

## 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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

**Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым присуждается ученая степень.** Диссертация посвящена разработке способов измерения параметров и модификации схем на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ), установлению закономерностей изменения 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. Представленная работа направлена на исследование функциональных и эксплуатационных характеристик изделий и устройств твердотельной электроники: эффективности их применения в технике.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что по целям, задачам и объекту исследования работа соответствует паспорту специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах по пунктам 3 (Методы создания, испытания, измерения параметров и модификации акустических, электрических, электромеханических, магнитных и оптических схем (цепей) на основе изделий и устройств по п. 1.) и 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), и отрасли – технические науки.

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время в качестве перспективных рассматриваются беспроводные технологии передачи данных на основе видимого диапазона спектра, где в качестве приемного элемента могут использоваться SiФЭУ. Развитие и постоянное совершенствование технологий современной полупроводниковой электроники основано на разработке новых применений существующих устройств или модификации схем, в которых они являются ключевым элементом.

Диссертационная работа направлена на проведение исследований характеристик твердотельных SiФЭУ и их зависимостей от внешних и внутренних факторов, что позволило разработать оригинальные устройства потенциально применимые для систем квантовых криптографических систем, технологий «Умный дом» и *Li-Fi*, и заложить основы для создания новых устройств и применений SiФЭУ. Разработанный метод определения

динамического диапазона SiФЭУ позволяет усовершенствовать и упростить процесс их производства и эксплуатации. Актуальность представленной диссертационной работы не вызывает сомнений.

**Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.** Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в следующем:

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/см<sup>2</sup>, а также от температуры окружающей среды  $233 - 313$  К, что позволяет оценивать изменения амплитуды импульсов SiФЭУ при изменении указанных факторов.

2. Экспериментально установлены зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности SiФЭУ  $\beta_s$  от таких факторов как температура в диапазоне  $233 - 313$  К, длина волны оптического излучения  $380 - 940$  нм и перенапряжение от  $-1$  до  $1$  В, что позволяет разработать способ определения числа фотонов в оптическом импульсе в условиях изменения внешней среды.

3. Разработана методика измерения динамического диапазона SiФЭУ, не требующая предварительных измерений пороговой чувствительности, полосы пропускания и уровня шума от величины внешнего воздействия на фотоприемник.

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  $10^{-9} - 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>.

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.

Новизна положения 1, выносимого на защиту, состоит в разработке способа контроля за количеством фотонов в оптическом импульсе по амплитуде электрического сигнала на выходе кремниевого фотоэлектронного умножителя, работающего в режиме счета фотонов, для диапазона длин волн

оптического импульса 380 – 940 нм, который позволил разработать устройство формирования однофотонного импульса.

Новизна положения 2, выносимого на защиту, состоит в экспериментально установленных зависимостях пропускной способности оптического канала связи на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей от перенапряжения для температурного диапазона 233 – 313 К, на основании которых разработана методика восстановления пропускной способности такого канала до 30 Мбит/с в условиях фонового оптического излучения до 400 лк в системе передачи данных *Li-Fi*.

Новизна положения 3, выносимого на защиту, состоит в разработке способа определения температуры окружающей среды в интервале от 233 до 313 К и освещенности в интервале от 1 до 400 лк на SiФЭУ за один цикл измерения и комбинированного датчика реализующего этот способ.

Результаты являются новыми и получены соискателем самостоятельно. По результатам диссертационной работы получены 2 патента на полезное изобретение Республики Беларусь.

**Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Результаты, представленные в диссертационной работе, получены экспериментально с применением средств объективного контроля: калиброванного и поверенного оборудования. Результаты не противоречат основным законам физики, электротехники и оптики, а также результатам, полученным другими авторами. Для обработки результатов и установления зависимостей использовались методы статистического анализа. Таким образом, выводы, представленные в диссертационной работе являются обоснованными.

Эффективность разработок подтверждена актами внедрения результатов в производство ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ОАО «ПРОМСВЯЗЬ», а также учебный процесс УО «Белорусская государственная академия связи».

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

*Научная значимость* в установлении зависимостей характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей от таких факторов как температура в диапазоне 233 – 313 К, длина волны оптического излучения 380 – 940 нм и перенапряжение от –1 до 1 В, что позволило разработать способ определения числа фотонов в оптическом импульсе в условиях изменения внешней среды. В экспериментальном установлении зависимости 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/см<sup>2</sup> и разработке методики определения динамического диапазона SiФЭУ, не требующей предварительных измерений пороговой чувствительности, полосы

пропускания и уровня шума от величины внешнего воздействия на фотоприемник. В экспериментально полученных значениях пропускной способности оптического канала связи на основе SiФЭУ в условиях отсутствия и наличия внешнего оптического излучения. В определении уровня фонового оптического излучения, необходимого для «ослепления» исследуемых фотоприемников.

*Практическая и экономическая* значимость полученных результатов обусловлена созданием ряда наработок для разных сфер производства и жизнедеятельности на основе экспериментально полученных данных. Проведенные исследования показали высокий уровень конкурентоспособности продукции Республики Беларусь по сравнению с иностранными аналогами.

*Социальная значимость* работы состоит 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».

**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.

**Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.** Диссертация и автореферат в целом 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.

#### **Замечания по диссертации.**

##### **А. По существу**

1. В пункте 3 «Научная новизна» помимо самой формулировки приводятся определения и размерность параметров, что уже частично сделано в перечне сокращений и обозначений.

2. В положения, выносимого на защиту выносится комбинированный датчик температуры и освещенности, однако погрешность определения температуры составляет 4-6%, что существенно ниже известных и используемых методов, при этом в самой диссертационной работе не анализируются перспективы повышения точности измерения.

3. На стр. 104 отмечается большая взаимосвязь напряжения пробоя от температуры в случае большего значения последовательного сопротивления SiФЭУ. Однако данный тезис противоречит данным таблицы 5.1.

4. Для ряда расчётных значений (например таблица 2.1 на стр. 43) приведены лишь крайние значения из диапазона. Вызывают неоднозначность восприятия обозначения единиц измерений на рис 3.1, 3.4, 3.10. Можно было просто указать XXX мкА.

5. В схеме формирования однофотонных импульсов не предусмотрена система охлаждения, хотя представленные результаты исследования показали, что регистрация оптического излучения идентичного в среднем одному фотону возможна при температуре 233 К.

Б. По оформлению.

В целом диссертация оформлена достаточно аккуратно. Имеются отдельные погрешности в тексте диссертации, не снижающие значимость научных результатов и выводов.

1. Очень мелкие надписи или размытые изображения на рисунках 2.2, 3.1, 3.4, 3.14, 4.5, 5.1.

2. Перенос инициалов отдельно от фамилии стр. 11 «Личный вклад соискателя».

3. Ошибки по ссылкам на источники/перенос ссылок на источники без текста (стр 6 абзац 1, стр7, абзац 1, стр. 13 абзац 5, стр.17 абзац 2, стр 96 абзац 3 и др.).

4. Перенос единиц измерений и самих физических значений на разные страницы (например стр. 40-41), а также «описание формулы:» и перенос самой формулы на другую страницу (например стр. 100-101).

5. Наличие орфографических ошибок.

**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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

**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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, содержит новые интересные 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 следующие принципиально новые научно обоснованные результаты:

1. Разработку способа формирования однофотонных импульсов, основанного на ослаблении энергии оптического импульса, для диапазона длин волн от 380 до 940 нм и на регулировке величины ослабления энергии оптического излучения по результатам контроля за количеством фотонов в оптическом импульсе при помощи кремниевого фотоэлектронного умножителя, работающего в режиме счета фотонов, отличающегося от известных стабилизацией энергии импульса на уровне одного фотона.

2. Разработку методики регистрации информационного потока, транслируемого оптическим излучением в спектральном диапазоне 380 – 940 нм, в основу, которого положено изменение напряжения питания кремниевого фотоэлектронного умножителя в зависимости от величины фоновой освещенности, изменяющейся в интервале 0 до 400 лк, позволяющий обеспечивать скорость передачи информации не менее 30 Мбит/.

3. Разработку способа определения температуры и превышения уровня освещенности на основе измерения темнового тока и контроля фототока кремниевого фотоэлектронного умножителя, позволяющего регистрировать температуру окружающей среды в интервале от 233 до 313 К и контролировать уровень освещенности в интервале от 1 до 400 лк.

Официальный оппонент, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

