

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.391; 621.383.92

**ТИМОФЕЕВ**  
Александр Михайлович

**СИСТЕМЫ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
НА БАЗЕ ЛАВИННЫХ ФОТОНРИЕМНИКОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск, 2012

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре сетей телекоммуникаций

Научный руководитель: Зеневич Андрей Олегович, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры математики и физики Учреждения образования «Высший государственный колледж связи»

Официальные оппоненты: Борботько Тимофей Валентинович, д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры защиты информации Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»; Залесский Валерий Борисович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., заведующий лабораторией Государственного научного учреждения «Институт физики им. Б. И. Степанова»

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится «21» декабря 2012 г. в 14<sup>15</sup> на заседании совета по защите диссертации Д02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, кор. 1, ауд. 202). Тел. ученого секретаря (8-017) 293-95-17; e-mail: [aantoshyn@mail.ru](mailto:aantoshyn@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2012 г.

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

Антошин А.А.

© Тимофеев А.М., 2012  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2012

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время элементная база оптико-электронных приборов и комплексов имеет достаточно интенсивные темпы развития. Одной из основных движущих сил такого развития являются растущие потребности в обмене большими объемами информации как со стороны населения (абонентов различных сетей связи), так и со стороны организаций, учреждений, ведомств и пр. При этом могут предъявляться весьма высокие требования к системам передачи информации, например, в части обеспечения необходимой скорости передачи информации (СПИ), максимальное значение которой определяется пропускной способностью. Поэтому для передачи информации в последние годы чаще используют волоконно-оптические системы передачи информации, которые позволяют достичь значительно большей пропускной способности, по сравнению с другими типами передающих сред. Вопросы приема оптических сигналов в таких системах особенно важны, например, когда решается задача обеспечения скрытности передаваемой информации путем использования квантовых систем. Использование в квантовых системах маломощных оптических сигналов позволяет обнаружить любую попытку перехвата информации в таких системах. Однако необходимо применять приемные модули, которые способны регистрировать сигналы, содержащие от одного до десятка фотонов. Отметим, что одним из основных недостатков существующих квантовых систем является низкая пропускная способность (до 50 кбит/с), что ограничивает функциональные возможности таких систем. Высокочувствительные приемные модули также применяют в устройствах диагностики волоконно-оптических кабелей, так как приемники с большей чувствительностью позволяют тестировать более протяженные участки кабелей. Одним из наиболее чувствительных методов регистрации оптических сигналов является метод счета фотонов, а его реализация на базе кремниевых лавинных фотодиодов (ЛФД) – не требует применения схем охлаждения, в отличие от других типов фотоприемников (квантовых точек, сверхпроводниковых фотоприемников, диссекторов и пр.).

Для повышения пропускной способности квантовых систем, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе ЛФД, необходимо разработать такие системы и провести их исследования, установив влияние основных характеристик приемного модуля на пропускную способность. В данной работе представлены теоретически и экспериментально обоснованные принципы построения квантовых систем, в которых данные передаются оптическими импульсами, содержащими от одного до десятка фотонов на каждый бит информации; предложен способ приема оптической информации, который позволяет достичь пропускной способности, и способы определения основных характеристик приемного модуля, работающего в режиме счета фотонов. Выполнена оптимизация созданных квантовых систем; в качестве критерия оптимальности использовались пропускная способность и пороговая чувствительность.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены в ходе проведения научно – исследовательских работ.

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

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

Тема «Высокоскоростные приемники информации для квантовых криптографических систем» (2011-2013 гг., номер госрегистрации 20113593), выполненная при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (дог. № Т11ОБ-043).

### **Цель и задачи исследования**

Целью настоящей диссертационной работы является создание квантовых систем, использующих в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе ЛФД, и оптимизация режимов их функционирования, направленные на достижение максимально возможной пропускной способности.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих взаимосвязанных задач:

1. Разработать квантовые системы, в которых для передачи каждого бита информации используются оптические импульсы, содержащие от одного до десятка фотонов.

2. Предложить способ приема оптической информации квантовой системой, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе ЛФД, обеспечивающий максимально возможную пропускную способность.

3. Провести оптимизацию созданных систем одноквантовой регистрации, используя в качестве критерия оптимальности пропускную способность и пороговую чувствительность.

4. Разработать способы определения основных характеристик приемных модулей квантовых систем, влияющих на пропускную способность оптического канала.

5. Выполнить оценку основных характеристик приемных модулей квантовых систем, влияющих на пропускную способность оптического канала.

Исследуемым объектом являются системы одноквантовой регистрации, построенные на базе лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов. Предметом исследования являются способы приема оптической информации и оптимизация систем одноквантовой регистрации, направленные на повышение пропускной способности.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Теоретически и экспериментально обоснованные принципы построения однофотонной квантовой системы, функционирующей в синхронном режиме и осуществляющей прием оптических импульсов, содержащих отдельные фотоны на каждый бит информации, за счет введения импульсного кодирования передаваемых символов, что позволило увеличить пропускную способность в таких системах до 0,8 Мбит/с.

2. Теоретически и экспериментально обоснованные принципы построения многофотонной квантовой системы, функционирующей в синхронном режиме и осуществляющей прием оптических импульсов, содержащих от двух до десяти фотонов на каждый бит информации, основанная на определении порогового уровня зарегистрированного числа фотонов и мощности оптического излучения заданной длины волны, что позволило получить максимальное значение пропускной способности при мощности оптического сигнала  $3,0 \cdot 10^{-12}$  Вт и пороговом уровне зарегистрированного числа фотонов 2.

3. Математическая модель оценки пропускной способности квантовой системы, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, основанная на учете типа и длительности мертвого времени и статистических распределений числа темновых импульсов и смеси сигнальных и темновых импульсов, что дает возможность ее применения при проектировании счетчиков фотонов для квантовых систем.

## **Личный вклад соискателя**

Содержание диссертации отражает личный вклад соискателя. В работах, выполненных в соавторстве, автор принимал участие в определении целей, задач исследований, а также в проведении самих исследований и обработке полученных результатов.

## **Апробация результатов диссертации**

Основные полученные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXI и XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, РФ, 2010, 2012 г.), XV и XVI Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Минск, Беларусь, 2010, 2011 гг.), VIII, IX и X Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, Беларусь, 2010-2012 гг.), на Международной научно-практической конференции «Инженерно-педагогическое образование: проблемы и пути развития» (Минск, Беларусь, 2012 г.).

## **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ, в том числе 8 статей в научных журналах и 7 статей в сборниках научных статей и материалах конференций, 6 тезисов докладов. Получено 4 патента Республики Беларусь на изобретения. Также результаты диссертационной работы вошли в 3 отчета по НИР. Без соавторов опубликовано 2 статьи в сборниках научных статей и материалах конференций. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий Республики Беларусь, составляет 4,5 авторского листа.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и одного приложения. В первой главе приводятся обоснование выбора метода регистрации предельно слабых оптических сигналов, а также типа фотоприемника и схемы его включения. Во второй главе описаны разработанные квантовые системы передачи и приема оптической информации, предложена их классификация, приведены методика и основные результаты экспериментальных исследований, описан разработанный способ определения пропускной способности квантовой системы. Третья глава содержит результаты математического моделирования и экспериментальных исследований мертвого времени приемных модулей квантовых систем, разработанные способы определения длительности и типа мертвого времени. В четвертой главе описаны послеимпульсные явления лавинных фотоприемников, в том числе влияние послеимпульсов на пороговую чувствительность фотоприемника, предложенный способ измерения времени протекания послеимпульсных явлений в счетчиках фотонов, методика и результаты экспериментальных исследований послеимпульсных явлений на основе анализа как статистических распределений интервалов времени между импульсами, так и автокорреляционных функций выходных потоков импульсов. Полный объем диссертации составляет 146 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 34 рисунка на 19 страницах, 4 таблицы на 1 странице. Библиографический список занимает 16 страниц и состоит из 183 наименований использованных источников и списка собственных публикаций соискателя из 25 наименований на 4 страницах и 1 приложение на 3 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения исследований, связанных с квантовыми системами передачи и приема передачи и приема оптической информации.

В первой главе приведены результаты анализа литературы, где рассмотрены известные методы регистрации предельно слабых оптических сигналов; на основании выполненного сопоставительного анализа существующих методов регистрации маломощных оптических сигналов установлено, что метод счета фотонов обеспечивает лучшую пороговую чувствительность по сравнению с другими методами.

Показано, что для получения максимально возможного значения СПИ целесообразно при прочих равных условиях выбирать фотоприемники, которые имеют наименьшую скорость счета темновых импульсов и большую квантовую эффективность.

Установлено, что основными критериями выбора типа фотоприемника, входящего в состав счетчика фотонов квантовой системы, являются скорость счета темновых импульсов, квантовый выход, коэффициент умножения фотоносителей фотоприемника и диапазон спектральной чувствительности. Показано, что для квантовых систем наиболее предпочтительно использовать ЛФД, которые имеют высокий квантовый выход, широкий диапазон спектральной чувствительности, включающий окна прозрачности оптического кабеля, низкие напряжения питания, обладают высоким коэффициентом умножения фотоносителей, а также обеспечивают режим счета фотонов и имеют небольшие габариты (несколько миллиметров в диаметре) и вес (несколько грамм). Причем кремниевые лавинные фотоприемники позволяют реализовывать режим счета фотонов при комнатных температурах для первого и второго окон прозрачности оптического кабеля, а, в сравнении с германиевыми ЛФД, ЛФД на основе различных соединений галлия и фотоэлектронными умножителями, имеют лучшую пороговую чувствительность.

Выполнен сопоставительный анализ известных схем включения ЛФД; в качестве критерия оценки каждой использовались скорость счета темновых импульсов и длительность мертвого времени; фотоприемниками оптического излучения являлись серийно выпускаемые кремниевые лавинные фотодиоды ФД-115Л, работающие в режиме счета фотонов при одинаковой величине максимально приложенного перенапряжения при комнатных температурах. Установлено, что минимальной величиной мертвого времени обладают ЛФД, включенные по схеме активного гашения лавины (до 30 нс), однако схема пассивного гашения имеет меньшую погрешность измерений регистрируемого излучения. Поэтому для проведения экспериментальных исследований целесообразно использовать схему пассивного гашения, а для получения наибольшей пропускной способности – схему активного гашения.

Во второй главе дано описание созданных квантовых систем передачи и приема оптической информации. Предложена классификация таких систем, согласно которой квантовые системы можно разделить по числу фотонов, используемых для передачи каждого бита информации, на однофотонные и многофотонные, а также по способу синхронизации источника и приемника – на синхронные и асинхронные. Определены основные способы кодирования двоичной информации, передаваемой по квантовым системам.

Предложено устройство, реализующее многофотонную синхронную квантовую систему; для расчета пропускной способности этой системы использовалось выражение

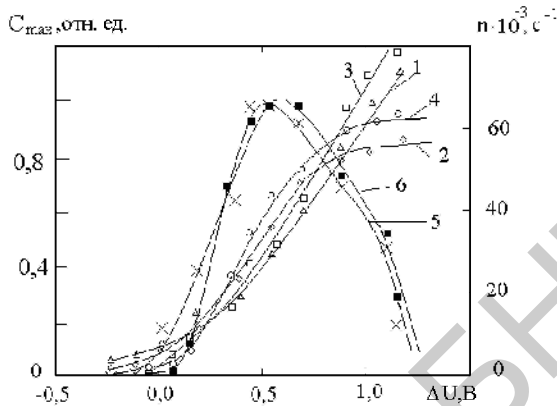
$$\begin{aligned}
 C_{\max} = & \left\{ -0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \log_2 \left( 0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right) - \right. \\
 & - \left( 1 - 0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right) \log_2 \left( 1 - 0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right) + \\
 & + 0,5 \left[ \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) \log_2 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) + \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) \log_2 \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) \right] + \\
 & + 0,5 \left[ \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \log_2 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) + \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \log_2 \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right] \left. \right\} \frac{1}{\tau_b},
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_t(N)$  и  $P_{st}(N)$  – статистические распределения числа темновых и смеси сигнальных и темновых импульсов соответственно,  $N_n$  – пороговый уровень регистрации,  $\tau_b$  – среднее время передачи одного бита.

Выполнены экспериментальные исследования по определению зависимости пропускной способности многофотонной синхронной квантовой системы от перенапряжения ЛФД  $\Delta U$  (рисунок 1), а также от величины порогового уровня регистрации для различных мощностей оптического сигнала  $W$  и постоянной скорости счета темновых импульсов  $n_t$  (рисунок 2) и для различных скоростей счета темновых импульсов и постоянной мощности оптического сигнала (рисунок 3).

Установлено, что для получения максимального значения пропускной способности необходимо подбирать оптимальные напряжение обратного смещения ЛФД, мощность транслируемого оптического сигнала и пороговый уровень регистрации.

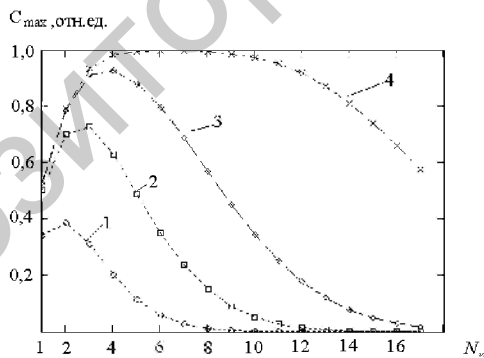




1 -  $n_t$  для  $p^+n-v-n^+$ ; 2 -  $n_s$  для  $p^+n-v-n^+$ ; 3 -  $n_t$  для  $p^+p-p^+$ ; 4 -  $n_s$  для  $p^+p-p^+$ ;  
 5 - пропускная способность для  $p^+n-v-n^+$ ; 6 - пропускная способность для  $p^+p-p^+$

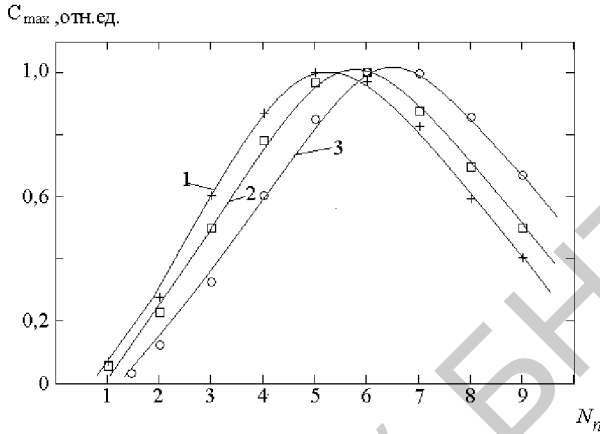
**Рисунок 1 – Зависимости пропускной способности и скорости счёта импульсов от переапряжения ЛФД**

Получено максимальное значение пропускной способности  $C_{max} \approx 100$  кбит/с при мощности оптического сигнала  $W = 3,0 \cdot 10^{-12}$  Вт, подаваемого на ЛФД со структурой  $p^+p-p^+$ , и  $C_{max} \approx 90$  кбит/с при  $W = 3,3 \cdot 10^{-12}$  Вт для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$ .



1, 2, 3, 4 – мощность оптического сигнала  $W_1, W_2, W_3, W_4$  соответственно.  
 ( $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$ )

**Рисунок 2 – Зависимости пропускной способности от порогового уровня для различных мощностей оптического сигнала,  $n_t = 10^4$  с<sup>-1</sup>**



$1 - n_t = 2,4 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ;  $2 - n_t = 3,2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ;  $3 - n_t = 5,0 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$

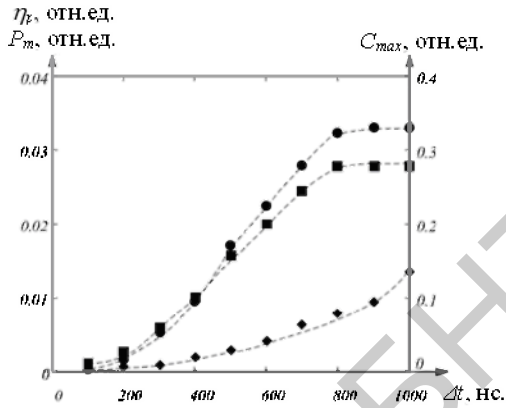
**Рисунок 3 – Зависимость пропускной способности от порогового уровня для различных скоростей счета темновых импульсов**

Разработана однофотонная квантовая система передачи и приема оптической информации с импульсным кодированием информации, работающая в синхронном режиме. Для расчета пропускной способности такой системы предложено выражение:

$$\begin{aligned}
 C_{\max} = & \left\{ - [0,5(2 - P_m - \eta_p)] \log_2 [0,5(2 - P_m - \eta_p)] \right\} - \\
 & - [1 - 0,5(2 - P_m - \eta_p)] \log_2 [1 - 0,5(2 - P_m - \eta_p)] + \\
 & + 0,5[(1 - P_m) \log_2 (1 - P_m) + P_m \log_2 P_m] + \\
 & + 0,5[(1 - \eta_p) \log_2 (1 - \eta_p) + \eta_p \log_2 \eta_p] \left. \right\} \frac{1}{\tau_b},
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P_m$  – вероятность регистрации темнового импульса,  $\eta_p$  – квантовая эффективность регистрации.

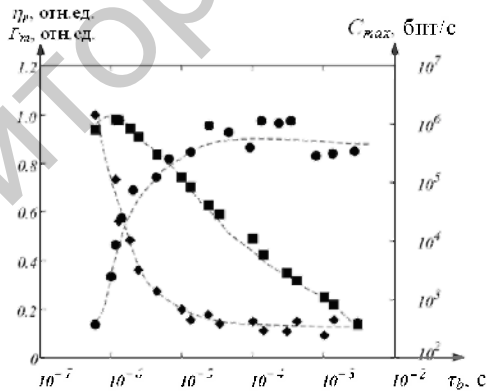
Выполнены экспериментальные исследования зависимости пропускной способности от длительности импульса стробирования  $\Delta t$  (рисунок 4) и от времени передачи одного бита информации  $\tau_b$  (рисунок 5).



- - квантовая эффективность регистрации, ◆ - вероятность появления темновых импульсов, ■ - пропускная способность квантовой системы

**Рисунок 4 – Зависимости квантовой эффективности регистрации, вероятности появления темновых импульсов и пропускной способности квантовой системы от длительности импульса стробирования**

Установлено, что СПИ достигает своего максимального значения  $C_{max} \approx 0,8$  Мбит/с при  $\Delta t \approx 0,8$  мкс и  $\tau_b = 1,1$  мкс.



- - квантовая эффективность регистрации, ◆ - вероятность появления темновых импульсов, ■ - пропускная способность квантовой системы

**Рисунок 5 – Зависимости квантовой эффективности регистрации, вероятности появления темновых импульсов и пропускной способности квантовой системы от времени передачи одного бита информации**

Предложена однофотонная квантовая система передачи и приема оптической информации с временным кодированием информации, работающая в синхронном режиме. Эта система, по сравнению с известными, позволяет передавать данные и импульсы синхронизации по одной линии связи – это упрощает ее практическую реализацию, а также обеспечивает контроль несанкционированного доступа к информации, что расширяет ее функциональные возможности.

Дано теоретическое обоснование принципов построения асинхронных многофотонных квантовых систем передачи и приема оптической информации. Такие системы, в отличие от синхронных, могут найти более широкое практическое применение. Например, когда необходимо передавать информацию между источником и приемником, расположенными в высокогорной местности, либо при обмене данными между удаленными на значительные расстояния друг от друга объектами в космическом пространстве и т.п. В этих случаях трансляция информации может осуществляться, например, по открытым линиям связи (по воздушному или космическому пространству), следовательно, необходимость прокладки дополнительных линий связи для передачи синхросигналов в таких системах может усложнить или даже сделать невозможной их практическую реализацию, вызывать трудности при их обслуживании и эксплуатации.

Создан способ определения пропускной способности квантовой системы, основанный на подборе оптимальных значений мощности регистрируемого оптического сигнала и порогового уровня регистрации, что позволило достичь максимально возможной пропускной способности. Для определения оптимальных значений мощности регистрируемого оптического сигнала и порогового уровня регистрации получены выражения соответственно:

$$W = \frac{hc}{\eta_p \lambda \tau_b} \left[ \left( \frac{m + \sqrt{m^2 + 4 \langle N_t \rangle + m \sqrt{\langle N_t \rangle}}}{2} \right)^2 - \langle N_t \rangle \right],$$

$$N_n = \langle N_t \rangle + m \sqrt{\langle N_t \rangle}, \quad (3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина волны оптического излучения,  $m$  – это целое число больше нуля,  $\langle N_t \rangle$  – среднее число темновых импульсов.

В третьей главе выполнено математическое моделирование квантовой системы передачи и приема оптической информации с учетом типа и длительность мертвого времени счетчика фотонов. Получены выражения для  $P_t(N)$  и  $P_{st}(N)$  соответственно:

$$\begin{cases}
P_t(N) = \frac{(n_t \tau_b)^N}{N!} \exp(-n_t \tau_b), & 0 \leq N < s, \\
P_t(s) = 1 - \sum_{N=0}^s \frac{(n_t \tau_b)^N}{N!} \exp(-n_t \tau_b), & N \geq s,
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
P_{st}(N) = \frac{\left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_b}{1 + \left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_d} \frac{1}{N!} \exp \left( - \frac{\left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_b}{1 + \left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_d} \right), & 0 \leq N < s, \\
P_{st}(s) = 1 - \sum_{N=0}^s \frac{\left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_b}{1 + \left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_d} \frac{1}{N!} \exp \left( - \frac{\left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_b}{1 + \left( \frac{\eta_p W}{h\nu} + n_t \right) \tau_d} \right), & N \geq s.
\end{cases}$$

(4)

где  $N$  – число зарегистрированных импульсов на выходе счетчика фотонов,  $\tau_d$  – мертвое время счетчика фотонов,  $s$  – целая часть отношения  $\tau_d/\tau_b$  (например, если выполняется условие  $20 \leq \tau_d/\tau_b \leq 21$ , то  $s = 20$ ),  $\nu$  – частота оптического излучения.

Предложено выражение для определения пропускной способности. При сравнении счетчиков фотонов с различными типами мертвого времени определено, что для получения максимального значения пропускной способности затрачивается меньшая мощность оптического излучения при использовании счетчика с мертвым временем постоянного типа. Установлено, что для получения максимально возможного значения СПИ квантовой системы, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, необходимо подбирать пороговый уровень регистрации, а также мощность регистрируемого оптического излучения.

Предложены способы определения мертвого времени фотоприемника, которые позволяют повысить точность измерений за счёт устранения погрешности, связанной с неопределённостью типа мёртвого времени, а также упростить известные способы определения мертвого времени за счёт устранения дополнительного источника оптического излучения постоянной интенсивности и набора нейтральных ослабляющих светофильтров, имеющих высокоточное значение коэффициента ослабления.

Выполнены экспериментальные исследования влияния мертвого

времени приемного модуля квантовой системы на СПИ. Установлено, что величина напряжения питания ЛФД и интенсивность оптического излучения влияют на значения длительности мертвого времени и квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов. Наибольшее значение пропускной способности (см. рисунок 6) получено при наименьшей длительности мертвого времени и наибольшей квантовой эффективности регистрации и составило  $\sim 81$  кбит/с.

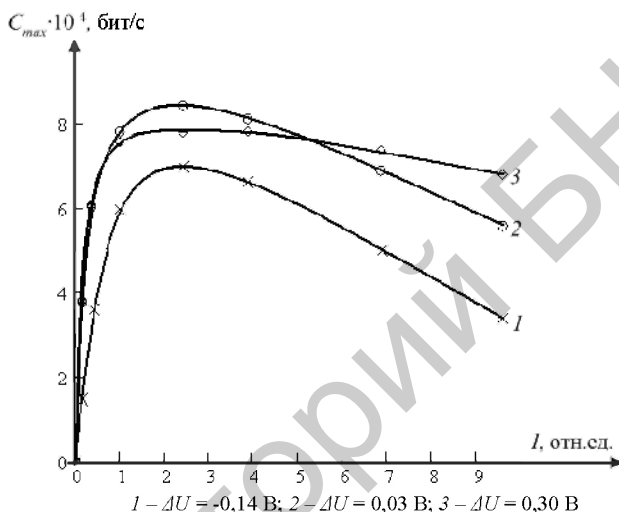


Рисунок 6 – Зависимость пропускной способности квантовой системы от интенсивности регистрируемого излучения

Результаты экспериментальных исследований, представленные в настоящем разделе, подтверждают результаты математического моделирования квантовой системы, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, которые нами были получены ранее.

В четвертой главе выполнены исследования послеимпульсных явлений лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов. Определено влияние послеимпульсов на пороговую чувствительность фотоприемника. Предложены выражения для расчета пороговой чувствительности фотоприемника для четырех случаев соответственно: при отсутствии послеимпульсов, когда послеимпульсы сопровождают только сигнальные импульсы, только темповые импульсы и когда послеимпульсы сопровождают как темповые импульсы, так и сигнальные:

$$\begin{aligned}
 W_{\min} &= \frac{hc}{T_{\text{изм.}} \lambda} \frac{1 + \sqrt{1 + 4\langle N_t \rangle}}{2\eta_p}, \\
 W_{\min} &= \frac{hc}{T_{\text{изм.}} \lambda} \frac{1 + Z_s + \sqrt{(1 + Z_s)^2 + 4(1 - Z_s)\langle N_t \rangle}}{2\eta_p (1 - Z_s)^2}, \\
 W_{\min} &= \frac{hc}{T_{\text{изм.}} \lambda} \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4(1 + Z_t)}{(1 - Z_t)^2} \langle N_t \rangle}}{2\eta_p}, \\
 W_{\min} &= \frac{hc}{T_{\text{изм.}} \lambda} \frac{\frac{(1 + Z_s)}{(1 - Z_s)^2} + \sqrt{\left(\frac{(1 + Z_s)}{(1 - Z_s)^2}\right)^2 + \frac{4(1 + Z_t)}{(1 - Z_t)^2} \langle N_t \rangle}}{2\eta_p}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

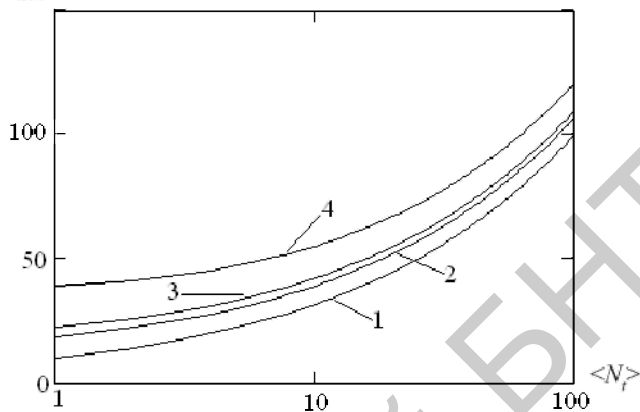
где  $\langle N_t \rangle$  – среднее число темновых импульсов фотоприемника, зарегистрированных за время  $T_{\text{изм.}}$ ,  $Z_s$  и  $Z_t$  – вероятности образования послеимпульсов, сопровождающих сигнальные импульсы и темновые импульсы соответственно.

Установлены зависимости пороговой чувствительности фотоприемника от скорости счета темновых импульсов для случаев, когда послеимпульсы сопровождают только сигнальные импульсы (рисунок 7), только темновые импульсы (рисунок 8) и смесь темновых и сигнальных импульсов (рисунок 9, кривая 2).

Показано, что во всех случаях послеимпульсы приводят к увеличению по абсолютной величине пороговой чувствительности счетчика фотонов по сравнению со счетчиком, у которого послеимпульсы отсутствуют. Установлено, что пороговая чувствительность счётчика фотонов при наличии послеимпульсов, сопровождающих темновые и сигнальные импульсы, по абсолютному значению больше, чем, когда послеимпульсы сопровождают только сигнальные, но меньше, чем, когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы.

Предложен способ измерения времени протекания послеимпульсных явлений в счетчиках фотонов, который позволяет определить вероятность образования послеимпульсов и расширить функциональные возможности известных способов определения послеимпульсов за счет дополнительного определения длительности и типа мёртвого времени счётчика фотонов, а также времени, в течение которого послеимпульсы образуются и время их затухания.

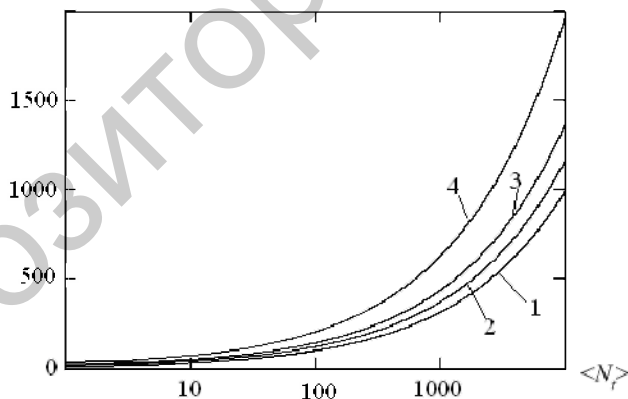
$W_{min}$  отн.ед.



1 – вероятность образования послеимпульсов  $Z_s = 0$ ; 2 –  $Z_s = 0,1$ ;  
3 –  $Z_s = 0,2$ ; 4 –  $Z_s = 0,4$  (расчет выполнен для  $\eta_p = 0,1$ )

**Рисунок 7 – Зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от среднего числа темновых импульсов для случая, когда послеимпульсы сопровождают только сигнальные импульсы**

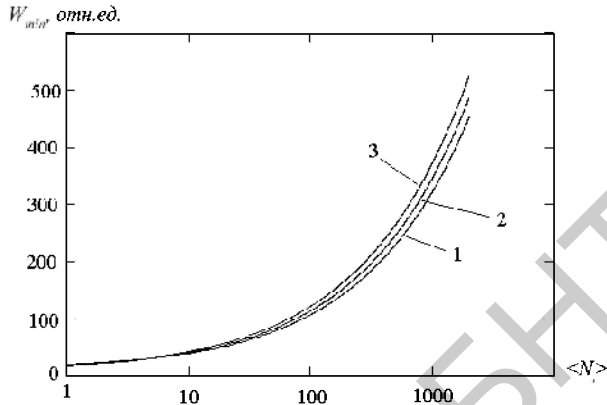
$W_{min}$  отн.ед.



1 – вероятность образования послеимпульсов  $Z_t = 0$ ; 2 –  $Z_t = 0,1$ ;  
3 –  $Z_t = 0,2$ ; 4 –  $Z_t = 0,4$  (расчет выполнен для  $\eta_s = 0,1$ )

**Рисунок 8 – Зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от среднего числа темновых импульсов для случая, когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы**

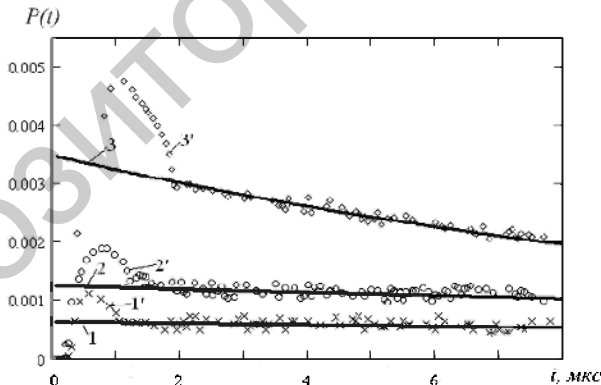




1 – послеимпульсы сопровождают сигнальные импульсы,  $Z_s = 0,1, Z_t = 0$ ; 2 – послеимпульсы сопровождают темповые и сигнальные импульсы,  $Z_s = 0,05, Z_t = 0,05$ ; 3 – послеимпульсы сопровождают темповые импульсы,  $Z_s = 0, Z_t = 0,1$  (расчет выполнен для  $\eta_n = 0,1$ )

**Рисунок 9 – Зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от среднего числа темповых импульсов**

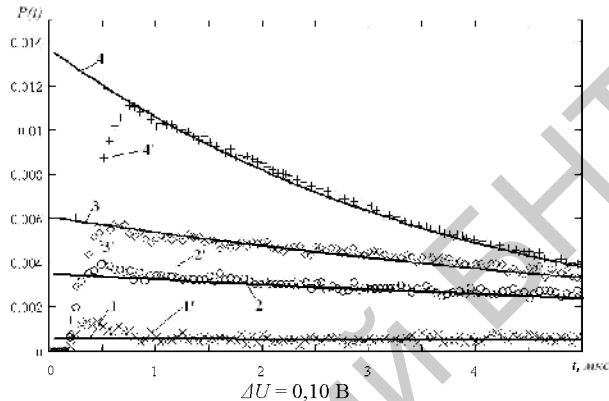
Выполнены экспериментальные исследования послеимпульсных явлений на основе анализа статистических распределений интервалов времени между импульсами.



1 – экспоненциальное (теоретическое) распределение и 1' – экспериментальное распределение для  $\Delta U = -0,10$  В; 2 – теоретическое распределение и 2' – экспериментальное распределение для  $\Delta U = 0,00$  В; 3 – теоретическое распределение и 3' – экспериментальное распределение для  $\Delta U = 0,30$  В

**Рисунок 10 – Статистические распределения интервалов времени между темповыми импульсами**

Получены статистические распределения интервалов времени между импульсами для темповых импульсов при различных перенапряжениях ЛФД (рисунок 10), а также для различных интенсивностей подсветки (рисунок 11).



1 и 1' – теоретическое и экспериментальное распределение соответственно для темповых импульсов; 2 и 2' – теоретическое и экспериментальное распределение соответственно для интенсивности подсветки  $I_1$ ; 3 и 3' – теоретическое и экспериментальное распределение соответственно для интенсивности подсветки  $I_2$ ; 4 и 4' – теоретическое и экспериментальное распределение соответственно для интенсивности подсветки  $I_3$  ( $I_1 < I_2 < I_3$ )

**Рисунок 11 – Статистические распределения интервалов времени между импульсами для различных интенсивностей подсветки**

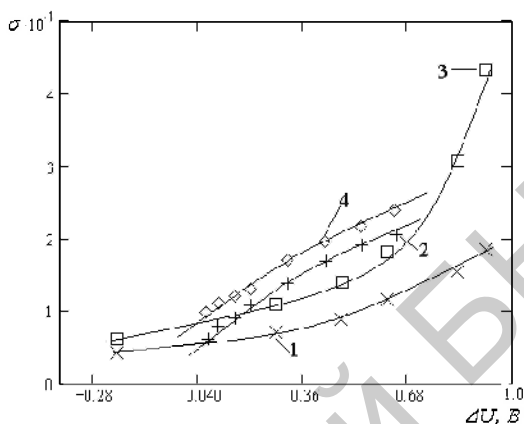
Выполнено сравнение экспериментальных распределений статистических распределений интервалов времени между импульсами  $P(t)$  с экспоненциальным распределением  $P_e$ . В качестве критерия оценки отклонения экспериментального распределения  $P(t)$  от  $P_e$  использован параметр

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{отп}}} (P_i - P_{ei})^2}{N'_{\text{общ}}}} \quad (6)$$

где  $P_i$  и  $P_{ei}$  – экспериментально полученная и теоретическая вероятности появления  $i$ -ого временного интервала между импульсами соответственно,  $N'_{\text{общ}}$  – общее количество временных интервалов, по которым выполнялось сравнение  $P_i$  и  $P_{ei}$ .

Установлена зависимость параметра  $\sigma$  от величины перенапря-

жения  $\Delta U$  для темновых и смеси темновых и сигнальных импульсов (рисунок 12).



1 × - темновые импульсы (структура  $p^+n-v-p^+$ ); 2 + - темновые импульсы (структура  $p^+p-\pi-p^+$ ); 3 □ - смесь темновых и сигнальных импульсов (структура  $p^+n-v-p^+$ ); 4 ◊ - смесь темновых и сигнальных импульсов (структура  $p^+p-\pi-p^+$ )

**Рисунок 12 – Зависимость параметра  $\sigma$  от величины переапряжения**

Получено, что по статистическим распределениям интервалов времени между импульсами можно оценить время, в течение которого образуются послеимпульсы, тип и длительность мертвого времени фотоприемника, время восстановления напряженности электрического поля в  $p-n$ -переходе после протекания в нем лавинного пробоя.

Представлены результаты исследований послеимпульсных явлений на основе анализа автокорреляционных функций выходных потоков импульсов. Получены зависимости автокорреляционных функций для темновых импульсов при различных напряжениях питания ЛФД, а также для различных интенсивностей оптического сигнала при постоянном напряжении питания ЛФД. Установлено, что по автокорреляционным функциям регистрируемых оптических потоков можно определить вероятность появления и время затухания послеимпульсов, а также значение мертвого времени.

В приложении представлены акты о практическом использовании результатов диссертационной работы в научно-производственном предприятии ООО «Марфи», научно-исследовательской лаборатории систем и устройств связи ОАО «Гипросвязь», а также в учебном процессе Учреждения образования «Высший государственный колледж связи» на кафедре телекоммуникационных систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Предложена однофотонная квантовая система с импульсным кодированием информации, работающая в синхронном режиме. Выполнены исследования зависимости пропускной способности квантовой системы от длительности импульса стробирования  $\Delta t$  и от времени передачи одного бита информации  $\tau_b$ , в результате которых установлено, что скорость передачи информации достигает своего максимального значения  $C_{max} \approx 0,8$  Мбит/с при  $\Delta t \approx 0,8$  мкс и  $\tau_b = 1,1$  мкс [2, 12, 19, 21].

2. Разработана многофотонная синхронная квантовая система [4, 6, 9, 16, 18]. Выполненные экспериментальные исследования по определению пропускной способности этой системы показали, что для получения максимального значения пропускной способности необходимо подбирать оптимальные напряжение обратного смещения ЛФД, мощность транслируемого оптического сигнала и пороговый уровень регистрации. Получено максимальное значение пропускной способности  $C_{max} \approx 100$  кбит/с при мощности оптического сигнала  $W = 3,0 \cdot 10^{-12}$  Вт, подаваемого на ЛФД со структурой  $p^+r-p^+$ , и  $C_{max} \approx 90$  кбит/с при  $W = 3,3 \cdot 10^{-12}$  Вт для ЛФД со структурой  $p^+n-v-p^+$ .

3. Предложена математическая модель квантовой системы, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов, и получено выражение для определения пропускной способности, учитывающее тип и длительность мертвого времени счетчика фотонов. Выполненная оценка пропускной способности показала, что проявление эффекта мертвого времени в счетчиках фотонов приводит к росту мощности оптического излучения, для которой достигается максимальное значение скорости передачи информации по сравнению со счетчиками фотонов, для которых этот эффект не проявляется. При среднем числе темновых импульсов, зарегистрированных за время передачи одного бита информации, меньшем либо равном единице, целесообразно подбирать пороговый уровень регистрации  $N_n = 2$  [3, 17].

4. Результаты экспериментальных исследований влияния мертвого времени ЛФД на пропускную способность квантовой системы показали, что величина напряжения питания ЛФД и интенсивности регистрируемого оптического излучения влияют на значения длительности мертвого времени и квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов. Наибольшее значение пропускной способности для исследуемых типов ЛФД получено при наименьшей длительности мертвого времени и наибольшей квантовой эффективности регистрации и составило  $\approx 81$  кбит/с [7].

5. Выполнена оценка влияния послеимпульсов на пороговую чувствительность счетчика фотонов. Установлено, что по абсолютному значению пороговая чувствительность счётчика фотонов при наличии послеимпульсов, сопровождающих темновые и сигнальные импульсы, больше, чем когда послеимпульсы сопровождают только сигнальные,

но меньше, чем когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы, причём разность пороговых чувствительностей увеличивается с увеличением  $\langle N_T \rangle$ . Увеличение вероятности образования послеимпульсов приводит к росту по абсолютной величине пороговой чувствительности как в случае, когда послеимпульсы сопровождают только сигнальные импульсы, так и в случае, когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы [1].

6. Разработан способ измерения времени протекания послеимпульсных явлений в счетчиках фотонов [5, 10, 11, 24], который позволяет определить вероятность образования послеимпульсов и расширить функциональные возможности известных способов определения послеимпульсов за счет дополнительного определения длительности и типа мёртвого времени счётчика фотонов, а также времени, в течение которого послеимпульсы образуются и время их затухания.

7. В результате проведенных экспериментальных исследований послеимпульсных явлений на основе анализа статистических распределений интервалов времени между импульсами и автокорреляционных функций регистрируемых оптических потоков установлено, что по статистическим распределениям интервалов времени между импульсами можно оценить время, в течение которого образуются послеимпульсы, длительность и тип мертвого времени фотоприемника, время восстановления напряженности электрического поля в р-п-переходе после протекания в нем лавинного пробоя, а по автокорреляционным функциям регистрируемых оптических потоков – вероятность появления и время затухания послеимпульсов и значение мертвого времени [5, 8, 10, 11, 13].

### **Рекомендации по практическому использованию**

Разработанное устройство, реализующее однофотонную синхронную квантовую систему с кодированием задержанными интервалами времени, может найти применение в качестве системы волоконно-оптической связи, в которой осуществляется контроль как несанкционированного доступа к информации, так и повреждений на линии связи.

Предложенный способ определения пропускной способности и способы определения типа и длительности мертвого времени лавинного фотодиода могут использоваться на этапе оптимизации параметров ЛФД, когда в качестве критерия оптимальности используется величина предельно достижимой пропускной способности.

Предложенная математическая модель квантовой системы, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, позволяет получить более точную оценку пропускной способности, поскольку эта модель учитывает тип и длительность мертвого времени. Это дает возможность применять такую модель, например, при проектировании счетчиков фотонов для квантовых систем, когда на основании основных параметров счетчика фотонов можно определить ожидаемое значение пропускной способности квантовой системы.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1 Гулаков, И.Р. Влияние послеимпульсов фотодетектора на точность определения пороговой чувствительности счетчика фотонов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Доклады БГУИР. – 2010. – № 4(50). – С. 5–10.

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

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

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

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

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

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

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

### Статьи в сборниках и материалах конференций

9 Тимофеев, А.М. Определение скорости передачи информации по оптическому каналу связи, содержащему в качестве приёмного модуля счётчик фотонов / А.М. Тимофеев // Вестник связи. – 2010. – № 4(102). – С. 32–35.

10 Тимофеев, А.М. Исследование распределения временных интервалов между импульсами лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов / А.М. Тимофеев // Вестник связи. – 2011. – № 1(105). – С. 39–41.

11 Гулаков, И.Р. Статистическое распределение фотоотчетов лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Фотоэлектроника и приборы ночного видения: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 25-28 мая 2010 г. / Федеральное гос. унитарное предприятие НПО «ОРИОН»; редкол.: А.М. Филачев [и др.]. – Москва, 2010. – С. 139–140.

12 Зеневич, А.О. Оценка пропускной способности оптического канала связи при передаче сообщения отдельными фотонами / А.О. Зеневич, С.К. Комаров, А.М. Тимофеев, А.А. Пашкевич // Современные средства связи: материалы докладов XV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28-30 сент. 2010 г. / Высш. Гос. колледж связи; редкол.: А.О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 41–42.

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

14 Зеневич, А.О. Приемники информации для квантовых криптографических систем / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Инженерно-педагогическое образование: проблемы и пути развития: материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17-18 мая 2012 г. / УО МГВРК; под общ. ред. С.Н. Анкуды. – Минск, 2012. – ч.2. – С. 69–70.

15 Гулаков, И.Р. Использование одноквантовых лавинных фотоприемников в оптических системах обнаружения несанкционированного доступа / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Фотоэлектроника и приборы ночного видения: материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 мая 2012 г. / Федеральное гос. унитарное предприятие НПО «ОРИОН»; редкол.: А.М. Филачев [и др.]. – Москва, 2012. – С. 83–85.

#### **Тезисы докладов**

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

17 Зеневич, А.О. Влияние мертвого времени на пропускную способность оптического канала связи / А.О. Зеневич, С.К. Комаров, А.М. Тимофеев // Технические средства защиты информации: материалы докладов VIII Междунар. Белорусско-российской науч.-техн. конф., Браслав, 24-28 мая 2010 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2010. – С. 19.

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

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

20 Зеневич, А.О. Использование квантовых систем для обнаружения каналов утечки оптической информации / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев, Ф.А. Ахмеджанов // Технические средства защиты информации: материалы докладов X Междунар. Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 29-30 мая 2012 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2012. – С. 17.

21 Тимофеев, А.М. Использование маломощных оптических сигналов в системах обнаружения несанкционированного доступа / А.М. Тимофеев, Ф.А. Ахмеджанов // Технические средства защиты информации: материалы докладов X Междунар. Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 29-30 мая 2012 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2012. – С. 18.

### Патенты на изобретение

22 Способ определения мертвого времени лавинного фотодиода, работающего в режиме счета фотонов: пат. 15846 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20100640; заявл. 27.04.2010; опубл. 30.04.2012 // Официальный бюл. / Нац. Центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №2. – С. 140.

23 Способ определения типа мертвого времени фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов: пат. 15925 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20100513; заявл. 05.04.2010; опубл. 30.06.2012 // Официальный бюл. / Нац. Центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №3. – С. 158.



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

25 Способ определения временных характеристик счетчика фотонов; пат. 16655 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01J 1/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20101781; заявл. 09.12.2010; опубл. 30.10.2012 // Официальный бюл. / Нац. Центр интеллектуал. собственности. – 2012. – №5. – С. 164.

## РЭЗЮМЭ

Цімафееў Аляксандр Міхайлавіч

### СІСТЭМЫ АДНАКВАНТАВАЙ РЭГІСТРАЦЫІ НА БАЗЕ ЛАВІННЫХ ФОТАПРЫМАЛЬНІКАЎ

**Ключавыя словы:** метад падліку фатонаў, лавінныя фотапрымальнікі, мёртвы час, пасляімпульсы.

**Мэта работы:** стварэнне квантавых сістэм, якія выкарыстоўваюць у якасці прыёмнага модуля лічыльнік фатонаў на базе ЛФД, і аптымізацыя рэжымаў іх функцыянавання, накіраваныя на дасягненне максімальна магчымай прапускной здольнасці.

**Мэтады даследавання і апаратура:** матэматычнае мадэляванне прапускной здольнасці квантавай сістэмы рэалізавана з выкарыстаннем праграмнага пакета Mathcad V.11. Для правядзення эксперыментальных даследаванняў у якасці крыніцы аптычнага выпраменьвання з пуасонаўскай статыстыкай выкарыстоўваўся святлодыёд АЛ307А, у якасці фотапрымальнікаў ужываліся крамянёвыя ЛФП са структурамі  $p-n-p$  і  $p-p-p$ , а таксама крамянёвыя лавінныя фотадыёды ФД-115Л, якія выпускаюцца сёрыйна.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** прапанаваны квантавыя сістэмы перадачы і прыёму аптычнай інфармацыі маламагутнымі аптычнымі сігналамі, якія забяспечваюць СПІ да 0,8 Мбіт/с. Створаны спосаб перадачы і прыёму аптычнай інфармацыі дазволіў абгрунтаваць выбар парогавага ўзроўню рэгістрацыі аднаквантавага фотапрымальніка і магутнасці аптычнага выпраменьвання зададзенай даўжыні хвалі, пры якіх СПІ квантавай сістэмы максімальная; прапанаваная мадэль квантавай сістэмы перадачы і прыёму аптычнай інфармацыі, якая ў якасці прыёмнага модуля змяшчае лічыльнік фатонаў з мёртвым часам, – выканаць аптымізацыю створаных сістэм, у якасці крытэрыя аптымальнасці выкарыстоўваючы максімальную прапускную здольнасць, а таксама павысіць дакладнасць вызначэння СПІ.

**Ступень выкарастання:** вынікі даследаванняў ужытыя ў ТАА «Марфі» пры распрацоўцы прапаноў для валаконна-аптычных сістэм рэгістрацыі, у ААТ «Гіпрасувязь» пры выкананні праектна-пошукавых работ і стварэнні праектна-каштарыснай дакументацыі сістэм абароны інфармацыі валаконна-аптычных ліній электрасувязі, а таксама ў навучальным працэсе ўстановы адукацыі «Вышэйшы дзяржаўны каледж сувязі» на кафедры тэлекамунікацыйных сістэм.

**Галіна ужывання:** аптычныя сістэмы аднаквантавай рэгістрацыі на базе лавінных фотапрымальнікаў.

## РЕЗЮМЕ

Тимофеев Александр Михайлович

### СИСТЕМЫ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ НА БАЗЕ ЛАВИННЫХ ФОТОНПРИЕМНИКОВ

**Ключевые слова:** метод счета фотонов, лавинные фотоприемники, мертвое время, послепулсы.

**Цель работы:** создание квантовых систем, использующих в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе ЛФД, и оптимизация режимов их функционирования, направленные на достижение максимально возможной пропускной способности.

**Методы исследования и оборудование:** математическое моделирование пропускной способности квантовой системы реализовано с использованием программного пакета Mathcad V.11. Для проведения экспериментальных исследований в качестве источника оптического излучения с пуассоновской статистикой использовался светодиод АЛ307А, в качестве фотоприемников применялись кремниевые ЛФП со структурами  $p^+n-v-n^+$  и  $p^+r-p^+$ , а также серийно выпускаемые кремниевые лавинные фотодиоды ФД-115Л.

**Полученные результаты и их новизна:** предложены квантовые системы передачи и приема оптической информации маломощными оптическими сигналами, обеспечивающие СПИ до 0,8 Мбит/с. Созданный способ передачи и приема оптической информации позволил обосновать выбор порогового уровня регистрации одноквантового фотоприемника и мощности оптического излучения заданной длины волны, при которых СПИ квантовой системы максимальна; предложенная модель квантовой системы передачи и приема оптической информации, содержащей в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, – выполнить оптимизацию созданных систем, используя в качестве критерия оптимальности максимальную пропускную способность, а также повысить точность определения СПИ.

**Степень использования:** результаты исследований применены в ООО «Марфи» при разработке предложений для волоконно-оптических систем регистрации, в ОАО «Гипросвязь» при выполнении проектно-исследовательских работ и создании проектно-сметной документации систем защиты информации волоконно-оптических линий электросвязи, а также в учебном процессе Учреждения образования «Высший государственный колледж связи» на кафедре телекоммуникационных систем.

**Область применения:** оптические системы одноквантовой регистрации на базе лавинных фотоприемников

## SUMMARY

Timofyeyev Alexander Mikhaylovich

### ONE-QUANTUM RECORDING SYSTEMS ON THE BASIS OF AVALANCHE PHOTODETECTORS

**Keywords:** photon counting method, avalanche photodetectors, dead time, afterpulses.

**The aim of research:** creation of quantum systems, using the photon counter on the basis of an avalanche photodiode that serves as a receiving module, and optimization the modes of operation of such systems, aimed at attainment of maximum possible throughput.

**Research techniques and equipment:** the Mathcad V.11 software package for mathematical modelling of throughput of quantum system has been used. To carry out experimental research the AL307A light-emitting diode has been used as an optical emission source with Poissonian statistics, silicon APD with structures  $p^+n-v-n^+$  and  $n^+p-\pi-p^+$  have been applied as photodetectors, and series-produced FD-115L silicic avalanche photodiodes also have been used.

**Output and novelty:** quantum systems for transmission and reception of optical data by means of low-power optical signals, providing data rate of up to 0,8 Mbit/s have been suggested. The created method of transmission and reception of optical data has allowed to select the recording threshold level of one-quantum photodetector and optical radiation power of a given wave length at which data rate quantum system data rate is maximum; the model of quantum system suggested for transmission and reception of optical data contains photon counter with dead time that serves as a receiving module to optimize created systems, using maximum throughput capacity and also to improve accuracy of data rate definition.

**Efficiency:** research output has been applied at Marphi Co Ltd in working out proposals for fiber-optical recording systems, at Giprosvyaz Public Corporation in carrying out design and exploration work and creating design estimates for data guarding systems of fiber-optics communication lines and also in educational process of the «Higher State College of Communication» at Telecommunication Systems Department.

**Field of application:** one-quantum recording optical systems on the basis of avalanche-type photodetectors.

Научное издание

**ТИМОФЕЕВ** Александр Михайлович

**СИСТЕМЫ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
НА БАЗЕ 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 12.11.2012. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,23. Тираж 60. Заказ 1486.

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