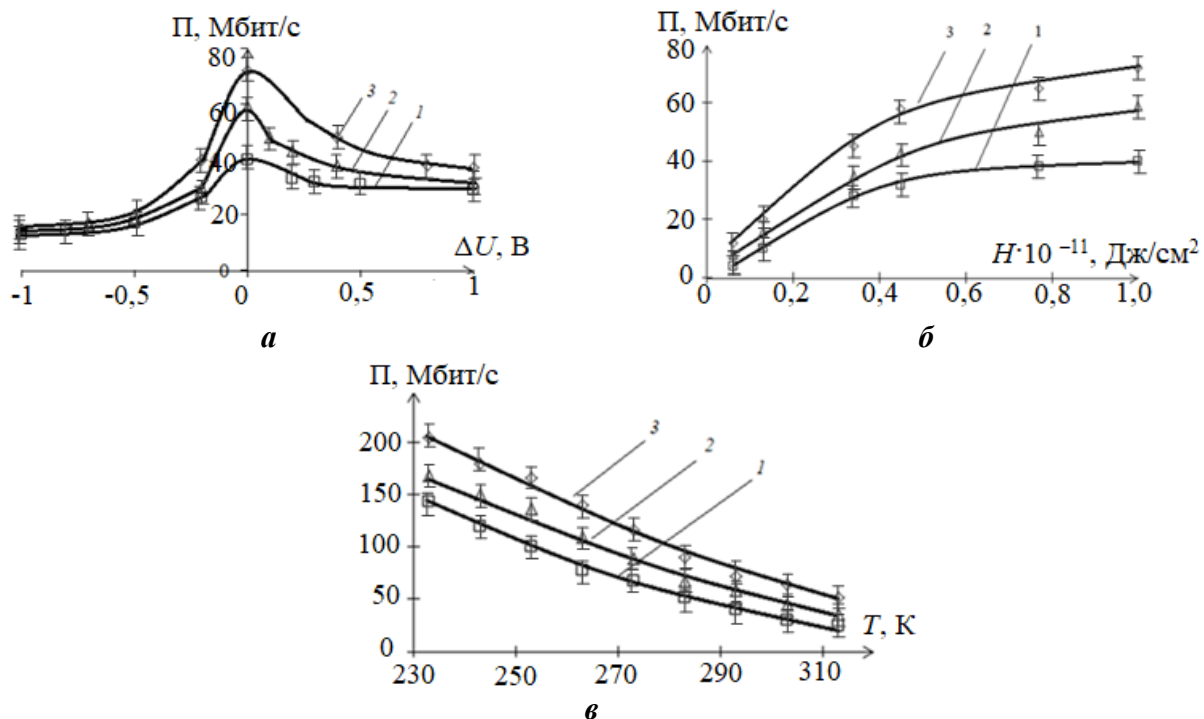


Рисунок 7 – Осциллограмма воздействия (1) и отклика (2) фотоприемника при определении $J_{кр}$

В четвертой главе рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты интеграции SiФЭУ для создания систем обработки оптической информации. Приведены результаты измерения пропускной способности оптического канала связи на основе SiФЭУ (рисунок 8).

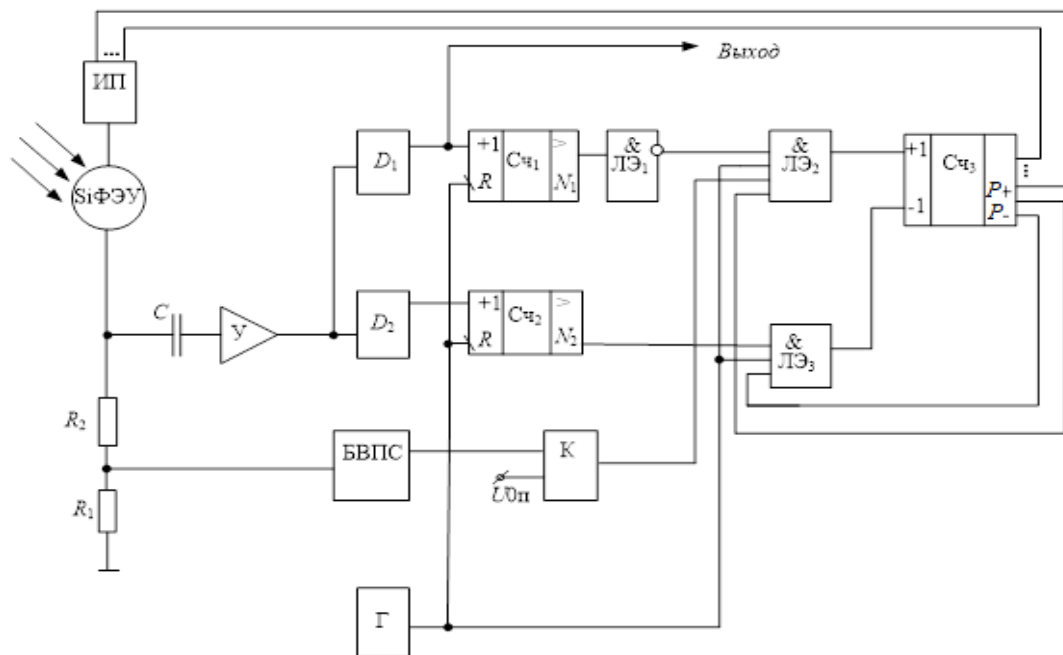


1 – КЕТЕК РМ 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Рисунок 8 – Зависимость пропускной способности оптического канала связи на основе SiФЭУ от перенапряжения (а); энергетической экспозиции (б); температуры (в)

Получено, что увеличение температуры окружающей среды от 233 до 313 К приводит к снижению пропускной способности исследуемых фотоприемников. Увеличение энергетической экспозиции оптических импульсов в диапазоне до $1,0 \times 10^{-11}$ Дж/см² приводит к росту пропускной способности SiФЭУ. Определено, что полоса частот вносит бóльший вклад в значение пропускной способности, чем отношение сигнал/шум. Максимальное значение пропускной способности канала на основе исследуемых SiФЭУ, равное

144 – 204 Мбит/с, получено в условиях отсутствия внешнего фонового излучения при температуре 233 К и напряжении питания, соответствующем напряжению пробоя. Увеличение фонового оптического излучения SiФЭУ приводит к уменьшению скорости передачи оптического канала связи, что связано с увеличением уровня дробового шума и уменьшением коэффициента усиления фототока. Установлено значение фонового оптического излучения, при котором исследуемые фотоприемники «ослепляются», и передача данных прекращается. Оно составило свыше 100; 80 и 40 лк для КЕТЕК РМ 3325, ON Semi FC 30035 и SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ» соответственно. При этом для «ослепления» фотоприемника при больших перенапряжениях требуется большая интенсивность фонового излучения. Использование светофильтра с длиной волны, соответствующей максимуму спектральной чувствительности SiФЭУ, позволяет восстановить скорость передачи данных после «ослепления» до 30 – 41 Мбит/с при уровне внешнего оптического излучения до 400 лк для исследуемых фотоприемников. Разработано устройство регистрации информационного потока, транслируемого оптическим излучением в видимой области спектра в условиях фонового оптического излучения (рисунок 9).

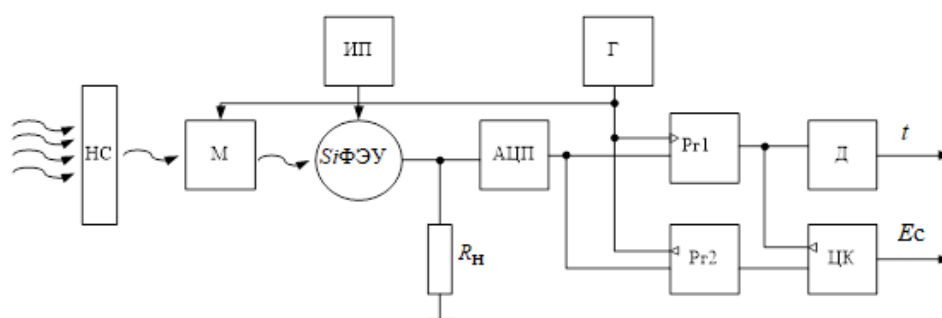


ИП – источник питания; **D₁** и **D₂** – дискриминаторы; **C** – конденсатор;
У – усилитель; **R₁** и **R₂** – резисторы нагрузки; **БВПС** – блок выделения постоянной составляющей; **Г** – генератор; **К** – компаратор; **Сч₁** и **Сч₂** – суммирующие счетчики;
Сч₃ – реверсивный счетчик; **ЛЭ₁** – инвертор; **ЛЭ₂** и **ЛЭ₃** – логические схемы «И»

Рисунок 9 – Схема электрическая структурная устройства регистрации информационного потока, транслируемого оптическим излучением в видимой области спектра в условиях фонового оптического излучения

Разработанное устройство осуществляет контроль напряжения питания и поддерживает его в заданном диапазоне, а также компенсирует влияние фонового излучения на SiФЭУ путем изменения напряжения питания этого фотоприемника. Оно позволяет расширить функциональные возможности устройств регистрации одиночных фотонов и повысить надежность работы этого устройства, так как фиксируется рабочий диапазон изменения напряжения питания фотоприемника и исключается его резкое изменение.

В пятой главе изложен способ определения температуры и освещенности за один период измерения и с помощью одного чувствительного элемента. В данном способе по величине темнового тока, протекающего через фотоприемник, определяется температура, по которой определяется соответствующая ей чувствительность SiФЭУ. Затем по величине фототока и уже известной чувствительности определяется уровень освещенности помещения. Разработана структура прибора на квантовом эффекте, а именно, комбинированного датчика на основе SiФЭУ (рисунок 10). Установлено, что напряжение пробоя SiФЭУ зависит не только от температуры, но и от освещенности.



НС –нейтральный светофильтр; М – модулятор; Г – генератор;
АЦП– аналого-цифровой преобразователь; Pr1 и Pr2 – регистры; ИП – источник
питания; R_n – резистор нагрузки; Д – дисплей; ЦК – цифровой компаратор

Рисунок 10 – Схема электрическая структурная комбинированного датчика
на основе SiФЭУ

Показано, что напряжения питания SiФЭУ, при которых наблюдается линейная зависимость темнового тока от температуры, соответствуют участку вольт-амперной характеристики, для которого дифференциальное сопротивление остается постоянным. Установлено, что увеличение температуры приводит к уменьшению чувствительности SiФЭУ к оптическому излучению, а значение критической освещенности увеличивается. Разработанная структура датчика позволяет одновременно контролировать два параметра, а именно, измерять температуру в диапазоне от 233 до 313 К и контролировать освещенность до 400 лк. Определено, что погрешность измерения температуры составляет 4 – 6 %, и минимальное значение освещенности SiФЭУ, при котором происходит включение освещения для этого датчика, составляет 1 лк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложен способ регистрации количества фотонов в оптическом импульсе при помощи матричной многоэлементной структуры кремниевых фотоэлектронных умножителей по средней амплитуде электрических импульсов в амплитудном распределении импульсов на выходе SiФЭУ. Данный способ позволяет создать источник одиночных фотонов, то есть устройство, формирующее электрический импульс, энергия которого идентична энергии одного фотона, основанный на ослаблении импульсного оптического излучения в среднем до одного фотона в диапазоне длин волн 380 – 940 нм на основе SiФЭУ при работе в режиме счета фотонов [9–А; 10–А; 11–А; 13–А; 15–А; 18–А; 19–А; 21–А].

2. Определено, что зависимость динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей имеет максимум при напряжениях питания, соответствующих напряжению пробоя. При создании фотоприемных устройств на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей для обеспечения наибольшего динамического диапазона регистрации необходимо выбирать напряжения питания, соответствующие этому максимуму. Определено, что рост температуры приводит к росту величины критической и пороговой интенсивности регистрируемого оптического излучения. Зависимость пороговой интенсивности от температуры для исследованных фотоприемников ON Semi FC 30035, КЕТЕК РМ 3325 и SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ» одинакова. Установлено, что величина динамического диапазона исследованных фотоприемников с ростом температуры от 233 до 313 К уменьшается. Получено, что наибольшее значение динамического диапазона соответствует максимуму спектральной чувствительности исследуемых фотоприемников. Показано, что более высокая стабилизация температуры необходима для регистрации оптического излучения на длине волны оптического излучения 470 нм [1–А; 2–А; 12–А; 17–А; 19–А].

3. Установлено, что пропускная способность оптического канала связи с кремниевым фотоэлектронным умножителем при реализации технологии *Li-Fi* принимает максимальное значение, соответствующее напряжению пробоя исследуемых фотоприемников, и зависит от величины динамического диапазона фотоприемника. Показано, что максимум пропускной способности соответствует максимуму спектральной чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей, и увеличение температуры окружающей среды приводит к ее снижению. Максимальное значение пропускной способности оптического канала связи на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей в условиях без внешнего фонового оптического излучения составило 144 – 204 Мбит/с [3–А; 5–А; 6–А; 7–А; 19–А; 20–А; 23–А; 24–А; 25–А;].

4. Установлено, что фоновое оптическое излучение приводит к снижению отношения сигнал/шум исследованных SiФЭУ и, следовательно, к снижению пропускной способности оптического канала связи при реализации технологии *Li-Fi*. Получено, что передача данных прекращается при уровне фонового оптического излучения фотоприемника при 40 – 100 лк и выше, в зависимости от марки SiФЭУ. Восстановить передачу данных возможно при использовании светофильтров и/или путем повышения напряжения питания кремниевых фотоэлектронных умножителей. Показана возможность восстановления пропускной способности до 30 – 40 Мбит/с при уровне фонового оптического излучения 100 – 400 лк при использовании светофильтра с длиной волны, соответствующей максимуму спектральной чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей. На основании полученных результатов разработано устройство регистрации оптической информации в видимой части спектра на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей, которое позволяет осуществлять контроль напряжения питания и поддерживать его в заданном диапазоне, а также компенсировать фоновое оптическое излучение путем регулировки напряжения питания фотоприемника [4–А; 14–А].

5. Установлено, что напряжения питания кремниевых фотоэлектронных умножителей, при которых наблюдается линейная зависимость темнового тока от температуры, соответствуют участку вольт-амперной характеристики, для которого дифференциальное сопротивление остается постоянным. Соответствующие перенапряжения составили $\Delta U \geq 0,5$ В для КЕТЕК РМ 3325, $\Delta U \geq 0,8$ В для ON Semi FC 30035, $\Delta U \geq 1,2$ В для SiФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ». Установлено, что увеличение температуры в диапазоне 233 – 313 К приводит к уменьшению чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей к оптическому излучению. Определено, что с ростом температуры значение критической освещенности увеличивается. Предложено устройство комбинированного датчика на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя, который позволяет контролировать два параметра: температуру и освещенность. Определены характеристики этого датчика. На основании полученных результатов разработана схема комбинированного датчика на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей, позволяющего регистрировать температуру окружающей среды в интервале от 233 до 313 К и контролировать освещенность помещений или улиц от 1 лк и более [8–А; 16–А; 18–А; 22–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты позволили разработать новые методики и способы эксплуатации фотоэлектронных устройств на основе SiФЭУ, а именно: способ формирования однофотонных импульсов может найти применение в квантовых криптографических системах, в фундаментальных исследованиях,

связанных с интерференцией фотонов, для создания генераторов случайных чисел; методика регистрации информационного потока, транслируемого оптическим излучением в видимой области спектра, в условиях внешнего оптического излучения может быть использована в открытых оптических системах связи, таких как *Li-Fi*; способ определения температуры и превышения уровня освещенности может найти применение в системах «Умный дом» и «Умный город»; экспериментальные результаты по зависимости динамического диапазона и чувствительности от внешних факторов могут быть использованы при изготовлении SiФЭУ, а также разработке и создании других оптоэлектронных устройств на их основе.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в настоящее время, что подтверждается актами внедрения в производство ОАО «ПРОМСВЯЗЬ» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и актами внедрения в образовательный процесс учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» при разработке курсов лекций «Технологии телематики» и «Техническая электроника».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1–А. Усиление фототока лавинными фотоприемниками при микроплазменном пробое / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков // Успехи приклад. физики. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 117 – 123.

2–А. Работа кремниевых фотозлектронных умножителей со структурой p^+p-n^+ в режиме одноквантовой регистрации / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков, С. А. Сорока // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3 – С. 349 – 356.

3–А. Реализация режима счета фотонов матричными многоэлементными лавинными фотоприемниками видимого и ближнего инфракрасного диапазонов / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. В. Кочергина, А. А. Лагуттик // Успехи приклад. физики. – 2020. – Т. 8, № 6 – С. 464 – 471.

4–А. Зеневич, А. О. Исследование динамического диапазона кремниевых фотозлектронных умножителей / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Изв. высш. учеб. заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 30 – 39.

5–А. Исследование зависимости динамического диапазона кремниевых фотозлектронных умножителей от температуры / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, А. М. Лемешевская, С. А. Сорока // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 234 – 240.

6–А. Гулаков, И. Р. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Успехи приклад. физики. – 2021. – Т. 9, № 2 – С.164 – 171.

7–А. Исследование характеристик матричных лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. В. Кочергина, А. А. Лагуттик // Успехи приклад. физики. – 2021. – Т. 9, № 3 – С. 216 – 223.

8–А. Кремниевые фотоэлектронные умножители как основа для создания комбинированных датчиков / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 11. – С. 48 – 54.

9–А. Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя / В. Б. Залесский, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, В. С. Цымбал // Изв. вузов. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 50 – 58.

10–А. Гулаков, И. Р. Исследование пропускной способности оптического канала связи с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя в условиях фоновой засветки / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Приклад. физика. – 2022. – № 1. – С. 28 – 44.

11–А. Обнаружение канала утечки информации из многомодового оптического волокна при помощи кремниевого фотоумножителя / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Т. А. Матковская // Докл. БГУИР. – 2022. – № 20 (6). – С. 37 – 44.

12–А. Приемное устройство канала утечки оптической информации из многомодового оптоволокна на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Т. А. Матковская // Приклад. физика. – 2022. – № 4. – С. 86 – 91.

Статьи в других рецензируемых журналах

13–А. Исследование шумовых характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей при регистрации оптических импульсов / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков // Проблемы инфокоммуникаций. – 2020. – № 2 (12). – С. 41 – 46.

14–А. Регистрация оптического излучения переменной интенсивности в режиме счета фотонов лавинным фотодиодом / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков, С. А. Гоибов // Опт. журн. – 2021. – Т. 88, № 11. – С. 9 – 15.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

15–А. Кочергина, О. В. Анализ выбора фотоприемника для датчика задымления /О. В. Кочергина, А. О. Зеневич // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи: материалы XX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, Минск, 12 – 13 мая 2020 г. / М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО «Белорус. гос. акад. связи», редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск: Бел. гос. акад. связи, 2020. – С. 35.

16–А. Кочергина, О. В. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей / О. В. Кочергина, А. О. Зеневич // Современные средства связи: материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22 – 23 окт. 2020 г. / М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО «Белорус. гос. акад. связи», Регион. сотрудничество в области связи (РСС), Междунар. союз электросвязи (МСЭ), РУП «Белпочта», РУП «Белтелеком», ОАО «Гипросвязь», редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск: Белорус. гос. акад. связи, 2020. – С. 100.

17–А. Кочергина, О. В. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей / О. В. Кочергина, А. О. Зеневич // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи: материалы XXI науч.-техн. конф. аспирантов, студентов и молодых специалистов, Минск, 12 – 13 мая 2021 г. / М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО «Белорус. Гос. акад. связи»; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск: Белорус. гос. акад. связи, 2021. – С. 34 – 35.

18–А. Кочергина, О. В. Пропускная способность оптической системы связи *Li-Fi* /О. В. Кочергина, А. О. Зеневич // Современные средства связи: материалы XXVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21 – 22 окт. 2020 г./ М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО «Белорус. гос. акад. связи», Региональное сотрудничество в области связи (РСС), Междунар. союз электросвязи (МСЭ), РУП «Белпочта», РУП «Белтелеком», ОАО «Гипросвязь», редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : Белорус. гос. акад. связи, 2021. – С. 144 – 145.

19–А. Кочергина, О. В. Фотоприемники для регистрации оптического излучения в открытых системах связи / О. В. Кочергина, А. О. Зеневич // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи: материалы XXII науч.-техн. конф. аспирантов, студентов и молодых специалистов, Минск, 11 – 12 мая 2022 г. / М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО . «Белорус. гос. акад. связи» ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, Белорус. гос. акад. связи, 2022. – С.57 – 58.

20–А. Кочергина, О. В. Регистрация информации из канала утечки на основе многомодового оптоволокна / О. В. Кочергина // Материалы, Междунар. науч.-практ. конф. Инновации, цифровые технологии при обеспечении общественной

безопасности: проблемы и решения» Ташкент, 8 июня 2022 г. – Ташкент, 2022. – С. 183 – 185.

21–А. Кочергина, О. В. Канал утечки информации в области изгиба оптического волокна / О. В. Кочергина, Т. А. Матковская, Dr. Arash Kosari // Современные средства связи: материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27 – 28 окт. 2022 г. / М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО «Белорус. гос. акад. связи», Региональное сотрудничество в области связи (РСС), Междунар. союз электросвязи (МСЭ), РУП «Белпочта», РУП «Белтелеком», ОАО «Гипросвязь»; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск: Беларус. гос. акад. связи, 2022. – С. 122 – 124.

22–А. Кочергина, О. В. Использование кремниевого фотоэлектронного умножителя для обнаружения канала утечки информации из многомодового оптического волокна / О. В. Кочергина, Т. А. Матковская // Современные средства связи: материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27 – 28 окт. 2022 г. / М-во связи и информатизации Респ. Беларусь, УО «Белорус. гос. акад. связи», Региональное сотрудничество в области связи (РСС), Междунар. союз электросвязи (МСЭ), РУП «Белпочта», РУП «Белтелеком», ОАО «Гипросвязь»; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, Беларус. гос. акад. связи, 2022. – С. 72 – 74.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

23–А. Кочергина, О. В. Кремниевые фотоэлектронные умножители как фоточувствительный элемент комбинированного датчика контроля освещенности и измерения температуры / О. В. Кочергина, А. О. Зеневич // Материалы 26-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 25 – 27 мая 2022 г. / Гос. науч. центр Рос. Федерации АО «НПО «Орион», Минпромторг России, Минобрнауки России, гос. корпорация «Ростех», холдинг АО «Швабе», Рос. фонд фундам. исслед., Рус. опт. о-во, Опт. о-во им. Д.С. Рождественского – М., НПО «Орион», 2022. – С. 265 – 267.

Патенты на изобретение

24–А. Пожарный датчик. пат. ВУ 23998 / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик, Е. В. Новиков. – Оpubл. 30.04.2023.

25–А. Способ генерации однофотонных оптических импульсов. пат. ВУ 24019 / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, А. А. Лагутик, Е. В. Новиков. – Оpubл. 30.04.2023.



РЕЗЮМЕ

Кочергина Ольга Викторовна

Оптоэлектронные устройства на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей для спектрального диапазона 380 – 940 нм

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, технология *Li-Fi*, счет фотонов, однофотонный импульс, динамический диапазон, пропускная способность, фоновое оптическое излучение, комбинированный датчик.

Цель работы: разработка оптоэлектронных устройств, включающих комбинированный датчик температуры и освещенности, источник однофотонных импульсов и устройство регистрации оптического излучения для спектрального диапазона 380 – 940 нм на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей с учетом воздействия на них таких внешних факторов, как температура, внешняя освещенность, длина волны оптического излучения и напряжение питания.

Методы исследования: методы статистического анализа, методы математического моделирования и натурального эксперимента.

Полученные результаты и их новизна: разработан способ определения числа фотонов в оптическом импульсе, использующий свойства матричной структуры SiФЭУ, и способ формирования однофотонных импульсов, основанный на ослаблении энергии оптического импульса, в среднем до одного фотона в диапазоне длин волн 380 – 940 нм; предложена методика регистрации информационного потока, транслируемого оптическим излучением в видимой области спектра в условиях фоновой освещенности от 0 до 400 лк, основанная на коррекции напряжения питания SiФЭУ и позволяющая обеспечивать скорость передачи информации до 30 Мбит/с; разработан способ определения температуры и контроля уровня освещенности за один период измерений и с помощью одного чувствительного элемента на основе SiФЭУ, позволяющий регистрировать температуру окружающей среды в интервале от 233 до 313 К и контролировать уровень освещенности в интервале от 1 до 400 лк.

Рекомендации по применению: полученные результаты могут быть использованы при разработке оптоэлектронных устройств на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Область применения: оптоэлектроника, связь, приборостроение, квантовая криптография, системы «Умный дом».

РЭЗІЮМЭ

Качаргіна Вольга Віктараўна

Оптаэлектронныя прылады на аснове крэмніевых фотаэлектронных памнажальнікаў для спектральнага дыяпазону 380 – 940 нм

Ключавыя словы: крэмніевы фотаэлектронны памнажальнік, тэхналогія *Li-Fi*, падлік фатонаў, аднафатонны імпульс, дынамічны дыяпазон, прапускная здольнасць, фонавае аптычнае выпраменьванне, камбінаваны датчык.

Мэта працы: распрацоўка оптаэлектронных прылад, а менавіта камбінаванага датчыка тэмпературы і асветленасці, крыніцы аднафатонных імпульсаў і прылады рэгістрацыі аптычнага выпраменьвання для спектральнага дыяпазону 380 – 940 нм на аснове SiФЭП з улікам уздзеяння на іх такіх знешніх фактараў, як тэмпература, фонавае аптычнае выпраменьванне, даўжыня хвалі аптычнага выпраменьвання і напружанне сілкавання.

Метады даследавання: метады статыстычнага аналізу, метады матэматычнага мадэлявання і натуральнага эксперыменту.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны спосаб вызначэння колькасці фатонаў у аптычным імпульсе, які выкарыстоўвае ўласцівасці матрычнай структуры SiФЭП, і спосаб фарміравання аднафатонных імпульсаў, заснаваны на паслабленні энергіі аптычнага імпульсу, у сярэднім да аднаго фатона ў дыяпазоне даўжынь хваль 380 – 940 нм; прапанавана метадыка рэгістрацыі інфармацыйнага патоку, які транслюецца аптычным выпраменьваннем у бачнай вобласці спектру ва ўмовах фонавай асветленасці ад 0 да 400 лк, заснаваная на карэкцыі напружання сілкавання SiФЭП і якая дазваляе забяспечваць хуткасць перадачы інфармацыі да 30 Мбіт/с; распрацаваны спосаб вызначэння тэмпературы і кантролю ўзроўню асветленасці за адзін перыяд вымярэнняў і з дапамогай аднаго адчувальнага элемента на аснове SiФЭП, які дазваляе рэгістраваць тэмпературу навакольнага асяроддзя ў інтэрвале ад 233 да 313 К і кантраляваць узровень асветленасці ў інтэрвале ад 1 да 400 лк.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы оптаэлектронных прылад на аснове крэмніевых фотаэлектронных памнажальнікаў.

Галіна прымянення: оптаэлектроніка, сувязь, прыборабудаванне, квантавая крыптаграфія, сістэмы «Разумны дом».

SUMMARY

Kochergina Olga Viktorovna

Optoelectronic devices on the basis of silicon photoelectronic multipliers for the spectral range 380 – 940 nm

Keywords: silicon photoelectronic multiplier, Li-Fi technology, photon counting, single-photon impulse, dynamic range, bandwidth, background optical radiation, combined sensor.

Purpose of research: the creation of optoelectronic devices such as a combined temperature and light sensor, a source of single-photon pulses, and an optical radiation detection device for the spectral range of 380–940 nm on the basis of SiPM, taking into account that they are influenced by such external factors as temperature, background optical radiation, wavelength optical radiation and supply voltage.

Research methods: statistics analysis methods, mathematical modeling and natural experiment methods.

The results obtained and their novelty: The method for identifying the number of photons in an optical impulse using the properties to the matrix structure of SIPM has been developed, and the way of formation of single-photon impulses, based on the optical impulse power weakening up to 1 photon in the wave length range 380 – 940 nm, has been suggested; method of information stream registration translated by optical radiation in the visible spectral area under background lighting 0 – 400 lx based on the power voltage correction SiPM and allowing to provide information transmission rate not less than 30 Mbit/s has been suggested; the method of simultaneous identifying of temperature and lighting level control on the basis of SIPM has been developed allowing to register environmental temperature in the range of 233 up to 313 K and control the lighting level from 1 till 400 lx.

Recommendations for use: the acquired results can be used in the development of optoelectronic devices on the basis of silicon photoelectronic multipliers.

Applications: optoelectronics, communications, instrumentation, quantum cryptography, Smart Home systems.

Научное издание

Кочергина Ольга Викторовна

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО
ДИАПАЗОНА 380 – 940 нм**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать 01.08.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз Заказ 213.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск