

На правах рукописи



Азанова Ирина Сергеевна

**Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов
интерферометрических датчиков физических величин**

Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Пермь — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), г. Пермь

Научный консультант: **Волынцев Анатолий Борисович**
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники физико-математического института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь

Официальные оппоненты: **Полисадова Елена Федоровна**
доктор физико-математических наук, профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Филатов Юрий Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Лагов Петр Борисович
доктор технических наук, доцент, начальник отдела научного центра сертификации элементов и оборудования НЦ СЭО АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», г. Москва

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» июня 2026 г. в 15 ч 15 мин на заседании диссертационного совета 24.2.358.03, созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», по адресу: г. Пермь, ул Букирева, д. 15, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте www.psu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.358.03,
к.т.н.



Сосунов Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Волоконно-оптические интерферометрические датчики физических величин (ВОИД) и их компоненты все активнее применяются в различных системах мониторинга состояния объектов. Воздействие внешних факторов может ухудшить работоспособность ВОИД. Повышенный уровень радиационного фона может как ослабить чувствительность этих датчиков, так и привести к потере работоспособности. Применение таких систем в космических аппаратах, на атомных силовых установках и других специальных объектах выдвигает требования по их стойкости к воздействию непрерывного, а также импульсного ионизирующего излучения (ИИ).

Наиболее показательным представителем ВОИД является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Основными волоконно-оптическими компонентами ВОИД, в том числе и ВОГ, обычно выступают источник оптического излучения, многофункциональная интегрально-оптическая схема (СИОМ), например, на монокристалле ниобата лития, а также чувствительный элемент на основе оптического волокна (ОВ) с сохранением поляризации излучения. Поэтому результаты исследований радиационно-оптической стойкости (РОС) волоконно-оптических компонентов ВОГ вполне применимы для других ВОИД.

Для проектирования ВОИД необходимо понимание влияния на РОС компонентов ВОИД факторов, а именно: уровня напряженно-деформированного состояния ОВ, величины оптической мощности рабочего сигнала и температуры в сочетании с вариацией интенсивности и вида воздействующего ИИ. Поэтому актуальной задачей является исследование влияния факторов ИИ и технологии изготовления волоконно-оптических компонентов на оптические свойства компонентов ВОИД в процессе облучения и после облучения, определения аналитических зависимостей, позволяющих численно оценить радиационный отклик компонентов ВОИД при отличающихся условиях опытов.

Особую актуальность носит необходимость разработки научных основ для создания промышленной технологии производства оптических компонентов с повышенной РОС, а также радиационно-стойкого одномодового ОВ с сохранением поляризации излучения.

Цель и задачи работы

Цель работы: установление основных физических закономерностей влияния ИИ и технологии изготовления волоконно-оптических компонентов на оптические свойства компонентов ВОИД в процессе облучения и после облучения, разработка экспериментальных методов изучения влияния ИИ на РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД, а также создание физических основ промышленной технологии радиационно стойких компонентов для них.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка единой методологии и создание экспериментального комплекса для изучения влияния ИИ на РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД в сопоставимых условиях.
2. Выполнение экспериментальных исследований РОС компонентов ВОИД.

3. Установление основных физико-химических критериев, соблюдение которых необходимо для создания промышленной технологии радиационно стойкого одномодового ОВ с сохранением поляризации излучения.

4. Разработка научных основ для создания промышленной технологии производства оптических компонентов с повышенной РОС.

Объектом исследования является влияние внешних факторов на работоспособность компонентов ВОИД.

Предмет исследования – влияние ИИ на оптические свойства следующих компонентов ВОИД:

1. ОВ с сохранением поляризации излучения с германосиликатной сердцевиной (PGeO_2) в свободном состоянии и в виде гироскопических волоконных контуров бескаркасных (БВК) и на каркасе (ВК).

2. Радиационно-стойкое ОВ с сохранением поляризации излучения с нелегированной кварцевой сердцевиной (PSiO_2) в свободном состоянии и в виде гироскопических волоконных контуров, а также изотропное радиационно-стойкое одномодовое ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной (ISiO_2).

3. Радиационно-стойкое активное ОВ, легированное ионами эрбия и церия в схеме однопроходного суперлюминесцентного волоконного источника излучения (СВИ).

4. СИОМ, изготовленная на монокристалле ниобата лития по технологии протонного обмена.

Научная новизна результатов

1. Впервые с помощью единой методологии в сопоставимых условиях для гамма, фотонного (тормозного) и гамма-нейтронного видов излучений для широкой вариации доз и мощностей доз получены сведения о РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД. Выявлены волоконно-оптические компоненты, определяющие стойкость ВОИД в условиях воздействия непрерывного и импульсного ИИ.

2. Для ОВ с кварцевой сердцевиной чувствительность РНП на длине волны 1550 нм к уровню входной оптической мощности и уровню внутренних упругих напряжений определяется, в первую очередь, наличием радиационных центров окраски (РЦО) с полосами поглощения 0,95 эВ и 1,12 эВ.

3. Установлены закономерности, связывающие процесс релаксации РНП в ОВ после воздействия импульсного ИИ с величиной дозы в импульсе, относительной продольной деформацией, температурой образца, входной оптической мощностью.

4. РОС волоконного контура ВОГ определяется уровнем внутренних упругих напряжений в сердцевине ОВ.

5. При воздействии импульсного ИИ в анизотропном ОВ с германосиликатной сердцевиной выявлено образование короткоживущих РЦО на длине волны 1550 нм с временем жизни до 0,1 мс.

6. Впервые для времен миллисекундного диапазона после воздействия гамма-нейтронного и фотонного импульсного ИИ для ОВ измерены спектры пропускания в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм. Установлено, что в анизотропных ОВ с кварцевой сердцевиной в течение промежутка времени до 3

секунд после импульсного гамма-нейтронового воздействия происходит перераспределение РЦО, приводящее к уменьшению РНП в области длин волн более 1000 нм с одновременным их увеличением в области длин волн менее 1000 нм.

Защищаемые научные положения

1. Установленный автором научный факт, что именно режимы осаждения фтор-силикатной отражающей оболочки и кварцевой сердцевины преформы в ОВ с сохранением поляризации излучения обеспечивают снижение РНП на длине волны 1550 нм с 19 дБ/км до 3,5 дБ/км при одних условиях облучения.
2. Наличие внутренних упругих напряжений в ОВ типа «Панда» с германосиликатной сердцевиной является условием возникновения в «короткоживущих РЦО», вносящих вклад в РНП на длине волны 1550 нм, при воздействии импульсного ИИ.
3. Для «короткоживущих» РЦО, вызванных в ОВ воздействием импульсного ИИ, характерное время релаксации экспоненциально возрастает с увеличением относительной продольной деформации ОВ.
4. Средневзвешенная длина волны СВИ изменяется пропорционально поглощенной дозе при воздействии непрерывного ИИ.
5. Наличие легирующих примесей (германий, алюминий) в сердцевине ОВ ускоряет процессы релаксации РНП после импульсного воздействия потока нейтронов, а внутренние упругие напряжения замедляют их.
6. РОС волоконного контура и СВИ в равной степени определяют РОС ВОИД при воздействии непрерывного ИИ.
7. Время восстановления характеристик ВОИД определяется временем релаксации РНП волоконного контура после воздействия импульсного ИИ.

Достоверность результатов исследования обеспечивается проведением исследований с использованием аттестованного и поверенного контрольно-измерительного оборудования, применением современных методов обработки экспериментальных данных, достаточной статистической выборкой повторяющихся серий опытов, а, в ряде случаев, и многократным воспроизведением выполненных экспериментов. На основе полученных результатов удалось построить технологическую цепочку по выпуску радиационно стойких оптических компонентов и подтвердить достоверность результатов исследования их стабильным коммерческим выпуском.

Результаты работы рецензированы и приняты к публикации в ведущих высокорейтинговых научных журналах, апробированы на международных конференциях.

Методология и методы исследования

Для повышения достоверности данных РОС различных волоконно-оптических компонентов разработана специальная методология исследования, характеризующаяся следующими подходами:

- Данные по РОС волоконно-оптических компонентов фиксируются в одних условиях воздействия, сравнительные эксперименты для импульсных воздействий проводятся в рамках одного опыта (кроме вариации температуры в опыте), что позволяет минимизировать влияние погрешности определения уровня воздействия.

- Исследовались эффекты, происходящие в волоконно-оптических компонентах как непосредственно в ходе облучения, так и после него. Состав возникающих при облучении РЦО в ОВ выявлялся при воздействии непрерывного ИИ, а данные о характерных временах их релаксации – при воздействии импульсного ИИ.

- Для определения влияния условий опыта и технологических факторов на РОС волоконно-оптических компонентов контролировались спектры пропускания ОВ во время и после воздействия ИИ, состояния сохранения поляризации излучения, оптическая мощность входного сигнала зондирующего излучения, начальный уровень напряженно-деформированного состояния ОВ с помощью измерения частотного смещения Бриллюэна, а также температура в опыте.

- Для исследования закономерностей процессов облучения и релаксации в ОВ применена математическая аппроксимация экспериментальных зависимостей РНП, позволившая выявить связи эмпирических коэффициентов аппроксимации с варьируемыми параметрами.

Научная и практическая значимость работы

1. Обоснован подход к исследованию РОС компонентов ВОИД, позволяющий минимизировать влияние погрешности определения уровня воздействия и обеспечить достоверность определения общей РОС ВОИД.

2. Полученные данные по РНП оптических компонентов ВОГ при воздействии ИИ позволяют прогнозировать РНП в оптическом тракте ВОИД при условии воздействия ИИ разного уровня, а также осознанно проектировать волоконно-оптические приборы, устойчивые к воздействию как непрерывного, так и импульсного излучения.

3. Заложены основы промышленной технологии изготовления радиационно-стойких гироскопических ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной с сохранением поляризации излучения с высоким значением двулучепреломления (до $7,3 \times 10^{-4}$). Технология реализована в ПАО «ПНППК», налажен серийный выпуск ОВ.

4. Исследования по теме диссертации являются составной частью проектов, направленных на создание высокотехнологичных производств радиационно-стойких оптических волокон, реализованных при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-059 от 22 ноября 2019 г.), Российского Научного Фонда (Проект № 18-12-00436), Программы, введенной Постановлением Правительства РФ от 08.06.2021 № 872.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является результатом работы автора в ПАО «ПНППК» и ПГНИУ и представляет собой обобщение исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками ПАО «ПНППК», ПГНИУ, НЦВО РАН, ИХВВ РАН и РФЯЦ ВНИИЭФ. Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии и руководстве.

Для проведения экспериментов автором выполнены анализ и подбор облучательных установок, выбор контрольно-измерительного оборудования, подготовлены схемы опытов, выполнены подготовка к транспортировке исследуемых образцов и оборудования, обеспечено сопровождение их в испытательные

центры. Автор непосредственно на месте руководила группой исследователей при проведении экспериментов на линейном индукционном ускорителе ЛИУ30М (кроме экспериментов работ [3, 9]) и реакторе быстрых нейтронов БР1М, ускорителе электронов ЛУ 10-20 в РФЯЦ-ВНИИЭФ, установке на основе изотопа кобальта НИЦ «Курчатовский институт», отвечала за безопасность группы исследователей по приказу на проведение исследований, монтировала оптические схемы, размещала образцы в облучательном зале, участвовала в проведении дозиметрии, снимала показания приборов.

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»:

П.2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности.

П.4. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.

П.6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных семинарах и конференциях: «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.); международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2022 г.); международная научная конференция-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2018, 2022 гг.); всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 2017, 2019, 2021, 2023 гг.); «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2019 г.); «Высокочистые вещества. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 2018 г.). научный семинар по Теоретической физике ПГНИУ, 2023 г., рук. проф. В.А. Демин, научный семинар НЦВО РАН и ИОФ РАН, 2023 г., научно-технический совет ПАО «ПНППК» 2020 г.

Публикации

Основные результаты исследований изложены в 37 работах [A1-A37]. В том числе 9 из них входят в базы данных Scopus и Web of Science [A1-A9] (2 в материалах конференций), 5 статей опубликовано в журналах из списка ВАК, индексируемых системой РИНЦ [A10-A14], 19 публикаций представляют собой труды в сборниках научных конференций и тезисы докладов [A17-A37], 1 патент на полезную модель [A15], 1 патент на изобретение [A16].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из семи глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 240 наименований, а также списка публикаций автора, включающего 37 наименований. В работе имеется 113 Рисунков и 25 Таблиц. Общий объем диссертации равен 308 страницам. Имеется приложение на 33 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко рассмотрена актуальность, приведены цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту, данные об апробации результатов работы, публикациях по теме диссертации и личном вкладе автора.

В первой главе проведен обзор источников научно-технической информации по теме диссертации. Рассмотрены основные требования к оптическим компонентам интерферометрических датчиков на примере ВОГ: суперлюменесцентному волоконному источнику и активному оптическому волокну, оптическому волокну с сохранением поляризации излучения, СИОМ. Показаны основные методы и технологии изготовления этих компонентов. Приведены данные об известных из литературы причинах и механизмах деградации оптических характеристик рассматриваемых компонентов под воздействием ИИ, а также факторах, влияющих на РОС. Показано, что основной вклад в изменение характеристик вносят возникающие под действием ионизирующего излучения внутренние точечные дефекты, т.н. радиационные центры окраски (РЦО). Также проведен сравнительный анализ литературных данных о характеристиках активных и пассивных ОВ, СИОМ известных производителей, включая количественные данные по РОС. Отмечено, что по данным литературы основным механизмом деградации рассматриваемых оптических компонентов под действием ионизирующего излучения является ионизация материала, поэтому условия воздействия электронов, протонов и нейтронов допустимо моделировать с помощью непрерывного гамма-излучения различной мощности [1].

Приведены известные подходы к повышению РОС пассивных и активных ОВ. Показано, что изготовление пассивных ОВ с кварцевой сердцевиной является наиболее перспективным направлением по сравнению с известными альтернативными подходами, такими как легирование сердцевины ОВ азотом или малыми добавками фтора. В первом случае при облучении возникают близкие к рабочей длине волны РНП на длине волны 1380 нм из-за *ОН*-групп и на длине волны 1510 нм от *NH*-групп [2]. ОВ с сердцевиной легированной малыми добавками фтора при определенных условиях облучения теряют РОС [3].

По результатам анализа научно-технической информации сделаны следующие выводы:

1. О невозможности корректного сравнения РОС ОВ, полученных из разных источников из-за неполноты данных об условиях проведения исследований, составе стекла и особенностях технологии изготовления;
2. Об отсутствии комплексных данных о совместном влиянии различных факторов на РОС ОВ при воздействии непрерывного и импульсного ИИ, в частности остается не ясным как мощность зондирующего излучения в сочетании с различной температурой и величиной относительной продольной деформации (ϵ) ОВ влияют на его РНП;
3. Об отсутствии понимания какие именно оптические компоненты ВОИД оказывают доминирующее влияние на их РОС при воздействии непрерывного и импульсного ИИ;

4. Об отсутствии серийного промышленного производства в РФ радиационно-стойкого ОВ с сохранением поляризации излучения, несмотря на их востребованность со стороны космической техники, атомной энергетики и навигационного приборостроения.

Во второй главе приводится методология диссертационного исследования.

Основными причинами возникновения погрешности показаний интерферометрических датчиков при воздействии ионизирующего излучения можно считать возникновение радиационно наведенных оптических потерь в оптическом тракте и изменение средневзвешенной длины волны суперлюменесцентного волоконного источника. Поэтому методы исследования радиационной стойкости компонентов построены на контроле оптических характеристик до, во время и после воздействия ионизирующего излучения. Для сопоставления данных и возможности в последующем прогнозирования радиационной стойкости датчиков исследования проводились в одинаковых условиях по уровням и видам воздействия ИИ как при комнатной температуре, так и при крайних температурах рабочего диапазона датчиков.

В работе применены непрерывное гамма-излучение, импульсное тормозное излучение линейного индукционного ускорителя электронов и импульсное гамма-нейтронное излучение реактора быстрых нейтронов с различными уровнями воздействия, что дает возможность оценить влияние на РОС различных видов излучения, их дозы и мощности. При этом влияние вариации условий воздействия ИИ оценивалось на идентичных образцах исследуемых компонентов.

В качестве источников ИИ применено непрерывное гамма-излучение от изотопа ^{60}Co и ^{235}U с вариацией мощности дозы от 0,0001 Гр/с до 5 Гр/с и поглощенной дозой до 1,2 МГр (установки ГУТ-200М, НИЦ «Курчатовский институт» и «Гамма-Н», АО «НИИП»), импульсное тормозное излучение линейного индукционного ускорителя электронов с энергией до 40 МэВ, длительность импульса 20 нс, доза в импульсе от 4 Гр до 650 Гр (установка «ЛИУ-30М», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), импульсное гамма-нейтронное излучение с энергией нейтронов до 14 МэВ, длительность импульса 70 мкс, потоком нейтронов до 5×10^{13} н/см², дозой сопутствующего гамма-излучения до 60 Гр (установка «БР-1М», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). Температура в опытах варьировалась от минус 60 °С до плюс 110 °С.

В исследовании использовали образцы ОВ с кварцевой и германосиликатной сердцевиной, изготовленные на одном и том же оборудовании с применением одинаковых исходных материалов и методов обработки заготовок, что позволило варьировать степень компактности решетки стекла сердцевины ОВ. Вариация уровня напряженно-деформированного состояния достигалась использованием для исследований изотропных и анизотропных образцов ОВ с одним составом стекла сердцевины, а также исследованием образцов ОВ как в состоянии свободной намотки с минимальным уровнем внешних напряжений, так и в виде волоконных контуров с внесенными внешними напряжениями из-за натяжения при намотке и пропитке фиксирующим компаундом.

Несмотря на известную низкую РОС ОВ с германосиликатной сердцевиной, ОВ типа «Панда», PGeO_2 , выбрано в качестве объекта исследования из-за недо-

статочности данных о радиационной стойкости PGeO_2 по сравнению с изотропным вариантом для оценки влияния на РНП анизотропии напряженного состояния сердцевины. Также легирование германием матрицы стекла снижает компактность решетки стекла [4] по сравнению с нелегированной кварцевой сердцевиной, что позволяет оценить влияние этого параметра на время релаксации РНП после воздействия импульсного ИИ.

Для сопоставления РОС радиационно-стойких одномодовых ОВ с сохранением поляризации излучения проведены сравнительные исследования при воздействии непрерывного и импульсного ИИ в одинаковых условиях опыта для образцов ОВ PSiO_2 , изготовленного по технологии, полученной в данной работе, и ОВ с сердцевиной, легированной азотом, (ПН).

Контролируемыми параметрами до, во время и после воздействия ИИ для образцов СИОМ являлись выходная оптическая мощность на длине волны 1550 нм в обоих каналах, коэффициент сохранения поляризации излучения (СПИ), коэффициент деления и РНП. Для активного ОВ контролировались РНП на длине волны 1300 нм, в схеме СВИ контролировался спектр люминесценции, вычислялись РНП. Для образцов пассивных ОВ контролировался частотный сдвиг Бриллюэна, спектр пропускания в диапазоне длин волн от 400 нм до 1600 нм, уровень входной и выходной оптической мощности на длине волны 1550 нм (для анизотропных ОВ по обеим поляризационным осям), вычислялись РНП, величина h -параметра, величина относительной продольной деформации ϵ_{33} (коэффициент пропорциональности определен экспериментально по изменению частотного сдвига Бриллюэна при контролируемом растяжении ОВ).

РНП в момент времени t определялись как

$$\text{РНП}(t) = \frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_0}{P_1}, \quad (1)$$

где P_0 – оптическая мощность на фотоприемнике до воздействия, P_1 – оптическая мощность для времени t , L – длина образца.

В третьей главе показаны результаты исследования влияния непрерывного гамма-излучения на РНП в спектральном диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм и величины h -параметра для ОВ PSiO_2 и PGeO_2 в условиях свободной намотки и волоконных контуров ВОГ.

В разделе 3.1 приведены результаты исследования ОВ с сохранением поляризации излучения типа PGeO_2 при воздействии непрерывного гамма-излучения.

Установлено, что наличие напрягающих элементов в ОВ не привело к образованию дополнительных РЦО. Разложение спектра РНП на составляющие выявило, что основную роль в РНП играют центры окраски, связанные с присутствием германия [5, 6].

Впервые показано, что величина РНП зависит не только от содержания германия в сердцевине (в GeO_2 «Панда» оно достигает 8 мол. %, что существенно выше, чем в стандартном одномодовом волокне – до 5 мол. %), но и от уровня напряженно-деформированного состояния ОВ. В гироскопическом каркасном волоконном контуре величина РНП при дозе 1 кГр достигает 55 дБ/км при комнатной температуре, в то время как в свободной намотке – до 25 дБ/км, при этом

стандартные телекоммуникационные одномодовые волокна характеризуются РНП на уровне 17 дБ/км для дозы 1 кГр [5]. Величина относительной продольной деформации ОВ, вызванная намоткой в гироскопический волоконный контур, составляет $\Delta\varepsilon_{zz} \approx 0,009$. Она получена из средней величины частотного сдвига Бриллюэна ВК $\Delta f_b \approx 11,01$ ГГц с учетом экспериментально определенного коэффициента пропорциональности [7]. Функционально учет деформаций может быть выражен независимым множителем в функциональной зависимости РНП. Поэтому автором предложена формула аппроксимации, учитывающая кроме величины поглощенной дозы мощность дозы и величину продольной относительной деформации:

$$\text{РНП} = CE^\gamma \cdot D^\alpha \cdot \dot{D}^\beta, \quad (2)$$

где C – коэффициент пропорциональности, α и β – коэффициенты степенной зависимости, не превышающие единицы, D – величина поглощенной дозы, \dot{D} – величина мощности дозы, E – множитель, отвечающий за величину относительной продольной деформации, параметры C , α , β и γ вычислялись по данным измерений РНП при разной дозе, мощности дозы облучения, разном уровне напряженно-деформированного состояния.

Эффект фотообесцвечивания приводит к разнице РНП на длине волны 1550 нм не более 2 дБ/км при дозе 1 кГр при изменении величины входной оптической мощности от 0,1 мВт до 5 мВт. Тем не менее, этого оказывается достаточно для незначительного увеличения коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ) во время облучения, поскольку он определяется отношением выходной оптической мощности по главной и неглавной оптическим осям.

Температурная зависимость РНП близка к экспоненциальной. Чувствительность к изменению температуры смещена в область пониженных температур. Разница РНП для диапазона температур от плюс 30 °С до плюс 60 °С незначительна и составляет 1-2 дБ/км, тогда как для диапазона температур от минус 30 °С до минус 60 °С разница РНП составляет ~ 10 дБ/км при одних условиях измерения.

Раздел 3.2 посвящен созданию технологии изготовления радиационно-стойких ОВ PSiO_2 , а также результатам исследования PSiO_2 при воздействии непрерывного гамма-излучения, в том числе сравнению их характеристик с характеристиками мировых аналогов ОВ.

Первые изготовленные образцы PSiO_2 отличала сильная зависимость РНП от величины двулучепреломления. Для достижения величины двулучепреломления $6,3 \times 10^{-4}$ внесение напрягающих элементов приводило к увеличению частотного сдвига Бриллюэна относительно ISiO_2 на $\Delta f_b = 0,45$ ГГц, что соответствует увеличению относительной продольной деформации в сердцевине ОВ на $\Delta\varepsilon_{zz} \approx 0,6 \times 10^{-3}$. При этом разница РНП на длине волны 1550 нм между ISiO_2 и PSiO_2 достигала до 20 дБ/км при дозе 1 кГр при комнатной температуре и величине $P_0 = 0,5$ мВт (Рисунок 1, а). Одновременно с этим обнаружена уникальная возможность радикального снижения РНП при повышении величины P_0 , увеличение P_0 до 5 мВт оказалось достаточным, чтобы РНП PSiO_2 снизились до величины РНП ISiO_2 .

Анализ РНП в спектральной области от 400 нм до 1600 нм выявил, что РНП на длине волны 1550 нм вызываются РЦО, создающими полосы поглощения в

области 0,95 эВ и 1,12 эВ, что соответствует длинам волн 1305 нм и 1107 нм (далее для краткости «полоса 1 эВ», Рисунок 1, б). В изотропных ОБ, эти РЦО связывают с собственными автолокализованными дырками (АДС) (или некоторым их промежуточным типом), которые возникают в начальные времена облучения, а также при низких температурах [5, 8].

В результате проведенных исследований впервые установлено, что именно радиационно-наведенная интенсивность поглощения в области 1 эВ в ОБ PSiO_2 , определяет:

- РНП для $\lambda=1550$ нм в процессе облучения,
- зависимость РНП от уровня P_0 , температуры, величины упругих напряжений в сердцевине ОБ,
- скорость восстановления характеристик после облучения.

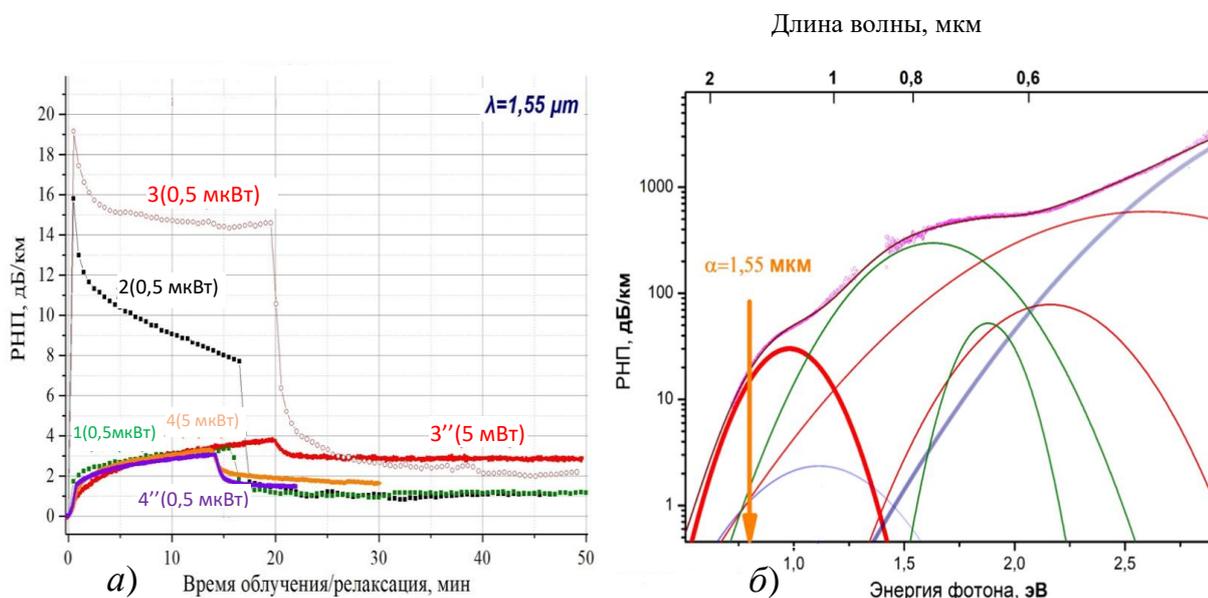


Рисунок 1 – РНП (а) на $\lambda=1550$ нм в процессе облучения и релаксации с мощностью дозы ~ 1 Гр/с до дозы 1 кГр от источника ^{60}Co при комнатной температуре: 1 – изотропное ISiO_2 ; 2 – PSiO_2 с двулучепреломлением $5,9 \times 10^{-4}$ (состав стекла как для 1); 3 и 3'' – PSiO_2 с двулучепреломлением $6,3 \times 10^{-4}$ (состав стекла как для 1); 4 и 4'' – доработанная PSiO_2 с двулучепреломлением $6,4 \times 10^{-4}$; величина $P_0 = 0,5$ мкВт для образцов 1, 2, 3, 4 и $P_0 = 5$ мВт для образцов 3'' и 4''; разложение спектра РНП образца 3 на составляющие (б), обозначенные цветами: красным – собственные РЦО, зеленым – деформационные РЦО, сиреневым – неизвестная малоинтенсивная полоса с центром 1,12 эВ, голубым – «хвост» УФ поглощения; источник ^{60}Co , доза 27 Гр, мощность 1,1 Гр/с, $\lambda = 1550$ нм, 30 °С; $P_0 = 0,5$ мкВт [А4]

Выявлено, что на интенсивность поглощения в области 1 эВ влияют не столько конструкционные особенности ОБ, сколько технологические факторы его изготовления, связанные с избытком или недостатком кислорода в сетке стекла. Использование данных работы [9] позволило доработать технологию изготовления ОБ. Создание кислороднодефицитной среды при осаждении фторсиликатной оболочки и сердцевины ОБ, подбор режимов вытяжки, приводящих к снижению упругих напряжений в сердцевине ОБ привели к уменьшению интенсивности поглощения в области 1 эВ. Это, в свою очередь, привело к существенному

снижению чувствительности как к фотообесцвечиванию, так и к величине напряжений сетки стекла, внесенных напрягающими элементами и намоткой гироскопического контура.

В доработанном варианте технологии разница РНП при тех же условиях составила не более 2 дБ/км (Рисунок 1, а, графики 4 и 4"). Такая же ситуация с зависимостью РНП от величины P_0 : разница РНП при комнатной температуре незначительна для $P_0=0,5$ мкВт и $P_0=5$ мВт. При этом, чем больше величина P_0 , тем меньше скорость релаксации РНП ОВ после облучения.

На основе результатов, опубликованных в работах [А1, А4 - А6, А11, А14, А16] и отраженных материалах конференций [А7, А8, А17-А19, А24, А26, А28, А29, А31, А37], сформулировано **первое научное положение** о том, что именно режимы осаждения фторсиликатной отражающей оболочки и кварцевой сердцевинной преформы в ОВ с сохранением поляризации излучения обеспечивают снижение РНП на длине волны 1550 нм с 19 дБ/км до 3,5 дБ/км при одинаковых условиях облучения.

Разработанная конструкция [А16] и технология ОВ позволили обеспечить высокие значения двулучепреломления до $7,3 \times 10^{-4}$, а также технологичность изготовления. В ПАО «ПНППК» освоен серийный выпуск ОВ PSiO_2 , а также изотропного одномодового ОВ (оба типа ОВ получили статус серийной продукции). Для ОВ PSiO_2 коэффициент затухания на длине волны 1550 нм составляет 0,8 дБ/км при величине двулучепреломления $6,5 \times 10^{-4}$ и значении числовой апертуры 0,16. При этом РНП для $\lambda = 1550$ нм (доза 1 кГр, мощность дозы 1 Гр/с, $P_0 = 5$ мкВт) не более 3,5 дБ/км при комнатной температуре. Технологический разброс РНП от партии к партии при этих условиях составляет не более 1 дБ/км.

При сопоставимых характеристиках радиационной стойкости разработанные волокна существенно превосходят мировые аналоги [10-13] по характеристикам величин коэффициента затухания и двулучепреломления, что обеспечивает более высокие точностные характеристики ВОГ. Далее, если не оговорено особо, все результаты приведены для ОВ, изготовленных по доработанному варианту технологии.

Для сопоставления возможностей разработанной технологии с альтернативными решениями проведены сравнительные испытания образцов PSiO_2 производства ПНППК с образцами ОВ «Панда» [А16] с сердцевинной, легированной азотом (ПН, образцы предоставлены ФИРЭ и ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова) которые отличались существенно меньшим значением двулучепреломления, по сравнению с ОВ PSiO_2 . При этом образцы ПН показали существенно более высокие РНП при непрерывном облучении – 38 дБ/км, против 5 дБ/км у образцов PSiO_2 производства ПНППК при поглощенной дозе 79,2 кГр и мощности дозы 1,27 Гр/с [А1]. Образцы ПН продемонстрировали более быструю релаксацию после окончания облучения, что, вероятно, будет приводить к небольшим РНП в условиях сверхмалой мощности дозы в космическом пространстве, тогда как высокие РНП в условиях работы, например, при ликвидации последствий радиационной аварии не позволят использовать такое ОВ. При импульсном воздействии максимальные РНП меньше у образцов ПН, однако у образцов ОВ PSiO_2 наблюдается более быстрое снижение РНП до требуемого уровня [А1]. Более быстрая релаксация РНП PSiO_2 после импульсного воздействия обеспечивает меньшее время неработоспособности ВОГ, что является преимуществом этого типа ОВ.

Выводы по главе 3

1. В ОВ $PGeO_2$ РНП определяется уровнем напряженно-деформированного состояния и температурой ОВ, при этом наличие напрягающих элементов не приводит к образованию дополнительных РЦО.

2. Установлено определяющее влияние концентрации РЦО с полосами поглощения с центрами, соответствующими значениям 0,95 эВ и 1,12 эВ, на РОС ОВ с кварцевой сердцевиной. Создание кислороднодефицитной среды в сетке стекла ОВ привело к повышению РОС ОВ и одновременно снизило чувствительность ОВ к величине упругих напряжений и к величине входящей оптической мощности. Это подтверждает предположение, что концентрация этих РЦО определяется концентрацией немостиковых атомов кислорода в сетке стекла ОВ в области распространения оптического сигнала.

3. Создана промышленная технология производства радиационно-стойкого одномодового ОВ, сохраняющего поляризацию излучения с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, обеспечивающая достижение низкого начального уровня коэффициента затухания на длине волны 1550 нм (до 0,8 дБ/км), высокого уровня величины двулучепреломления (до $7,3 \times 10^{-4}$).

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния импульсного ионизирующего излучения на РНП в спектральном диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм ОВ $PGeO_2$, $ISiO_2$, $PSiO_2$ в виде свободной намотки и в виде волоконных контуров ВОГ.

В разделе 4.1 приведены результаты исследования релаксационных процессов РНП ОВ после воздействия импульсного фотонного излучения с энергией до 40 МэВ линейного индукционного ускорителя электронов в зависимости от температуры, дозы в импульсе, входящей оптической мощности и уровня напряжений в сетке стекла ОВ.

Воздействие импульсного фотонного излучения в условиях, когда поглощенная доза может достигать сотен Грей, время импульса 20 нс, а максимальная энергия квантов излучения до 40 МэВ, приводит к увеличению РНП на несколько порядков величины, по сравнению с РНП при непрерывном воздействии ИИ. Поэтому в случаях применения в ВОИД достаточно большой длины ОВ (более сотен метров) важно не столько увеличение РНП при воздействии ИИ, сколько время восстановления характеристик ОВ после импульса ИИ до максимально допустимого уровня РНП.

На Рисунке 2 для образцов ОВ $PSiO_2$ приведены типичные результаты зависимости РНП на длине волны 1550 нм от времени после воздействия импульса ИИ. На графиках РНП наблюдаются две временные области, в которых скорость релаксации РНП заметно отличается, что может быть связано с распадом двух разных групп РЦО, с разными характерными временами жизни. Далее, в соответствии с работой [14], будем называть первую группу короткоживущих РЦО собственными, а вторую группу долгоживущих РЦО – деформационными автолокализованными дырками.

Сравнение результатов исследования образцов ОВ $PSiO_2$, изготовленных по исходному и доработанному вариантам технологии показало, что чувствительность к упругим напряжениям стекла в первом варианте технологии, выраженная в зависимости РНП от величины двулучепреломления, проявляется в замедлении релаксации РНП на длине волны 1550 нм вплоть до времен 0,1 с (Рисунок 2, а).

Логично предположить, что это связано с характерным временем распада РЦО, связанных с избытком кислорода в сетке стекла, маркером которых является наличие полосы поглощения с энергией 1 эВ. Чем выше напряжения в сетке стекла, тем больше их характерное время жизни. Доработанный вариант технологии, в котором таких дефектов существенно меньше, позволил существенно уменьшить время релаксации РНП после воздействия.

На спектрах РНП образца PSiO_2 , изготовленного по доработанному варианту технологии, в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм, измеренных с шагом 1 мс во время и после воздействия, явного проявления полосы на 1 эВ уже не наблюдается (Рисунок 2, б). Это согласуется с данными по зависимости РНП(t) от времени на длине волны 1550 нм, где после 1 мс наблюдается изменение скорости релаксации РНП. Поэтому выдвинуто предположение, что короткоживущие РЦО связаны, в том числе, с проявлениями полосы поглощения в области 1 эВ.

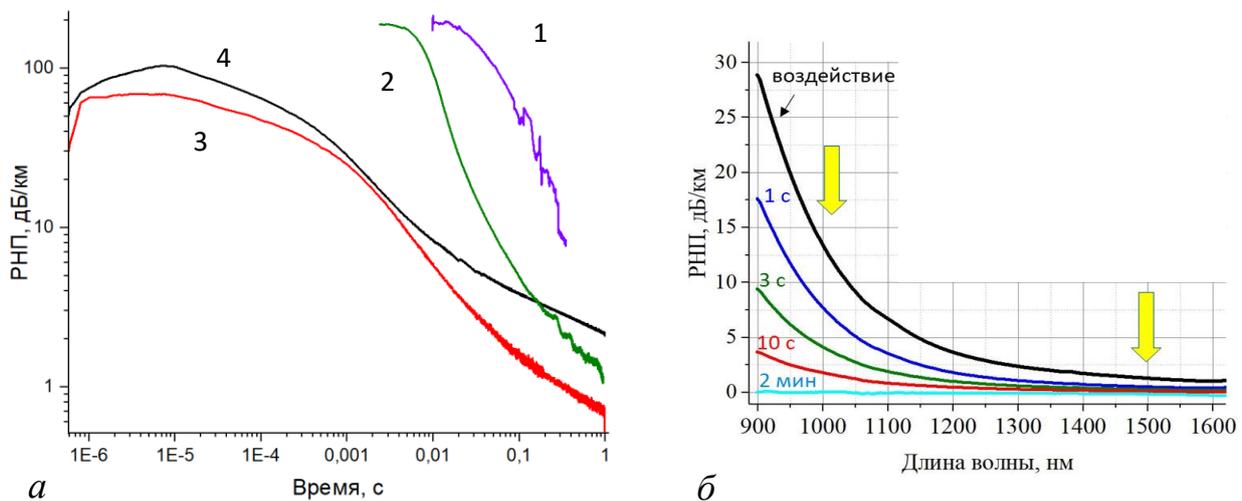


Рисунок 2 – РНП PSiO_2 : (а) на $\lambda = 1550$ нм, кривые 1,2 – PSiO_2 с большой интенсивностью полосы 1 эВ, 3,4 – PSiO_2 с малой интенсивностью полосы 1 эВ (1 – $B=7,2 \times 10^{-4}$, $D=28$ Гр, $P_0=25$ мкВт; 2 – $B=6,0 \times 10^{-4}$, $D=27$ Гр, $P_0=25$ мкВт, 3 – $B=6,1 \times 10^{-4}$, $D=21$ Гр, $P_0=10$ мкВт, 4 – $B=6,1 \times 10^{-4}$, $D=450$ Гр, $P_0=31$ мкВт); (б) – РНП PSiO_2 с малой интенсивностью полосы с энергией 1 эВ ($B=6,1 \times 10^{-4}$) в диапазоне $\lambda = 900$ -1600 нм через 1 мс, 1 с, 3 с, 10 с, 2 мин после воздействия импульса фотонов $D_p = 20$ Гр

Для определения характера процессов, проходящих при релаксации РНП, вызванных собственными и деформационными РЦО в зависимости от условий опыта и состава сердцевины ОВ все экспериментальные данные были проанализированы с помощью подходов химической кинетики, а также проведена их математическая аппроксимация несколькими способами. С учетом закона Бугера-Ламберта-Бера РНП пропорциональны концентрации РЦО, поэтому для определения характера процессов, проходящих при релаксации, зависимость РНП(t) проанализирована с помощью функциональной зависимости Колмогорова – Авраами [15]:

$$\alpha = 1 - \exp(-k \cdot t^n), \quad (3)$$

где α – доля вещества (в нашем случае доля центров окраски) претерпевшая превращение к моменту времени t , k – константа скорости, t – время, n – величина показателя степени. Поскольку в начальный момент времени после воздействия РНП максимальны, то α определяется как $\alpha = 1 - \text{РНП}(t)$, где РНП(t) нормированы на 1. Анализ данных с помощью функциональной зависимости Колмогорова – Авраами показал, что на начальный участок после воздействия (несколько микросекунд) находится в бездиффузионной области, а далее процесс является диффузионным.

Для всех исследуемых образцов ОВ, включая PGeO_2 , наблюдаемый порядок реакции изменения $C(t)$ дробный и больше 2. Анализ результатов указывает на то, что порядок реакции изменяется во времени, поскольку рекомбинация РЦО является сложным, возможно многостадийным процессом. При этом на зависимостях логарифма скорости релаксации РНП ($\lg v$) от логарифма РНП(t) выделяются два продолжительных почти линейных участка (Рисунок 3) с различными значениями наблюдаемого порядка реакции, т.е. с двумя разными характерными временами релаксации, что подтверждает предположение о наличии двух разных групп РЦО.

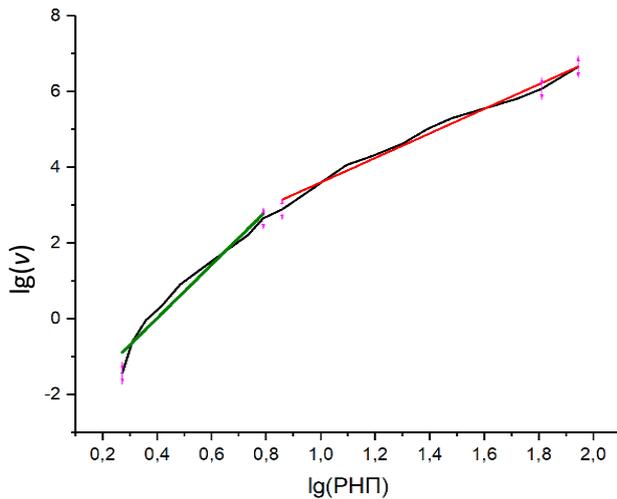


Рисунок 3 – Зависимость логарифма скорости релаксации РНП от логарифма РНП для образца PGeO_2 в свободной намотке после воздействия импульса фотонов; $D = 29$ Гр, 22 °С, $n_1 = 3,24$, $n_2 = 7,08$

Для образцов PGeO_2 впервые показано наличие процессов релаксации РЦО с двумя разными характерными временами после воздействия импульсного ИИ, аналогичных процессам релаксации для ОВ с кварцевой сердцевиной. Для единообразия РЦО в ОВ в PGeO_2 будем также называть собственными и деформационными центрами окраски, при этом их физическая природа может отличаться от РЦО в ОВ с кварцевой сердцевиной.

Для математической аппроксимации РНП(t) опробованы три варианта зависимостей, в которых учитывались независимые вклады от собственных и деформационных РЦО:

1. Сумма растянутых экспонент Кольрауша [A12]:

$$\text{РНП} = A_{\text{соб}} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\text{соб}}}\right)^{\beta_{\text{соб}}}} + A_{\text{деф}} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\text{деф}}}\right)^{\beta_{\text{деф}}}}, \quad (4)$$

где эмпирические коэффициенты: $A_{\text{соб}}$, $A_{\text{деф}}$ – РНП для собственных и деформационных РЦО в момент времени $t = 0$; $\tau_{\text{соб}}$, $\tau_{\text{деф}}$ – характерное время релаксации собственных и деформационных РЦО соответственно; $\beta_{\text{соб}}$, $\beta_{\text{деф}}$ – показатель степени от 0 до 1 для РЦО каждого типа; коэффициенты определялись, исходя из достижения коэффициента детерминации R^2 не хуже 0,93.

2. Растянутая кинетика второго порядка [14]:

$$\text{РНП} = \frac{C_{\text{соб}}}{1 + (t/\tau_{\text{соб}})^{\alpha_{\text{соб}}}} + \frac{C_{\text{деф}}}{1 + (t/\tau_{\text{деф}})^{\alpha_{\text{деф}}}}, \quad (5)$$

где эмпирические коэффициенты: $C_{\text{соб}}$, $C_{\text{деф}}$ – РНП в момент времени $t = 0$; $\tau_{\text{соб}}$, $\tau_{\text{деф}}$ – характерное время жизни; $\alpha_{\text{соб}}$, $\alpha_{\text{деф}}$ – показатель степени от 0 до 1 для РЦО каждого типа; эти коэффициенты определялись аналогично первому случаю.

Для образцов ОВ в свободной намотке коэффициент детерминации достигал 0,99. При этом для образцов в виде гироскопических контуров аппроксимация уравнением кинетики реакции второго порядка оказалась невозможной, поскольку показатели степени становились больше 1, что запрещено моделью.

3. Модель кинетики реакции n порядка [16]:

Расчетные кривые РНП(t) восстанавливались из двух слагаемых по известным формулам химической кинетики, в которых значения наблюдаемых порядков реакции n соответствовали двум наиболее протяженным участкам на графике зависимости $\lg(v)$ от $\lg(\text{РНП})$ соответствующего образца. Также определялись константы скорости реакции и характерные времена релаксации. Точность аппроксимации с помощью уравнения кинетики реакции n порядка составила менее 0,45, что ожидаемо, поскольку для расчета использовались средние значения n .

Эмпирические коэффициенты для исследуемых образцов совпали между собой по порядку величины для всех трех зависимостей. Также стоит отметить, что именно показатели степени для первого и второго варианта зависимостей являются характеристикой каждого типа РЦО. Показатели степени являются функционально зависимыми от величины относительной деформации сетки стекла ОВ и увеличиваются при ее увеличении. Таким образом, сумма растянутых экспонент Кольрауша оказалась единственной зависимостью, корректно аппроксимирующей экспериментальные кривые РНП как для образцов ОВ в свободной намотке, так и в виде гироскопических контуров.

На Рисунке 4 приведен пример экспериментальной и расчетной зависимостей РНП, а также вклады в РНП от собственных и деформационных дырок для образца каркасного волоконного контура из ОВ PSiO_2 . В течение 0,1 с после импульса ИИ основной вклад в РНП вносят собственные дырки, вклад деформационных дырок невелик и заметен на временах от 0,1 до 1 с.

Для установления функциональных зависимостей эмпирических коэффициентов аппроксимации от условий эксперимента исследовано влияние дозы в импульсе, температуры, величины входной оптической мощности и величины относительной продольной деформации стекла сердцевина ОВ.

Доза в импульсе. Экспериментальные данные РНП ОВ как с германосиликатной, так и с кварцевой сердцевиной позволяют считать закономерным монотонный рост максимальных РНП в зависимости от дозы в импульсе D_p (Рисунок 5). До значений $D_p \leq 450$ Гр величина дозы в импульсе влияет только на количество возникающих центров окраски, как короткоживущих, так и долгоживущих. При $D_p \geq 650$ Гр дополнительно изменяются все эмпирические коэффициенты, что свидетельствует о изменении структуры стекла ОВ при воздействии ИИ.

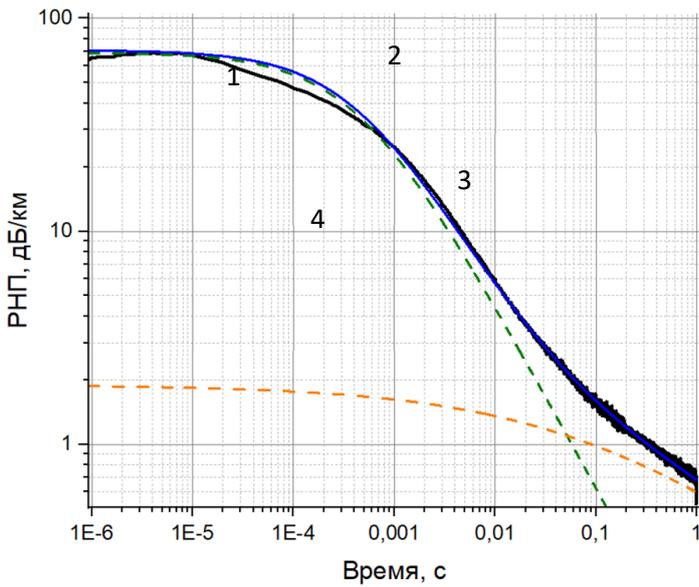
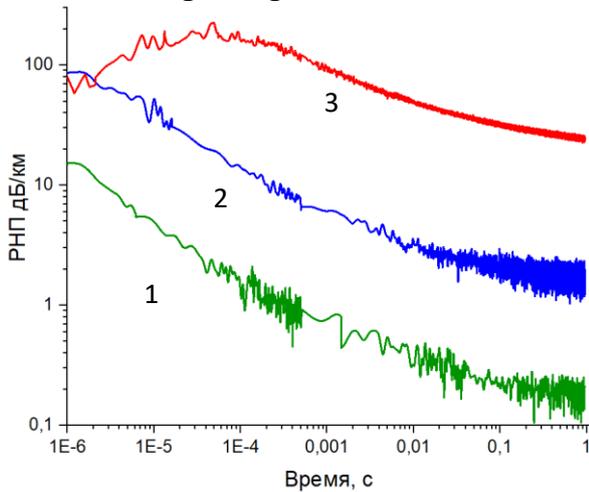
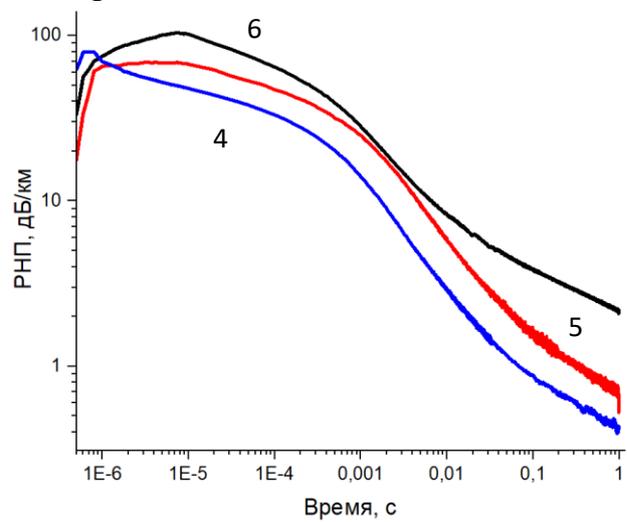


Рисунок 4 – Релаксация РНП для образца каркасного волоконного контура из $OV\text{PSiO}_2$, кривые: 1 – экспериментальная кривая, 2 – расчетная кривая, 3 – вклад собственных дырок, 4 – вклад деформационных дырок; $D=22$ Гр, $P_0 = 30$ мкВт, 22°C

также радиационного рассеивания энергии. Поскольку наряду с релаксацией РЦО идет процесс образования новых центров, то зависимость РНП имеет немонотонный характер и на ней заметны точки перегиба.



a



б

Рисунок 5 – Зависимость РНП от времени для $OV\text{PGeO}_2$ (*a*) при разных дозах в импульсе: 1 – $D_p = 6$ Гр, 2 – $D_p = 29$ Гр, 3 – $D_p = 650$ Гр; зависимость РНП от времени для $OV\text{PSiO}_2$ (*б*) при разных дозах в импульсе: 4 – $D_p = 5$ Гр, 5 – $D_p = 22$ Гр, 6 – $D_p = 450$ Гр; $P_0 = 31$ мкВт, $\lambda = 1550$ нм, 22°C

Количество возникающих короткоживущих РЦО стремится к насыщению при увеличении дозы в импульсе и может быть выражено логарифмической зависимостью $C_{\text{соб}} = f(\log D_p)$, а для долгоживущих – степенной зависимостью от D_p : $C_{\text{деф}} = f(D_p^\beta)$, поскольку насыщения не наблюдается (Рисунок 6). Также для больших доз в импульсе зафиксирован рост РНП после окончания импульсного воздействия (Рисунок 5). Выдвинуто предположение, что поскольку энергия образования РЦО довольно мала по сравнению с энергией воздействующего гамма-кванта, то требуется время для уменьшения этой энергии за счет процессов образования вторичных и последующих гамма-квантов, имеющих меньшую энергию, а

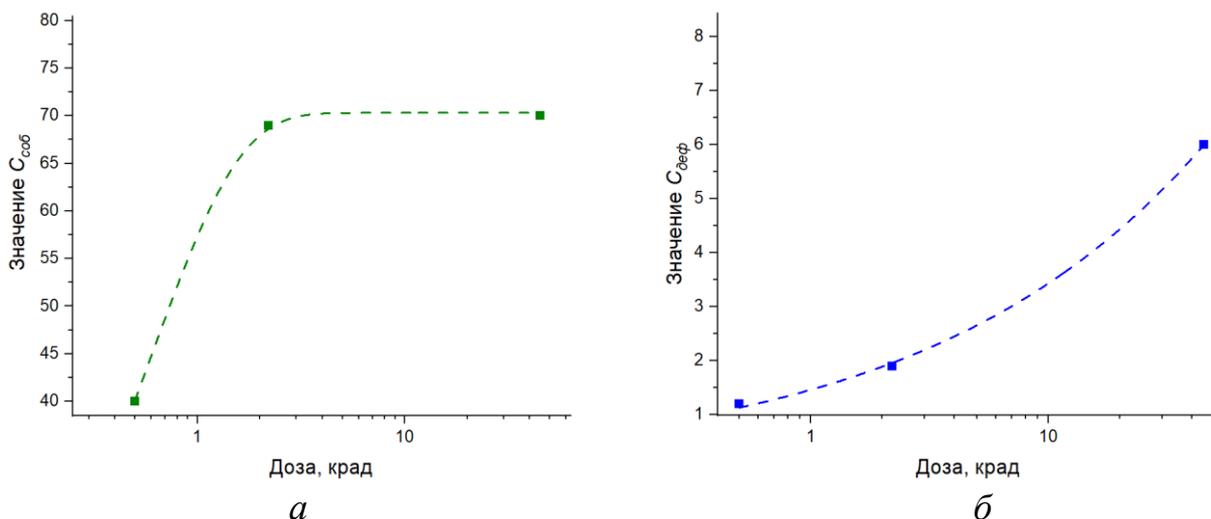


Рисунок 6 – Зависимости от дозы в импульсе коэффициентов C_{sob} (дБ/км) собственных дырок (а) и коэффициентов $C_{деф}$ (дБ/км) деформационных дырок (б)

Температура эксперимента. Показано, что изменение температуры приводит к изменению времен релаксации как долгоживущих РЦО (деформационных дырок), так и короткоживущих РЦО (собственных дырок), не затрагивая существенно остальные составляющие. Для обоих типов дефектов зависимость характерного времени релаксации РЦО от температуры в опыте удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией. На Рисунке 7, б показана зависимость от температуры характерного времени релаксации короткоживущих РЦО.

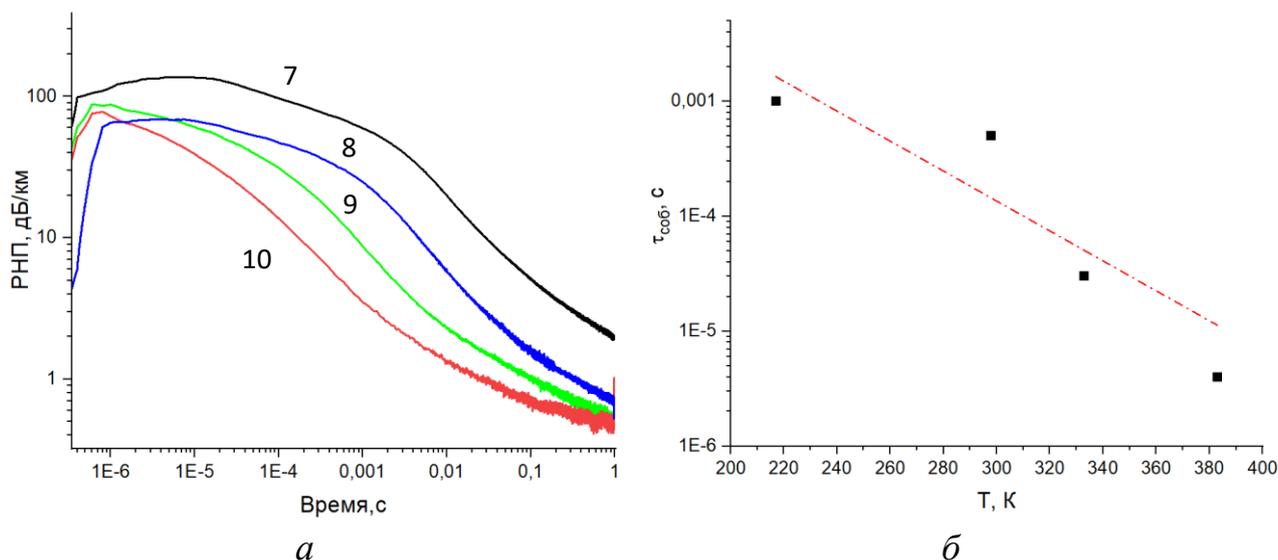


Рисунок 7 – Зависимость РНП для ОВ $PSiO_2$ от температуры при дозе в импульсе 2 крад и при вводимой оптической мощности 31 мкВт: 7 – $T = -56$ °С, 8 – $T = 25$ °С, 9 – $T = 60$ °С, 10 – $T = 110$ °С; Зависимость τ_{sob} для $PSiO_2$ от температуры, доза в импульсе 20 Гр, $P_0 = 31$ мкВт

Уровень входной оптической мощности (P_0). Влияние величины P_0 на РНП особенно значимо для ОВ с кварцевой сердцевиной. Изменение величины P_0 приводит в первую очередь к изменению характерного времени релаксации τ_{sob} (Рисунок 8, а).

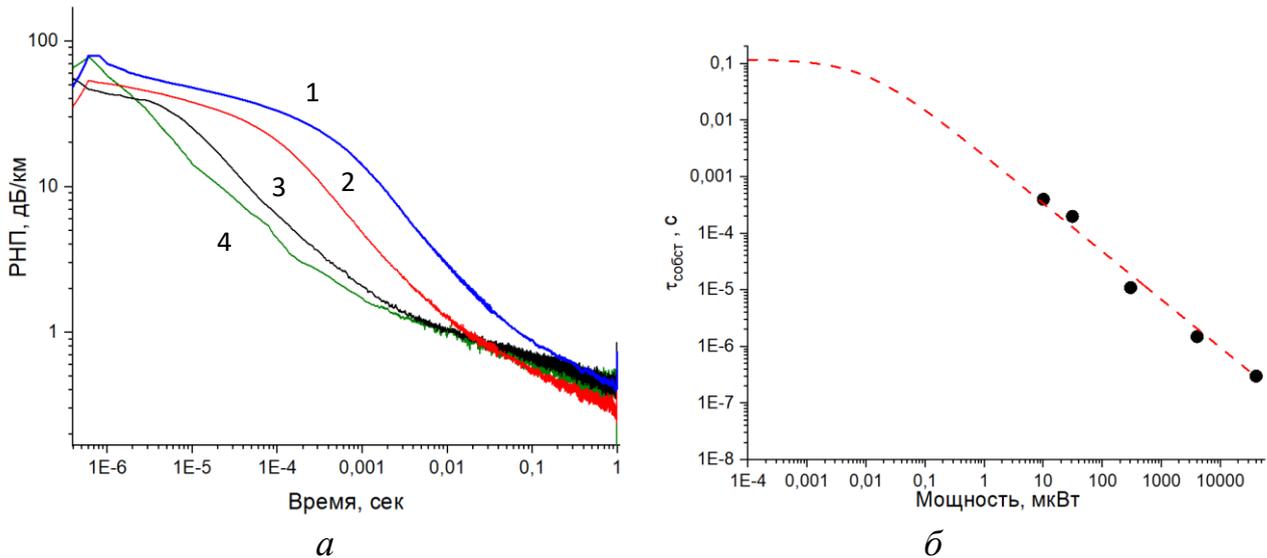


Рисунок 8 – (а) – зависимость РНП от времени для ОВ ПSiO₂ при дозе в импульсе 0,5 крад, при разной величине P_0 на $\lambda = 1550$ нм, мкВт: 1 – $P_0 = 31$, 2 – 300, 3 – 4000, 4 – 40 000; (б) – зависимость характерного времени релаксации собственных дырок ОВ ПSiO₂ от величины входной оптической мощности (пунктирная линия – аппроксимация)

Величина P_0 в данном случае является аналогом температуры, ускоряющей скорость превращения. Зависимость $\tau_{\text{соб}}$ от величины P_0 вполне удовлетворительно аппроксимируется функцией «растянутой» кинетики второго порядка (Рисунок 8, б, коэффициент детерминации 0,86) и позволяет спрогнозировать время жизни собственных дырок в образце при пассивном облучении:

$$\tau_{\text{соб}} = \tau_0 / (1 + (P_0/\zeta)^{\alpha_{\text{соб}}}), \quad (6)$$

где τ_0 – эмпирический коэффициент, время жизни РЦО при $P_0=0$; ζ – эмпирический коэффициент, характерная мощность оптического излучения. Для исследуемых образцов и доз в импульсе $\tau_0 = 0,12$ с, что на пять порядков больше, чем для случая величины P_0 несколько милливатт, $\zeta = 0,01$ мкВт.

Из аппроксимации зависимости значений натурального логарифма константы скорости реакции от обратной оптической мощности (по аналогии с зависимостью Аррениуса) получена оптическая мощность активации процесса распада собственных дефектов ~ 100 мкВт. Выдвинуто предположение, что увеличение мощности оптического излучения увеличивает вероятность поглощения энергии дырками и преодоления потенциального барьера образования дырки, при постоянной величине энергии поглощенного кванта.

Величина относительной продольной деформации стекла сердцевины ОВ. Впервые проанализированы зависимости $\tau_{\text{соб}}$, $\tau_{\text{деф}}$ и энергии активации распада РЦО на $\lambda=1550$ нм от величины сдвига частоты Бриллюэна Δf_b , и величины продольной относительной деформации $\Delta \varepsilon_{zz}$ сетки стекла сердцевины ОВ.

Увеличение концентрации GeO_2 в сердцевине приводит к уменьшению компактности сетки стекла ОВ и выражается уменьшением величины Δf_b [4, 17]. При изготовлении гироскопического контура в ОВ вносятся внутренние упругие напряжения, что приводит к увеличению величины относительной продольной

деформации $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ и величины Δf_b . Поэтому образцы PGeO_2 в свободной намотке характеризовались наименьшей величиной Δf_b , а образцы PSiO_2 в виде гироскопического контура – наибольшим значением Δf_b (Рисунок 9). Изменения величины $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ отсчитывались от PGeO_2 в свободной намотке (для этих образцов величина $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ принималась равной нулю).

Поскольку все исследуемые образцы PGeO_2 , ISiO_2 и PSiO_2 изготовлены на одном типе технологического оборудования с использованием одних исходных материалов и имеют примерно одинаковое содержание примесей, таких как OH -группы, хлор и др., то их можно рассматривать как единую группу образцов, отличающихся величинами $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ и Δf_b .

Принимая во внимание малые и полностью релаксируемые РНП в ОБ с германосиликатной сердцевиной при малой поглощенной дозе, также как и в ОБ с кварцевой сердцевиной, несмотря на то, что РНП в этих типах ОБ формируются различными РЦО, далее будем рассматривать процессы релаксации РНП в образцах PGeO_2 , ISiO_2 и PSiO_2 с единых позиций.



Рисунок 9 – Значения сдвига частоты Бриллюэна для образцов PGeO_2 и PSiO_2 в виде свободной намотки и гироскопических контуров по мере его возрастания

Установлено, что увеличение $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ приводит к увеличению РНП при малых временах релаксации после импульса ИИ и снижению РНП при относительно больших временах (Рисунок 10). Аппроксимация зависимости $\text{РНП}(t)$ показала, что с ростом Δf_b (и $\Delta\varepsilon_{ZZ}$) тенденцию к увеличению имеют все коэффициенты, кроме $\tau_{\text{деф}}$. На Рисунках 11, *a* и *б* приведены два варианта аппроксимационных зависимостей для величины $\tau_{\text{деф}}$ при увеличении $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ с практически одинаковым значением коэффициента детерминации (более 0,98). В первом варианте с ростом $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ величина $\tau_{\text{деф}}$ экспоненциально уменьшается (зависимости $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ от ε_{ZZ} этого варианта расчета приведены на на Рисунке 11, *a*). Второй вариант расчета показывает наличие экстремума для зависимости $\tau_{\text{деф}}(\Delta\varepsilon_{ZZ})$: при переходе к образцам PSiO_2 $\tau_{\text{деф}}$ начинают возрастать с ростом $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ (Рисунок 11, *б*). При этом для зависимости $\tau_{\text{соб}}(\Delta\varepsilon_{ZZ})$ разночнений нет: величина $\tau_{\text{соб}}$ экспоненциально возрастает при увеличении $\Delta\varepsilon_{ZZ}$. Для образца ISiO_2 (заполненные кружок и ромбик на Рисунках 11, *a* и *б*) условия опыта отличались величиной P_0 ($P_0=5$ мВт вместо 31 мкВт). Расчетные значения $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ при $P_0 = 31$ мкВт с учетом (6) для образца ISiO_2 (показаны пустыми кружком и ромбиком) переместились к аппроксимационным зависимостям, что свидетельствует в пользу их неслучайного характера.

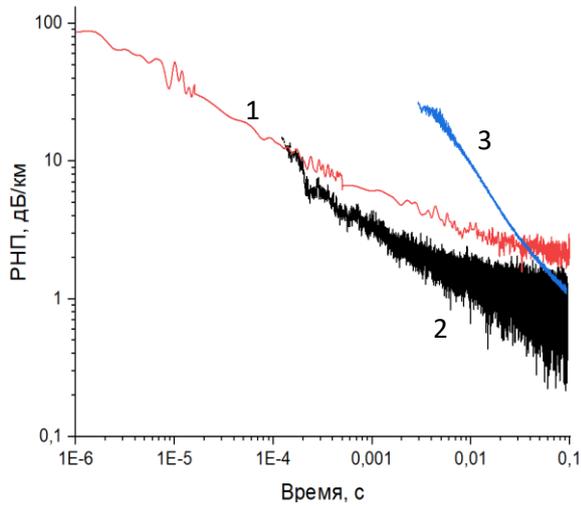
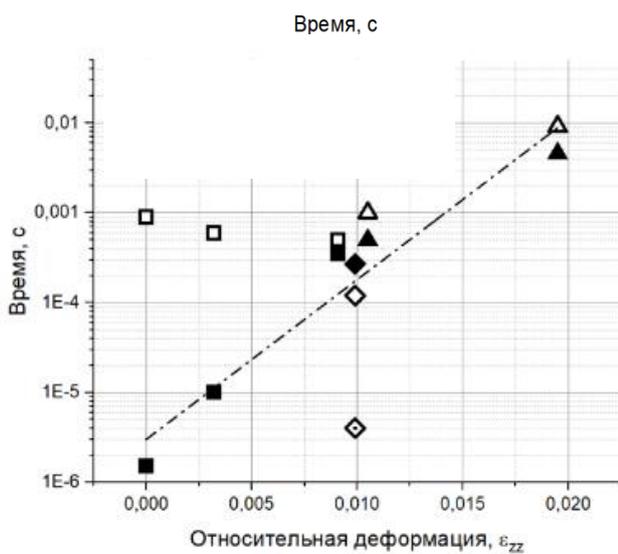
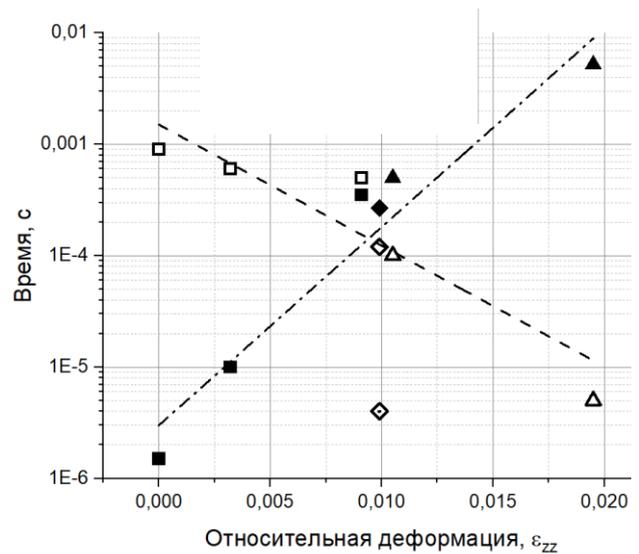


Рисунок 10 – Зависимость $RNP(t)$ ОВ $PGeO_2$, кривые 1 – в свободной намотке, 2 – БВК, 3 – ВК при дозе в импульсе 2 крад, $P_0=31$ мкВт, $\lambda=1550$ нм



a



б

Рисунок 11 – Рассчитанные значения $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ в зависимости от ϵ_{zz} , первый вариант расчета (*a*), второй вариант расчета (*б*) в образцах $PGeO_2$ (квадраты), $ISiO_2$ (ромбики), $PSiO_2$ (треугольники). Для собственных дырок значки закрышены черным, для деформационных оставлены без заливки.

На основе результатов, опубликованных в работах [A9], [A11 - A14] и отраженных материалах конференций [A19, A20, A25], сформулировано **второе научное положение**:

- наличие внутренних упругих напряжений в ОВ типа «Панда» с германо-силикатной сердцевиной является условием возникновения «короткоживущих РЦО», вносящих вклад в РНП на длине волны 1550 нм, при воздействии импульсного ИИ.

На основе результатов, опубликованных в работах [A2], [A10-A12] и отраженных материалах конференций [A17-A19, A20, A25], сформулировано **третье научное положение**

- для «короткоживущих» РЦО, вызванных в ОВ воздействием импульсного ИИ, характерное время релаксации экспоненциально возрастает с увеличением относительной продольной деформации ОВ.

В разделе 4.2 представлены результаты исследования процессов релаксации $RNP(t)$ ОВ при воздействии импульсного фотонного и гамма-нейтронного

излучения. В экспериментах изменялась продолжительность импульса, присутствовал или отсутствовал поток нейтронов.

Импульсное воздействие потока нейтронов вызывает замедление релаксации РНП, вызванных короткоживущими РЦО, по сравнению с аналогичным по дозе гамма-излучения воздействием импульсного фотонного излучения. Наличие легирующих примесей в сердцевине ОВ ускоряет процессы релаксации РНП после импульсного воздействия потока нейтронов, а внутренние упругие напряжения замедляют их. Наибольшее замедление релаксации зафиксировано для образцов PSiO_2 в виде гироскопических контуров, промежуточное значение получено для ОВ с германосиликатной сердцевиной, а для активного ОВ с высоким уровнем легирования как ионами германия, так и алюминия не зафиксировано отдельного вклада во время релаксации от нейтронов.

Впервые удалось зафиксировать перераспределение РНП из длинноволновой области в коротковолновую после окончания импульсного гамма-нейтронного воздействия для образцов PSiO_2 . При этом в течение нескольких секунд в коротковолновой области РНП возрастают, достигают максимума, и только затем снижаются (Рисунок 12, а). Перераспределение РНП указывает на обратимую перестройку структуры стекла. Сразу после воздействия РНП для $\lambda=1550$ нм больше, чем для более коротковолновой области, что скорее всего вызвано дополнительной деформацией сетки стекла из-за воздействия нейтронов, поскольку РЦО в длинноволновой области вызывается колебаниями фононной подрешетки, которая напрямую связана с деформациями сетки стекла [А12]. Это подтверждается тем, что при одинаковой дозе в импульсе по гамма-излучению, в опыте с импульсным гамма-нейтронным воздействием величины максимальных РНП и $\tau_{\text{соб}}$ больше, а $\tau_{\text{деф}}$ меньше для всех исследуемых образцов ОВ (Рисунок 12, б), так же, как и при внешнем внесении деформаций в ОВ.

Выводы по главе 4

1. Аппроксимирующая функция для зависимости РНП(t) при различных значениях входной мощности (P_0), величины относительной деформации (ε), при заданной температуре и дозе в импульсе D_p до 450 Гр имеет вид:

$$\text{РНП}(t) = A_{\text{соб}}(\log D_p, \varepsilon) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\text{соб}}}\right)^{\beta_{\text{соб}}(\varepsilon)}} + A_{\text{деф}}(D_p^\alpha, \varepsilon) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\text{деф}}(\varepsilon)}\right)^{\beta_{\text{деф}}(\varepsilon)}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{соб}} = \frac{\tau_0(\varepsilon)}{1 + \left(\frac{P_0}{\zeta}\right)^{\alpha_{\text{соб}}}}$, α – показатель степени, P_0 – характерный уровень входной оптической мощности, $\tau_0(\varepsilon)$ – характерное время жизни собственных дырок при $P_0=0$, функционально зависящее от величины ε .

Для D_p более 450 Гр следует учитывать зависимость всех эмпирических коэффициентов от дозы в импульсе. Зависимость РНП(t) от температуры носит экспоненциальный характер. Определение функциональных зависимостей эмпирических коэффициентов уравнения (7) позволяет численно прогнозировать РНП при отличающихся условиях опыта.

2. Импульсное гамма-нейтронное воздействие вызывает замедление релаксации РНП, вызванных короткоживущими РЦО, по сравнению с аналогичным

по дозе гамма-излучения воздействием импульсного фотонного излучения. Леггирующие примеси в сетке стекла ОВ способствуют релаксации РНП, а внутренние упругие напряжения замедляют их.

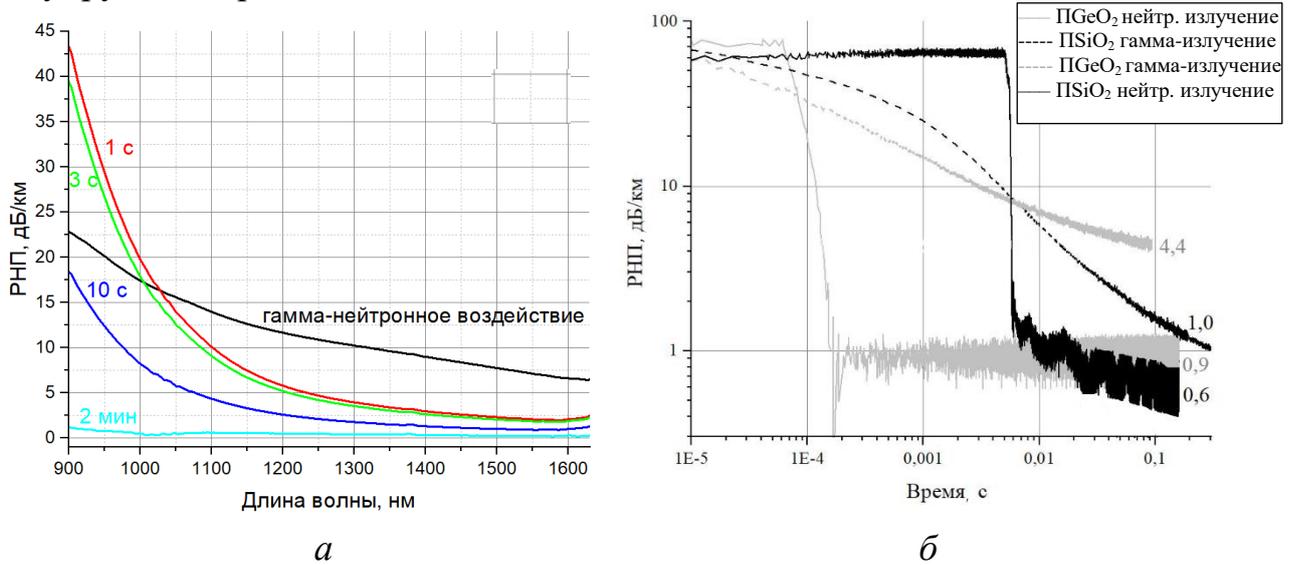


Рисунок 12 – (а) Зависимость от λ РНП ПSiO₂ непосредственно после гамма-нейтронного воздействия при различных временах релаксации; релаксация РНП на $\lambda=1550$ нм (б) при воздействии импульсного фотонного излучения (доза в импульсе 2 крад) и гамма-нейтронного (доза в импульсе 2 крад, поток нейтронов 1×10^{13} н/см²) для ПSiO₂ и ПGeO₂

Пятая глава посвящена изучению вопросов, касающихся радиационной стойкости СВИ. Уровень выходного излучения СВИ определяет запас интенсивности сигнала на весь оптический тракт ВОГ, а стабильность его спектральных характеристик определяет точность определения угловой скорости объекта. Поэтому в условиях воздействия ИИ необходимо минимизировать деградацию спектральных и мощностных характеристик СВИ.

Основное внимание в этом разделе сфокусировано на исследовании свойств активного ОВ в составе однопроходной схемы СВИ со встречной накачкой, как компонента, наиболее подверженного влиянию ИИ. Однопроходная схема СВИ применена для минимизации влияния конфигурации оптической схемы на показатели РОС активного ОВ. Исследовались радиационно-стойкие активные ОВ с фосфоалюмосиликатной, алюмосиликатной, алюмогерманосиликатной матрицами стекла, легированные ионами эрбия и церия, разработанного ИЦВО РАН и ИХВВ РАН по заказу и совместно с ПАО «ПНППК».

Для активного ОВ с алюмогерманосиликатной матрицей ($Al_2O_3-GeO_2(Er/Ce)$) показано достижение требуемых характеристик СВИ для ВОГ – ширина спектра излучения при выходной мощности СВИ 35 мВт не менее 6 нм на полувысоте. Исследуемые активные ОВ являлись одномодовыми на длине волны накачки 980 нм с поглощением на длине волны 1530 нм ~ 20 дБ/м. Фосфоросиликатная матрица стекла активных ОВ в СВИ не позволила получить необходимую ширину спектра излучения. Таким образом, алюмогерманосиликатная матрица стекла является предпочтительной для стекла сердцевины легированных эрбием активных ОВ, применяемых в источниках излучения для ВОГ.

Легирование активных ОВ ионами церия позволило значительно повысить РОС исследуемых СВИ. Сравнительные исследования активных ОВ, матрицы стекла сердцевины которых отличались только наличием или отсутствием ионов

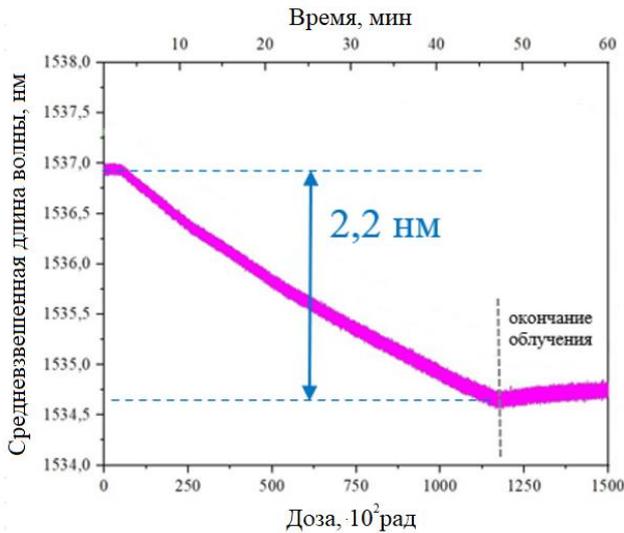


Рисунок 13. Изменение средневзвешенной длины волны однопроходного СВИ со встречной накачкой, доза в опыте 1,2 кГр, мощность дозы 1,1 Гр

церия, показали, что воздействие непрерывного ИИ с мощностью дозы 0,6 Гр/с при поглощенной дозе 450 Гр привело к уменьшению выходной мощности СВИ с активными ОВ без ионов церия больше чем на 4 дБ (более 60 %), а с применением легирования ионами церия – менее 1 дБ (менее 20 %).

При сравнении активных ОВ с различным содержанием германия в сердцевине зафиксировано повышение РОС при увеличении концентрации германия. Это согласуется с данными [18, 19].

При воздействии непрерывного гамма-излучения выявлено квазилинейное изменение РНП и средневзвешенной длины волны $\Delta\lambda_{\text{ср}}$ от величины

поглощенной дозы (Рисунок 13) [A11]. На основе результатов, опубликованных в работах [A11], [A15] и отраженных материалах конференций [A21, A22, A27, A30, A32-A35, A36], сформулировано **четвертое научное положение:** средневзвешенная длина волны СВИ изменяется пропорционально поглощенной дозе при воздействии непрерывного ИИ.

При поглощенной дозе 1,2 кГр уменьшение выходной оптической мощности СВИ составило 2,3 дБ или в пересчете на длину контура активного ОВ РНП = 0,002 дБ/м/крад. У коммерчески доступного аналога ОВ IXF-RAD-AMP-2 (iXFiber, Франция) в спецификации приводятся данные по стойкости 0,07 дБ/м/крад [20]. Для поглощенной дозы 1 кГр $\Delta\lambda_{\text{ср}} = 2,2$ нм, что неприемлемо для точных ВОГ, но квазилинейный характер зависимости позволяет учитывать это изменение как систематическую погрешность.

В случае импульсного воздействия активное ОВ оказалось наиболее стойким оптическим компонентом ВОГ: оптическая мощность СВИ при воздействии импульсного фотонного излучения через 1 мс после воздействия уже составила 98 % от первоначальной, доза в импульсе при этом составила 1,5 крад, с изменением $\Delta\lambda_{\text{ср}}$ на 60 ppm (Рисунок 14). В активных ОВ решетка наиболее «рыхлая» по сравнению с ОВ с германосиликатной и кварцевой сердцевиной из-за высокой степени легирования оксидами алюминия и германия. Поскольку для случая гамма-нейтронного воздействия на активных ОВ РНП пропорциональны дозе гамма-излучения, отдельного вклада от потока нейтронов не выявлено, а в ОВ с германосиликатной сердцевиной релаксация происходит быстрее, чем в ОВ с

кварцевой сердцевиной при одних условиях опыта, то прослеживается тенденция замедления релаксации РНП после воздействия потоком нейтронов при увеличении компактности сетки стекла, связанная с обратимой локальной перестройкой сетки стекла при воздействии нейтронов и созданием дополнительных деформаций.

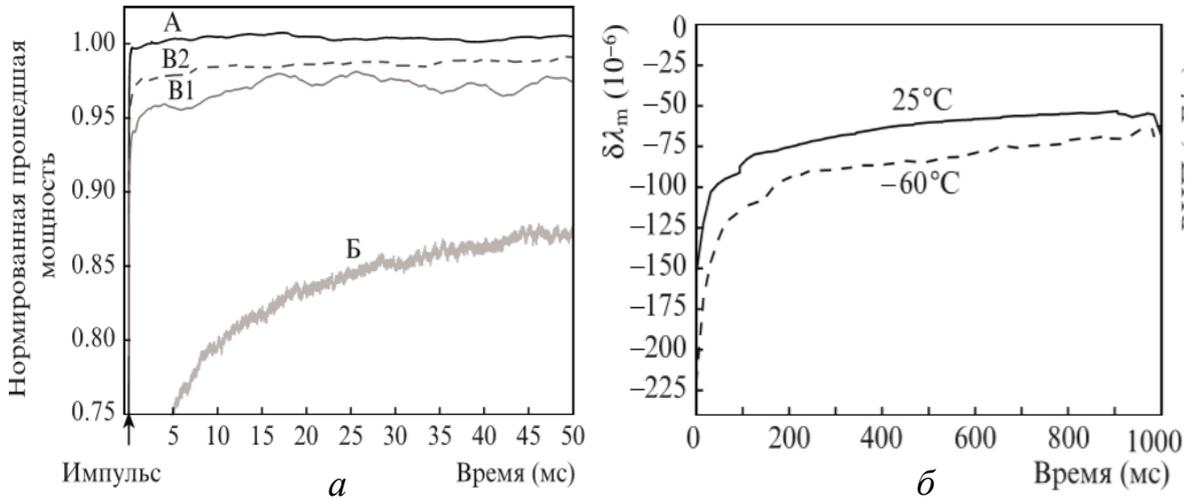


Рисунок 14 – Зависимость выходной мощности СВИ от времени при воздействии импульсного фотонного излучения (а), 15 Гр в импульсе при комнатной температуре, А – ОВ с фосфоросиликатной, Б – алюмосиликатной, В1, В2 – алюмо-германосиликатной матрицами стекла; изменение средневзвешенной длины волны для образца В2 (б), 15 Гр в импульсе при температурах $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [А3]

На основе результатов, опубликованных в работах [А2], [А3], [А10-А12] и отраженных материалах конференций [А19-А23, А32], сформулировано **пятое научное положение**: наличие легирующих примесей (германий, алюминий) в сердцевине ОВ ускоряет процессы релаксации РНП после импульсного воздействия потока нейтронов, а внутренние упругие напряжения замедляют их.

Выводы по главе 5

Алюмо-германосиликатная матрица стекла активных ОВ с высоким уровнем легирования алюминием и германием в сочетании с легированием церием позволяет обеспечить высокие показатели стойкости не только к непрерывному, но и импульсному излучению эрбиевых активных ОВ при ширине спектра излучения не менее 5 нм. При этом изменение средневзвешенной длины волны при воздействии ИИ требует учета и коррекции, например, как систематической погрешности.

Вклад от потока нейтронов в РНП ОВ зависит от степени легирования сетки стекла, для активных ОВ РНП определяется только дозой гамма излучения.

В шестой главе рассматриваются результаты исследований РОС оптических характеристик СИОМ к воздействию непрерывного и импульсного ИИ.

Для случая непрерывного гамма-излучения подтверждены литературные данные о высокой стойкости протонообменных волноводов ниобата лития. Для дозы 1 кГр на длине волны 1550 нм зафиксированы РНП не более 0,06 дБ, при этом из-за эффекта фотообесцвечивания увеличивается значение коэффициента

сохранения поляризации излучения (СПИ) (Рисунок 18). После окончания облучения характеристики полностью восстанавливаются. В результате воздействий на образцы СИОМ импульсами фотонного и гамма-нейтронного излучений зафиксированы изменения выходной оптической мощности, коэффициента сохранения поляризации излучения и коэффициента деления в пределах разрешенных изменений характеристик СИОМ в рабочем температурном диапазоне, начиная с 5 мс после импульса (Рисунок 15, а).

Обнаружена дополнительная реакция образцов СИОМ на воздействие импульса гамма-нейтронного излучения (Рисунок 15, б): после почти полного восстановления происходит, вероятно, резкая перестройка кристаллической структуры волноводного слоя, приводящая к резкому росту РНП, и последующее плавное восстановление исходной структуры, сопровождающееся плавным уменьшением РНП. Такие переходные процессы зарегистрированы для циклов последовательных облучений на нескольких образцах СИОМ.

Выводы по главе 6

СИОМ является наиболее стойким компонентом ВОГ. При этом импульсное воздействие потока нейтронов может приводить к перестройке структуры протонообменного волновода после окончания воздействия.

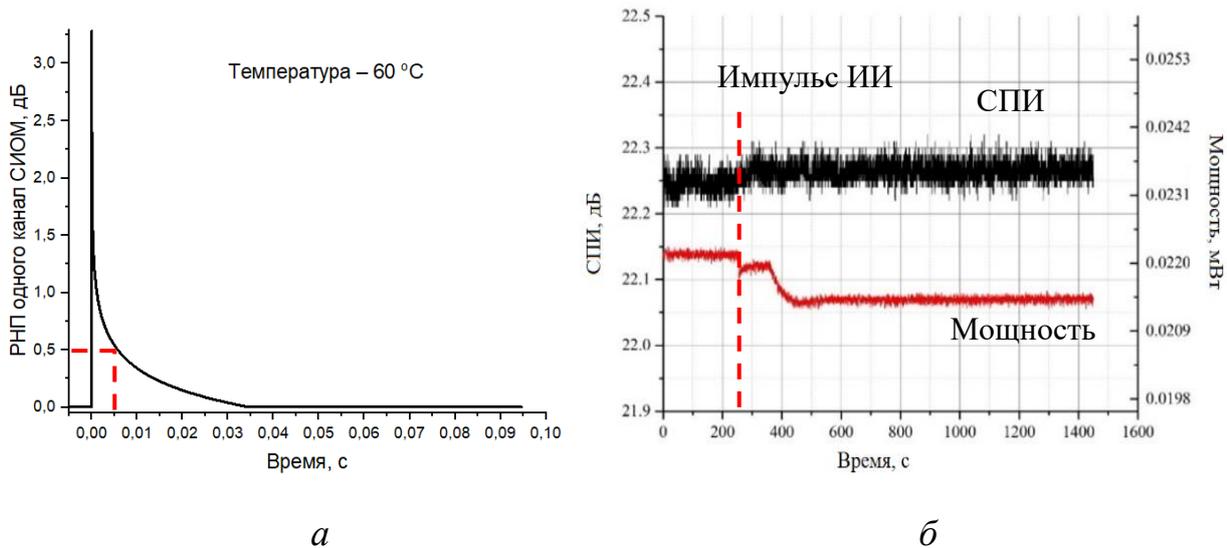


Рисунок 15 – Изменение РНП образца СИОМ после воздействия импульсного фотонного излучения (а): доза в импульсе 600 рад, минус 60 °С; изменение коэффициента сохранения поляризации излучения СПИ (черным) и выходной оптической мощности СИОМ (красным) (б): после воздействия импульсного потока нейтронов $3,2 \times 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 7,6 крад, импульс на 220-й с

В седьмой главе проведено обобщение и анализ полученных данных по стойкости рассматриваемых оптических компонентов ВОГ к воздействию ионизирующего излучения.

Рассмотрены особенности построения оптического тракта ВОГ с исследуемыми радиационно-стойкими оптическими компонентами для применения в условиях непрерывного ионизирующего излучения для наиболее типичной поглощенной дозы 1 кГр, обычно рассматриваемой для космических миссий.

Показано, что наиболее консервативная оценка для случая мощности дозы 100 рад/с (в условиях космоса обычно 10^{-5} рад/с) и отсутствия коррекции по току лазерного диода накачки однопроходного СВИ дает суммарный прирост коэффициента затухания в оптическом тракте ВОГ примерно 6,5 дБ при длине оптического волоконного контура 1 км. Это накладывает дополнительные требования на выбор лазерного диода накачки, у него должна быть возможность увеличения тока накачки для компенсации уменьшения оптической мощности СВИ. Также динамический диапазон и уровень шумов фотоприемника должен обеспечивать соотношение сигнал-шум, соответствующее техническому заданию, несмотря на уменьшение выходного сигнала СВИ.

Установлено, что наиболее уязвимым компонентом к воздействию импульсного ионизирующего излучения является оптический волоконный контур ВОГ, временем восстановления его оптических характеристик определяется время восстановления работоспособности всего ВОГ. Вклады СИОМ и СВИ можно не учитывать, поскольку время восстановления этих компонентов значительно меньше, и их характеристики восстанавливаются практически полностью.

на основе результатов, опубликованных в работах [A11], [A15], [A16] и отраженных материалах конференций [A32, A34-A36], сформулированы **шестое и седьмое научные положения:**

- радиационная оптическая стойкость волоконного контура и суперлюминесцентного волоконного источника в равной степени определяют радиационную стойкость волоконно-оптических интерферометрических датчиков при воздействии непрерывного ионизирующего излучения;

- время восстановления характеристик волоконно-оптических интерферометрических датчиков определяется временем релаксации РНП волоконного контура после воздействия импульсного ионизирующего излучения.

Обоснованы следующие рекомендации для снижения негативного воздействия ионизирующего излучения на работу ВОГ:

1. Для СВИ выбирать лазерный диод накачки с запасом увеличения тока накачки, достаточным для компенсации потери мощности в результате РНП в активных ОВ.
2. За счет конструкции и технологии изготовления минимизировать уровень внутренних напряжений в волоконном контуре чувствительного элемента ВОИД.
3. Увеличивать уровень входящей в волоконный контур оптической мощности.
4. Фотоприемник следует выбирать с динамическим диапазоном и уровнем шумов, способным обеспечить соотношение сигнал-шум на уровне не менее заданного в техническом задании с учетом уменьшения выходного сигнала СВИ.
5. Вводить компенсацию систематической погрешности среднезвешенной длины волны СВИ.

В заключении приведены основные результаты проведенных исследований и рекомендации по их практическому применению.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создан экспериментальный комплекс для исследования РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД, позволяющий определять РОС при воздействии непрерывного и импульсного фотонного (гамма) излучения и импульсного гамма-нейтронного излучения.
2. В ОВ с кварцевой сердцевиной для РЦО с полосами поглощения с энергиями 0,95 эВ и 1,12 эВ оптическое излучение с длиной волны 1550 нм является аналогом повышенной температуры и приводит к распаду РЦО, а внесение внутренних упругих напряжений приводит к резкому росту их концентрации.
3. Полученные аналитические зависимости процесса релаксации РНП ОВ позволяют прогнозировать продолжительность периода потери работоспособности ОВ после импульсного воздействия ИИ с дозой в импульсе до 450 Гр с учетом температуры, величины входной оптической мощности и величины относительной продольной деформации в образце ОВ.
4. Импульсное гамма-нейтронное воздействие по сравнению с равным по дозе импульсным фотонным (гамма) воздействием характеризуется значительно большим (до двух порядков) промежутком времени восстановления работоспособности ВОИД после воздействия.
5. Для сохранения точностных характеристик ВОИД при воздействии ИИ требуется выбор оптической схемы СВИ, обеспечивающий минимизацию изменений средневзвешенной длины волны, а также применение дополнительных мер по компенсации этих изменений как систематической погрешности.
6. Установлено сохранение поляризационных характеристик в волоконно-оптических компонентах ВОИД при воздействии ИИ.
7. Время восстановления работоспособности ВОГ после воздействия импульсного ИИ определяется характерным временем релаксации «короткоживущих» РЦО в ОВ волоконного контура.
8. При воздействии непрерывного ионизирующего излучения РНП оптического тракта ВОГ в равной мере складывается из РНП суперлюменесцентного волоконного источника и волоконного контура, РНП СИОМ являются незначительными.
9. Алюмо-германосиликатная матрица стекла эрбиевых активных ОВ за счет высокого уровня легирования алюминием и германием в сочетании с легированием церием обеспечивает ширину спектра люминесценции не менее 5 нм, необходимую в СВИ для применения в ВОГ, и высокую РОС к воздействию не только к непрерывного, но и импульсного ИИ.
10. Создана промышленная технология серийного производства радиационно-стойкого одномодового ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла с сохранением поляризации излучения, обеспечивающая высокие как начальные характеристики (уровень коэффициента затухания на $\lambda=1550$ нм до 0,8 дБ/км и величину двулучепреломления до $7,3 \times 10^{-4}$), так и показатели РОС при воздействии ИИ. Разработанное ОВ имеет улучшенные характеристики как по начальным параметрам, так и по РОС, по сравнению с аналогами: ОВ с чистой кварцевой сердцевиной и с сердцевиной, легированной азотом или фтором других производителей. Запущено серийное производство.

Список цитируемой литературы

1. Гуськов Н.А. Волоконная оптика в радиационной обстановке // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 8. С. 52–65.
2. Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Tomashuk A.L. Nitrogen doped silica core fibres: a new type of radiation-resistant fiber // Electronics Letters. 1995. Vol. 31. P. 1490-1491.
3. Kajihara K. et al. Co 60 gamma-ray-induced intrinsic defect processes in F-doped synthetic SiO₂ glasses of different fluorine concentrations // Mater. Sci. and Eng. B. 2009. Vol. 161. P. 96-99.
4. Weiwen Z., Zuyuan H., Kazuo H. Investigation of Strain- and Temperature-Dependences of Brillouin Frequency Shifts in GeO₂-Doped Optical Fibers // Journal of Lightwave Technology. 2008. Vol. 26, № 13. P. 1854-1861.
5. Кашайкин П.Ф. Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне: дис. ... к.ф.-м.н.: М.: РАН НЦВО. 2019. 147 с.
6. Girard S., Morana A., Ladaci A. et al. Recent advances in radiation hardened fiber-based technologies for space applications // Journal of Optics. 2018. Vol. 20. 10.1088/2040-8986/aad271.
7. Есипенко И.А. Построение и верификация модели нестационарного теплового воздействия на контур волоконно-оптического гироскопа с целью минимизации его теплового дрейфа: дис. ... канд. техн. наук: Пермь.: ПНИПУ. 2017. – 103 с.
8. Tomashuk, A. L., et al. Behavior of strain-assisted self-trapped holes in pure-silica optical fibers upon pulsed-X-ray irradiation // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. V. 566. P. 120880.
9. Tomashuk A.L., Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Spinov D.E., Performance of Special Radiation-Hardened Optical Fibers Intended for Use in the Telecom Spectral Windows at a Megagray Level // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45, № 3. P.1566-1569.
10. M. Alam, J. Abramczyk, U. Manyam, J. Farroni, D. Guertin Performance of optical fibers in space radiation environment // Sixth International Conference on Space Optics, Proceedings of ESA/CNES ICSO. 2006.
11. Спецификация на волокно с сохранением поляризации с нелегированной сердцевиной GyroSil 1550 Rad-Hard [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ofsoptics.com/wp-content/uploads/GyroSil-PM-Sensing-Optical-Fibers-web.pdf>.
12. Спецификация на волокно с сохранением поляризации HB1500G-RT-SB [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/single-mode-sm-fiber/pure-silica-core-sm-fiber/sm300-sc>.
13. Спецификация оптического волокна IXF-PMG-1550-80-019-E [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.cybel-llc.com/wp-content/uploads/2018/12/IXF-PMG-1550-80-019-E-LS_Product-Specification.pdf.
14. Tomashuk A.L., Kashaykin P.F., Filippov A.V. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica core optical fibers // Journal of Lightwave Technology. 2019. Vol. 37, N. 3. P. 956-963.

15. Cahn R.W., Haasen P. Physical metallurgy // North Holland. 1996.
16. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1994. Vol. 41. № 3. P. 523-527.
17. Alasia D., Fernandez A., Brichard B. et al. Study of the radiation effects on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibers // Proceedings 17th International Conference on Optical Fiber sensors. 2005. Vol. 5855.
18. Rose T.S., Gunn D., Valley C.G. Gamma and Proton Radiation Effects in Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Active and Passive Measurements // J. Lightwave Technol. 2001. Vol. 19(12). P. 1918.
19. Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Tomashuk A.L. The mechanism of the γ -irradiation effect on the bandwidth of multimode graded-index fibres // Sov. Lightwave Commun. 1992. Vol. 2, №4. P. 311-319.
20. Спецификация на активное волокно IXF-RAD-AMP-2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ixblue.com/store/ixf-rad-amp-2/>.

Список опубликованных автором работ по теме диссертации

[A1] Tomashuk A.L. Comparison study of radiation-resistant polarization-maintaining panda fibers with undoped- and N-doped-silica core / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, S.L. Semjonov, A.V. Filippov, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, **I.S. Azanova**, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, N.V. Zavyalov, E.A. Pospelova, T.V. Dimakova, V.V. Voloshin, I.L. Vorob'ev, A.O. Kolosovskii, Y.K. Chamorovskiy // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38, № 20. P. 5817-5824.

[A2] Tomashuk A.L. Pulsed-X-ray-irradiation of radiation-resistant panda fibers: dependence on dose, probe light power, and temperature / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, S.L. Semjonov, A.V. Filippov, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, **I.S. Azanova**, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, E.A. Pospelova, T.V. Dimakova, V.V. Voloshin, I.L. Vorob'ev, A.O. Kolosovskii, Y.K. Chamorovskiy // Optical Materials. 2020. Vol. 109. N. 110384.

[A3] Поносова А.А. Эрбиевые световоды с повышенной стойкостью к ионизирующему излучению для суперлюминесцентных волоконных источников / А.А. Поносова, **И.С. Азанова**, Н.К. Миронов, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, О.Л. Кель, Ю.О. Шаронова, М.А. Мелькумов // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 7. С. 693-697. Имеется перевод: Ponosova A.A. Erbium-doped optical fibre with enhanced radiation resistance for superluminescent fiber sources / A.A. Ponosova, **I.S. Azanova**, O.L. Kel, Y.O. Sharonova, N.K. Mironov, M.V. Yashkov, K.E. Riumkin, M.A. Melkumov // Quantum Electronics. 2019. Vol. 49, № 7. P. 693-697.

[A4] Kashaykin P.F. Radiation induced attenuation in pure silica polarization maintaining fibers / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, **I.S. Azanova**, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, A.V. Filippov, E.M. Dianov, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Pospelova, O.M. Tatsenko, N.S. Kuzyakina, O.V. Zverev // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. Vol. 508. P. 26-32.

[A5] Кашайкин П.Ф. Прогнозирование радиационно-наведенного поглощения света в волоконных световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого

стекла в космических применениях / П.Ф. Кашайкин, А.Л. Томашук, М.Ю. Салганский, **И.С. Азанова**, М.К. Цибиногина, Т.В. Димакова, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, № 5. С. 752-758.

Англоязычная версия: Kashaikin P.F. Prediction of radiation-induced light absorption in optical fibers with an undoped silica core for space applications / P.F. Kashaikin, A.L. Tomashuk, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, A.N. Gur'yanov, **I.S. Azanova**, M.K. Tsibinogina, T.V. Dimakova // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 64, № 5. P. 701-707.

[A6] Tomashuk A.L. Enhanced radiation resistance of pure-silica-core polarization-maintaining panda optical fibers / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, **I.S. Azanova**, Y.O. Sharonova, E.A. Pospelova, O.L. Vokhmyanina, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, S.L. Glushkov // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. Vol. 31, № 17. P. 1413-1416.

[A7] Kashaykin P.F. Gamma-radiation-induced attenuation of light in polarization-maintaining pure-silica-core panda fibers / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, **I.S. Azanova**, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, E.M. Dianov, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Pospelova // В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 6. Сер. "Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VI" 2019. N. 110290V.

[A8] Kashaykin P.F. Microscopic mechanisms of radiation-induced light attenuation in pure silica-core fibers: influence of heat treatment in the process of metal and polyimide coating application / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, **I.S. Azanova**, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, E.M. Dianov, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Pospelova // В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 6. Сер. "Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VI" 2019. N. 110290U.

[A9] Tomashuk A.L. Pulsed-bremsstrahlung-radiation effect on undoped- and Ge-doped-silica-core optical fibers at wavelength of 1.55 μm / A.L. Tomashuk, A.E. Levchenko, E.M. Dianov, A.V. Filippov, A.N. Moiseenko, E.A. Bychkova, O.M. Tatsenko, N.V. Zavialov, A.V. Grunin, E.T. Batova, M.Y. Salgansky, A.N. Guryanov, P.F. Kashaykin, **I.S. Azanova**, M.K. Tsibinogina // Journal of Lightwave Technology. 2017. Vol. 35, № 11. P. 2143-2149.

[A10] Томашук А.Л. Поглощение света, наведенное в двулучепреломляющем волоконном световоде типа "Панда" с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла импульсным воздействием ионизирующего излучения / А.Л. Томашук, П.Ф. Кашайкин, **И.С. Азанова**, А.В. Филиппов, Ю.О. Шаронова, О.Л. Вохмянина, Е.А. Бычкова, С.В. Галанова // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. Т. 45, № 12. С. 21-26.

Англоязычная версия: Tomashuk A.L. Light absorption induced in undoped-silica-core panda-type birefringent optical fiber by pulsed action of ionizing radiation / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, **I.S. Azanova**, A.V. Filippov, Y.O. Sharonova, O.L. Vokhmyanina, E.A. Bychkova, S.V. Galanova // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2018. Vol. 45, № 12. P. 385-388.

[A11] Азанова И.С. Радиационная стойкость оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа / **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, А.Д. Шевцова, Е.А. Поспелова, А.С. Вахрушев, О.Л. Вохмянина, А.Б. Волынцев // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 1. С. 5-20.

[A12] Азанова И.С. Исследование радиационного отклика оптического волокна при воздействии импульсного ионизирующего излучения / **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, Д.В. Хисамов, А.Б. Волынцев, А.В. Филиппов, И.В. Петухов // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 4. С. 52-69.

[A13] Хисамов Д.В. Влияние радиуса изгиба на долговечность оптических волокон типа "Панда" / Д.В. Хисамов, А.Н. Смирнова, **И.С. Азанова** // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 4. С. 52-57.

[A14] Азанова И.С. Опыт разработки термостойкого, радиационно-стойкого и водородостойкого оптического волокна / **И.С. Азанова**, Д.И. Шевцов, О.Л. Вохмянина, И.Д. Саранова, А.Н. Смирнова, М.И. Булатов, Е.А. Поспелова, Ю.О. Шаронова, Т.В. Димакова, П.Ф. Кашайкин, А.Л. Томашук, А.Ф. Косолапов, С.Л. Семёнов // Фотоника. 2019. Т. 13. № 5. С. 444-451.

[A15] Одномодовое эрбиевое радиационно-стойкое оптическое волокно с сохранением состояния поляризации / Андреев А.Г., Ермаков В.С., **Азанова И.С.**, Вохмянина О.Л., Рогожников П.Ю., Вахрушев А.С., Нурмухаметов Д.И., Яшков М.В., Димакова Т.В. // Патент на полезную модель №203256, 29.03.2021. Приоритет от 01.09.2020.

[A16] Одномодовое радиационно-стойкое оптическое волокно с сохранением состояния поляризации / **Азанова И.С.**, Вохмянина О.Л., Мальцев И.А. // Патент на изобретение №2829456 Рос. Федерация №2023130164; 20.11.2023; опубл. 30.10.2024, Бюл. № 31.

Публикации в сборниках научных конференций и тезисы докладов

[A17] Азанова И.С. Влияние гамма-нейтронного воздействия на оптико-механические характеристики оптических волокон / **И.С. Азанова**, Д.В. Хисамов, Ю.О. Шаронова, Е.А. Лунегова, М.Н. Напарин // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024», С. 43-44.

[A18] Хисамов Д.В. Математический расчет радиационного отклика оптических волокон с чистокварцевой сердцевиной / Д.В. Хисамов, **И.С. Азанова**, Е.А. Лунегова, А.С. Вахрушев, Ю.О. Шаронова // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024», С. 45-46.

[A19] Азанова И. С. Факторы, влияющие на радиационную стойкость оптического волокна / **И. С. Азанова**, О. Л. Вохмянина, Е. А. Поспелова [и др.] // Труды XIII Межотраслевой конференции по радиационной стойкости ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ": В 4-х т., Саров, 13–17 сентября 2021 года. – Саров: ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», 2024. – С. 110-116.

[A20] Азанова И.С. Сравнение реакции оптического волокна на воздействие импульсных гамма-нейтронного и фотонного излучений / **Азанова И.С.**, Шаронова Ю.О., Поспелова Е.А. // Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость-2022". Научно-технический сборник 25-й Всероссийской научно-технической конференции. Лыткарино, 2022. С. 31-32.

[A21] Шевцова А.Д. Радиационная стойкость активного оптического волокна в зависимости от конфигурации суперлюминисцентного волоконного источника А.Д. Шевцова, **И.С. Азанова**, А.С. Вахрушев, Ю.О. Шаронова // Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость-2022". Научно-технический сборник 25-й Всероссийской научно-технической конференции. Лыткарино, 2022. С. 33-34.

[A22] Шевцова А.Д. Влияние конфигурации суперлюминисцентного волоконного источника на радиационную стойкость активного оптического волокна / А.Д. Шевцова, В.Д. Степанова, Ю.О. Шаронова, **И.С. Азанова**, А.С. Вахрушев // В книге: 10 Международный семинар по волоконным лазерам. Материалы семинара. Новосибирск, 2022. С. 118-119.

[A23] Азанова И.С. Опыт разработки специальных оптических волокон / **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, О.Л. Вохмянина // 10 Международный семинар по волоконным лазерам. Материалы семинара. Новосибирск, 2022. С. 177-178.

[A24] Азанова И.С. Водородостойкость оптических волокон при высоком давлении и температуре / **И.С. Азанова**, Ю.А. Лаптева, И.О. Молчанов // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение. Программа и материалы 19-й Международной научной конференции-школы. Редколлегия: Н.С. Аверкиев [и др.]. Саранск, 2022. С. 24.

[A25] Азанова И.С. Влияние напряженно-деформированного состояния оптического волокна на радиационно-наведенное затухание после воздействия импульсного гамма-излучения / **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, Е.А. Ладыжец, А.Б. Волынцев, А.В. Филиппов // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 26-27.

[A26] Азанова И.С. Изготовление многомодового низкоапертурного оптического волокна с градиентным профилем показателя преломления в сочетании с радиационной стойкостью и исследование его свойств / **И.С. Азанова**, О.Л. Вохмянина, Е.А. Ладыжец, И.А. Мальцев, Е.А. Поспелова, А.Р. Рахматуллина, А.Н. Смирнова, Ю.О. Шаронова // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 330-331.

[A27] / Вахрушев А.С. Влияние структуры пористого слоя кварцевого стекла на процесс изготовления активных оптических волокон методом пропитки / А.С. Вахрушев, Д.И. Нурмухаметов, О.Л. Вохмянина, **И.С. Азанова**, М.В. Яшков // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7, № 1. С. 55-61.

[A28] Томашук А.Л. Сравнительное исследование радиационной стойкости световодов типа "панда" с сердцевинной из чистого и легированного азотом кварцевых стекол / А.Л. Томашук, П.Ф. Кашайкин, С.Л. Семенов, А.В. Филиппов, Е.А. Бычкова, С.В. Галанова, **И.С. Азанова**, О.Л. Вохмянина, Е.А. Поспелова, Ю.О. Шаронова, Т.В. Димакова, В.В. Волошин, И.Л. Воробьев, А.А. Колосовский, Ю.К. Чаморовский, К.М. Голант // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 184-185.

[A29] Азанова И.С. Радиационно стойкие нелегированные световоды типа "панда" в условиях воздействия непрерывного и импульсного ионизирующего излучения / **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, О.Л. Вохмянина, И.А. Мальцев, Т.В. Димакова, П.Ф. Кашайкин, А.В. Филиппов, О.М. Таценко, А.Л. Томашук // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 188-189.

[A30] Вахрушев А.С. Опыт разработки радиационно-стойкого анизотропного эрбиевого оптического волокна в ПАО ПНППК / А.С. Вахрушев, Д.И. Нурмухаметов, О.Л. Вохмянина, **И.С. Азанова**, Т.В. Димакова, П.Ю. Рогожников, М.В. Яшков // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 368-369.

[A31] Рахматуллина А.Р. Изготовление многомодового волокна с высокими оптическими характеристиками в сочетании с радиационной стойкостью / А.Р. Рахматуллина, И.А. Мальцев, **И.С. Азанова**, О.Л. Вохмянина, Р.Р. Кашина // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 373.

[A32] Азанова И.С. Радиационно-стойкие оптические компоненты для волоконно-оптического гироскопа / **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, О.Л. Вохмянина, И.А. Мальцев, Т.В. Димакова, Д.И. Шевцов // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. Тезисы докладов. Москва, 2019. С. 80-83.

[A33] Поносова А.А. Эрбиевые световоды, стойкие к повреждению ионизирующим излучением, для суперлюминесцентных волоконных источников / А.А. Поносова, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, **И.С. Азанова**, Ю.О. Шаронова, М.А. Мелькумов // Высокоочищенные вещества и материалы: получение, анализ, применение. сборник тезисов XVI Всероссийской конференции и IX Школы молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г.Г. Девярых. 2018. С. 163.

[A34] Рахматуллина А.Р. Исследование режимов генерации эрбиевых волоконных лазеров / А.Р. Рахматуллина, **И.С. Азанова**, М.К. Цибиногина, О.Л. Кель, А.А. Поносова // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение. Программа и материалы 17-й Международной научной конференции-школы / отв. ред. К.Н. Нищев. 2018. С. 26-27.

[A35] Мелькумов М.А. Эрбиевые световоды с повышенной радиационной стойкостью, оптимизированные для широкополосных суперлюминесцентных волоконных источников излучения / М.А. Мелькумов, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, П.Ф. Кашайкин, А.А. Поносова, **И.С. Азанова**, О.Л. Кель, А.Н. Абрамов, Н.Н. Вечканов, А.Н. Гурьянов // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 29-30.

[A36] Кель О.Л. Суперлюминесцентный волоконный эрбиевый источник излучения, стойкий к воздействию ионизирующего излучения / О.Л. Кель, М.А. Мелькумов, **И.С. Азанова**, А.Н. Гурьянов, К.Е. Рюмкин, М.Н. Яшков, Е.А. Носова, Ю.О. Шаронова, К.В. Коффер, А.А. Поносова // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 45-46.

[A37] Азанова И.С. Радиационно-стойкие двулучепреломляющие световоды типа "панда" для применений на космических летательных аппаратах и в условиях воздействия импульсного ионизирующего излучения / **И.С. Азанова**, М.К. Цибиногина, Т.В. Димакова, О.Л. Вохмянина, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, П.Ф. Кашайкин, А.Е. Левченко, А.Л. Томашук, Н.К. Миронов, А.В. Филиппов, О.М. Таценко // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 119-120.

Подписано в печать 24.02.2026. Формат 60x84/16.
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 2,15
Тираж 100 экз. Заказ № 23.

Отпечатано в типографии ПГНИУ
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
