

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 53.082.5; 681.7.08; 681.7.068; 004.085

**ПОЛЯКОВ
АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный консультант – **Ксенофонтов Михаил Александрович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Заслуженный деятель науки Республики Беларусь,
заведующий лабораторией физико-химии поли-
мерных материалов и природных органических
соединений НИУ «Институт прикладных
физических проблем имени А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Толстик Алексей Леонидович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой
лазерной физики и спектроскопии
Белорусского государственного университета;

Гончаренко Игорь Андреевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры естественных наук
ГУО «Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»;

Хомченко Александр Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Физические методы контроля»
МОУВО «Белорусско-Российский университет».

Оппонирующая организация – **Белорусский национальный
технический университет.**

Защита состоится 22 декабря 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон и. о. учёного секретаря: 209-57-09 ; e-mail: Samtsov@bsu.by. Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «21» ноября 2023 г.

И.о. ученого секретаря совета
по защите диссертаций
доктор физико-математических наук профессор



М.П. Самцов

ВВЕДЕНИЕ

В последние три десятилетия с развитием оптоэлектроники и волоконной оптики волоконно-оптические датчики (ВОД) нашли широкое распространение в качестве измерительных устройств благодаря присущим им уникальным свойствам: пожаро-, взрыво-, искро-безопасность; устойчивость к химическим, механическим, коррозионным воздействиям; нечувствительность к электромагнитным помехам; обеспечение мультиплексирования отдельных датчиков в сложные измерительные системы; возможность передачи информации на большие расстояния; значительный срок службы, превышающий 25 лет. Современной тенденцией дальнейшего развития ВОД является использование волоконных световодов одновременно в качестве чувствительного элемента и тракта передачи информации. В настоящее время разработаны ВОД для измерения температуры, давления, деформации, различных механических и электромагнитных величин, ионизирующего и радиационного излучения, уровня жидкости, химического состава, других физических величин.

Наибольшей точностью измерений обладают фазовые ВОД интерференционного типа, однако результаты их измерений сильно зависят от влияния механических воздействий, вибрации, температуры, дрейфа нуля. Наиболее распространенные амплитудные датчики отличаются простотой и надежностью, вместе с тем точность их измерений связана с регистрацией изменений амплитуды маломощных оптических сигналов на фоне шумов, при этом увеличение мощности излучения в тракте ВОД не позволяет значительно улучшить результаты измерений. Точность квазираспределенных спектральных волоконно-оптических датчиков, использующих в качестве чувствительного элемента волоконные брэгговские решетки (ВБР), ограничивается шириной спектральной линии отражения ВРБ, чувствительностью спектроанализатора.

Задача улучшения метрологических характеристик измерительных систем при сохранении простоты и надежности эксплуатации состоит в разработке новых методов измерений, в которых под воздействием измеряемых физических величин осуществляется модуляция неоптических параметров, являющихся носителями информации. Одним из путей решения подобных задач является формирование выходных сигналов ВОД в виде последовательности оптических импульсов, информационными параметрами в которых являются частота следования импульсов или временные интервалы между импульсами. Созданные на данном принципе частотные ВОД обладают низкой стабильностью автомодуляционных колебаний из-за затягивающего действия центральной частоты резонансного усилителя на частоту колебаний волоконно-оптического генератора и субгармонических бифуркаций, что снижает точность

измерений. Для повышения разрешающей способности частотных ВОД необходимо совершенствовать рециркуляционные методы измерения и разработать волоконно-оптические диагностические и измерительные системы, сочетающие в себе надежность, многофункциональность, высокую точность при длительном сроке эксплуатации.

Поиск структурных решений построения архитектуры оптических информационных систем, ориентированных на обработку и хранение оптической информации, например, в высокоскоростных оптоволоконных линиях связи, специализированных оптических процессорах, при лазерно-локационном зондировании, в лазерной космической связи и т.д. связан с применением специализированных высокоскоростных оптических элементов памяти, позволяющих избежать значительных потерь оптической информации при ее доставке конечному потребителю. В качестве такой буферной памяти перспективным является использование волоконно-оптических динамических запоминающих устройств (ВОДЗУ) рециркуляционного типа, достоинством которых является возможность записи информационного потока в реальном масштабе времени и осуществления хранения данных в течение времени, необходимого для их последующей обработки. В таких оптоволоконных системах можно организовать по одному световоду одновременно большое число информационных каналов за счет применения технологии спектрального мультиплексирования. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований подтвердили принципиальную возможность использования ВОДЗУ при скоростях информационных потоков более 1 Гбит/с. Было установлено, что одной из основных причин ограничения информационных параметров ВОДЗУ является разрушение информационного потока под воздействием внешних и внутренних дестабилизирующих влияний.

В настоящее время отсутствуют комплексные исследования причин и явлений, влияющих на разрушение оптического информационного потока в процессе рециркуляции с периодическим восстановлением оптических импульсов. Решение задач оптимизации режимов работы элементов ВОДЗУ с оптической регенерацией информации позволит уменьшить влияние дестабилизирующих факторов для наиболее полного использования преимуществ оптоволоконных методов обработки и хранения информации и создания новых систем динамических запоминающих устройств с высокими информационными характеристиками.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнялась в Белорусском государственном университете на кафедре физики и аэрокосмических технологий и соответствует

«Перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 гг.» «конкурентоспособные изделия радио-, микро-, нано-, СВЧ- и силовой электроники, микросенсорика, лазерно-оптической техники, разработка новых видов приборов, в том числе для научных целей», утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005г., № 512; «Перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы» «п. 6.10 оптико-электронные методы и средства измерений физических величин, контроля технологии и параметров производства полупроводниковых приборов и интегральных схем, размерного контроля», утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010г., № 585; «Приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы» «п.6. Электроника и фотоника», утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015г., № 190 и «Приоритетным направлениям научно - технической деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 годы» «п.4 Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика», согласно Указа Президента Республики Беларусь от 07.05.2020г., № 156.

Исследования проводились в рамках следующих программ и тем:

- Грант БРФФИ №Т00М-012 «Разработка эффективных методов повышения метрологических характеристик волоконно-оптических измерительных систем рециркуляционного типа», 2001-2003 гг. (№ госрегистрации 20012448);
- ГПОФИ «Электроника» (Электроника-28) «Разработка принципов создания высокоэффективных многофункциональных диагностических систем получения и обработки информации на основе волоконно-оптических датчиков», 2002-2005 гг., (№ госрегистрации 20022201);
- Грант БРФФИ №Т04М-009 «Разработать принципы создания прецизионных частотных волоконно-оптических датчиков распределенных и сосредоточенных воздействий различной природы», 2004-2006 гг. (№ госрегистрации 20042268);
- НИР, выполненная по плану Минобразования РБ, «Разработка прецизионных информационно-измерительных систем на основе частотных волоконно-оптических датчиков», 2009-2010 гг. (№ госрегистрации 20091358);
- Грант БРФФИ №Ф09-094 «Разработка структуры и принципов функционирования частотных волоконно-оптических измерительных систем для изучения различных физических процессов», 2009-2011 гг. (№ госрегистрации 20091357);

–ГПНИ «Информатика и космос», задание 5.03 «Разработка концепции построения оптоэлектронного процессора ввода оптической информации реального масштаба времени в вычислительный канал суперкомпьютера», 2011-2013 гг. (№ госрегистрации 20114343);

–ГПНИ «Фотоника и оптоэлектроника», НИР 2.1.15.1 «Разработка принципов структурного построения прецизионных оптоволоконных измерительных систем для мониторинга пространственного распределения температурных полей» в рамках задания 2.1.15 «Разработка методов и средств метрологического обеспечения лазерной и оптоэлектронной техники» 2014–2015 гг. (№ госрегистрации 20140468);

–ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (подпрограмма «Оптоэлектроника») НИР 2.3.02.2 «Разработка принципов построения подземной волоконно-оптической системы охраны периметра» (№ госрегистрации 20162099) и НИР 2.3.02.1 «Разработка структуры квазираспределенных волоконно-оптических измерителей электрических величин» (№ госрегистрации 20161078) в рамках комплексного задания 2.3.02 «Разработка базовых конфигураций структур прецизионных контрольно-измерительных систем на основе квазираспределенных оптоволоконных частотных датчиков» 2016–2020 гг.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования – развитие теории построения рециркуляционных волоконно-оптических систем и разработка физических основ создания эффективных рециркуляционных волоконно-оптических датчиков и динамических запоминающих устройств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- обосновать новый метод измерения физических величин рециркуляционными волоконно-оптическими датчиками;
- разработать принципы построения новых квазираспределенных частотных волоконно-оптических датчиков и систем охраны периметра рециркуляционного типа со спектральным мультиплексированием;
- создать математическую модель влияния спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения на уровень шумов волоконно-оптических систем при температурных воздействиях;
- установить пределы прочности кварцевых волокон, используемых в волоконно-оптических датчиках в качестве чувствительного элемента, при динамических изменениях температуры;
- развить теорию многопараметрического анализа процесса рециркуляции информационного потока в волоконно-оптических динамических

запоминающих устройствах со спектральным уплотнением информационных каналов.

Объект исследования – волоконно-оптические частотные измерители физических величин рециркуляционного типа и оптоволоконные динамические запоминающие устройства со спектральным мультиплексированием информационных каналов.

Предмет исследования – физические процессы, протекающие в оптоволоконных рециркуляционных информационно-измерительных устройствах при разных внешних воздействиях.

Научная новизна

1. Теоретически обоснован и экспериментально реализован новый метод измерения физических величин, основанный на регистрации частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов с их восстановлением по амплитуде, форме и длительности на каждом цикле рециркуляции в замкнутой оптоволоконной системе, позволяющий увеличить долговременную стабильность частоты рециркуляции.

2. Создана математическая модель, описывающая совместное влияние спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения на шумовые характеристики волоконно-оптических систем, позволяющая установить закономерности взаимосвязи метрологических параметров оптоволоконных измерителей с изменяющимися температурными условиями.

3. Разработаны принципы построения нового класса измерителей: квазираспределенных частотных волоконно-оптических датчиков рециркуляционного типа с технологией спектрального мультиплексирования, основанные на зависимости частоты рециркуляции оптических импульсов на разных длинах волн от изменений размеров и группового показателя преломления волоконного световода под воздействием температуры, обратного поперечного пьезоэффекта и магнитострикции.

4. Установлены закономерности разрушения кварцевого волокна с металлическим покрытием на основе роста поверхностных микротрещин при воздействии нестационарных механических напряжений, позволяющие установить интервалы температур, измеряемые рециркуляционными оптоволоконными датчиками.

5. Определены характерные особенности совместного влияния дополнительных потерь мощности излучения, связанных с туннелированием излучения из сердцевины в оболочку при изгибе волокна, а также мощности излучения лазера и фронта оптических импульсов на изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами при поперечных деформациях

волоконных световодов, позволяющие создать структуру подземной волоконной системы охраны периметра с улучшенными эксплуатационными характеристиками и методику обнаружения нарушителя.

6. Развита теория многопараметрического анализа процесса динамического хранения информации в волоконно-оптических запоминающих устройствах с оптической регенерацией, заключающаяся в установлении механизма совместного влияния амплитудных флуктуаций в элементах волоконной буферной памяти, временного джиттера, фазовой самомодуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсии в волоконном световоде на время хранения при заданной вероятности ошибки.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения физических величин, основанный на регистрации вызванных внешними воздействиями изменений частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов в замкнутом оптоволоконном контуре с их периодическим восстановлением по амплитуде и форме, отличающийся повышенной разрешающей способностью и точностью за счет увеличения на порядок долговременной стабильности частоты рециркуляции.

2. Математическая модель, описывающая взаимосвязь метрологических параметров волоконно-оптических систем с температурными зависимостями спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения, и установленные на ее основе закономерности влияния изменения температуры на шумовые характеристики оптоволоконных систем, обуславливающие появление минимума эквивалентной мощности шума в зависимости от температуры и длины волоконного световода при использовании лавинных фотодиодов.

3. Принципы построения квазираспределенных рециркуляционных волоконно-оптических измерительных систем с технологией спектрального мультиплексирования, которые позволяют измерять температуру до 500 °С с погрешностью метода измерений $\pm 0,1$ °С, контролировать высоковольтное электрическое напряжение в диапазоне 20–150 кВ с относительной погрешностью 0,3–0,45 %, определять концентрацию газообразного кислорода с относительной погрешностью 0,75 % и 3,2 % в воздушной смеси, что в 3–5 раз превышает точность амплитудных волоконных датчиков и спектральных датчиков на основе решеток Брэгга.

4. Возникновение и рост поверхностных микротрещин в кварцевых волоконных световодах с металлическим покрытием, обусловленных механизмом зарождения пор, при воздействии нестационарных продольных механических напряжений приводит к уменьшению максимальной измеряемой температуры на 37 % с 500 °С до 315 °С для срока эксплуатации 10–12 лет.

5. Структура и принципы функционирования подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа с применением технологии спектрального мультиплексирования, основанной на изменениях временных интервалов между циркулирующими импульсами при поперечных деформациях волоконного световода, отличающаяся увеличением в 1,5 раза разрешающей способности по сравнению с радиочастотными охранными системами, позволяющая фиксировать перемещение нарушителя между секторами охраняемой территории, обеспечить отсутствие «мертвых зон» и устойчивость к воздействию окружающей среды.

6. Максимальное время хранения информации в динамических запоминающих устройствах с оптической регенерацией и спектральным уплотнением информационных каналов определяется совместным влиянием амплитудных флуктуаций в элементах памяти, временным джиттером, фазовой самомодуляцией, хроматической и поляризационной модовой дисперсией в волоконном световоде, при этом длина волокна, соответствующая максимальному времени хранения при вероятности ошибки 10^{-9} , не зависит от скорости информационного потока и мощности излучения лазера.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе результаты отражают личный вклад автора в решение поставленных задач. Автор принимал непосредственное участие в выборе темы диссертации, в постановке цели и задач исследования, в разработке физических принципов построения и математического описания физических процессов в оптоволоконных системах, выполнении численных расчетов и проведении экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, подготовке публикаций. Научный консультант Ксенофонтов М.А. принимал участие в планировании работ, обсуждении полученных результатов. Чубаров С.И. оказал помощь в подготовке и проведении экспериментальных исследований. Жуковский А.В., Прокопенкова Т.Д., Сахончик Д.Г., Хлебородов Н.Р. участвовали в написании некоторых программ для численного моделирования. Альгина Е.Г. изучала вопросы, не вошедшие в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XIV, XVI научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Судак, 24–31 мая 2002, 24-31 мая 2004); International Conference on Laser, Application and Technologies (Москва, 22–27 июня 2002); International Conference

on Advanced Optoelectronics and Lasers (Алушта, 16-20 сентября 2003; Ялта, 12-17 сентября 2005, Севастополь, 10–14 сентября 2010, Судак, 9–13 сентября 2013); V, VIII, IX, X, XI, XII Международных научно-технических конференциях «Квантовая электроника» (Минск, 22–25 ноября 2004, 22–25 ноября 2010, 18–21 ноября 2013, 9–13 ноября 2015, 13–17 ноября 2017, 18–22 ноября 2019); I, V International Conference “Electronics and applied physics” (Киев, 24-27 ноября 2005, 21–24 октября 2009); Международных конференциях «Лазеры. Измерения. Информация» (С.-Петербург, 3–5 июня 2008, 2–4 июня 2009, 1-3 июня 2010, 7–9 июня 2011, 5–7 июня 2012, 4–6 июня 2013); IV, V, VI, VIII, IX, X, XI Международных конференциях «Фундаментальные проблемы оптики» (С.-Петербург, 16–20 октября 2006, 20–24 октября 2008, 18–22 октября 2010, 20-24 октября 2014, 17–21 октября 2016, 15–19 октября 2018, 21–25 октября 2019); Optical Sensors 2009 (Прага, 20-23 апреля 2009); 10th European Conference on Optical Chemical Sensors and Biosensors (Прага, 28–31 марта 2010); IX Международной конференции «Прикладная оптика-2010» (С.-Петербург, 18–22 октября 2010); III Международной научно-практической конференции «Оптика неоднородных структур 2011» (Могилев, 16–17 февраля 2011); SPIE Optics+Optoelectronics (Прага, 18-21 апреля 2011); I, III, IV, V Международных научно-практических конференциях «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 28 февраля 2011, 28–29 апреля 2015, 11–12 мая 2017, 16–17 мая 2019); SPIE Security+Defense (США, Орlando, 26-28 апреля 2011); Международном научном конгрессе по информатике «Информационные системы и технологии» (Минск, 31 октября–3 ноября 2011, 24–27 октября 2016); 11 International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (Харьков, 4–8 сентября 2011); III Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, 9–11 ноября 2011); SPIE Optics and Photonics for Information Processing VI (США, Сан Диего, 15-16 августа 2012); SPIE Fiber Optic Sensors and Applications XII (США, Балтимор, 20-24 апреля 2015); V, VIII Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (Москва, 3–5 февраля 2016, 23–25 января 2019); 9, 10, 11, 12 Международных научно-технических конференциях «Приборостроение» (Минск, 24–27 октября 2016, 1–3 ноября 2017, 14–16 ноября 2018, 13–15 ноября 2019); SPIE Electro-Optical and Infrared Systems : Technology and Applications XIV (Варшава, 13-14 сентября 2017); I Международной научно-технической конференции «Опто-, микро- и СВЧ-электроника» (Минск, 22–26 октября 2018).

По результатам диссертации получено 6 актов о внедрении результатов исследования в промышленность (РУНПП «Гродненский механический завод», ОАО «Белтеплоизоляция», ЗАО «Институт информационных технологий»,

ООО «ГамбитФорт», НИИПФП имени А.Н. Севченко БГУ) и 3 акта об использовании результатов НИР в учебном процессе.

Получено 8 патентов Республики Беларусь на изобретения и полезные модели.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 70 научных работах, из которых: 2 единолично изданных монографии (объемом 11,7 и 10,75 авторского листа), одна из которых прошла научное рецензирование двумя рецензентами - доктором и кандидатом физико-математических наук - и рекомендована к изданию Редакционно-издательским советом БГУ, а также 24 статьи в научных изданиях, включенных в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях (общим объемом 13,07 авторского листа), 4 статьи в других научных изданиях, 35 статей в сборниках материалов научных конференций, 5 тезисов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 317 страниц, в том числе 120 рисунков занимают 57 страниц, 17 таблиц на 8 страницах, два приложения занимают 22 страницы. Список использованных источников содержит 455 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени на 39 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** рассмотрены физические принципы функционирования, современное состояние и направления развития волоконно-оптических информационно-измерительных устройств.

Современные тенденции развития ВОД связаны с разработкой принципов функционирования, в которых оптическое волокно является одновременно чувствительным элементом и каналом передачи информации. Наибольшей точностью измерений обладают фазовые ВОД интерференционного типа, однако результаты их измерений сильно зависят от влияния механических воздействий, вибрации, температуры, дрейфа нуля. Наиболее распространенные амплитудные датчики отличаются простотой и надежностью, вместе с тем точность их измерений связана с регистрацией изменений амплитуды маломощных оптических сигналов на фоне шумов, при этом увеличение мощности излучения в тракте ВОД не позволяет значительно увеличить точность измерений. Распределенные ВОД, использующие вынужденное комбинационное рассеяние

(ВКР) света, характеризуются небольшой величиной температурного коэффициента рамановского рассеяния, составляющей $0,8\%/^{\circ}\text{C}$ для антистоксовой линии, что требует применения длительного накопления сигнала. Поскольку ВКР является пороговым процессом, для его возникновения необходимо использовать излучение накачки с мощностью более $0,8\text{ Вт}$. Датчики на основе ВКР используются, как правило, только для измерения температуры, при этом погрешность измерения не превышает $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Основными недостатками распределенных ВОД на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна являются относительно невысокая точность измерения величины (например, разрешение по температуре порядка $\pm 1^{\circ}\text{C}$), достаточно большое время измерений (от десятков секунд до десятков минут), а также сложная конструкция и методика измерений. Квазираспределенные волоконно-оптические датчики, использующие в качестве чувствительного элемента волоконные брэгговские решетки (ВБР), сформированные в стандартном кварцевом ВС, позволяют измерять температуру до $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$, поскольку при более высоких температурах спектральные и энергетические характеристики ВБР ухудшаются вследствие разрушения структуры решетки. Погрешность измерений составляет, как правило, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ для ВБР с полимерным покрытием и $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ для ВБР с металлическим покрытием и ограничивается шириной спектральной линии отражения ВРБ, а также чувствительностью спектроанализатора. Диапазон измерения относительных деформаций не превышает 1% . Количество используемых ВБР определяется спектральной шириной источника излучения, чувствительностью ВБР и требуемым диапазоном измерения физической величины.

Задача улучшения метрологических характеристик измерительных систем при сохранении простоты и надежности эксплуатации, присущих амплитудным датчикам, состоит в разработке новых методов измерений и принципов схемных реализаций. Одним из путей решения подобных задач является переход от регистрации оптических величин к измерению таких неоптических параметров, как частота или период рециркуляции. В данном случае волоконно-оптические датчики могут быть созданы на основе оптоэлектронных рециркуляционных систем (ОЭРС). Для более полной реализации всех возможностей рассматриваемых структур требуется разработка новых методов измерений и нахождение оптимальных режимов работы ОЭРС, что напрямую связано с улучшением их метрологических характеристик.

Во многих практических применениях для обработки высокоскоростной оптической информации необходимо применение специальных буферных элементов памяти. Проведенный анализ литературных источников показал, что в качестве таких элементов эффективно могут использоваться волоконно-

оптические динамические запоминающие устройства (ВОДЗУ) рециркуляционного типа с волоконным световодом в качестве линии задержки, достоинством которых является возможность записи информационного потока в реальном масштабе времени, хранение в течение времени, необходимого для последующей обработки, а также организовать по одному световоду одновременно большое число информационных каналов за счет применения технологии плотного спектрального мультиплексирования. Для работы с гигабитными скоростями информационного потока необходим переход от оптоэлектронных к чисто оптическим способам восстановления оптических информационных импульсов в процессе рециркуляции. Проведена оценка состояния теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении. Рассмотренные схемы построения ВОДЗУ используют оптическую 1R-регенерацию и по таким параметрам, как время хранения, информационная емкость не удовлетворяют современным требованиям. В настоящее время отсутствуют комплексные исследования влияния таких факторов, как шумовые источники, амплитудные и временные флуктуации, нелинейные эффекты в волоконном световоде (ВС) на разрушение оптического информационного потока в процессе рециркуляции. В этой связи становится актуальной задача разработки, исследования и оптимизации новых структур оптоволоконной буферной памяти регенеративного типа субнаносекундного быстрого действия с использованием спектрального лазерного уплотнения информационных каналов с целью улучшения их информационных параметров.

Вторая глава содержит описание разработанного рециркуляционного метода измерений с периодической регенерацией оптических импульсов и экспериментальное исследование стабильности частоты рециркуляции в замкнутых оптоэлектронных системах регенеративного типа.

На основании обобщения теоретических и экспериментальных данных разработан новый метод измерений физических величин волоконно-оптическими датчиками, основанный на регистрации частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов с их восстановлением по амплитуде, форме и длительности на каждом цикле рециркуляции в замкнутой оптоволоконной системе. При этом оптическое волокно является одновременно чувствительным элементом и каналом передачи информации. Сохраняя простоту и надежность конструкции, присущие амплитудным ВОД, в рециркуляционных ВОД отсутствует необходимость измерения незначительных изменений амплитуды сигналов на фоне шумов, что повышает разрешающую способность таких систем.

Анализ предложенного метода измерений показал, что одним из главных факторов, влияющим на метрологические характеристики рециркуляционных

ВОД, является стабильность частоты рециркуляции. Наиболее существенное влияние на точность ВОД оказывают следующие процессы: 1) временной джиттер в инжекционном лазере (ИЛ), возникающий из-за случайных изменений времени задержки между импульсом тока накачки и излучением лазера; 2) нестабильность времени отклика лавинного фотодиода (ЛФД); 3) временной разброс моментов срабатывания порогового решающего устройства, который связан с изменением амплитуды входного сигнала из-за флуктуаций мощности излучения ИЛ, дробовых шумов ЛФД, тепловых шумов нагрузочного сопротивления и т. д. Проведены экспериментальные исследования зависимости относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции (ОДН) от параметров ОЭРС. Для ОЭРС на основе волоконного световода длиной 200 м, InGaAsP-ИЛ при токе накачки $I=1,3I_{п}$ и постоянном токе смещения $I_0=0,9I_{п}$, обеспечивающих мощность излучения 2 мВт, ЛФД при коэффициенте лавинного умножения $M \approx 10$, экспериментально полученная ОДН частоты рециркуляции не превышала $2 \cdot 10^{-6}$ при времени наблюдения 1 ч и времени измерения 1 с (рисунок 1). Для порогов срабатывания устройства регенерации в интервале 30 %–80 % от амплитуды импульсов на его входе стабильность частоты рециркуляции оставалась практически постоянной. С уменьшением длины волоконного световода стабильность частоты рециркуляции нелинейно уменьшалась, что связано с усилением влияния на процесс рециркуляции нестабильности параметров ИЛ и ЛФД, приводивших к возрастанию скорости накопления ошибок. Поскольку в разработанных ОЭРС исключены такие источники флуктуаций, как затягивающее действие центральной частоты

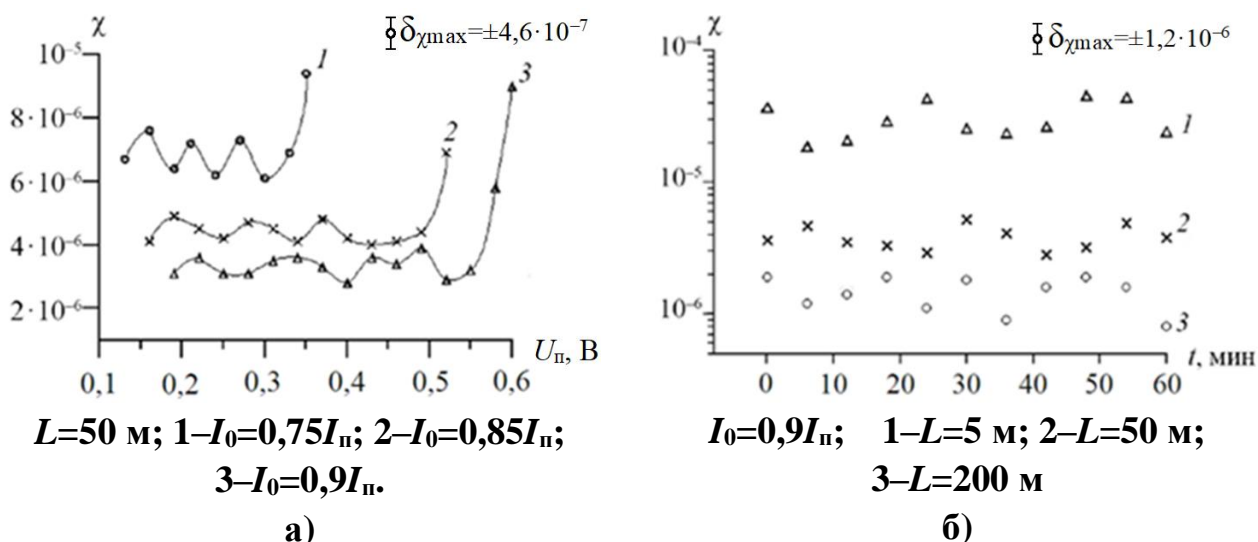


Рисунок 1 – Зависимость ОДН частоты рециркуляции χ от величины порога срабатывания $U_{п}$ блока регенерации (а) и времени наблюдения t (б) при различных величинах тока постоянного смещения ИЛ и значениях длины ВС

резонансного усилителя на частоту колебаний волоконно-оптического генератора и субгармонические бифуркации, полученные значения ОДН более, чем на порядок меньше по сравнению с ОДН для автоколебательных систем при длине ВС 350 м.

Одним из традиционных способов повышения метрологических характеристик ВОД является увеличение времени измерений, в течение которого частотомером производится усреднение регистрируемых значений. Анализ полученных экспериментальных зависимостей величины ОДН от времени измерения показал, что нарастающее отклонение ОДН от линейного закона в сторону возрастания при увеличении времени измерения свидетельствует о том, что ВОД рециркуляционного типа обладают свойством накапливать флуктуации в процессе циркуляции, и это дало основание устанавливать время измерения частотомера не более, чем 1 с.

При исследовании кратковременных флуктуаций времени распространения оптических импульсов по оптоэлектронному тракту, соответствующему единичным периодам рециркуляции, были использованы метод многоканального временного анализа и специально разработанный экспериментальный стенд на основе время-амплитудного преобразования. Анализ полученных результатов показал (рисунок 2), что минимальные значения кратковременных флуктуаций наблюдались при коэффициенте лавинного умножения ЛФД в окрестности $M \approx 8-12$ и пороге решающего устройства, соответствовавшего линейному участку фронта импульса.

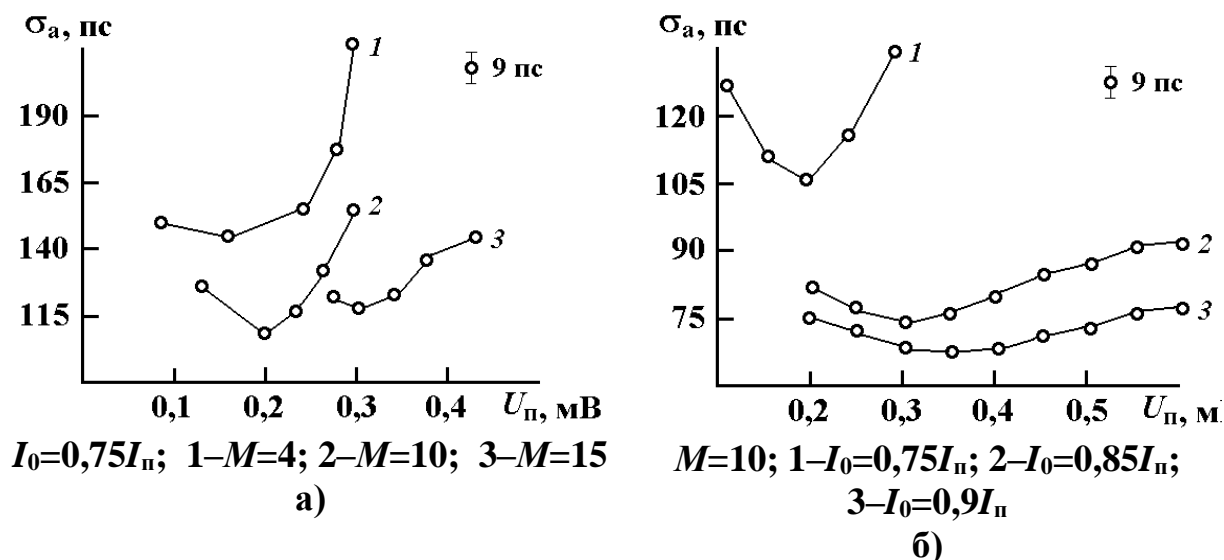


Рисунок 2 – Зависимости среднеквадратичных флуктуаций времени распространения импульса в оптоэлектронном тракте σ_a от величины порога срабатывания компаратора U_n при различных значениях коэффициента лавинного умножения ЛФД (а) и тока постоянного смещения ИЛ (б)

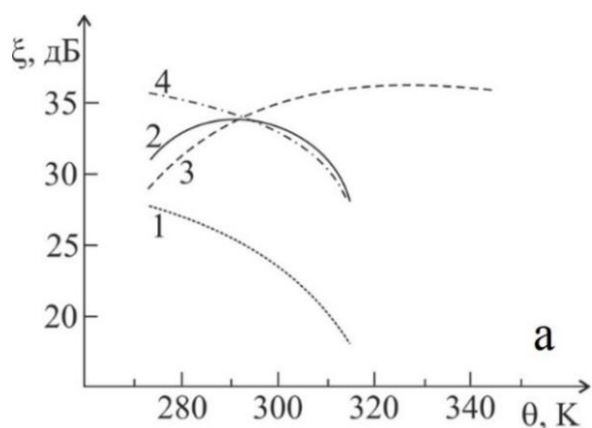
В третьей главе приведены результаты исследования влияния температурной зависимости спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения на параметры волоконно-оптических систем.

Методами численного моделирования были проведены исследования эффективности использования синхронизации лазера гармоническим сигналом и применения различных способов регистрации информационной последовательности для уменьшения флуктуаций амплитуды и временного положения информационных импульсов. Установлено, что использование дополнительной синхронизации ИЛ небольшим гармоническим сигналом со специально подобранными параметрами позволило уменьшить временной разброс моментов срабатывания решающего устройства волоконно-оптической системы передачи и обработки информации при RZ кодировании на 45 %. Показано, что отношение сигнал/шум увеличивается при этом в 3–4 раза при передаче (записи) информации, состоящей из нерегулярной последовательности битов со скоростью более 2 Гбит/с, наименьший временной джиттер наблюдается при плотности тока смещения, составлявший 0,96–0,98 величины плотности порогового тока.

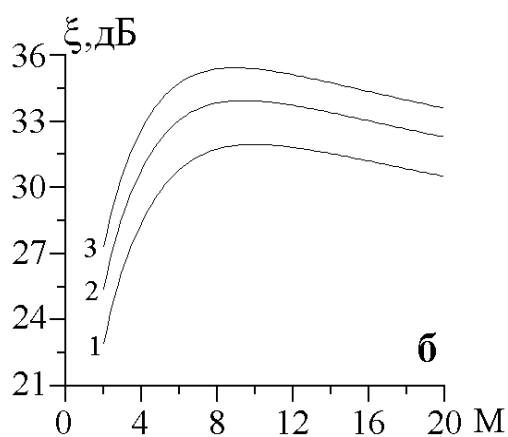
Разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь шумовых параметров волоконно-оптических систем с температурными зависимостями спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения. Показано, что воздействие изменяющихся температурных условий приводит к возникновению систематической погрешности измерений волоконными гидрофонами на основе гомодинного интерферометра Маха-Цендера, достигающей 107 % для $\lambda=1,3$ мкм и 80 % для $\lambda=1,55$ мкм в диапазоне температур от -30 °С до $+50$ °С относительно калибровочных значений при комнатной температуре. Меньшие значения систематической погрешности при $\lambda=1,55$ мкм объясняются тем, что температурное изменение спектральной чувствительности ЛФД в окрестностях 1,55 мкм частично компенсировало изменение мощности излучения инжекционного лазера, связанное с температурной зависимостью порогового тока, и смещение длины волны генерации, обусловленное температурными зависимостями длины резонатора лазера, коэффициента преломления материала полупроводника и ширины запрещенной зоны ИЛ. Для длины волны 1,3 мкм спектральная чувствительность фотодиода изменяется незначительно при колебаниях температуры окружающей среды и погрешность измерения практически полностью определялась температурными свойствами ИЛ.

Одной из основных характеристик волоконно-оптических информационно-измерительных систем является вероятность ошибки *BER*

приема информации. Обычно величина BER определяется отношением сигнал/шум (ОСШ) на входе порогового решающего устройства. Разработанная математическая модель отношения сигнал/шум в контуре, учитывающая амплитудные флуктуации мощности излучения ИЛ, дробовые шумы ЛФД, тепловые шумы нагрузочного сопротивления, а также температурные зависимости спектральной чувствительности ЛФД и длины волны излучения ИЛ, позволила находить оптимальные режимы работы элементов оптоэлектронной системы и осуществлять выбор рабочего диапазона температур по критерию максимального отношения сигнал/шум. Проведен многопараметрический системный анализ способов минимизации совместного влияния флуктуационных и температурных воздействий и были выявлены следующие закономерности (рисунок 3, а): шумы, связанные с флуктуациями амплитуды излучения ИЛ, соизмеримы с другими шумовыми компонентами ОЭРС при длинах одномодовых ВС до 30–35 километров; отношение сигнал/шум постоянно нелинейно уменьшается с повышением температуры при использовании ЛФД в режиме $M=const$; появление максимума в зависимости ОСШ $\xi(\theta)$ и положение этого максимума на оси температур определяется совместным влиянием температурных зависимостей мощности и длины волны излучения ИЛ, а также спектральной чувствительности, коэффициента лавинного умножения и темнового тока ЛФД в режиме при постоянном напряжении смещения $U=const$. Отношение сигнал/шум увеличивается примерно на 10 дБ по сравнению с фотоприемниками без внутреннего усиления для длины одномодового волоконного световода $L>30$ км.



$L=30$ км; 1 – $P_{ил}=f(\theta)$, $M=1$; 2 – $P_{ил}=f(\theta)$,
 $U=const$ 3 – $P_{ил}=2$ мВт= $const$, $U=const$;
 4 – $P_{ил}=f(\theta)$, $M=const$



1 – $P_{ил}=1,5$ мВт; 2 – $P_{ил}=2$ мВт;
 3 – $P_{ил}=2,5$ мВт; $L=30$ км; $\theta=293$ К

Рисунок 3 – Зависимость отношения сигнал/шум ξ в волоконно-оптической системе от температуры θ (а) и коэффициента лавинного умножения ЛФД M (б) при различных режимах работы ЛФД и мощностях излучения ИЛ

Учитывая тот факт, что отношение сигнал/шум увеличивается за счет повышения коэффициента лавинного умножения M до тех пор, пока растущие пропорционально $M^2 F$ (F –шум-фактор ЛФД) дробовые шумы не станут преобладать над другими шумовыми источниками, получили, что при комнатной температуре для анализируемой системы оптимальный с точки зрения максимума ОСШ коэффициент лавинного умножения для германиевого ЛФД лежит в пределах 8–12 и практически не зависит от мощности излучения ИЛ (рисунок 3, б). Полученные теоретические результаты объясняют представленные во 2 главе экспериментальные данные, выявившие минимальные значения кратковременных флуктуаций частоты рециркуляции при указанных параметрах.

При малых уровнях входного сигнала, соответствующих длине волоконного световода более 60 км, эквивалентная мощность шума NEP , определяющая разрешающую способность оптоэлектронного измерительного устройства, при использовании ЛФД будет иметь минимум в зависимости от температуры (рисунок 4). Данная закономерность связана с тем, что при возрастании температуры составляющая дробового шума, обусловленная фототоком, уменьшается и становится соразмерной с экспоненциально растущим темновым током, кроме того, существенный вклад начинают вносить линейно возрастающие тепловые шумы нагрузочного сопротивления.

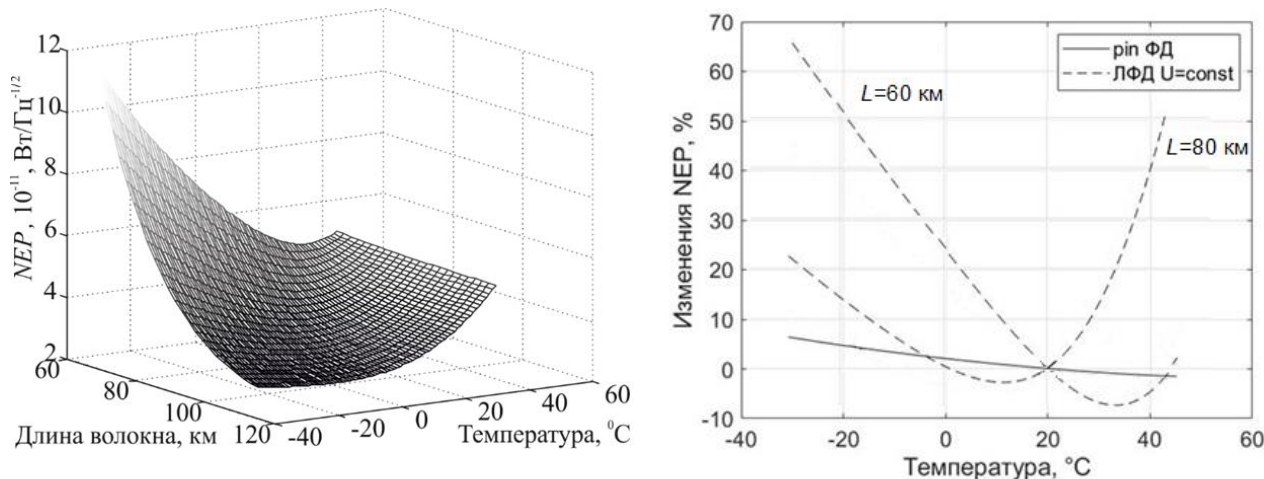


Рисунок 4 –Изменение NEP ЛФД и pin -ФД, возникающие вследствие изменения температуры, при различной длине ВС

Четвертая глава посвящена разработке физических принципов построения квазираспределенных волоконно-оптических рециркуляционных систем измерения температуры, электрического напряжения, концентрации кислорода, а также оценке их метрологических характеристик. Принцип действия разработанных оптоволоконных датчиков основан на регистрации

На основе разработанной математической модели, учитывающей химический состав волоконного световода, относительную долговременную нестабильность частоты рециркуляции, температурные зависимости коэффициента линейного расширения, показателя преломления, модуля Юнга волокна, показано, что разрешающая способность датчика увеличивается при возрастании измеряемой температуры (рисунок 6).

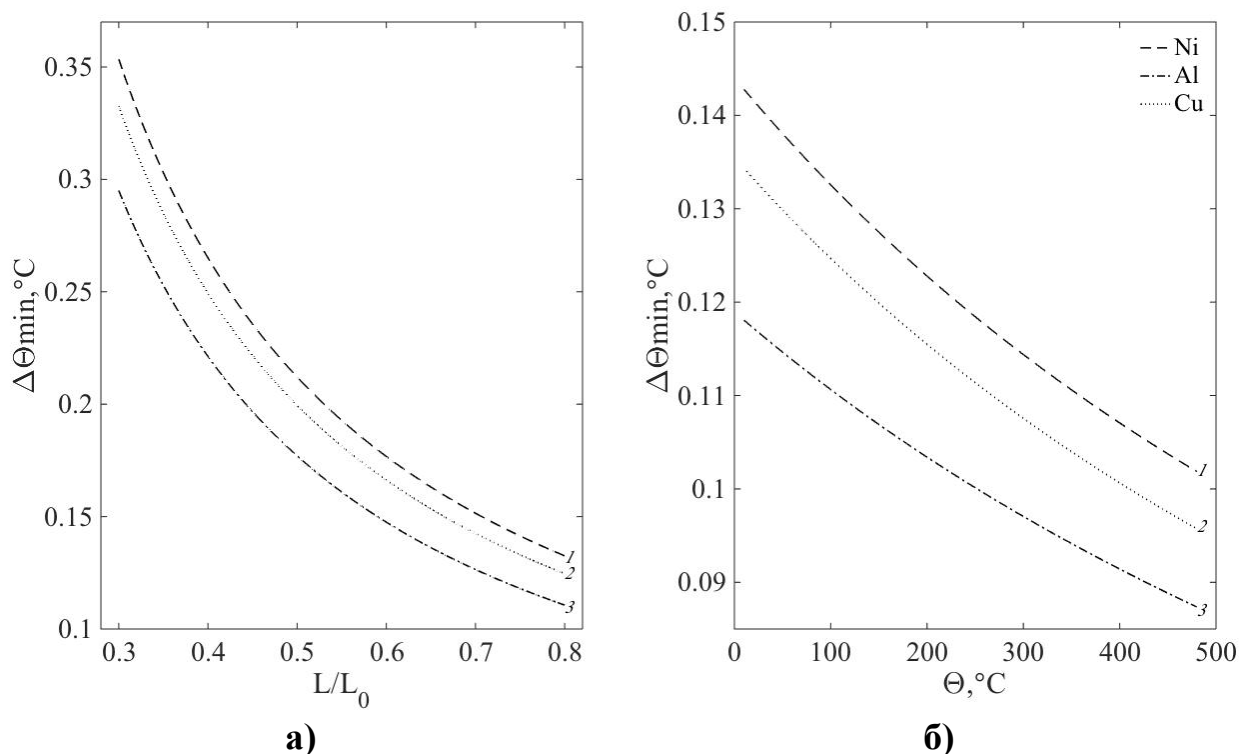


Рисунок 6 – Оценка разрешающей способности ВОДТ для волокна с сердцевиной, легированной оксидом германия и защитным покрытием из никеля (1), меди (2) и алюминия (3): а) относительно длины участка, подвергающегося температурному воздействию, б) в широком температурном диапазоне

Установлено, что подбором толщины металлического покрытия можно в 1,7 раза уменьшить погрешность измерений, однако в то же время наращивание толщины с целью увеличения разрешающей способности целесообразно до величин не более 1 мм, поскольку при дальнейшем наращивании толщины покрытия увеличение точности измерений становится значительно менее эффективным. Таким образом, погрешность метода измерений ВОДТ с алюминиевым покрытием при относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции $2 \cdot 10^{-6}$ составляла $\pm 0,08-0,12$ °C для всего диапазона измерений и по сравнению с ВОДТ на основе традиционных ВС с кремнийорганическими и пластмассовыми покрытиями увеличивается в 2,5–3 раза в зависимости от толщины металлического покрытия. Полученная погрешность метода измерений в 5–10 раз меньше погрешности измерения

температуры амплитудными ВОД на основе вынужденного комбинационного рассеяния и поглощения полупроводником, а также ВОД на основе волоконных решеток Брэгга.

Динамический диапазон измеряемых температур ограничивается не только максимальным растяжением волоконного световода, при котором происходит его разрушение, но и нестационарным характером воздействия температуры, приводящим к динамической усталости волокна. Выявлен механизм физико-химических процессов, возникающих в волоконном световоде при воздействии динамических напряжений. Оказалось, что на прочность и на срок службы оптоволокна в наибольшей степени влияют поверхностные дефекты, связанные с зарождением пор и образованием поверхностных микротрещин. Предложен способ теоретической оценки долговечности волоконных световодов, используемых в волоконно-оптических датчиках в качестве чувствительного элемента, в зависимости от напряжений, возникающих при динамических изменениях температуры, учитывающий конструктивные особенности волокна (диаметры сердцевины и оболочки, металлическое или полимерное покрытие), типы легирования, относительную влажность окружающей среды. Получены зависимости срока службы световодов при случайных динамических воздействиях измеряемой температуры и различной относительной влажности среды и установлено, что для срока службы ВОДТ 10–12 лет максимально измеряемая температура при нестационарных продольных деформациях составляет 315 °С и уменьшается на 37 % по сравнению с воздействием постоянной температуры.

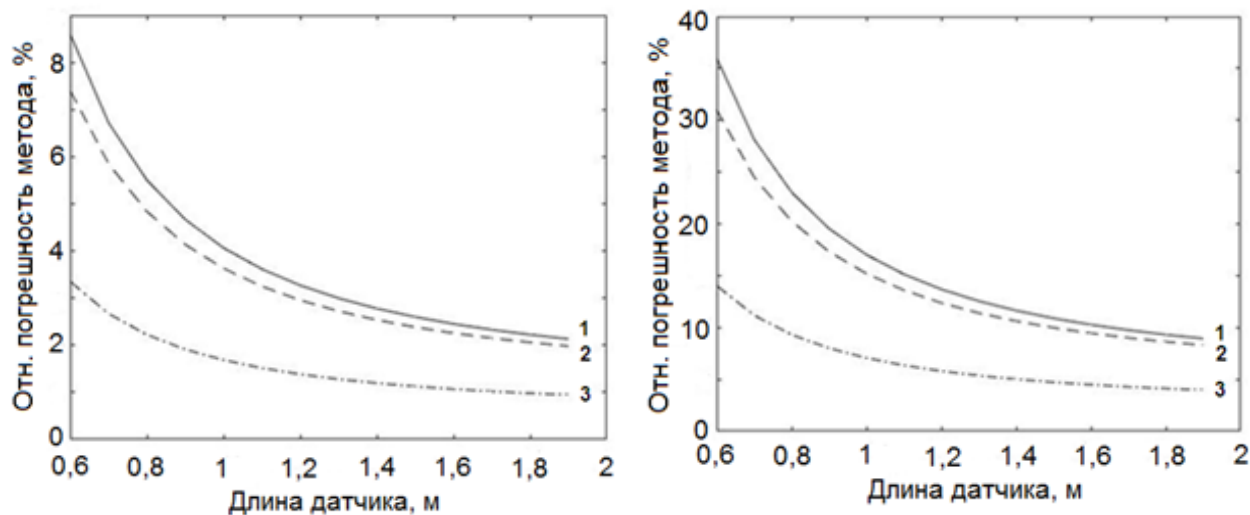
Для контроля высоковольтного напряжения разработана схема квазираспределенного рециркуляционного волоконно-оптический датчика электрического напряжения (ВОДН), чувствительными элементами в котором являлись пьезокерамические трубки (ПЗТ), на которые намотан волоконный световод и жестко на них зафиксирован. В данном устройстве использовали обратный поперечный пьезоэффект, при котором приложенное к трубке напряжение приводило к изменению ее размеров, что влекло за собой изменение длины волоконного световода, его показателя преломления и, следовательно, частоты рециркуляции. Спектрально-селективными элементами выступали волоконные решетки Брэгга с различными периодами, настроенными на отражение определенных длин волн.

Учитывая геометрические размеры пьезокерамической трубки, длину волоконного световода, относительную долговременную нестабильность частоты рециркуляции, с помощью моделирования показали, что зависимость изменения частоты рециркуляции от приложенного напряжения носит линейный характер, а выбором параметров чувствительного элемента можно увеличить

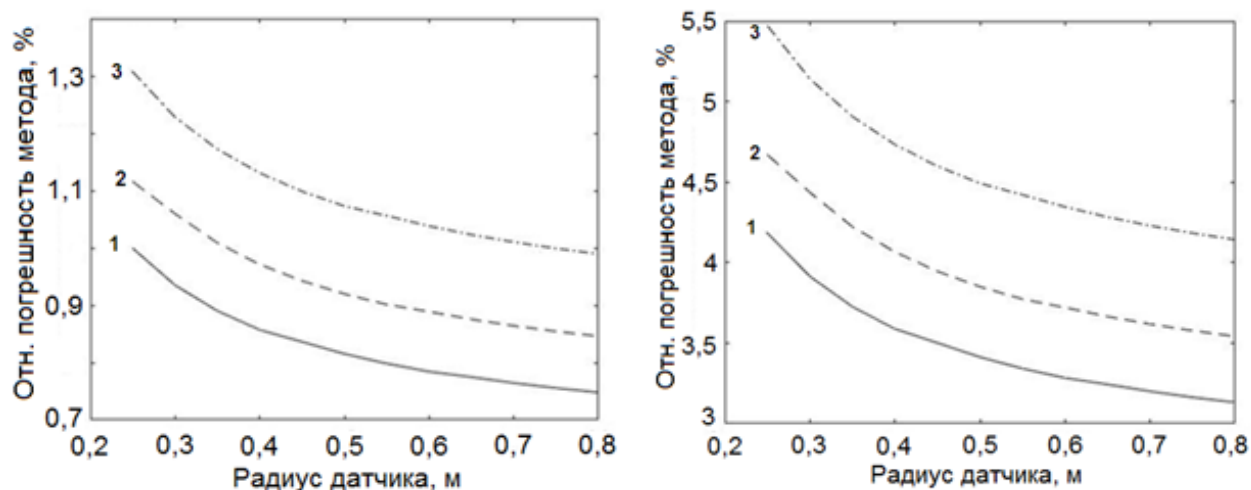
чувствительность метода в 2,2 раза. Для случая точечного датчика при контроле только одной электрической линии относительная погрешность метода измерения для такой системы с пьезокерамическими трубками радиусом 12 см из PZT-4 составила 0,8 %, а для PZT-5Н и ПКР-73 равнялась 0,3 % соответственно при измерении эффективного напряжения 20 кВ. Для сравнения, для точечных ВОДН на основе волоконных решеток Брэгга эта величина достигала 2,4 %. Для достижения максимальной разрешающей способности при мониторинге 5 электрических линий с различными напряжениями с помощью одного волоконного световода чувствительные элементы следует располагать в порядке возрастания действующих напряжений в измеряемых линиях. Выбором радиуса и толщины трубки, длины недеформированной волоконной секции получили относительную погрешность 0,3–0,45 % (для PZT-5Н и ПКР-73) и 0,8–1,2 % (для PZT-4) в диапазоне контролируемых напряжений 20–150 кВ.

В основу измерения концентрации газообразного кислорода волоконно-оптическим рециркуляционным датчиком кислорода (ВОДК) положили парамагнитные свойства кислорода. Конструкция чувствительного элемента представляет собой набор полипропиленовых измерительных трубок, внутри которых размещены магнитострикционные полосы с закрепленным волоконным световодом, а снаружи сформирована катушка соленоида для создания постоянного магнитного поля. При прокачивании через трубку газообразного кислорода величина магнитного поля внутри трубки изменялась, что приводило к изменению длины магнитострикционных полос и, следовательно, длины волоконного световода и, как следствие, частоты рециркуляции. Полученные с помощью численного моделирования зависимости относительной погрешности метода измерения устройства от длины L_T и радиуса R_T чувствительного элемента, а также от площади сечения магнитострикционной полосы S_m представлены на рисунке 7.

Выбором размеров чувствительного элемента достигается уменьшение относительной погрешности измерений концентраций до 0,75 % для кислорода при наличии примесей и до 3,2 % для воздуха. Для достижения данной точности интерференционным волоконным датчиком необходимо осуществлять регистрацию изменения тока на уровне 0,6 мкА, что является достаточно сложной технической задачей выделения таких малых сигналов на уровне шумов. Для сравнения, промышленные газоанализаторы кислорода фирм Rosemount (США), Kent-Taulor (Великобритания), ТДК-3М, ТГМ (Россия) имеют относительную погрешность от 2 % для смеси с высоким процентным содержанием кислорода до 5 % для воздуха.



а) б)
 радиус датчика: 1– $R_1=0,2$ м; 2– $R_1=0,3$ м; 3– $R_1=0,4$ м

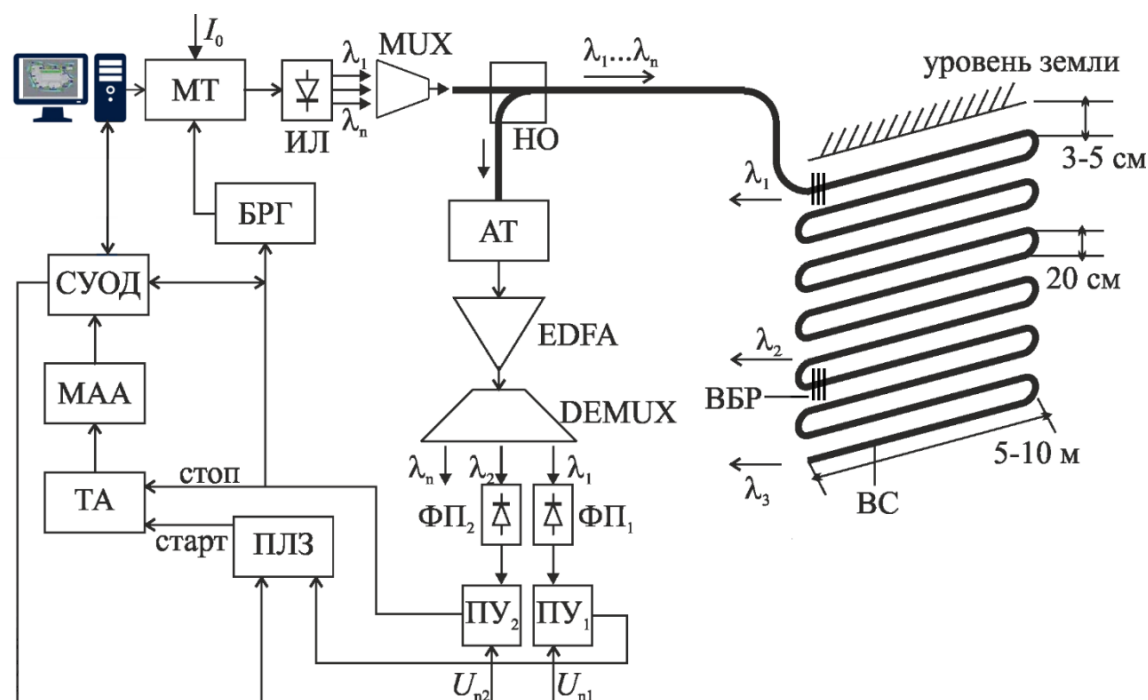


в) г)
 площадь сечения магнитострикционной полосы
 1– $S_m=24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; 2– $S_m=20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; 3– $S_m=16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$

Рисунок 7 –Зависимость относительной погрешности метода измерений от длины и радиуса датчика для а), в) –кислорода и б), г) –воздуха

Пятая глава посвящена исследованию влияния поперечных деформаций волоконного световода на период рециркуляции и разработке принципов построения подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа.

На основе разработанного рециркуляционного метода измерения с применением WDM-технологии спектрального разделения информационных каналов создана структура подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа, позволяющая не только установить сам факт нарушения периметра, но и локализовать место нарушения и отследить перемещение нарушителя по охраняемой территории (рисунок 8).



МТ – модулятор тока, ИЛ – набор полупроводниковых инжекционных лазеров, MUX – мультиплексор, НО – направленный ответвитель, АТ – аттенюатор, EDFA – эрбиевый волоконно-оптический усилитель, ВС – волоконный световод, ВБР – волоконные брэгговские решетки, DEMUX – демультиплексор, ФП – набор фотоприемников, ПУ – пороговое устройство, БРГ – блок регенерации, ПЛЗ – перестраиваемая линия задержки, ТА – время-амплитудный преобразователь, МАО – многоканальный амплитудный анализатор, СУОД – система управления и обработки данных

Рисунок 8 – Структура квазираспределенной системы охраны периметра на основе волоконно-оптического датчика рециркуляционного типа

Принцип действия системы основан на возникновении дополнительных потерь оптического излучения при деформации оптического волокна под воздействием нарушителя и связанное с этим изменение периода рециркуляции. Увеличение разрешающей способности системы получили за счет специальной конструкции чувствительного элемента, состоящей из деформирующего элемента в виде каркасной двуслойной экструдированной георешетки из полипропилена с размером трубки 8 мм и размером ячейки, равной шагу укладки оптоволокон (20 см), а также волоконного световода, уложенного на упругую основу в виде пенополиуретановых полос толщиной 1 см и шириной 1,5 см. Поскольку решетка укладывалась посередине между волоконными линиями, это обеспечило отсутствие «мертвых зон», нечувствительных к внешнему давлению. Конструкция накрывалась сверху стеклотканевым полотном и, при необходимости, маскировалась. По сравнению с обычно используемыми в качестве упругих элементов резиновыми матами применяемые полосы из

эластичного пенополиуретана обладали следующими преимуществами: способностью длительно сохранять упругие свойства, не разрушаться под воздействием внешних условий; небольшой гигроскопичностью вследствие запекания наружного слоя и плотного прилегания к основе; неподверженностью к разрушению под воздействием грызунов и бактерий. Кроме того, поскольку пенополиуретановые полосы повторяли геометрию укладки ВС, а не покрывали всю охраняемую территорию, как резиновые маты, это позволяло влаге не скапливаться около ВС, а стекать на перфорированное основание из стеклопластика и удаляться через дренажную систему, что обеспечивало устойчивую работу системы в различных погодных условиях.

Методика измерений основана на преобразовании изменений периода рециркуляции в изменение амплитуды электрического напряжения с помощью время-амплитудного преобразователя с последующей регистрацией смещения гистограмм распределения амплитуд по каналам многоканального амплитудного анализатора (МАО). При этом, используя технологию спектрального мультиплексирования, каждому охраняемому сектору соответствовали периоды рециркуляции оптических импульсов на разных длинах волн.

Экспериментальные зависимости кратковременных флуктуаций периода рециркуляции, определяемые по ширине на уровне полувысоты гистограмм распределения амплитуд по каналам многоканального амплитудного анализатора для различных режимов работы оптоэлектронного контура при пиковой мощности излучения полупроводникового инжекционного лазера $P_{\text{ил}}=3$ мВт, величине фронта импульса $\tau_{\text{ф}}=5$ нс, представлены на рисунке 9. Как следует из полученных результатов, для коэффициента лавинного умножения ЛФД $M=8-12$ и порога компаратора, соответствующего линейному участку фронта импульса, величина кратковременных флуктуаций являлась минимальной и не превышала 400 пс, что принималось нами в качестве разрешающей способности установки.

Для исследования метрологических характеристик измерительной системы получили экспериментальные зависимости величины поперечной деформации волоконного световода от значений твердости по Шору (А) упругой основы, количества точек деформаций, массы нарушителя и показали, что для идущего нарушителя различной массы величина деформации носит нелинейный характер, хотя и остается в области упругих деформаций, а для ползущего нарушителя деформация подчинялась линейному закону Гука.

Разработана математическая модель изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами в зависимости от величины поперечных деформаций волоконного световода с прямоугольным профилем показателя преломления, которая учитывает возникновение дополнительных потерь

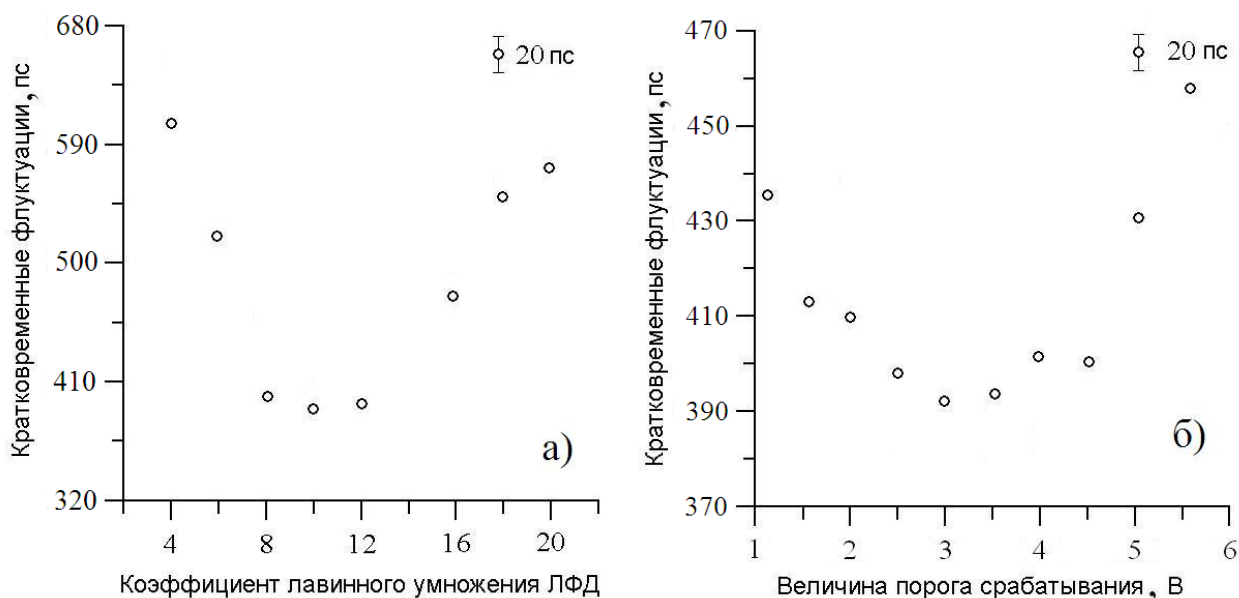


Рисунок 9 – Зависимость кратковременных флуктуаций измеряемых временных интервалов в зависимости от коэффициента лавинного умножения ЛФД (а) и величины порога срабатывания порогового устройства (б)

в зависимости от радиуса изгиба, величины деформации, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку и параметров самого кварцевого волокна, с помощью которой получены теоретические зависимости времени задержки оптических сигналов от твердости упругой основы, воздействующей массы, количества точек деформации, пиковой мощности излучения и длительности фронта циркулирующих импульсов. Установлено, что при пиковой мощности лазера 3 мВт и значении фронта импульса на входе порогового устройства 5 нс, твердости пенополиуретанового упругого элемента по Шору 50 для идущего нарушителя массой 60 кг величина временной задержки составляла 840 пс и для ползущего нарушителя массой 85 кг данная величина равнялась 610 пс, что превышало разрешающую способность установки, а следовательно, позволяло достоверно фиксировать факт нарушения периметра.

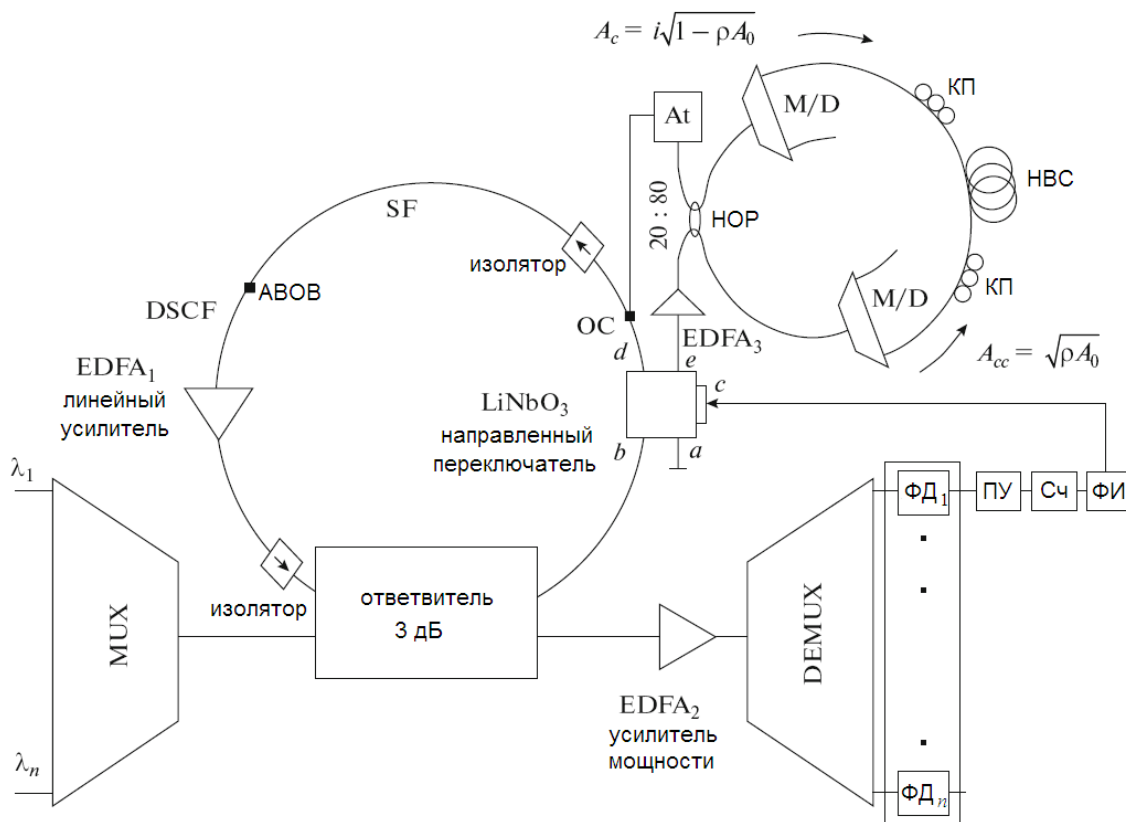
Для проверки полученных результатов провели исследования смещения гистограммы распределения амплитуд с использованием разработанного экспериментального стенда при использовавшихся в расчетах параметрах и разрешающей способности 20 пс. Результирующее изменение временных интервалов оказалось равной 1020 пс и на 22 % превышало расчетные значения, что с точки зрения регистрации нарушения является положительным фактом, поскольку чувствительность системы увеличилась с 14 пс/кг до 17 пс/кг. По-видимому, это связано с тем, что кроме основных точек деформации волокна возникали еще деформации в других близлежащих точках пересечения ВС и георешетки, которые вызывали дополнительные потери оптической мощности и

не учитывались в теоретических расчетах. В этом случае разрешающая способность измерительной системы по массе составляла 23 кг, что в 1,5 раза превосходит разрешающую способность радиочастотной подземный охранной системы, равную 35 кг. Полученные теоретические и экспериментальные данные подтверждают эффективность применения разработанной измерительной системы и методики регистрации фактов нарушения охраняемой территории как для идущего, так и для ползущего нарушителя.

В **шестой главе** развита теория многопараметрического анализа процесса динамического хранения информации в волоконно-оптических запоминающих устройствах с оптической регенерацией, направленного на улучшение информационных характеристик быстродействующей буферной памяти, использующей спектральное уплотнение информационных каналов.

Разработана архитектура волоконно-оптического динамического запоминающего устройства (ВОДЗУ) оптической информации RZ-формата с периодической 2R-регенерацией (по амплитуде и длительности) информационных импульсов в оптическом диапазоне с помощью нелинейного оптического кольцевого зеркала (НОКЗ) (рисунок 10). Преимуществом данной структуры является возможность записи, хранения и оптической регенерации информационных потоков, поступающих с гигабитными скоростями. Комбинация стандартного одномодового волокна и волокна с отрицательной дисперсией и отрицательным наклоном дисперсионной кривой позволила уменьшить усредненную хроматическую дисперсию вдоль всей оптоволоконной петли более, чем на два порядка, уменьшить наклон дисперсионной кривой почти на полтора порядка, а также минимизировать возникновение таких нелинейных эффектов, как четырехволновое смешение и перекрестная фазовая модуляция. Использование волоконно-оптического эрбиевого усилителя мощности EDFA₂ обеспечило отсутствие электронных усилителей на выходе каждого фотоприемника. Проведены исследования информационных параметров такого ВОДЗУ для скоростей информационного потока 2,5 Гбит/с и 10 Гбит/с при амплитудном кодировании в формате с возвращением к нулю (RZ-формат), числа информационных каналов $k_k=8-32$ со спектральным шагом 0,8 нм в диапазоне длин волн 1530–1565 нм, пиковой мощности оптических импульсов на входе ВОДЗУ 2–10 мВт.

Анализ нелинейных эффектов в волоконном световоде, возникающих при использовании технологии плотного спектрального мультиплексирования информационных каналов, показал, что при рассматриваемых параметрах ВОДЗУ основным нелинейным эффектом являлась фазовая самомодуляция, связанная с зависимостью показателя преломления волокна от оптической мощности. Установлено, что при совместном влиянии фазовой самомодуляции,



EDFA₁, EDFA₂ и EDFA₃ – усилители на основе легированных эрбием волокон, SF – ступенчатое одномодовое волокно, DSCF – волокно с отрицательной компенсирующей дисперсией, ФД₁...ФД_n – фотодиоды, Сч – счетчик, HOP – несимметричный оптический разветвитель, M/D – мультиплексор/демультиплексор, КП – контроллер поляризации, НВС – нелинейный волоконный световод, ПУ – пороговое устройство, ФИ – формирователь импульсов, At – аттенюатор, ОС – оптический соединитель
Рисунок 10 – Структурная схема волоконно-оптической динамической памяти с периодической 2R-регенерацией информации в оптическом диапазоне и спектральным уплотнением информационных каналов

хроматической и поляризационной модовой дисперсии в процессе рециркуляции в окрестности длины волны $\lambda=1550$ нм, длительность циркулирующих информационных импульсов сначала уменьшается, а затем увеличивается (рисунок 11). Данный эффект усиливается с возрастанием числа информационных каналов (т.е. с увеличением вводимой мощности) и оказывает существенное влияние на информационные параметры оптоволоконной памяти. Из полученных результатов следует, что нет необходимости проводить восстановление длительности оптических информационных импульсов на каждом цикле рециркуляции.

Проведенный на основе разработанной математической модели отношения сигнал/шум в замкнутом оптоэлектронном контуре

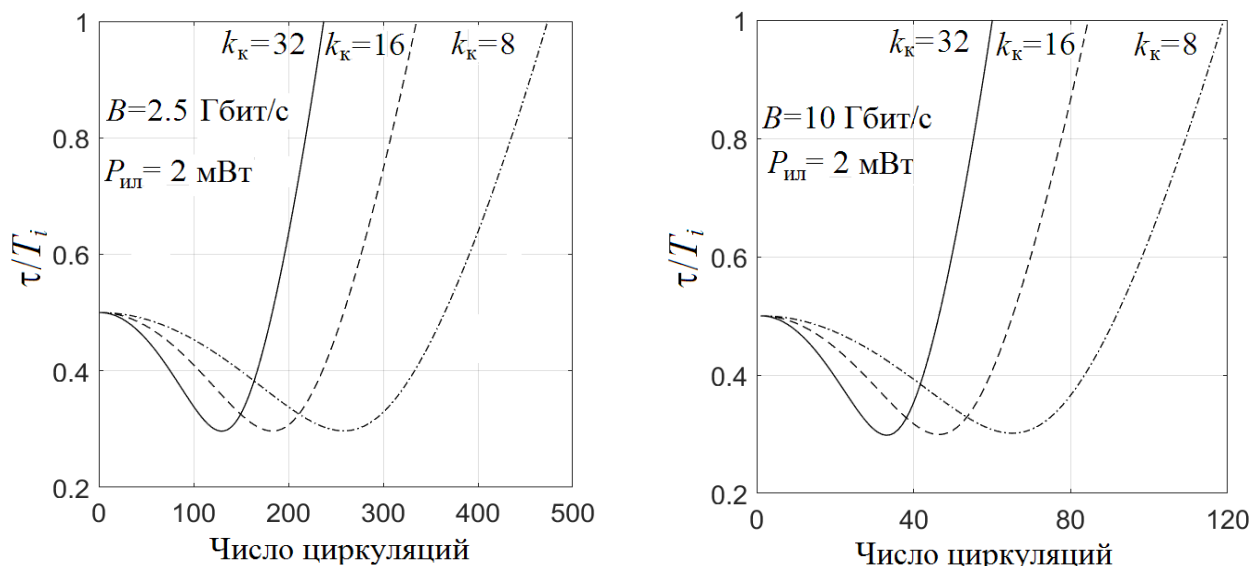
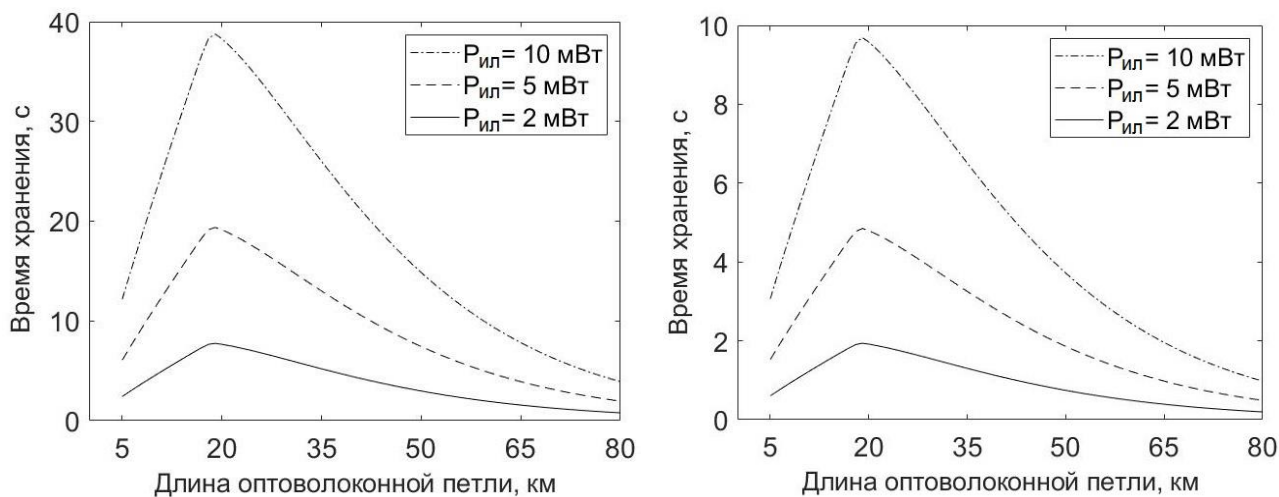


Рисунок 11 – Изменение длительности информационных импульсов от числа циркуляций при различном количестве информационных каналов и скорости информационного потока

многопараметрический анализ процесса рециркуляции информационного потока показал, что совместное влияние амплитудных флуктуаций в элементах ВОДЗУ, явления временного джиттера, фазовой самомодуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсии в волоконном световоде приводит к появлению максимума времени хранения в зависимости от длины оптоволоконной петли (рисунок 12) при заданной вероятности ошибки $BER \leq 10^{-9}$. Это позволило выбрать длину волоконного световода с компенсацией дисперсии в ВОДЗУ, обеспечившую максимальное время хранения при заданной вероятности ошибки. Показано, что значение этой длины не зависит от скорости поступающей информации, мощности излучения лазера и коэффициента усиления волоконного эрбиевого усилителя мощности $EDFA_2$. Установлено, что для повышения времени хранения эффективно увеличивать мощность излучения лазеров на входе в ВОДЗУ до значений не более 10–12 мВт на один канал. Получено, что время хранения возрастает при увеличении коэффициента усиления волоконно-оптического эрбиевого усилителя мощности $EDFA_2$ до величины 16 дБ, а далее изменяется незначительно.

Для минимизации влияния временного джиттера в структуре ВОДЗУ необходимо использовать так называемую оптическую 3R-регенерацию, обеспечивающую периодическое восстановление циркулирующих импульсов не только по амплитуде и длительности, но и по временному положению. Результаты моделирования показали, что максимальное время хранения наблюдается при длине ВС $L=83$ км. Возникновение максимума объясняется тем, что при увеличении длины ВС коэффициент усиления $EDFA_1$, становится максимальным и полностью не компенсирует растущие оптические потери при



а) $V=2,5$ Гбит/с

б) $V=10$ Гбит/с

Рисунок 12 – Зависимость времени хранения информации от длины волоконно-оптической петли рециркуляции при различной мощности излучения полупроводникового источника излучения

увеличении длины оптоволоконной петли, в результате уменьшается отношение сигнал/шум, а следовательно, и время хранения. Переход от оптической 1R-регенерации (восстановление по амплитуде) к 2R-регенерации (восстановление по амплитуде и длительности) увеличил время хранения информации при вероятности ошибки 10^{-9} более, чем на два порядка с 34 мс до 9,5 с, а использование 3R-регенерации (восстановление по амплитуде, длительности и временному положению) позволило увеличить время хранения еще на порядок до 70,6 с, при этом информационная емкость достигает 15,4 Мбайт при скорости информационного потока 10 Гбит/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден новый метод измерений физических величин волоконно-оптическими датчиками (ВОД), основанный на регистрации частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов на разных длинах волн с их восстановлением по амплитуде, форме и длительности на каждом цикле рециркуляции в замкнутой оптоволоконной системе, при котором оптическое волокно является одновременно и чувствительным элементом и каналом передачи информации. Поскольку в разработанных системах исключены такие источники флуктуаций, как затягивающее действие центральной частоты резонансного усилителя на частоту колебаний волоконно-оптического генератора и субгармонические бифуркации, установлено, что экспериментально полученные значения относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции (ОДН) более, чем на

порядок меньше по сравнению с ОДН для рециркуляционных ВОД на основе автоколебаний при схожих параметрах [1, 5, 11, 13, 14, 27, 33, 36, 37, 39, 61, 63].

2. Разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь метрологических параметров волоконно-оптических систем с температурными зависимостями спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения. Получено, что без учета температурных зависимостей систематическая погрешность измерений оптоволоконными гидрофонами может достигать 107 % для $\lambda=1,3$ мкм и 80 % для $\lambda=1,55$ мкм в диапазоне температур от -30 °С до $+50$ °С относительно калибровочных данных при комнатной температуре, что требует введения специального коэффициента коррекции. Показано, что амплитудные флуктуации полупроводниковых лазеров вносят соразмерный вклад в отношение сигнал/шум по сравнению с другими шумовыми компонентами до длин одномодовых ВС 30–35 км. Установлены закономерности влияния изменения температуры на шумовые характеристики оптоволоконных систем, приводящие к появлению минимума эквивалентной мощности шума в зависимости от температуры при использовании лавинных фотодиодов. Данная закономерность связана с тем, что при малых уровнях мощности излучения, связанных с увеличением длины ВС, при возрастании температуры составляющая дробового шума, обусловленная фототоком, уменьшается и становится соразмерной с экспоненциально растущим темновым током, кроме того, существенный вклад начинают вносить линейно возрастающие тепловые шумы нагрузочного сопротивления. Для германиевых ЛФД минимум эквивалентной мощности шума начинает проявляться, начиная от температуры $+32$ °С, и смещается в сторону уменьшения температуры при увеличении длины одномодового волоконного световода более 60 км [1, 4, 6, 9, 10, 12, 28, 32, 43, 68].

3. Разработаны принципы построения квазираспределенных волоконно-оптических измерительных систем рециркуляционного типа с использованием технологии спектрального мультиплексирования, основанные на зависимости частоты рециркуляции оптических импульсов на разных длинах волн от изменений размеров и группового показателя преломления волоконного световода под воздействием температуры, обратного поперечного пьезоэффекта, магнитострикции, позволяющие измерять температуры до 500 °С с погрешностью метода измерений $\pm 0,1$ °С, контролировать высоковольтное электрическое напряжение в диапазоне 20–150 кВ с относительной погрешностью 0,3–0,45 %, определять концентрацию газообразного кислорода при наличии примесей с относительной погрешностью 0,75 % и 3,2 % в воздушной смеси. Полученные результаты по точности в 5–10 раз превосходят

параметры амплитудных волоконных датчиков температуры на основе вынужденного комбинационного рассеяния и поглощения света полупроводником в диапазоне температур до 300 °С и в 2–3 раза точность волоконных датчиков электрического напряжения на основе волоконных решеток Брэгга [1, 3, 8, 13–16, 20, 22, 24, 26, 30, 34, 40, 41, 42, 53, 54–57, 59, 66, 67].

4. На основе модели формирования поверхностных микротрещин, связанной с механизмом зарождения пор, установлены зависимости разрушения кварцевых волокон, используемых в волоконно-оптических датчиках в качестве чувствительного элемента, от продольных механических напряжений, возникающих при динамических изменениях температуры, учитывающие конструктивные особенности волокна, типы легирования, относительную влажность окружающей среды. Показано, что по сравнению со стационарными продольными напряжениями максимальная измеряемая температура уменьшается на 37 % с 500 °С до 315 °С при сроке службы световодов с металлическим покрытием не менее 10–12 лет [2, 23, 48, 50].

5. Создана структура подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа с использованием технологии спектрального мультиплексирования, а также конструкция чувствительного элемента, позволяющая минимизировать вероятность ложной тревоги и пропуска сигнала, обеспечить отсутствие «мертвых зон», устойчивость к воздействию окружающей среды. Получены зависимости изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами от величины поперечных деформаций волоконного световода с прямоугольным профилем показателя преломления, учитывающие возникновение дополнительных потерь в зависимости от радиуса изгиба, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку и параметров самого кварцевого волокна. Экспериментально установлены режимы работы активных элементов оптоволоконного контура, обеспечивающие минимальные кратковременные флуктуации периода рециркуляции, не превышающие 400 пс, что характеризует разрешающую способность установки. Найдено, что экспериментально полученная чувствительность измерителя возрастает на 22 % по сравнению с теоретическими расчетами, при этом разрешающая способность увеличивается в 1,5 раза по сравнению с радиочастотными подземными охранными системами [1, 21, 29, 45, 51, 52, 58, 60, 62, 64, 65, 69].

6. Совместное влияние амплитудных флуктуаций в элементах волоконно-оптического динамического запоминающего устройства с оптической регенерацией, временного джиттера, фазовой самомодуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсии в волоконном световоде приводит к

появлению максимума времени хранения при вероятности ошибок $BER \leq 10^{-9}$ в зависимости от длины оптоволоконной петли. Установлено, что длина волокна, соответствующая максимальному времени хранения, не зависит от скорости информационного потока и мощности излучения лазера. Разработана структура волоконно-оптического динамического запоминающего устройства (ВОДЗУ) рециркуляционного типа и спектральным уплотнением информационных каналов с периодической 2R-регенерацией информационного потока (восстановлением оптических импульсов по амплитуде и длительности) в оптическом диапазоне с помощью нелинейного волоконного кольцевого зеркала. Показано, что в процессе рециркуляции совместное влияние фазовой самомодуляции, связанной с зависимостью показателя преломления волокна от оптической мощности, хроматической и поляризационной модовой дисперсии, приводит к первоначальному уменьшению, а затем увеличению длительности циркулирующих информационных импульсов, что не требует оптической регенерации информационного потока на каждом цикле рециркуляции. Найдено, что в разработанном ВОДЗУ для скорости информационного потока 10 Гбит/с при использовании 2R-оптической регенерации за счет уменьшения хроматической и поляризационной модовой дисперсии и межсимвольных помех время хранения увеличилось на два порядка по сравнению с 1R-регенерацией и достигло 9,5 с, а применение 3R-регенерации при уменьшении влияния временного джиттера обеспечило возрастание времени хранения еще почти на порядок до 70,6 с, при этом информационная емкость составляет 15,4 Мбайт [2, 7, 17–19, 25, 35, 38, 44, 46, 47, 49, 70].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные научные результаты являются основой для создания целого ряда новых оптоволоконных информационно-измерительных систем рециркуляционного типа. Для мониторинга динамики изменения средней температуры по объему изотермических цистерн из нержавеющей стали на РУНПП «Гродненский механический завод», г. Гродно был внедрен интегрирующий кольцевой волоконно-оптический рециркуляционный измеритель температуры [71] (акт об использовании НИР от 10.11.2000г.). Модификация данного устройства была внедрена на ОАО «Белтеплоизоляция», г. Минск для мониторинга качества термоизоляции магистральной подземной теплотрассы (акт о практическом использовании результатов исследований от 06.09.2018г.). Волоконный измеритель температуры рециркуляционного типа был также использован в НИИПФП им.А.Н. Севченко БГУ, г. Минск в качестве индикатора температуры в автоматизированном комплексе по производству уплотнительного контура из пенополиуретана (акт о практическом использовании результатов исследования от 04.03.2011г.).

Квазираспределенный линейный волоконно-оптический рециркуляционный измеритель температуры [74] предназначен для мониторинга технологического процесса добычи тяжелой высоковязкой нефти с использованием перегретого пара. Методика экспресс-анализа дисперсионных характеристик многомодовых волоконных световодов рециркуляционным способом применялась в ЗАО «Институт информационных технологий», г. Минск (акт об использовании НИР от 18.01.2001г.). Методика определения и классификации микроизгибных воздействий на оптоволокно на основе метода время-амплитудного преобразования (акт о практическом использовании результатов исследований от 16.12.2016г.) и макет квазираспределенной волоконно-оптической системы регистрации внешних воздействий с применением WDM-технологии использовались компанией «ГамбитФорт», г. Минск при разработке многомодульного автоматизированного комплекса охраны периметра «ЗУБР-Интеллект» (акт о практическом использовании результатов исследований от 28.05.2019г.). Подземная волоконная система охраны периметра [77] предназначена для контроля подходов к запретным зонам и территориям, включая режимные и стратегические объекты, такие, как склады, полигоны, территория БелАЭС, участки государственной границы и т.п. Разработанный квазираспределенный оптоволоконный датчик электрического напряжения [78] может быть использован для контроля высоковольтного напряжения в линиях электропередач и распределительных подстанциях, а волоконный датчик концентрации газообразного кислорода может найти применение при производстве медицинского кислорода, в отраслях промышленности, где в технологических процессах используется кислород и смеси на его основе, а также при мониторинге окружающей среды. Волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство рециркуляционного типа [75; 76] предназначено для использования в качестве быстродействующей буферной памяти в высокоскоростных волоконных линиях связи, специализированных оптических процессорах, при лазерной космической связи, лазерно-локационном зондировании.

Разработки «Экспериментальный стенд для исследования процесса динамического хранения информации в оптоэлектронных системах» (акт БГУ об использовании НИР в учебном процессе от 21.09.2000г.), «Частотный волоконно-оптический измеритель рециркуляционного типа» (акт БГУ об использовании НИР в учебном процессе от 22.11.2005г.), «Оптическое динамическое запоминающее устройство» (акт БГУ о практическом использовании результатов исследований в учебном процессе от 24.05.2013г.) внедрены в учебный процесс для студентов кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета.

Список публикаций соискателя ученой степени

Монографии

1. Поляков, А.В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А.В. Поляков. – Минск: БГУ, 2014. – 208 с.

2. Поляков, А.В. Волоконно-оптические информационно-измерительные WDM-системы / А.В. Поляков. – Riga, Latvia: LAMBERT Academic Publishing RU, 2018. – 319 с.

Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях

3. Поляков, А.В. Рециркуляционный волоконно-оптический датчик температуры / А.В. Поляков // Измерительная техника. – 2002. – № 4. – С. 40–43.

(Polyakov, A.V. A recirculation fiber-optical temperature sensor / A.V. Polyakov // Measurement Techniques. – 2002. – Vol. 45, № 4. – P. 400–405.)

4. Поляков, А.В. Влияние температурных и динамических эффектов в полупроводниковом лазере на рециркуляционное хранение информации / А.В. Поляков // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 7. – С. 28–32.

(Polyakov, A.V. Influence of temperature and dynamic effects in the semiconductor laser on the recirculation storage of the information / A.V. Polyakov // J. Optical Technology. – 2002. – Vol. 69, № 7. – P. 468–471.)

5. Поляков, А.В. Стабильность частоты рециркуляции в кольцевых структурах с волоконно-оптической линией задержки / А.В. Поляков, С.И Чубаров // Известия вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46, № 5. – С. 49–55.

6. Поляков, А.В. Систематическая погрешность измерения оптических потерь в волоконных линиях связи при изменяющихся температурных условиях / А.В. Поляков // Датчики и системы. – 2003. – № 11. – С. 20–23.

7. Поляков, А.В. Уменьшение потерь ввода лазерного излучения в одномодовые волоконные световоды / А.В. Поляков // Измерительная техника. – 2003. – № 11. – С. 25–28.

(Polyakov, A.V. Decreasing input losses of laser radiation in single-mode fiber light guides / A.V. Polyakov // Measurement Techniques. – 2003. – Vol. 46, № 11. – P. 1046–1051.)

8. Поляков, А.В. Чувствительность рециркуляционных волоконно-оптических датчиков температуры / А.В. Поляков // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 9. – С. 84–87.

(Polyakov, A.V. Sensitivity of recirculation fiber-optic temperature sensors / A.V. Polyakov // J. Optical Technology. – 2004. – Vol. 71, № 9. – P. 635–637.)

9. Поляков, А.В. Повышение быстродействия волоконно-оптических систем передачи и обработки информации / А.В. Поляков, С.И. Чубаров // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2005. – № 6. – С. 36–43.
10. Поляков, А.В. Температурная зависимость шумовых характеристик оптоволоконных информационно-измерительных систем / А.В. Поляков // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 8. – С. 33–38.
11. Поляков, А.В. Волоконно-оптические датчики: современное состояние и перспективы развития / А.В. Поляков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 6. – С. 42–46.
12. Поляков, А.В. Температурная погрешность оптоволоконных измерительных систем / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонтов // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 4. – С. 138–142.
(Polyakov, A.V. Temperature error of fiber-optic measuring systems / A.V. Polyakov, M.A. Ksenofontov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2007. – Vol. 80, № 4. – P. 781–785.)
13. Поляков, А.В. Частотная волоконно-оптическая измерительная система / А.В. Поляков // Датчики и системы. – 2008. – № 1. – С. 29–32.
14. Ксенофонтов, М.А. Волоконно-оптический датчик рециркуляционного типа / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 3. – С. 32–35.
15. Polyakov, A.V. Quasi-distributed recirculation fiber-optic temperature sensor / A.V. Polyakov, M.A. Ksenofontov // Optical Memory and Neural Networks. – 2009. – Vol. 18, № 4. – P. 271–277.
16. Поляков, А.В. Измерение концентрации кислорода волоконно-оптическим рециркуляционным датчиком / А.В. Поляков // Датчики и системы. – 2010. – № 11 (138). – С. 25–29.
17. Ксенофонтов, М.А. Повышение эффективности ввода лазерного излучения в световоды волоконно-оптических информационно-измерительных систем / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 8. – С. 22–26.
18. Поляков, А.В. Нелинейные эффекты в оптоволоконных рециркуляционных запоминающих устройствах со спектральным уплотнением информационных каналов / А.В. Поляков, А.В. Жуковский // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 2 (11). – С. 41–49.
19. Жуковский, А.В. Моделирование процесса рециркуляционного хранения информации в оптоволоконной динамической буферной памяти / А.В. Жуковский, А.В. Поляков // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 2. – С. 31–36.

20. Поляков А.В. Волоконно-оптическая система скважинной термометрии рециркуляционного типа / А.В. Поляков // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 9. – С. 84–90.

21. Сахончик, Д.Г. Влияние деформаций волоконного световода на период рециркуляции в оптоэлектронных системах охраны периметра / Д.Г. Сахончик, А.В. Поляков // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2019. – № 2. – С. 112–124.

22. Поляков, А.В. Рециркуляционный метод измерения температуры волоконно-оптическим датчиком / А.В. Поляков // Проблемы физики, математики и техники. – 2019. – № 2 (39). – С. 36–44.

23. Поляков, А.В. Влияние динамических напряжений на долговечность кварцевых волоконных световодов в оптоэлектронных измерительных устройствах / А.В. Поляков // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 9. – С. 28–36.

24. Поляков, А.В. Мониторинг высоковольтного напряжения с помощью оптоволоконной рециркуляционной измерительной системы / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонов // Измерительная техника. – 2020. – № 2. – С. 38–44.

(Polyakov, A.V. High-voltage monitoring with a fiber-optic recirculation measuring system / A.V. Polyakov, M.A. Ksenofontov // Measurement Techniques. – 2020. – Vol. 63, № 2. – P. 117–124.)

25. Polyakov, A.V. Simulation of fiber-optic buffer loop memory with all-optical 2R regeneration / A.V. Polyakov // Optical Memory and Neural Networks. – 2020. – Vol. 29, № 2. – P. 100–109.

26. Поляков, А.В. Квазираспределенная рециркуляционная оптоволоконная система измерения концентрации газообразного кислорода / А.В. Поляков // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 5. – С. 34–41.

Статьи в других научных изданиях

27. Поляков, А.В. Увеличение скорости передачи данных в протяженных волоконно-оптических информационных системах / А.В. Поляков // Информатика. – 2006. – № 3. – С. 122–127.

28. Polyakov, A.V. Temperature dependent spectral systematic error in optical measuring systems [Electronic resource] / A.V. Polyakov // Physics Journal. – 2015. – Vol. 1, № 3. – P. 194–199. – Mode of access: <http://www.aiscience.org/journal/pj>. – Date of access: 17.01.2023.

29. Поляков, А.В. Нейрокомпьютерные и волоконно-оптические технологии, применяемые для охраны периметра / А.В. Поляков, Е.Г. Альгина // Военно-промышленный комплекс. Беларусь. – 2016. – № 1 (19). – С. 60–66.

30. Поляков, А.В. Квазираспределенная волоконно-оптическая система измерения температуры рециркуляционного типа на основе технологии

спектрального мультиплексирования / А.В. Поляков, Т.Д. Прокопенкова // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 131–141.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

31. Поляков, А.В. Повышение эффективности соединения рефлектометров с исследуемыми одномодовыми оптическими волокнами / А.В. Поляков // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: сб. материалов XIV науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов, Судак, 24-31 мая 2002 г./ Министерство образования РФ, Российская метрологическая академия, МГИЭМ; редкол.: В.Н. Азаров [и др.]. – Москва, 2002.– С. 172–173.

32. Poliakov, A.V. Increase of signal-to-noise ratio in fiber-optic systems with avalanche photodiode / A.V. Poliakov // Proc. of 1-st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2003), Alushta, Ukraine, 16-20 September 2003 / National University of Radio Electronics. – Alushta, 2003. – Vol. 2. – P. 129–131.

33. Поляков, А.В. Исследование метрологических параметров волоконно-оптических датчиков рециркуляционного типа / А.В. Поляков // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: материалы XVI науч.-техн. конф. с участием зарубеж. специалистов, Судак, 24-31 мая 2004 г./ Министерство образования РФ, Российская метрологическая академия, МГИЭМ; под ред. проф. В.Н. Азарова. – М., 2004. – С. 325–327.

34. Poliakov, A.V. Frequency fiber-optic sensor for electrical measurements / A.V. Poliakov // Proc. of 2-nd Intern. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2005), Yalta, Ukraine, September 12–17, 2005 / V.N. Karazin Kharkiv National University; ed. : I.A. Sukhoivanov. – Yalta, 2005. – Vol. 2.– P. 286–289.

35. Poliakov, A.V. Optoelectronic recirculation system for dynamic storage and processing of the information / A.V. Poliakov, M.A. Ksenofontov // Electronics and applied physics: proc. of I International conf., Kyiv, Ukraine, November 24-27, 2005 / Taras Shevchenko National University of Kyiv; ed. : O.Y. Nechyporuk. – Kyiv, 2005. – P. 14–15.

36. Поляков, А.В. Многофункциональная оптоволоконная информационно-измерительная система рециркуляционного типа / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонов // Фундаментальные проблемы оптики-2006: сб. трудов V Межд. конф., С.-Петербург, 16-20 октября 2006г. / под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2006. – С. 259–261.

37. Poliakov, A.V. Monitoring of physical parameters by fiber-optic recirculation sensor / A.V. Poliakov // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 7009 : 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Yalta, Crimea South Coast, Ukraine, 12-17 Sept. 2008 / ed. : Y.S. Shmaliy. – P. 70091A-1–8.

38. Поляков, А.В. Волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство / А.В. Поляков // Сб. тр. Междунар. оптич. Конгресса «Оптика – XXI век» (Т. 1. «Фундаментальные проблемы оптики – 2008»; Т. 2. «Всероссийский семинар по терагерцовой оптике и спектроскопии»), С.-Петербург, 20–24 октября 2008 г. / СПбГУ ИТМО; под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2008. – С. 130–133.

39. Poliakov, A.V. Frequency fiber-optical sensor system with wavelength division multiplexing / A.V. Poliakov // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7356 : Optical Sensors 2009, Prague, Czech Republic, 20-23 Apr. 2009. – P. 73561X-1–73561X-9.

40. Ксенофонтов, М.А. Устройство измерения концентрации кислорода на основе кольцевого волоконного эрбиевого лазера / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии - 2009: труды XVII Межд. конф., Новороссийск, 8–12 сентября 2009 г. / Академия инженерных наук России, Кубанский гос. технологич. у-т, Новороссийский политехнич. и-т; под ред. В.Е. Привалова. – Новороссийск, 2009. – С. 31–33.

41. Поляков, А.В. Волоконно-оптический датчик температуры на основе WDM-технологий / А.В. Поляков // Фотон-Экспресс. – 2009. - № 6, специальный выпуск «Фотон-Экспресс - Наука 2009» : Всероссийская конференция по волоконной оптике, г. Пермь, 8-9 октября 2009 г. – С. 79-80.

42. Polyakov, A.V. Optoelectronic recirculating system for high-voltage measurements / A.V. Polyakov // Electronics and applied physics: proc. of the V Internat. Conf., Kyiv, Ukraine, October 21–24, 2009 / Taras Shevchenko National University of Kyiv ; ed. : O.Y. Nechyporuk. – Kyiv, 2009. – P. 25–26.

43. Polyakov, A.V. Influence of semiconductor photoreceiver spectral responsivity at different temperature on optical measurements / A.V. Polyakov, M.A. Ksenofontov // Proc. of the 5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2010), Sevastopol, Ukraine, 10–14 September 2010 / V.N. Karazin Kharkiv National University; ed. : I.A. Sukhoivanov, O.V. Shulika. – Sevastopol, 2010. – P. 199–201.

44. Ксенофонтов, М.А. Оптоволоконная динамическая буферная память со спектральным уплотнением каналов / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // VI Международный оптический конгресс «Оптика – XXI век» : сб. тр. конф. «Фундаментальные проблемы оптики-2010»; сб. тр. семинаров «Всероссийский семинар по терагерцовой оптике и спектроскопии», «Всероссийский семинар по оптическим материалам, фотонным кристаллам и наноструктурам», С.-Петербург, 18–22 октября 2010 г. / Мин. обр. и науки РФ; Санкт-Петербургский гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики; под

ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – С.-Петербург, 2010. – С. 288–291.

45. Поляков, А.В. Оптоэлектронная охранная сигнальная система / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонтов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28 февраля 2011 г. / НИИПФП имени А.Н. Севченко; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 146–147.

46. Жуковский, А.В. Влияние нелинейных эффектов в волоконном световоде на информационные параметры динамических запоминающих устройств на основе DWDM-технологии / А.В. Жуковский, А.В. Поляков // Проблемы взаимодействия излучения с веществом: материалы III Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию со Дня рождения Б.В. Бокутя, Гомель, 9-11 ноября 2011 г. В 2 ч. / Мин. обр. Респ. Бел.; ГГУ имени Ф. Скорины; БРФФИ; редкол.: А.В. Рогачев (гл. ред) [и др.]. – Гомель, 2011. – Ч. 1. – С. 42–45.

47. Polyakov, A.V. Information parameters of DWDM fiber-optic dynamic loop memory / A.V. Polyakov // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8498 : Optics and Photonics for Information Processing VI, San Diego, California, US, 15-16 August 2012 / ed. : A.A.S. Awwal; K.M. Iftekharuddin. – P. 849813-1-8.

48. Ксенофонтов, М.А. Динамическая прочность волоконных световодов под влиянием нестационарных температурных воздействий / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // Фундаментальные проблемы оптики-2014: сб. тр. VIII Междунар. конф., С.-Петербург, 20-24 октября 2014 г. / Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2014. – С. 270–272.

49. Поляков, А.В. Оптоволоконная память рециркуляционного типа с 2R-восстановлением информационного потока / А.В. Поляков, Н.Р. Хлебородов // Фундаментальные проблемы оптики-2014: сб. тр. VIII Междунар. конф., С.-Петербург, 20–24 октября 2014 г. / Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2014. – С. 255–257.

50. Polyakov, A.V. Influence of dynamic thermal effects on durability of optical fiber in the fiber-optic temperature sensor / A.V. Polyakov // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9480 : Fiber Optic Sensors and Applications XII, Baltimore, Maryland, US, 20-24 Apr. 2015 / ed.: G. Pickrell [et al.]. – P. 948009-1-8.

51. Поляков, А.В. Оптоэлектронная периметровая система охраны / А.В. Поляков // V Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике:

сб. науч. тр., Москва, 3–5 февраля 2016 г. / Мин. обр. и науки РФ; РАН; Гос. корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ»; НИЯУ МИФИ; отв. ред. В.Г. Родин. – М.: 2016. – С. 412–413.

52. Поляков, А.В. Периметровая подземная волоконно-оптическая система обнаружения / А.В. Поляков // *Фундаментальные проблемы оптики* – 2016 : сб. тр. IX Междунар. конф., С.-Петербург, 17–21 октября 2016 г. / Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2016. – С. 261–263.

53. Поляков, А.В. Квазираспределенный волоконно-оптический измеритель электрического напряжения / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонтов // *Фундаментальные проблемы оптики* - 2016: сб. тр. IX Междунар. конф., С.-Петербург, 17–21 октября 2016 г. / Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2016. – С. 264 – 266.

54. Поляков, А.В. Автоматизированная оптоэлектронная измерительная система [Электронный ресурс] / А.В. Поляков, Т.Д. Прокопенкова // *Информационные системы и технологии: материалы Междунар. науч. конгресса, Минск, 24–27 октября 2016 г.* / БГУ; редкол.: С.В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 793–797. – Режим доступа : elib.bsu.by/bitstream/123456789/160513/1/Поляков_Прокопенкова.pdf. – Дата доступа : 17.01.2023.

55. Ксенофонтов, М.А. Перестраиваемый источник излучения для оптоволоконных измерительных систем / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // *Приборостроение–2016: материалы 9-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 г.* / БНТУ; редкол.: О.К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 84–86.

56. Поляков, А.В. Волоконно-оптическая рециркуляционная измерительная система / А.В. Поляков, Т.Д. Прокопенкова // *Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы IV Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 11–12 мая 2017 г.* / НИИПФП имени А.Н. Севченко; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 120–122.

57. Ксенофонтов, М.А. Квазираспределенная оптоволоконная система мониторинга высоковольтного напряжения / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // *Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы IV Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 11–12 мая 2017 г.* / НИИПФП им. А.Н. Севченко; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 76–78.

58. Polyakov, A.V. Fiber-optic perimeter security system based on WDM technology / A.V. Polyakov // Proc. of SPIE. – 2017. – Vol. 10433 : Electro-Optical and Infrared Systems : Technology and Applications XIV, Warsaw, Poland, 13-14 Sept. 2017 / ed.: D. Huckridge [et al.]. – P. 10433-401-10433-407.

59. Ксенофонтов, М.А. Волоконно-оптическая система мониторинга высоковольтного напряжения / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // Приборостроение–2017: материалы 10-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 1–3 ноября 2017 г. / БНТУ; редкол.: О.К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 381–383.

60. Поляков, А.В. Оптоволоконная подземная система охраны периметра / А.В. Поляков, Д.Г. Сахончик // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13–17 ноября 2017 г. / БГУ, НИИПФП имени А.Н. Севченко; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 141–143.

61. Поляков, А.В. Исследование стабильности частоты рециркуляции оптических импульсов в замкнутых оптоволоконных информационно-измерительных системах регенеративного типа / А.В. Поляков, Д.Г. Сахончик // Фундаментальные проблемы оптики - 2018: сб. тр. X Междунар. конф., С.-Петербург, 15–19 октября 2018 г. / Мин. обр. и науки РФ; Университет ИТМО; под ред. В.Г. Беспалова [и др.]. – С.-Петербург, 2018. – С. 268–271.

62. Поляков, А. В. Волоконно-оптическая рециркуляционная сигнальная система на основе WDM-технологии / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонтов, Д.Г. Сахончик // Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018: сб. науч. статей I Межд. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 октября 2018 г. / Институт физики НАНБ; под ред.: Н.С. Казака [и др.]. – Минск, 2018. – С. 262–265.

63. Поляков, А.В. Анализ кратковременных флуктуаций периода рециркуляции в замкнутых оптоволоконных системах / А.В. Поляков, Д.Г. Сахончик // VIII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 23–25 января 2019 г. / НИЯУ МИФИ; отв. ред.: В.Г. Родин. – М., 2019. – С. 651–652.

64. Поляков, А.В. Оценка разрешающей способности волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа / А.В. Поляков // Фундаментальные проблемы оптики - 2019: сб. тр. XI Междунар. конф., С.-Петербург, 21–25 октября 2019 г. / Мин. обр. и науки РФ; Университет ИТМО; под ред. С.А. Козлова. – С.-Петербург, 2019. – С. 217–219.

65. Поляков, А.В. Волоконно-оптические технологии охраны периметра на основе рециркуляционных систем / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонтов, Д.Г. Сахончик // Приборостроение–2019: материалы 12-й Междунар. науч.-

технич. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / БНТУ; редкол.: О.К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 431–433.

Тезисы докладов

66. Поляков, А.В. Частотные волоконно-оптические датчики электромагнитных воздействий / А.В. Поляков // Квантовая электроника: материалы V Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2004 г. / Белгосуниверситет, НИИ прикладных физических проблем; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2004. – С. 195.

67. Polyakov, A.V. Measurement of oxygen concentration by fiber-optical recirculation sensor / A.V. Polyakov // 10th European Conference on Optical Chemical Sensors and Biosensors, Prague, Czech Republic, March 28–31, 2010. – Prague, 2010. – P. 107.

68. Поляков, А.В. Влияние спектральных свойств полупроводниковых источников и приемников излучения на метрологические характеристики оптоволоконных измерительных систем при изменяющихся температурных условиях / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонтов // Лазеры. Измерения. Информация: труды конф., С.-Петербург, 1-3 июня 2010 г. / Академия инженерных наук России, Балт. гос. технич. ун-т «Военмех», С.-ПГПУ; под ред. В.Е. Привалова. – С.-Петербург, 2010. – С. 94–95.

69. Поляков, А.В. Система охраны периметра на основе волоконно-оптического датчика / А.В. Поляков // Квантовая электроника: материалы VIII Межд. науч.-технич. конф., Минск, 22–25 ноября 2010 г. / БГУ, НИИПФП имени А.Н. Севченко; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 130.

70. Поляков, А.В. Матрично-вариативный оптический элемент памяти / А.В. Поляков, А.В. Жуковский // Лазеры. Измерения. Информация : тр. конф., С.-Петербург, 5-7 июня 2012 г. / Академия инженерных наук России, Балт. гос. технич. ун-т «Военмех», С.-ПГПУ; под ред. В.Е. Привалова. – С.-Петербург, 2012. – С. 102.

Патенты

71. Частотная волоконно-оптическая измерительная система: полез. модель ВУ 4351 / А.В. Поляков. – Оpubл. 30.04.08.

72. Устройство ввода лазерного излучения в одномодовое оптическое волокно: полез. модель ВУ 5806 / А.В. Поляков. – Оpubл. 30.12.2009.

73. Двухволновой перестраиваемый волоконный кольцевой лазер: полез. модель ВУ 6815 / А.В. Поляков. – Оpubл. 30.12.10.

74. Волоконно-оптический датчик температуры: пат. ВУ 14790 / А.В. Поляков. – Оpubл. 30.10.2011.

75. Волоконно-оптическое запоминающее устройство: полез. модель ВУ 8012 / И.А. Малевич, А.В. Поляков, С.И. Чубаров. – Оpubл. 28.02.2012.

76. Волоконно-оптическая динамическая память с периодической регенерацией информации: полез. модель ВУ 9723 / А.В. Поляков, А.В. Жуковский, Н.Р. Хлебородов. – Оpubл. 30.12.2013.

77. Подземная волоконно-оптическая система охраны периметра: полез. модель ВУ 12436 / А.В. Поляков. – Оpubл. 30.10.2020.

78. Квазираспределенный рециркуляционный волоконно-оптический датчик электрического напряжения: полез. модель ВУ 12485 / А.В. Поляков. – Оpubл. 30.12.2020.



РЕЗЮМЕ

Поляков Александр Владимирович

Физические закономерности рециркуляции сигналов в информационно-измерительных волоконно-оптических системах со спектральным мультиплексированием

Ключевые слова: волоконный световод, частота рециркуляции, спектральное мультиплексирование, метод измерений, спектральные и шумовые характеристики, информационные параметры.

Цель работы: развитие теории построения рециркуляционных волоконно-оптических систем и разработка физических основ создания эффективных рециркуляционных волоконно-оптических датчиков и динамических запоминающих устройств.

Методы исследования и использованная аппаратура: численное моделирование физических процессов в оптоволоконных рециркуляционных системах, включая нелинейное уравнение Шредингера, кинетические уравнения, метод конформного отображения. Исследования стабильности частоты рециркуляции с помощью экспериментальных стендов, содержащих полупроводниковые источники и приемники излучения, измерительную аппаратуру.

Полученные результаты и их новизна: предложен новый метод измерения физических величин, на основе которого разработаны принципы построения квазираспределенных волоконно-оптических датчиков рециркуляционного типа с технологией спектрального мультиплексирования. Выявлены закономерности взаимосвязи температурных свойств спектральных и энергетических характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения на отношение сигнал/шум. Разработан механизм совместного влияния на информационные параметры временного джиттера, фазовой самомодуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсии в волоконном световоде, амплитудных флуктуаций в элементах динамических запоминающих устройствах с оптической регенерацией и спектральным уплотнением информационных каналов.

Рекомендации по использованию и область применения: полученные результаты послужили основой для разработки многофункциональных волоконно-оптических измерителей различных физических величин, подземных волоконных системах охраны периметра для контроля подходов к запретным зонам и территориям, быстродействующей буферной памяти для высокоскоростных волоконных линий связи, специализированных оптических процессоров, лазерной космической связи, лазерно-локационного зондирования.

РЭЗІЮМЭ

Полякоў Аляксандр Уладзіміравіч

Фізічныя заканамернасці рэцыркуляцыі сігналаў у інфармацыйна-вымяральных валаконна-аптычных сістэмах са спектральным мультыплексаваннем

Ключавыя словы: валаконны святлавод, частата рэцыркуляцыі, спектральнае мультыплексаванне, метады вымярэнняў, спектральныя і шумавыя характарыстыкі, інфармацыйныя параметры.

Мэта работы: развіццё тэорыі пабудовы рэцыркуляцыйных валаконна-аптычных сістэм і распрацоўка фізічных асноў стварэння эфектыўных рэцыркуляцыйных валаконна-аптычных датчыкаў і дынамічных запамінальных прыладаў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: лікавае мадэляванне фізічных працэсаў у аптавалаконных рэцыркуляцыйных сістэмах, уключаючы нелінейнае ўраўненне Шрэдынгера, кінетычныя ўраўненні, метады канформнага адлюстравання. Даследаванні стабільнасці частаты рэцыркуляцыі з дапамогай эксперыментальных стэндаў, якія змяшчалі паўправадніковыя крыніцы і прымачы выпраменьвання, вымяральную апаратуру.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны новы метады вымярэння фізічных велічынь, на аснове якога распрацаваны прынцыпы пабудовы квазіразмеркаваных валаконна-аптычных датчыкаў рэцыркуляцыйнага тыпу з тэхналогіяй спектральнага мультыплексавання. Выяўлены заканамернасці ўзаемасувязі тэмпературных уласцівасцей спектральных і энергетычных характарыстык паўправадніковых крыніц і прымачоў выпраменьвання на стаўленне сігнал/шум. Распрацаваны механізм сумеснага ўплыву на інфармацыйныя параметры часовага джытара, фазавай самамадуляцыі, храматычнай і палярызацыйнай модавай дысперсіі ў валаконным святлаводзе, амплітудных флуктуацый у элементах дынамічных запамінальных прыладах з аптычнай рэгенерацыяй і спектральным ушчыльненнем інфармацыйных каналаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання: атрыманыя вынікі паслужылі асновай для распрацоўкі шматфункцыянальных валаконна-аптычных вымяральнікаў розных фізічных велічынь, падземных валаконных сістэмах аховы перыметра для кантролю падыходаў да забароненых зон і тэрыторый, хуткадзейнай буфернай памяці для высакахуткасных валаконных ліній сувязі, спецыялізаваных аптычных працэсараў, лазернай касмічнай сувязі, лазерна-лакацыйнага зандавання.

SUMMARY

Polyakov Alexandre Vladimirovich

Physical regularities of signal recirculation in information-measuring fiber optic systems with spectral multiplexing

Keywords: optical fiber, recirculation frequency, spectral multiplexing, measurement method, spectral and noise characteristics, information parameters.

Goal of the research: elaboration of the theory of constructing recirculating fiber-optic systems and developing the physical foundations for creating effective recirculating fiber-optic sensors and dynamic storage devices.

Research methods and equipment: numerical simulation of physical processes in fiber optic recirculation systems, including the nonlinear Schrödinger equation, kinetic equations, conformal mapping method. Studies of the recirculation frequency stability using experimental stands containing semiconductor sources and receivers of radiation, measuring equipment.

Obtained results and their novelty: a new method for measuring physical quantities is proposed, on the basis of which the principles for constructing quasi-distributed fiber-optic recirculation sensors with the technology of spectral multiplexing are developed. Regularities in the relationship between the temperature properties of the spectral and energy characteristics of semiconductor radiation sources and receivers on the signal-to-noise ratio are revealed. A mechanism has been developed for the joint influence on the information parameters of temporal jitter, self-phase modulation, chromatic and polarization mode dispersion in an optical fiber, amplitude fluctuations in elements of dynamic storage devices with optical regeneration and spectral multiplexing of information channels.

Recommendation for use and application: the results obtained served as the basis for the development of multifunctional fiber-optic meters of various physical quantities, underground fiber perimeter security systems for monitoring approaches to restricted areas and territories, fast-acting buffer memory for high-speed fiber communication lines, specialized optical processors, laser space communications, laser-location sensing.

