

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.383.523

ГОРБАДЕЙ
Ольга Юрьевна

**ШУМЫ И ПОМЕХИ В СЧЕТЧИКАХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ
ЛАВИННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 – оптические
и оптико-электронные приборы и комплексы

Минск 2019

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:

Смирнов Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор зав. НИЛ
«Устройства обработки и отображения информации»
учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

Кравченко Владимир Михайлович,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории фотоэлектроники Государственного научно-производственного объединения
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Оппонирующая
организация

Открытое акционерное общество «Планар»

Защита состоится «19» декабря 2019 г. в 14.15 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря: +375 (17) 293 96 18, e-mail: D.02.05.17@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2019 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук



Ризноокая Н.Н.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лавинные фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов, находят широкое применение в различных областях науки и техники. В астрономии лавинные фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов, применяются для регистрации слабосветящихся звезд. В спектроскопии такие фотоприемники используются для изучения кинетики затухания люминесценции. Также такие фотоприемники используются при создании оптических рефлектометров для волоконных оптических линий связи, обладающих высокой разрешающей способностью. В последние годы большой интерес к лавинным фотоприемникам, работающим в режиме счета фотонов, обусловлен интенсивными исследованиями в области квантовой криптографии как направления защиты информации. Квантовая криптография применяется в методах, осуществляющих защиту оптических каналов связи. В таком случае состояния отдельных фотонов реализовывают передачу секретного ключа. Для приема секретного ключа используют счетчики фотонов на основе лавинных фотоприемников. К таким счетчикам фотонов предъявляют довольно высокие требования по скорости регистрации, количеству темновых импульсов и величине собственных шумов, вероятности того, что фотон будет детектирован ошибочно. С развитием волоконно-оптических линий связи все больший интерес вызывают системы, использующие счетчики фотонов на основе лавинных фотоприемников, позволяющие обнаруживать каналы утечки оптической информации.

Однако, несмотря на ряд работ по методу счета фотонов, вопросы определения подхода к выделению шумов, вносимых фотоприемником, рассмотрены не в полной мере. Также не разработаны методы учета ошибки измерений, вносимой достаточно высоким уровнем собственных шумов фотоприемника. Шумы и помехи могут приводить к формированию импульсов, которые воспринимаются системой регистрации как сигнальные. Такие импульсы приводят к уменьшению чувствительности фотоприемника. Также актуальной остается задача разработки оптоэлектронных устройств на основе лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, позволяющих учитывать ошибки, вносимые шумами и помехами при регистрации оптических информационных сигналов малой интенсивности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует утвержденному научному плану работ учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» и следующему приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190: электроника и фотоника.

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

Тема «Квантовые системы безопасной связи на основе одноквантовых фотоприемников» (2014–2016 гг., номер госрегистрации 20141955), выполненная при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (дог. № Т14М-130).

Тема «Система квантовой связи по оптическому волокну с функцией обнаружения канала утечки информации» (2016–2018 гг., номер госрегистрации 20164528), выполненная при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (дог. № Т16К-006).

Тема «Исследование фотоэлектронных процессов формирования шумовых импульсов в одноквантовых лавинных фотоприемниках» (2017–2019 гг., номер госрегистрации 20171006), выполненная при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (дог. № Т17М-076).

Цель и задачи исследования

Цель работы состоит в разработке способов определения шумов и помех в лавинных фотоприемниках, работающих в режиме счета фотонов, а также создании на основе этих фотоприемников оптоэлектронных устройств, позволяющих учитывать ошибку, вносимую шумами и помехами при измерении мощности оптического излучения.

Для осуществления вышеназванных целей в работе ставятся следующие взаимосвязанные задачи:

- 1) выявить физические процессы и факторы, влияющие на формирование шумов в лавинных фотоприемниках, работающих в режиме счета фотонов;
- 2) разработать методику оценки коэффициента шума лавинного фотоприемника;
- 3) определить влияние послепульсных явлений на величину коэффициента шума лавинного фотоприемника;
- 4) установить физические принципы формирования шумовых выбросов в счетчике фотонов на основе лавинных фотоприемников;

5) разработать оптоэлектронные устройства определения характеристик оптического излучения на основе лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, которые позволяют учитывать ошибки, вносимые в процесс измерения шумами и помехами.

Исследуемыми объектами являются счетчики фотонов на основе лавинных фотоприемников. Предметом исследования являются шумовые процессы, происходящие в лавинных фотоприемниках.

Научная новизна

Предложен критерий отбора фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов по коэффициенту шума. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что максимальная чувствительность фотоприемника достигается при значении данного коэффициента, равного обратной величине квантовой эффективности. Показано, что увеличение мощности оптического излучения приводит к снижению коэффициента шума для исследуемых типов фотоприемников, что объясняется уменьшением вклада темновых импульсов в значение коэффициента шума.

Обоснована методика определения коэффициента шума лавинного фотоприемника, который работает в режиме счета фотонов, основанная на поочередном приеме оптического излучения от двух источников с разной статистикой фотонов (пуассоновской и непугассоновской).

Предложено устройство регистрации оптического излучения, в основу работы которого положено определение мощности светового потока путем подсчета числа интервалов времени измерения, которое, в отличие от известных, позволяет в автоматическом режиме осуществлять подстройку длительности интервала измерения и учитывать ошибки, вносимые послеимпульсами.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретически обоснована методика определения коэффициента шума фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, давшая возможность определять значение этого параметра для любой статистики фотонов оптического информационного сигнала, и позволившая установить, что минимальное достижимое значение коэффициента шума равно обратной величине квантовой эффективности регистрации фотоприемника, а максимальное значение соответствует минимальному числу фотонов, которое может быть зарегистрировано фотоприемником в течение времени измерения.

2. Способ определения коэффициента шума лавинного фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, в основу работы которого положена поочередная регистрация оптического излучения от двух источников с разной статистикой фотонов (пуассоновской и непугассоновской), позволивший обеспечить повышение точности измерения коэффициента шума фотоприемника более чем

на 10% для скоростей счета темновых и фоновых импульсов превышающих 10^3 Гц, путем устранения ошибок измерений при определении величины квантовой эффективности регистрации, вносимых фоновым излучением и темновыми импульсами фотоприемника.

3. Способ регистрации энергетического светового потока, поступающего на вход лавинного фотоприемника, отличающийся тем, что анализ проводится путем разделения всего временного интервала измерений на равные подынтервалы малой длительности и подсчете количества подынтервалов, на которых не детектировано ни одного темнового, сигнального импульса или послеимпульса, что позволяет снизить ошибки измерения на 20%.

Личный вклад соискателя ученой степени

В диссертационной работе представлены результаты, которые были получены автором лично. Вклад автора в коллективные работы заключается в определении методики исследований, установлении теоретических принципов, постановке и обосновании конкретных научных задач, нахождении методических путей их решения, создании экспериментальных установок и проведении измерений, объяснении полученных экспериментальных данных, а также в создании новых способов и устройств. Экспериментальные исследования, описанные в работе, выполнялись автором лично или с его непосредственным участием.

Совместно с соавторами работ А.О. Зеневичем (научный руководитель), Е.В. Новиковым, О.К. Барановским был поставлен ряд научных задач.

Соавторами А.М. Тимофеевым, Е.В. Василиу, И.В. Лимарь, О.М. Сильченко оказана помощь в получении и обработке полученных данных.

Соавторы А.О. Зеневич и Е.В. Новиков содействовали разработке экспериментальных установок.

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 результаты диссертации докладывались на следующих научно-технических конференциях:

XX, XXI, XII Международные научно-технические конференции «Современные средства связи» Минск, Беларусь, 2015–2017 гг., II Международная конференция UkrMiCo 2017, Одесса, Украина, Международная конференция «Измерения и качество: Проблемы, перспективы», г. Баку, Азербайджан, 2018 г.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ОАО «ИНТЕГРАЛ» управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», на предприятии ОАО «Гипросвязь», в учебный процесс учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» при разработке курса лекций «Физические основы электроники».

Опубликованность результатов диссертации

На основании исследований, представленных в диссертации, опубликовано 17 работ, в их числе 11 статей в научно-технических журналах и сборниках, из которых 10 статей в изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, и 5 тезисов и материалов докладов. Получен 1 патент Республики Беларусь на изобретение. Результаты, представленные в диссертационной работе, вошли в 3 отчета по НИР.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация включает 130 страницы машинописного текста, в том числе: 27 рисунков на 25 страницах, 5 таблиц на 5 страницах, библиографический список из 101 наименования использованных источников на 8 страницах, список собственных публикаций соискателя из 17 наименований на 3 страницах, 3 приложения на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы.

В **первой главе** выполнен обзор литературы, который показал, что в настоящее время в счетчиках фотонов находит широкое применение способ синхронного детектирования фотонов, позволяющий устранять ошибку, вносимую в измерения интенсивности только темновыми импульсами и фоновым излучением, однако этот способ не позволяет в полной мере учитывать ошибку регистрации, вызванную наличием шумов в источнике оптического излучения, лавинном фотоприемнике, усилителе импульсов счетчика фотонов, дискриминаторе.

Осуществленный анализ структуры счетчиков фотонов на основе лавинных фотоприемников (ЛФП), применяемых для реализации режима счета фотонов, показал, что основными причинами, приводящими к появлению шумов и помех, является возникновение следующих флуктуаций: процесса детектирования и умножения носителей заряда в лавинных фотоприемниках; интенсивности падающего на фотоприемник излучения; коэффициента усиления усилителя и порога амплитудной селекции дискриминатора, а также временного интервала измерения частотомера счетчика фотонов.

Проведенное рассмотрение физических процессов, протекающих в лавинных фотоприемниках при реализации режима счета фотонов, показало, что основными причинами, приводящими к появлению шумов и помех, являются: статистический характер процесса умножения носителей электрического заряда в области умножения *p-n*-перехода; термогенерация свободных носителей электрического заряда; квантовая эффективность регистрации меньшей единицы; возникновение послеимпульсов; проявление эффекта мертвого времени.

Показано влияние интенсивности фонового излучения на ухудшение пороговой чувствительности лавинных фотоприемников, которые работают в режиме счета фотонов. Получено выражение, позволяющее определить скорость счета импульсов фонового излучения для фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, в случае источника фонового излучения, представляющего собой абсолютно черное тело. Пояснено влияние флуктуации частоты фонового излучения на формирование шумов счетчика фотонов.

Определено, что величина шума, создаваемого в счетчике фотонов регистрируемым оптическим излучением, зависит от статистики фотонов источника оптического излучения. Так, для полностью поляризованного теплового излучения при времени регистрации оптического излучения, которое меньше времени когерентности, статистика сигнальных импульсов будет подчиняться распределению Бозе-Эйнштейна. Если время регистрации оптического излучения счетчиком фотонов превышает время когерентности, то статистика сигнальных импульсов подчинится распределению Пуассона. Также статистика сигнальных импульсов будет соответствовать распределению Пуассона в случае использования в качестве источников оптического излучения лазеров, светодиодов и источников одиночных фотонов, для которых существует вероятность

испускания более одного фотона. При использовании источников одиночных фотонов, которые испускают не более одного фотона, статистическое распределение сигнальных импульсов соответствует биномиальному распределению.

Сформулированы требования, предъявляемые к усилителям для счетчиков фотонов, созданных на основе лавинных фотодиодов, которые заключаются в следующем: уровень собственных шумов усилителя должен быть таким, чтобы можно выделить сигнальный импульс на их фоне; ширину полосы пропускания усилителя необходимо выбирать на основании длительности мертвого времени лавинного фотодиода; коэффициент усиления усилителя должен быть таким, чтобы он обеспечивал срабатывание амплитудного дискриминатора.

Выявлено, что основными причинами, приводящими к возникновению флуктуации сигнала в регистрирующих блоках счетчика фотонов (усилителе, амплитудном дискриминаторе, счетчике импульсов), являются тепловые и дробовые шумы усилителя, а также нестабильность порога амплитудной селекции амплитудного дискриминатора. Нестабильностью временного интервала измерения счетчика импульсов можно пренебречь.

Во **второй главе** получено выражение для определения коэффициента шума фотодиода, работающего в режиме счета фотонов, учитывающее шумы, вызванные информационным сигналом, фоновым излучением, а также темновыми импульсами фотодиода:

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{\eta(1-\eta)(\langle N_\phi \rangle + \langle N_{uu} \rangle) + \eta^2(D_\phi + D_{uu}) + D_m}{\eta^2(D_\phi + D_{uu})},$$

где ρ_0 – отношение сигнал/шум для поступающего на фотодиод оптического информационного сигнала; ρ_1 – отношение сигнал/шум на выходе фотодиода; η – квантовая эффективность регистрации; $\langle N_\phi \rangle$ – среднее число фотонов информационного сигнала, попавших на фотодиод за время измерения t ; $\langle N_{uu} \rangle$ – среднее число фотонов фонового излучения; D_ϕ – дисперсия числа фотонов информационного сигнала N_ϕ ; D_{uu} – дисперсия числа фотонов фонового излучения N_{uu} ; D_m – дисперсия числа темновых импульсов N_m .

Показана возможность упрощения этого выражения для оптического излучения со статистикой фотонов, определяемой распределением Пуассона, как для фонового излучения, так и информационного сигнала:

$$F = \frac{\eta(\langle N_\phi \rangle + \langle N_{uu} \rangle) + \langle N_m \rangle}{\eta^2(\langle N_\phi \rangle + \langle N_{uu} \rangle)},$$

где $\langle N_m \rangle$ – среднее число темновых импульсов.

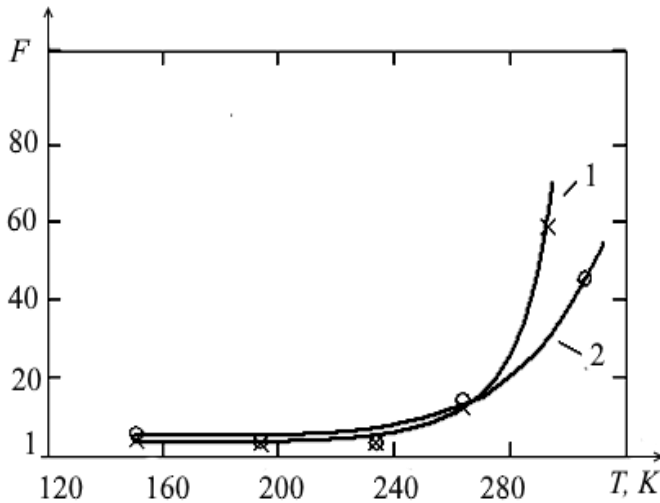
Определено, что для пуассоновского источника оптического излучения минимальное достижимое значение коэффициента шума равно обратному значению квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов, а его максимальная величина соответствует минимальному числу фотонов, которое может быть детектировано фотоприемником в течение времени измерения.

Разработана экспериментальная установка, позволяющая измерять мощность регистрируемого оптического излучения, скорости счета темновых и сигнальных импульсов.

В экспериментальной установке существует возможность изменять приложенное напряжение к лавинному фотоприемнику и температуру последнего, регулировать интенсивность оптического излучения. Все это позволяет определить коэффициент шума лавинного фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, а также измерить зависимость этого коэффициента от температуры, приложенного напряжения к лавинному фотоприемнику, а также от мощности регистрируемого оптического излучения.

Определены параметры лавинного фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, и внешние факторы, влияющие на величину коэффициента шума фотоприемника. К таким параметрам можно отнести квантовую эффективность регистрации и скорость счета темновых импульсов. К факторам – температуру окружающей среды, мощность регистрируемого оптического излучения и величину напряжения питания, приложенного к лавинному фотоприемнику.

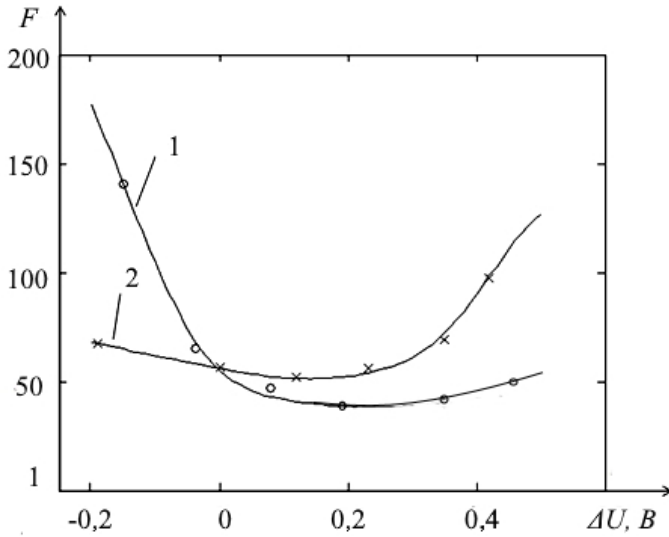
Понижение температуры приводило к увеличению квантовой эффективности регистрации и уменьшению скорости счета темновых импульсов и, как следствие, к понижению величины коэффициента шума (рисунок 1). Коэффициент шума для всех изучаемых ЛФП уменьшается при понижении температуры. Наибольшая сильная зависимость коэффициента шума от температуры наблюдается для ЛФП с МРП структурой (металл-резистор-полупроводник) $\Delta F/\Delta T = 0,40 \text{ K}^{-1}$, в то время как для ФД-115Л $\Delta F/\Delta T = 0,30 \text{ K}^{-1}$. При уменьшении температуры в диапазоне температур от 300 К до 250 К происходит увеличение квантовой эффективности от 0,03 до 0,25 для ФД-115Л и от 0,05 до 0,30 для ЛФП с МРП структурой, что объясняет более сильную зависимость коэффициента шума от температуры в этом диапазоне. Величина η , изменяется для ФД-115Л от $1,70 \cdot 10^4$ до 10^1 c^{-1} , а для ЛФП с МРП структурой от $3,00 \cdot 10^4$ до $2,00 \cdot 10^1 \text{ c}^{-1}$ с понижением температуры [1, 12]. Квантовая эффективность регистрации всех исследуемых ЛФП незначительно изменяется в диапазоне температур от 150 К до 250 К.



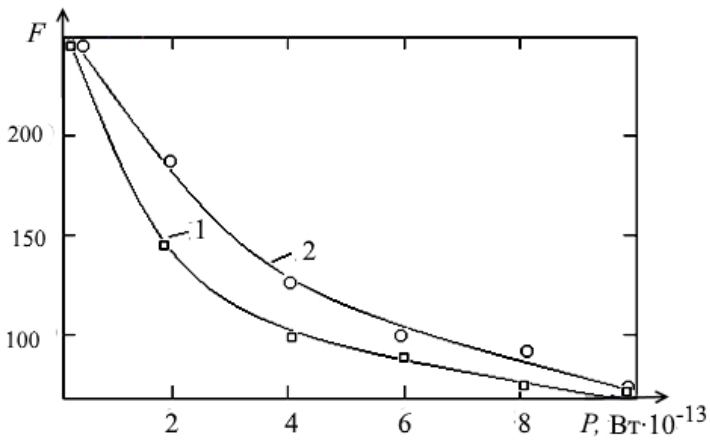
1 – для ЛФП с МРП структурой; 2 – для ФД-115Л
 Рисунок 1. – Зависимость коэффициента шума лавинного фотоприемника от температуры

Показано, что зависимость коэффициента шума от величины приложенного напряжения имеет минимум (рисунок 2). Минимум соответствует перенапряжению $\Delta U = 0,10$ В для ЛФП с МРП структурой и $\Delta U = 0,20$ В – ФД-115Л. Влияние нестабильности напряжения питания ΔU_n на изменение коэффициента шума ΔF вблизи минимума $F(\Delta U)$ составляет $\Delta F/\Delta U_n = 110$ В⁻¹ для ЛФП с МРП структурой и $\Delta F/\Delta U_n = 100$ В⁻¹ для ФД-115Л [1, 12]. Нестабильность напряжения электропитания составляла $\Delta U_n = 0,01$ В, поэтому необходимо выбирать напряжение питания лавинного фотоприемника, соответствующее минимуму зависимости, что позволит обеспечить его максимальную чувствительность.

Установлено, что увеличение мощности светового потока вызывает уменьшение коэффициента шума для всех типов исследуемых фотоприемников (рисунок 3). Во всем диапазоне изучаемых мощностей значения коэффициента шума фотоприемников с ЛФП с МРП структурой меньше значений F для ФД-115Л. Данное различие обосновывается тем, что квантовая эффективность регистрации фотоприемников ЛФП с МРП структурой больше, чем у фотоприемников ФД-115Л, даже если значения интенсивности темновых импульсов ФД-115Л ($n_m = 1,7 \cdot 10^4$ с⁻¹) ниже интенсивности темновых импульсов ЛФП с МРП структурой ($n_m = 3,0 \cdot 10^4$ с⁻¹).



1 – для ФД-115Л; 2 – для ЛФП с МРП структурой
 Рисунок 2. – Зависимость коэффициента шума от перенапряжения на лавинном фотоприемнике



1 – для ЛФП с МРП структурой; 2 – для ФД-115Л
 Рисунок 3. – Зависимость коэффициента шума лавинного фотоприемника от мощности регистрируемого оптического излучения

Разработан способ определения коэффициента шума фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, в основу работы которого положена поочередная регистрации оптического излучения поочередно от двух источников с разной статистикой фотонов (пуассоновской и непуассоновской).

Данный способ позволяет повысить точность измерения коэффициента шума фотоприемника более чем на 10 % для скоростей счета темновых и фоновых импульсов превышающих 10^3 Гц, путем устранения ошибки измерения при определении величины квантовой эффективности регистрации, вносимой фоновым излучением и темновыми импульсами фотоприемника (помеховыми), а также дополнительно позволяет определить пороговую чувствительность фотоприемника, дисперсию и среднюю скорость счета совокупности импульсов фонового излучения и темновых импульсов. Предложено устройство для реализации этого способа.

В **третьей главе** получено выражение для определения коэффициента шума лавинного фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, с учетом образования послеимпульсов и эффекта мертвого времени:

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{Z\eta + \eta(1-\eta)(\langle N_\phi \rangle + \langle N_{ш} \rangle) + \frac{\eta^2}{(1-Z)^2}(D_\phi + D_{ш}) + D_m}{\eta^2(D_\phi + D_{ш})},$$

где Z – вероятность образования послеимпульсов.

Показано, что для ЛФП с мертвым временем постоянного типа вероятность регистрации импульса P имеет вид:

$$P = \frac{1}{1 + (n_c + n_{ш} + n_m)\tau_m},$$

где n_c – скорости счета сигнальных импульсов, $n_{ш}$ – скорости счета фоновых импульсов, n_m – скорости счета темновых импульсов, τ_m – длительность мертвого времени.

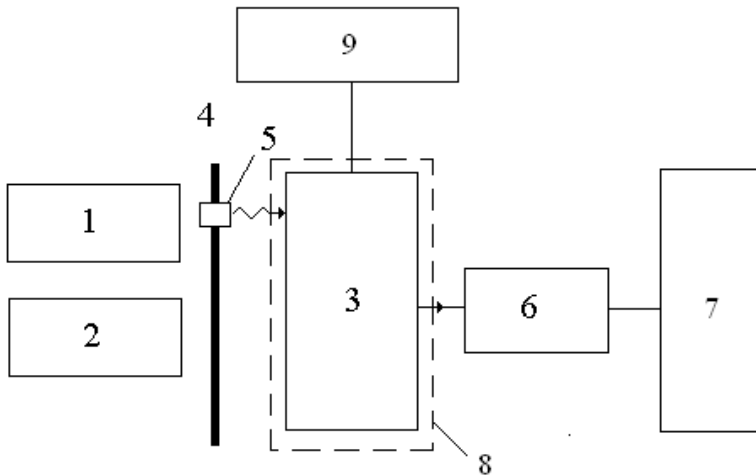
Для продлевающегося мертвого времени P имеет вид:

$$P = \exp(-(n_c + n_{ш} + n_m)\tau_m).$$

Выполнена адаптация полученного выражения к случаю использования источника оптического излучения со статистикой фотонов, соответствующей распределению Пуассона:

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{(1+Z)\eta P(\langle N_\phi \rangle + \langle N_{ii} \rangle) + D_m}{\eta^2 P^2(\langle N_\phi \rangle + \langle N_{ii} \rangle)(1-Z)^2}.$$

Разработана экспериментальная установка, которая дает возможность определить среднее количество темновых импульсов, детектированных за некоторый промежуток времени, и дисперсию этих импульсов, общее количество темновых и одноквантовых импульсов и их дисперсию, квантовую эффективность регистрации фотоприемника, вероятность образования послеимпульсов, а также мертвое время (рисунок 4). Полученные на этой установке характеристики лавинного фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, позволяют определять коэффициент шума с учетом послеимпульсных явлений.



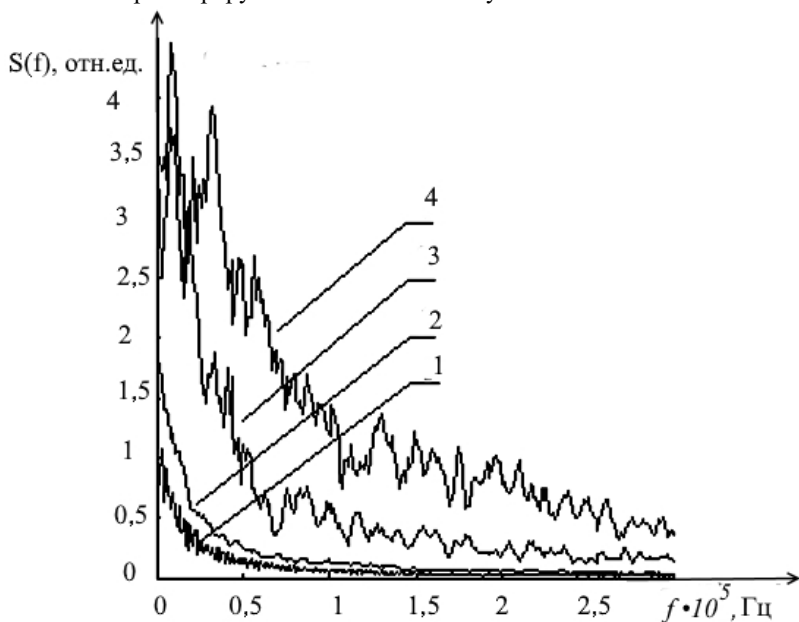
- 1 – источник излучения с пуассоновской статистикой фотонов;
 2 – источник излучения с непуассоновской статистикой фотонов;
 3 – лавинный фотоприемник; 4 – шторка; 5 – отверстие с ирисовой диафрагмой; 6 – счетчик импульсов; 7 – компьютер; 8 – холодильная камера;
 9 – блок управления режимами работы лавинного фотоприемника

Рисунок 4. – Блок-схема экспериментальной установки для измерения коэффициента шума при наличии в фотоприемнике послеимпульсных явлений

В результате экспериментальных исследований получено, что изменение коэффициента шума в большей степени связано с изменением квантовой эффективности регистрации лавинного фотоприемника в диапазоне от 0,53 до 0,84 мкм, чем изменением вероятности образования послеимпульсов. Также определено, что в случае одинаковых скоростей счета темновых импульсов, квантовых

эффективностей регистрации, вероятностей образования послеимпульсов и длительностей мертвого времени меньшим значением коэффициента шума обладают фотоприемники с мертвым временем постоянного типа, в сравнении с фотоприемниками с мертвым временем продлевающего типа.

В четвертой главе получены зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов лавинных фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации, от перенапряжения (рисунок 5) и интенсивности регистрируемого оптического излучения. Показано, что ширина СПМ зависит от интенсивности регистрируемого оптического излучения при неизменном перенапряжении на ЛФП и несущественно возрастает с увеличением перенапряжения при неизменной интенсивности регистрируемого оптического излучения.



1 – $\Delta U = -1,20$ В; 2 – $\Delta U = -0,50$ В; 3 – $\Delta U = 0,00$ В; 4 – $\Delta U = 0,50$ В

Рисунок 5. – Спектральная плотность мощности импульсов лавинного фотоприемника n^+p - π - p^+ , работающего в режиме счета фотонов, для различных величин перенапряжения

Предложено выражение для определения средней частоты выбросов, создаваемых тепловым и дробовым шумами лавинного фотоприемника, а также шумами усилителя счетчика фотонов, при заданном пороге амплитудной селекции счетчика фотонов:

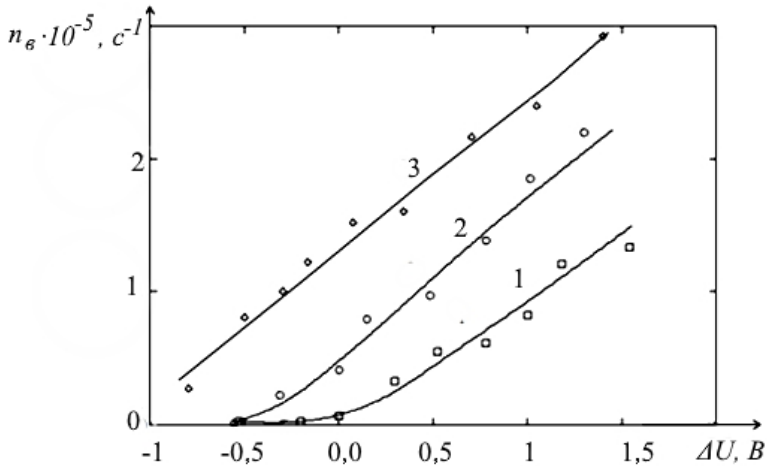
$$n_e = f_0 \sqrt{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^2} \exp \left(- \frac{U_{nop}^2}{(2eM_T^2 F I_n R_n^2 + 4kTR_n) \Delta f} \right),$$

где Δf – полоса частот, в которой наблюдаются флуктуации тока; f_0 – центральная полоса частот; U_{nop} – порог амплитудной селекции; e – заряд электрона; M_T – коэффициент умножения носителей электрического заряда; F – коэффициент шума; I_n – общий первичный ток, инжектированный в область пропорционального умножения p - n -перехода; R_n – сопротивление резистора; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Разработан способ, позволяющий определить среднюю частоту выбросов шума счетчика фотонов на основе лавинного фотоприемника для заданного порога амплитудной селекции. Способ основан на измерении и расчете следующих параметров и характеристик: коэффициента умножения носителей электрического заряда, шум-фактора лавинного фотоприемника, общего первичного тока, инжектированного в область пропорционального умножения p - n -перехода, спектральной плотности напряжения шума на выходе усилителя. Предложена экспериментальная установка, позволяющая реализовать данный способ.

В результате экспериментальных исследований были получены следующие зависимости: средней частоты выбросов от перенапряжения лавинного фотоприемника при постоянном уровне амплитудной селекции (рисунок б); средней частоты выбросов от порогового уровня амплитудной селекции при неизменном перенапряжении лавинного фотоприемника; зависимость порога амплитудной селекции от перенапряжения лавинного фотоприемника при пороговом значении частоты выбросов $n_e = 1 \text{ с}^{-1}$.

Из полученных экспериментальных зависимостей следует, что частота выбросов увеличивается с ростом напряжения питания, приложенного к лавинному фотоприемнику, что связано с ростом коэффициента умножения однородной части p - n -перехода при увеличении напряжения питания. При величине порога амплитудной селекции большей либо равной 10^{-3} В средняя частота выбросов стремится к нулю. При этом 98% микроплазменных импульсов имеют амплитуду, превышающую указанное значение порога амплитудной селекции. Определены требования к стабильности напряжения электропитания для лавинных фотоприемников ФД-115Л1 и со структурами n^+p - π - p^+ и p^+n - ν - n^+ .

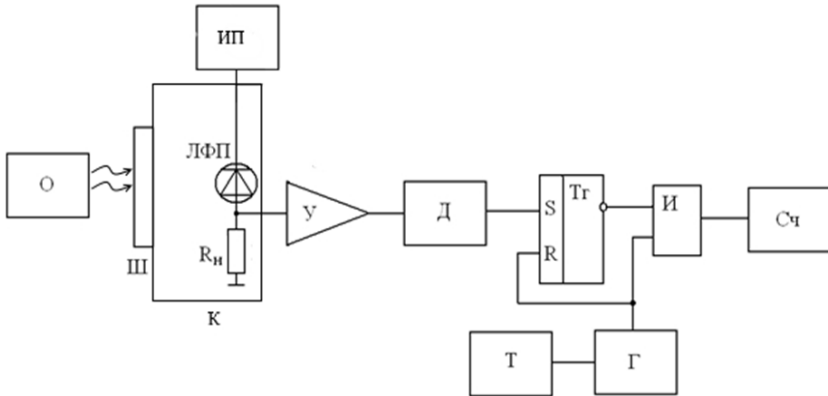


1 – ЛФП со структурой $n+p-\pi-p+$, 2 – ЛФП со структурой $p+n-v-n+$,
3 – ФД – 115.Л

Рисунок 6. – Зависимость средней частоты выбросов от перенапряжения ΔU

В пятой главе разработан способ регистрации энергетического светового потока, в основу работы которого положено разделение всего временного интервала измерений на равные подынтервалы малой длительности и определение числа подынтервалов, на которых не детектировано ни одного темнового, сигнального импульса или послеимпульса. Показана возможность применения этого способа для случаев наличия и отсутствия темновых импульсов в лавинном фотоприемнике. Получено, что данный способ позволяет повысить точность измерения мощности светового потока. Разработано устройство, реализующее этот способ (рисунок 7).

Создано устройство регистрации энергетического светового потока, работа которого основана на разбиении интервала измерения на подынтервалы и определении общего числа интервалов, на которых не зарегистрировано ни одного события. Разработанное устройство в автоматическом режиме осуществляет подстройку длительности интервала измерения, что позволит учитывать ошибку измерения, вносимую послеимпульсами, и автоматизировать процесс проведения измерений в тех случаях, когда интенсивность потоков сигналов фотоприемников резко изменяется.



О – источник оптического излучения; **Ш** – светонепроницаемая шторка;
ЛФП – лавинный фотодиод; **R_н** – резистор нагрузки; **К** – кожух;
И_п – источник питания; **У** – усилитель; **Д** – дискриминатор; **Тг** – триггер;
И – логическая схема «И»; **Сч** – счетчик импульсов;
Г – генератор тактовых импульсов; **Т** – таймер

Рисунок 7. – Блок-схема устройства регистрации энергетического светового потока

Показана возможность использования лавинных фотодиодов, работающих в режиме счета фотонов, для создания генератора пуассоновского потока событий. Определены напряжения питания лавинных фотодиодов и интенсивности оптического излучения, при которых поток выходных импульсов лавинного фотодиода будет соответствовать пуассоновскому потоку. Экспериментально доказано, что данные фотодиоды могут применяться для создания квантовых генераторов случайных чисел.

Разработано устройство со стабилизацией напряжения питания, позволяющее устранить погрешности измерений интенсивности светового потока, вносимые нестабильностями напряжениями питания без потери измерительного времени на калибровочный цикл, а также работающее в широком диапазоне регистрируемых мощностей оптического излучения за счет учета ошибки, вносимой при измерении темновых импульсов.

Проведена оценка применимости шумовых диодов для стабилизации напряжения питания лавинных фотодиодов, работающих в режиме счета фотонов. Полученные результаты показывают, что рассматриваемые шумовые диоды могут быть использованы для стабилизации напряжения питания исследуемых ЛФП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определены факторы, которые влияют на формирование шумов и помех в лавинных фотоприемниках, функционирующих в режиме счета фотонов. Предложено выражение для определения коэффициента шума фотоприемника, которое позволяет определять значение этого параметра для любой статистики фотонов оптического информационного сигнала и позволяет установить, что минимальное достижимое значение коэффициента шума равно обратной величине квантовой эффективности регистрации фотоприемника, а максимальное значение соответствует минимальному числу фотонов, которое может быть детектировано фотоприемником в течение времени измерения [1, 12].

2. Теоретически и экспериментально выполнена оценка влияния послеимпульсных явлений на точность определения коэффициента шума лавинных фотоприемников. Показано, что необходим учет ошибок измерений, вносимых послеимпульсными явлениями в значение коэффициента шума для мощностей оптического излучения, больших $8 \cdot 10^{-13}$ Вт [2, 5, 16].

3. С использованием математической статистики предложено выражение для определения средней частоты выбросов, создаваемых тепловым и дробовым шумами лавинного фотоприемника, а также шумами усилителя счетчика фотонов, при заданном пороге амплитудной селекции счетчика фотонов, что позволяет осуществлять выбор оптимального порога регистрации для заданного числа выбросов в единицу времени [3, 11].

4. Разработан способ регистрации энергетического светового потока, в основу работы которого положено разделение всего временного интервала измерений на равные подынтервалы малой длительности и подсчете количества подынтервалов, на которых не детектировано ни одного темнового, сигнального импульса или послеимпульса, что позволяет уменьшить ошибку измерения мощности светового потока [5, 17].

5. Создана установка для создания случайной бинарной последовательности и показана возможность использования лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, для генерации пуассоновского потока импульсов [7–10, 13, 15].

Рекомендации по практическому использованию

Применение разработанных способов и устройств [3, 4, 6, 14, 17] позволило создать принципиально новое оборудование для регистрации оптического излучения малой интенсивности, а также генераторы пуассоновских потоков импульсов и случайных бинарных потоков.

В частности:

- разработанные методики по определению коэффициента шума фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, и выражение для определения порога амплитудной селекции могут найти применение при проектировании счетчиков фотонов и систем для регистрации оптического излучения малой интенсивности [1, 3, 12];

- разработанный способ регистрации энергетических световых потоков может быть использован при регистрации энергетических световых потоков от слабосветящихся объектов в астрономии, биологии и медицине [5, 17];

- экспериментальные результаты, полученные при исследовании возможности использования лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, для создания генераторов пуассоновского потока импульсов, могут найти применение в качестве генераторов случайных чисел в системах защиты информации, а также в игровых автоматах [7, 8, 9, 10, 13, 14].

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в настоящее время, что подтверждается следующими актами внедрения: актом о практическом использовании результатов исследования в промышленности на предприятии ОАО «ИНТЕГРАЛ» управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», актом о внедрении результатов кандидатской диссертации на предприятии ОАО «Гипросвязь», актом внедрения в учебный процесс УО «Белорусская государственная академии связи» при разработке курса лекций «Физические основы электроники».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**Статьи в научных журналах**

1. Оценка коэффициента шума лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов / О. К. Барановский, А. О. Зеневич, А. М. Тимофеев, О. Ю. Горбадей // Доклады БГУИР. – 2015. – № 6. – С. 78–83.
2. Барановский, О. К. Влияние послеимпульсных явлений на коэффициент шума лавинного фотоприемника в режиме счета фотонов / О. К. Барановский, А. О. Зеневич, О. Ю. Горбадей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. – 2015. – № 12. – С. 90–96.
3. Барановский, О. К. Исследование спектральной плотности мощности сигналов одноквантовых лавинных фотоприемников / О. К. Барановский, А. О. Зеневич, О. Ю. Горбадей // Проблемы инфокоммуникаций. – 2015. – № 2 (2). – С.33–37.
4. Зеневич, А. О. Способ определения средней частоты выбросов шума счетчика фотонов на основе лавинного фотоприемника / А. О. Зеневич, О. К. Барановский, О. Ю. Горбадей // Веснік сувязі. – 2016. – № 1. – С. 34–38.
5. Барановский, О. К. Способ передачи секретного ключа по волоконно-оптической линии связи / О. К. Барановский, А. О. Зеневич, О. Ю. Горбадей // Веснік сувязі. – 2016. – № 4. – С.43–46.
6. Горбадей, О. Ю. Регистрация светового потока с учетом наличия послеимпульсов в одноквантовых лавинных фотоприемниках / О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков // Проблемы физики, математики и техники. 2016. – № 4 (29). – С. 13–19.
7. Квантовый метод безопасного распределения ключей шифрования / О. К. Барановский, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич, Е. В. Василиу, И. В. Лимарь // Сучасний захист інфармації. – 2017. – № 2 (30). – С. 56–64.
8. Исследование возможности использования шумовых диодов для генерации пуассановского потока импульсов / О. К. Барановский, А. О. Зеневич, О. Ю. Горбадей, О. М. Сильченко // Проблемы инфокоммуникаций. – 2017. – № 1 (5). – С.13–18.
9. Горбадей, О. Ю. Использования диодов-генераторов шума для создания двухуровневой случайной числовой последовательности / О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. – № 3 (56). – С. 12–17.
10. Барановский, О. К. Исследование возможности использования лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации для создания квантовых генераторов случайных чисел / О. К. Барановский, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 1. – С. 34–38.

11. Исследование характеристик потока импульсов шумовых диодов, работающих в режиме микроплазменного пробоя / О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 2 (35). – С. 7–10.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

12. Барановский, О. К. Способ определения коэффициента шума счетчиков фотонов / О. К. Барановский, А. О. Зеневич, О. Ю. Горбадей // Материалы XX Международ. науч.-техн. конф. «Современные средства связи», 14-15 окт. 2015 г. / Белорусская государственная академия связи; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2015. – С.10.

13. Барановский, О. К. Использование одноквантовых лавинных фотоприемников для создания кантовых генераторов случайных чисел / О. К. Барановский, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Материалы XXI Международ. науч.-техн. конф. «Современные средства связи», 20 – 21 окт. 2016 г. / Белорусская государственная академия связи; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2016. – С. 225–226

14. Quantum method of secure key distribution in optical fiber communication lines / Oleg Baranovsky, Olga Gorbadey, Andrei Zenevich and Yevhen Vasiliu // II Международ. Конф. UkrMiCo 2017, 11–15 September, 2017 / Odessa, Ukraine. – 2017. – С.1–4.

15. Горбадей, О.Ю. Сравнение генераторов шума для создания двухуровневой случайной числовой последовательности / О. Ю. Горбадей // Материалы XXII Международ. науч.-техн. конф. «Современные средства связи», 19-20 октября 2017 г. / Белорусская государственная академия связи; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2017. – С. 57–58.

16. Зеневич, А. О. Учет влияния послеимпульсных явлений при регистрации световых потоков одноквантовыми лавинными фотоприемниками / А. О.Зеневич, Е. В. Новиков, О. Ю. Горбадей // Материалы Международной конференции «Измерения и качество: Проблемы, перспективы», г. Баку, Азербайджан, 21-23 ноября 2018 г. / Баку, 2018. – С. 275–279.

Патенты

17. Измеритель интенсивности потока сигналов фотоприемников : пат. ВУ 22265 / А. О.Зеневич, Е. В. Новиков, О. Ю. Горбадей. – Опубл.30.12.2018.

РЭЗІЮМЭ

Гарбадзеі Вольга Юр'еўна

Шумы і перашкоды ў лічыльніках фатонаў на аснове лавінных фотапрыёмнікаў

Ключавыя словы: лічыльнік фатонаў, лавінны фотапрыёмнік, мёртвы час, пасляімпульс, каэфіцыент шуму, выкіды, шумавыя дыёды, выпадковая лікавая паслядоўнасць.

Мэта працы: распрацоўка спосабаў вызначэння шумоў і перашкод у лавінных фотапрыёмніках, якія працуюць у рэжыме падліку фатонаў, а таксама стварэнне оптаэлектронных прылад, на аснове гэтых фотапрыёмнікаў, якія дазваляюць ўлічваць памылку, што ўносіцца шумама і перашкодамі пры вымярэнні магутнасці аптычнага выпраменьвання.

Метады даследавання: метады статыстычнага аналізу, метады рэалізацыі аднаквантавай рэгістрацыі на лавінных фотапрыёмніках.

Атрыманая вынікі і іх навізна:

Прапанаваны крытэрыі адбору фотапрыёмнікаў, якія працуюць у рэжыме падліку фатонаў па каэфіцыенце шуму. Тэарэтычна ўстаноўлена і эксперыментальна пацверджана, што максімальная адчувальнасць фотапрыёмніка дасягаецца пры значэнні дадзенага каэфіцыента, роўнага зваротнай велічыні квантавай эфектыўнасці. Паказана, што павелічэнне магутнасці аптычнага выпраменьвання прыводзіць да зніжэння каэфіцыента шуму для доследных тыпаў фотапрыёмнікаў, што тлумачыцца памяншэннем ўкладу цёмных імпульсаў у значэнне каэфіцыента шуму.

Абгрунтавана метадыка вызначэння каэфіцыента шуму лавіннага фотапрыёмніка, які працуе ў рэжыме падліку фатонаў, заснаваная на пачарговым прыёме аптычнага выпраменьвання ад дзвюх крыніц з рознай статыстыкай фатонаў (пуасонаўскай і непуасонаўскай).

Прапанавана прылада рэгістрацыі аптычнага выпраменьвання, у аснову работы якога пакладзена вызначэнне магутнасці светлавога патоку шляхам падліку колькасці інтэрвалаў часу вымярэння, якое, у адрозненне ад вядомых, дазваляе ў аўтаматычным рэжыме ажыццяўляць падладку працягласці інтэрвалу вымярэння і ўлічваць памылкі, якія ўносяцца пасляімпульсамі.

Ступень выкарыстання: атрыманая вынікі ўкаранены на прадпрыемстве і ў навучальны працэс.

Галіна прымянення: оптыка, оптаэлектроніка, прыборабудаванне, сувязь, квантавая крыптаграфія.

РЕЗЮМЕ**Горбадей Ольга Юрьевна****Шумы и помехи в счетчиках фотонов на основе лавинных фотоприемников**

Ключевые слова: счетчик фотонов, лавинный фотоприемник, мертвое время, послеимпульс, коэффициент шума, выбросы, шумовые диоды, случайная числовая последовательность.

Цель работы: разработка способов определения шумов и помех в лавинных фотоприемниках, работающих в режиме счета фотонов, а также создание оптоэлектронных устройств, на основе этих фотоприемников, позволяющих учитывать ошибку, вносимую шумами и помехами при измерении мощности оптического излучения.

Методы исследования: методы статистического анализа, методы реализации одноквантовой регистрации на лавинных фотоприемниках.

Полученные результаты и их новизна:

Предложен критерий отбора фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, по коэффициенту шума. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что максимальная чувствительность фотоприемника достигается при значении данного коэффициента, равного обратной величине квантовой эффективности. Показано, что увеличение мощности оптического излучения приводит к снижению коэффициента шума для исследуемых типов фотоприемников, что объясняется уменьшением вклада темновых импульсов в значение коэффициента шума.

Обоснована методика определения коэффициента шума лавинного фотоприемника, который работает в режиме счета фотонов, основанная на поочередном приеме оптического излучения от двух источников с разной статистикой фотонов (пуассоновской и непуассоновской).

Предложено устройство регистрации оптического излучения, в основу работы которого положено определение мощности светового потока путем подсчета числа интервалов времени измерения, которое, в отличие от известных, позволяет в автоматическом режиме осуществлять подстройку длительности интервала измерения и учитывать ошибки, вносимые послеимпульсами.

Степень использования: полученные результаты внедрены на предприятии и в учебный процесс.

Область применения: оптика, оптоэлектроника, приборостроение, связь, квантовая криптография.

SUMMARY

Gorbadey Olga Yrevna

Noise and interference in the photon counter based avalanche photodetectors

Keywords: counter photon avalanche photodetector dead time afterpulses, noise figure, emissions, noise diodes, a random number sequence.

Objective: development of methods for the determination of noise and interference in the avalanche photodetectors operating in the photon counting mode, as well as the creation of optoelectronic devices based on these photodetectors, for integrating the error introduced by noise and interference in the measurement of the optical power.

Methods: the methods of statistical analysis, the methods of implementing single-quantum registration avalanche photodetectors.

The results and their novelty:

A criterion for the selection of photodetectors operating in the photon counting mode by the noise coefficient is proposed. It is theoretically established and experimentally confirmed that the maximum sensitivity of the photodetector is achieved when the value of this coefficient is equal to the inverse value of the quantum efficiency. It is shown that the increase in the optical radiation power leads to a decrease in the noise coefficient for the studied types of photodetectors, which is explained by the decrease in the contribution of dark pulses to the noise coefficient.

The technique of determining the noise coefficient of the avalanche photodetector, which operates in the photon counting mode, based on the alternate reception of optical radiation from two sources with different photon statistics (Poisson and non-Poisson).

The proposed device for registration of optical radiation, the basis of which is determination of the light output by counting the number of time intervals of measurement, which, in contrast to known, allows you to automatically carry out the adjustment of the duration of the measurement interval and to consider the mistakes made by afterpulses.

Use degree: the results implemented in the enterprise and in the educational process.

Scope: optics, optoelectronics, instrumentation, communications, quantum cryptography.

Научное издание

ГОРБАДЕЙ
Ольга Юрьевна

**Шумы и помехи в счетчиках фотонов
на основе лавинных фотоприемников**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 – оптические
и оптико-электронные приборы и комплексы

Подписано в печать 01.11.2019 г. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Ризо-
графия.

Усл. печ. л. 1,40 Уч.-изд. л. 1,09 Тираж 70 экз. Заказ № 793

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изда-
ний № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.