

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

КОЧЕРГИНОЙ Ольги Викторовны

«Оптоэлектронные устройства на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей для спектрального диапазона 380 – 940 нм»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым присуждается ученая степень

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.

Твердотельные кремниевые фотоэлектронные умножители представляют собой полупроводниковые приборы, предназначенные для регистрации излучения малой интенсивности вплоть до одиночных фотонов. Кремниевые фотоэлектронные умножители компактны, обладают низким напряжением питания, хорошей механической прочностью, высокой чувствительностью в видимой и ближней ИК области спектра, имеют большие коэффициенты усиления, низкую стоимость и большие площади фоточувствительной поверхности. Такие устройства обладают высоким потенциалом для реализации систем квантовых телекоммуникаций и криптографии.

Содержание диссертации Кочергиной О.В. соответствует специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки, физико-математические науки), в частности, областям исследований 3. Методы создания, испытания, измерения параметров и модификации акустических, электрических, электромеханических, магнитных и оптических схем (цепей) на основе изделий и устройств по п. 1.; 5. Функциональные и эксплуатационные характеристики изделий и устройств по п. 1, включая качество, долговечность, надежность и стойкость к внешним воздействиям, а также эффективность их применения в технике, а также требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Таким образом, диссертационная работа Кочергиной О.В. «Оптоэлектронные устройства на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей для спектрального диапазона 380 – 940 нм» полностью соответствует специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,

радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки).

2. Актуальность темы диссертации

В настоящее время широкое развитие получили технологии передачи данных, основанные на использовании видимого диапазона спектра. Это проводные технологии ВОЛС, беспроводные Li-Fi и технологии, назначение которых сопровождать процессы и обеспечивать защиту передаваемой информации, а именно, квантовые коммуникации, квантовая сигнализация.

Развивается класс оптоэлектронных элементов и устройств, способных к регистрации оптического излучения видимого диапазона спектра. Одним из таких элементов являются кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ). Таким образом, необходимо исследование характеристик SiФЭУ, связанных с реализацией технологий Li-Fi и квантовых коммуникаций, их зависимость от внешних факторов, таких как напряжение питания фотоприемника, температура окружающей среды и внешняя освещенность, а также создание на основе исследуемых фотоприемников соответствующих оптоэлектронных устройств.

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.

Актуальность данной работы не вызывает сомнений.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Основные результаты, полученные автором, являются новыми. Основными из них являются:

1. Контроль 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.

4. Методика определения динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей, не требующий предварительного измерения характеристик прибора и основанный на вычислении отношения напряжения фототока, напряжения шума, критической и внешней интенсивности оптического излучения, определяемых в одном цикле измерений.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность представленных результатов обоснована использованием современных методов исследования и калиброванного и поверенного оборудования. Сформулированные выводы обоснованы, структурированы, вытекают из содержания проведенного исследования и отражают научные положения, представленные в диссертации.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость результатов диссертационной работы состоит в получении новых знаний о закономерностях поведения характеристик твердотельных кремниевых фотоэлектронных умножителей при изменении температуры, освещенности и напряжения питания, разработке способов определения этих характеристик и физико-технических основ использования кремниевых фотоэлектронных умножителей в оптоэлектронных устройствах. Полученные результаты использовались в дальнейших научных разработках в рамках научно-исследовательских работ.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

- разработке принципа работы и создании устройства для формирования оптических сигналов с заданным числом фотонов в импульсе, основанном на использовании кремниевого фотоэлектронного умножителя для контроля интенсивности оптического сигнала;

- определение динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей, не требующего проведения предварительных измерений параметров приборов;

- методика регистрации импульсного оптического излучения в условиях переменной внешней фоновой освещенности, основанного на

контролируемом изменении перенапряжения на кремниевом фотоэлектронном умножителе;

- разработке одновременного определения температуры и превышения уровня освещенности путем измерения темнового тока и фототока кремниевого фотоэлектронного умножителя.

Экономическая значимость полученных результатов состоит в способствовании разработке и созданию конкурентоспособной продукции предприятиями Республики Беларусь. Использование разработанного комбинированного датчика на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя позволяют удешевить систему «Умный дом».

Социальная значимость заключается в использовании результатов диссертационной работы в образовательном процессе учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» для студентов специальностей 1 45 01 02 «Инфокоммуникационные системы» и 1 45 01 01 «Инфокоммуникационные технологии».

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

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.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями инструкции ВАК Республики Беларусь. Текст диссертации изложен последовательно и логично, с достаточным количеством графического материала. Содержание автореферата соответствует тексту диссертации.

8. Замечания по диссертации.

1. На стр.16 в таблице 1.1 указано, что напряжение питания лавинных фотодиодов находится в интервале от 200 – 300 В. Хотя известны кремниевые лавинные фотодиоды с напряжением 50 В например ФД-115Л.
2. В таблице 1.2 на стр.19 указана одна из характеристик кремниевого фотоэлектронного умножителя «коэффициент усиления». Для этих фотоприемников можно рассматривают как минимум два коэффициента усиления. Один из которых коэффициент усиления фототока, а другой коэффициент темнового тока. В диссертации не указано конкретно о каком коэффициенте усиления из них идет речь. Далее на стр.20 пишется о зависимости коэффициента усиления

кремниевого фотоэлектронного умножителя от температуры. Зависимость какого коэффициента усиления не уточняется.

3. На стр.25 имеется неудачное выражение «Фотоприемники для одноквантовой регистрации в режиме счета фотонов». Это связано с тем, что одноквантовая регистрация и режим счета фотонов являются одним и тем же видом регистрации оптического излучения.
4. На стр.49 вводится такое понятие «пороговая интенсивность регистрируемого оптического излучения», но далее по тексту не поясняется, что это такое. Пояснение необходимо поскольку в литературе и ГОСТах такое понятие не встречается.
5. Согласно ГОСТ Р 59607-2021 «Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик» чувствительность фотоприемника измеряется в А/Вт, а в диссертационной работе (см. формулу (3.4) стр. 51) эта величина имеет размерность она имеет размерность $\text{Ам}^2/\text{Вт}$. По всей видимости здесь идет речь об удельной чувствительности?
6. На стр.62 неудачное название таблицы 3.2 «Оценка зависимости $J_{\text{кр}}(\Delta U)$ ». Необходимо было назвать таблицу 3.2 «Данные оценки зависимости $J_{\text{кр}}(\Delta U)$ ». Также неудачное название таблицы 3.4 стр.66 «Сравнение результатов измерения динамического диапазона при изменении напряжения питания». Необходимо было назвать таблицу 3.4 «Результаты измерения динамического диапазона при изменении напряжения питания». Неудачное название таблицы 3.5 стр.69 «Сравнение результатов измерения динамического диапазона при изменении длины волны оптического излучения». Необходимо было назвать таблицу 3.5 «Результаты измерения динамического диапазона при изменении длины волны оптического излучения». Также неудачное название таблицы 3.7 стр.76 «Сравнение результатов измерения динамического диапазона при изменении температуры». Необходимо было назвать таблицу 3.7 «Результаты измерения динамического диапазона при изменении температуры».
7. В структурной схеме экспериментальной установки на рис. 84 отсутствует изображение окна или какого-либо отверстия в камере тепла и холода. Поэтому непонятно каким образом оптическое излучение поступает на кремниевый фотоэлектронный умножитель.
8. В формуле (5.1) стр.101 неудачно выбрано обозначение коэффициента пропорциональности k . Этот коэффициент можно спутать с постоянной Больцмана в данном контексте.
9. На рисунке 5.6 стр.111 в подрисуночных подписях отсутствует пояснения обозначений выходов структурной схемы комбинированного датчика на основе SiФЭУ.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ содержания диссертации и публикаций позволяет сделать вывод, что квалификация соискателя соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатам технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

10. Заключение.

Диссертация КОЧЕРГИНОЙ Ольги Викторовны «Оптоэлектронные устройства на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей для спектрального диапазона 380 – 940 нм» представляет собой законченную квалификационную работу, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, содержит новые результаты по актуальному научному направлению.

КОЧЕРГИНА Ольга Викторовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за разработку следующих принципиально новых научно обоснованных результатов:

1. Определение количества фотонов в оптическом импульсе при помощи матричной многоэлементной структуры кремниевых фотоэлектронных умножителей по средней амплитуде электрических импульсов в амплитудном распределении импульсов на выходе фотоприемника и устройства, формирующего электрический импульс, энергия которого идентична энергии одного фотона, принцип работы которого основан на ослаблении импульсного оптического излучения в среднем до одного фотона в диапазоне длин волн 380 – 940 нм на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей при работе в режиме счета фотонов.

2. Методики определения динамического диапазона кремниевого фотоэлектронного умножителя, не требующего предварительного измерения характеристик прибора и основанного на вычислении отношения напряжения фототока, напряжения шума, критической и внешней интенсивности оптического излучения, определяемых в одном цикле измерений.

3. Регистрации импульсов оптического излучения в спектральном диапазоне от 380 до 940 нм в условиях фонового внешнего излучения до 400 лк при помощи кремниевого фотоэлектронного умножителя, основанного на контроле напряжения питания фотоэлектронного умножителя в пределах его динамического диапазона.

4. Одновременной регистрации температуры окружающей среды и уровня освещенности на одном фоточувствительном элементе путем измерения темнового тока и фототока кремниевого фотозлектронного умножителя, который позволяет регистрировать температуру в диапазоне от 233 до 313 К и контролировать превышение освещенности в диапазоне от 1 до 400 лк.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор
Член-корреспондент Национальной
академии наук Беларуси, главный
специалист по науке
научно-технического управления
ОАО «ИНТЕГРАЛ»

В. А. Емельянов

Подпись В.А. Емельянова заверено
И.О. начальника ИИ Д.И. Кошар



Совет по защите
диссертаций при БГУИР
«04» окт. 2023 г.
Вх. № 05.02-11/170