

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

На правах рукописи



Азанова Ирина Сергеевна

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
КОМПОНЕНТОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
доктор физико-математических наук, профессор
Волынцев Анатолий Борисович

Пермь — 2025

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов	13
1.1. Архитектура современного ВОГ и требования к оптическим компонентам	14
1.2. Особенности воздействия непрерывного и импульсного ИИ применительно к оптическим компонентам ВОГ	27
1.3. Стойкость СИОМ к воздействию ИИ	31
1.4. Стойкость активного эрбиевого ОВ для СВИ.....	34
1.5. Радиационные эффекты в кварцевых стеклах и волокнах	41
1.5.1. Взаимодействие ИИ с кварцевым стеклом.....	41
1.5.2. Радиационно-наведенное поглощение в ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной и легированной германием сердцевиной	43
1.5.2.1. Радиационно-наведенные полосы поглощения в волокнах с нелегированной кварцевой сердцевиной.....	44
1.5.2.2. Радиационно-наведенные полосы поглощения в волокнах с легированной германием сердцевиной	49
1.5.2.3. Механизмы РНП в изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной и легированной германием сердцевиной при импульсном ИИ.....	51
1.5.3. Влияние внешних факторов на РНП ОВ	54
1.5.4. Радиационные эффекты в ОВ с сохранением поляризации излучения типа «Панда».....	56
1.5.5. Методы изготовления ОВ типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной	67
1.5.5.1. Методы изготовления изотропных волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной	67
1.5.5.2. Конструкция ОВ типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной	71
1.6. Выводы по литературному обзору	79
Глава 2. Методики и исследуемые образцы	82
2.1. Установки для воздействия импульсным и непрерывным ИИ	85
2.2. Исследуемые образцы.....	89
2.2.1. Образцы СИОМ.....	89
2.2.3. Образцы пассивных ОВ	92
2.3. Методики исследования	98
2.3.1 Оценка уровня напряженно-деформированного состояния ОВ	98
2.3.2. Методики исследования характеристик образцов при воздействии ИИ	102

2.3.2.2. Методика исследования образцов СИОМ	107
2.3.2.3 Методика исследования образцов АОВ при воздействии импульсного ИИ	109
2.3.3. Методика исследования образцов ОВ на воздействие непрерывного и импульсного ИИ	112
2.3.3.1 Методика проведения математической обработки экспериментальных результатов.....	115
Глава 3. Результаты исследования влияния непрерывного ИИ на характеристики анизотропного ОВ	122
3.1. Влияние непрерывного гамма-излучения на характеристики образцов PGeO_2	122
3.2. Влияние непрерывного гамма-излучения на образцы PSiO_2	141
Глава 4. Результаты исследования влияния импульсного ИИ на образцы ISiO_2 , PSiO_2 и PGeO_2	167
4.1. Влияние импульсного фотонного (тормозного) излучения	167
4.1.1. Влияние технологических факторов изготовления ОВ	170
4.1.2. Зависимости РНП(t) образцов PGeO_2 и PSiO_2 в виде свободной намотки, бескаркасных и каркасных гироскопических волоконных контуров.....	175
4.1.3. Анализ зависимостей РНП(t) с помощью подходов химической кинетики	179
4.1.4. Математическая аппроксимация РНП(t)	183
4.1.5. Влияние условий опыта на значения эмпирических коэффициентов РНП(t)	192
4.1.5.1. Доза в импульсе	192
4.1.5.2. Температура эксперимента	196
4.1.5.3. Уровень входящей оптической мощности	197
4.1.5.4. Уровень напряженно-деформированного состояния ОВ.....	201
4.1.5.5. Построение функциональной зависимости РНП(t)	208
4.2. Влияние импульсного гамма-нейтронного излучения.....	209
Глава 5. Результаты исследований образцов АОВ	217
5.1. Возможность применения АОВ в СВИ для ВОГ	217
5.2 Влияние непрерывного ИИ на параметры АОВ	220
5.3. Влияние импульсного фотонного излучения на параметры АОВ	225
5.4. Влияние импульсного гамма-нейтронного излучения.....	236
Глава 6. Результаты исследований СИОМ	241
6.1. Влияние непрерывного ИИ на образцы СИОМ	241

6.2. Влияние импульсного фотонного излучения на образцы СИОМ.....	244
6.3. Влияние импульсного гамма-нейтронного излучения на образцы СИОМ ...	250
Глава 7. Радиационная стойкость оптических компонентов ВОИД	257
7.1. Стойкость к непрерывному облучению.....	257
7.2. Стойкость к импульсному облучению.....	261
7.3. Рекомендации	261
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	263
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	265
Благодарности.....	268
Список сокращений	269
Список цитируемой литературы.....	271
Список опубликованных автором работ по теме диссертации	289
Список иллюстраций и таблиц	294
Приложение 1 Спецификации оптического волокна	309

Введение

Актуальность и степень разработанности 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 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 (АОВ), 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 радиационно-наведенных оптических потерь (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 милисекундного 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-нейтронного 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.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленный автором научный факт, что именно режимы осаждения фторсиликатной 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.

Теоретическая 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 $7,3 \cdot 10^{-4}$). Технология реализована в ПАО «ПНППК», наложен 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 нейtronов 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 паспорту 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 введения, семи глав, списка иллюстраций и таблиц, списка сокращений, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 240 наименований, а также списка публикаций автора, включающего 37 наименований и приложения. В работе имеется 113 Рисунков и 25 Таблиц. Общий объем диссертации равен 308 страницам и 33 страницы приложения.

Глава 1. Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов

В первой главе проведен обзор научно-технической информации по теме диссертации.

Рассмотрены основные требования к оптическим компонентам ВОГ: СИОМ, СВИ и активному оптическому волокну, ОВ с сохранением поляризации излучения. Проведен сравнительный анализ литературных данных о характеристиках активных и пассивных ОВ, СИОМ известных производителей, включая количественные данные по РОС.

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. РЦО.

Отмечено, что по данным литературы основным механизмом деградации рассматриваемых оптических компонентов под действием ионизирующего излучения является ионизация материала, поэтому допустимо условия воздействия электронов, протонов и нейtronов моделировать с помощью непрерывного гамма-излучения различной мощности.

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 OH групп и на длине волны 1510 нм от NH групп. ОВ с сердцевиной, легированной малыми добавками фтора, при определенных условиях облучения теряют РОС.

1.1. Архитектура современного ВОГ и требования к оптическим компонентам

ВОГ уже несколько десятилетий активно применяются в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) для определения угловой скорости объекта техники. Современная реализация ВОГ является типичным примером ВОИД.

Современные ВОГ навигационного класса точности характеризуются величиной дрейфа угловой скорости от 10^{-2} °/ч до $4 \cdot 10^{-5}$ °/ч [1, с. 266; 2]. Это позволяет использовать их для построения высокоточных БИНС (точность позиционирования одна морская миля за 15 дней). Поскольку в составе ВОГ нет электромеханических элементов, его отличает большой диапазон измеряемых угловых скоростей при режимах движения со сложными динамическими нагрузками (вибрации, удары). Для обеспечения высокой точности измерений, архитектура и алгоритмы обработки сигнала ВОГ строятся по компенсационной схеме.

Принцип работы ВОГ основан на эффекте Саньяка [3]. Между встречно распространяющимися оптическими волнами в кольцевом волоконном интерферометре при вращении объекта, на котором он установлен, возникает разность фаз [1, с. 442]:

$$\Delta\varphi_R = \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot L}{\lambda_c \cdot c} \Omega, \quad (1.1)$$

где λ_c – средневзвешенная длина волны излучения,

Ω – проекция вектора угловой скорости вращения объекта на ось, перпендикулярную плоскости оптического контура,

D и L – диаметр и длина оптического контура для случая многовитковой катушки из ОВ, соответственно,

c – скорость света в вакууме.

Далее эта разность фаз измеряется через изменение интенсивности на выходе двухлучевого интерферометра.

Один из вариантов структурной схемы одноосного ВОГ приведен на Рисунке 1.1.

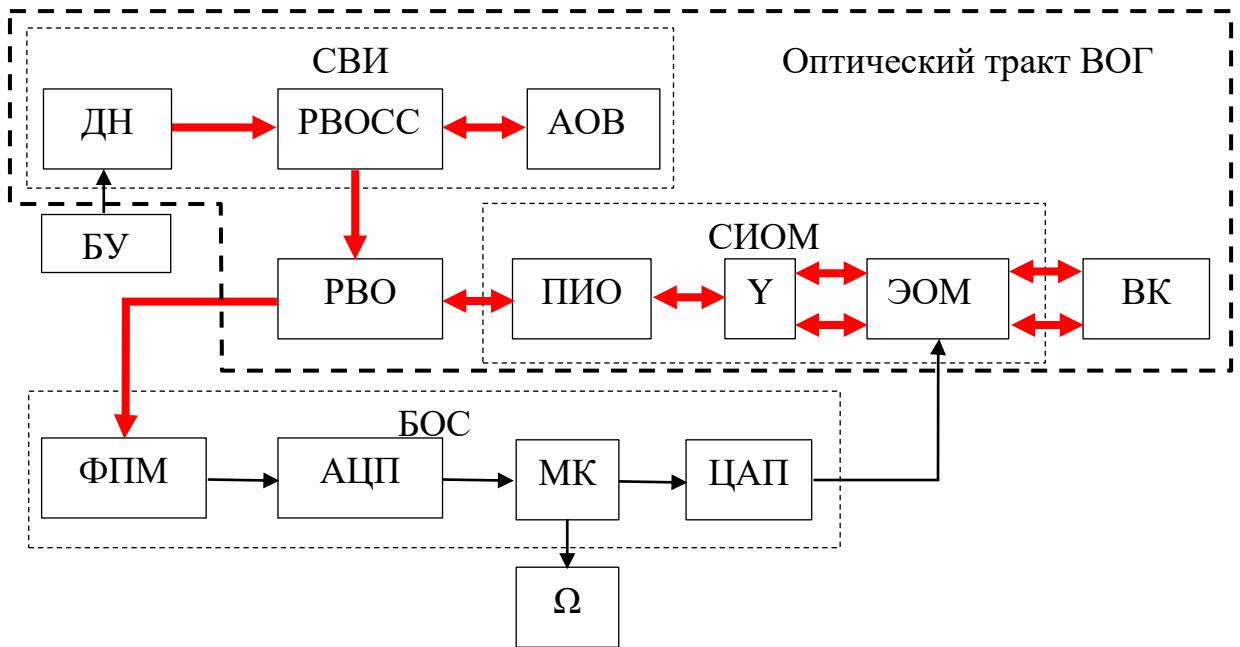


Рисунок 1.1 – Укрупненная блок схема одноосного ВОГ; тонкие стрелки – электронные сигналы, толстые стрелки – оптические сигналы

Интерферометр Саньяка образован ВК, представляющим собой намотанное особым образом в катушку оптическое волокно с сохранением поляризации излучения, и СИОМ на ниобате лития, содержащей поляризатор (ПИО), симметричный делитель (Y), электрооптический модулятор (ЭОМ). Разветвитель волоконно-оптический (РВО) или циркулятор служит для подключения источника излучения и фотоприёмного модуля (ФПМ). В качестве источника излучения обычно применяют СВИ с рабочей длиной волны 1550 нм, построенный на базе кварцевого одномодового активного оптического волокна (АОВ) с сердцевиной, легированной ионами эрбия. АОВ накачивается через разветвитель волоконно-оптический спектрально-селективный (РВОСС) излучением диода накачки (ДН), запитанным от блока управления (БУ). Электронный блок обработки сигналов (БОС) получает сигнал с фотоприемного модуля, переводит его в цифровой код в АЦП, далее в микроконтроллере (МК) демодулирует, вычисляет компенсационный сигнал обратной связи и, после его преобразования в аналоговый вид в ЦАП, подает на электрооптический

модулятор в составе СИОМ (вместе с сигналом вспомогательной модуляции). Этот компенсационный сигнал также выводится из МК в качестве выходного сигнала о величине угловой скорости Ω .

СВИ, СИОМ и ВК являются функциональными узлами, к которым выдвигаются определенные требования, связанные с обеспечением точности и стабильности показаний ВОГ. Далее разберем каждый из них подробнее.

Волоконный контур

Чувствительным к вращению элементом ВОГ является ВК — волоконная катушка, прецизионно намотанная с квадрупольной или, более перспективной, октупольной раскладкой для симметризации теплового поля по длине волокна, т.е. для снижения эффекта Шупе [1, с. 125 ; 4, 5]. При этом в коммерческих ВОГ используется сохраняющее поляризацию волокно, поскольку ВОГ на волокне, не сохраняющем поляризацию, в дальнейшем не получили распространения из-за того, что требуют применения дополнительных деполяризаторов [1, с. 110]. Для ВОГ были разработаны специальные модификации одномодовых ОВ с сохранением поляризации с уменьшенными диаметрами кварцевой оболочки и защитно-упрочняющего полимерного покрытия (ЗУП) [6-9]. Сейчас стандартом для такого ОВ является диаметр кварцевой оболочки 80 мкм и ОВ с ЗУП – 160 мкм, хотя есть попытки применить более тонкие ОВ с диаметром кварцевой оболочки 40-60 мкм для увеличения числа витков (площади контура, т.е. чувствительности ВОГ) при тех же габаритах ВК. Сохранение и даже снижение габаритов ВК преследует не только цель улучшения массогабаритных показателей, но и упрощает задачу снижения градиентов теплового поля в области ВК. Типичная длина волоконного контура ВОГ навигационного класса точности – 1000…3000 м, средний диаметр катушки – 60…150 мм, высота катушки – 10…20 мм [1 с. 214 ; 10-15]. При этом к ОВ предъявляются повышенные требования по однородности как оптических, так и геометрических параметров.

С целью снижения механических напряжений, действующих на ОВ в ВК, применяют либо каркас из композитного материала с коэффициентом

линейного температурного расширения (КЛТР) близким к КЛТР ОВ, пропитанного связующим компаундом, либо применяют бескаркасные волоконные катушки (БВК).

Для ВК (и БВК) применяют несколько типов гироскопического ОВ с сохранением поляризации излучения – «панда» (сечение схематично представлено на Рисунке 1.2, *а*), «галстук-бабочка», «эллипс». Все они так или иначе имеют в своей конструкции напрягающие элементы, создающие в области сердцевины механические напряжения около 0,15 ГПа с полем остаточных напряжений как на Рисунке 1.2, *б* [16]. Вследствие упруго-оптического эффекта возникает наведенное двулучепреломление величиной около $6 \cdot 10^{-4}$, снимающее вырождение поляризационных мод, что и обеспечивает сохранение поляризации излучения (разные скорости распространения поляризационных мод препятствуют их взаимодействию).

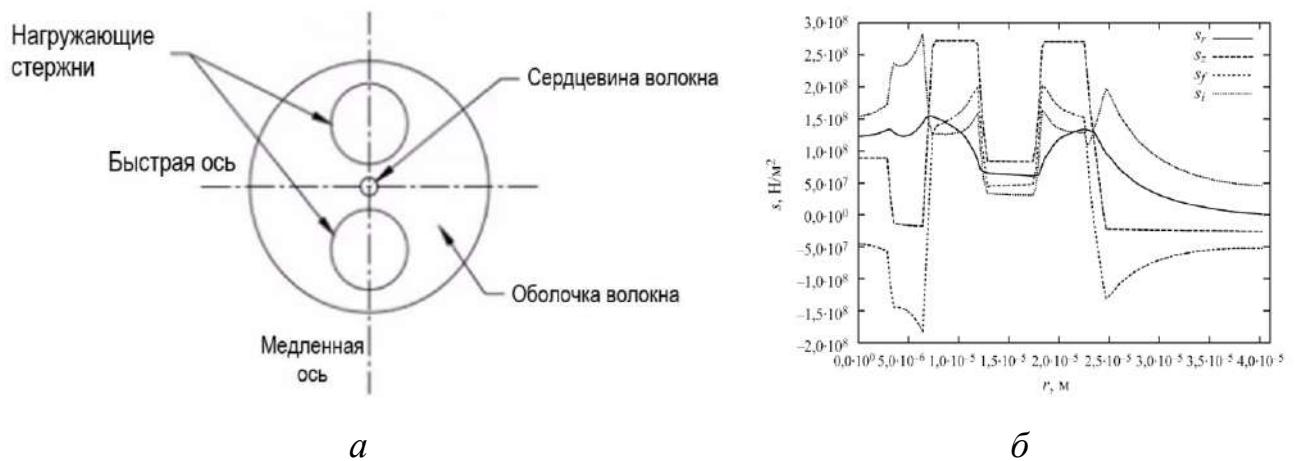


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение ОВ типа «Панда» (*а*) и эпюры остаточных напряжений от радиуса ОВ [16] (*б*)

Для применения в ВОГ стараются увеличить двулучепреломление до значений $4 \cdot 10^{-4} \dots 12 \cdot 10^{-4}$ для достижения минимального уровня перехода оптической мощности из основного поляризационного состояния в ортогональное. Эта характеристика ОВ описывается *h*-параметром (обычно около $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ в н.у.). Эта же характеристика для ВК с определенной длиной также описывается параметром сохранения поляризации излучения (СПИ) в дБ,

т.е. ВК длиной 2000 м с h -параметром волокна $0,5 \cdot 10^{-5}$ м⁻¹ имеет СПИ = 20 дБ. Температурная вариация этого параметра также является важной характеристикой ОВ и, особенно, ВК, в котором имеются механические напряжения, меняющиеся с температурой, и снижающие созданные для достижения сохранения поляризации в ОВ внутренние упругие напряжения. В итоге, сохранение поляризации влияет на соотношение сигнал-шум на фотоприёмном модуле ВОГ (но не определяет полностью). Однако, следует отметить, что наличие в схеме ВОГ поляризатора, общего для входящих в интерферометр Саньяка и выходящих из него волн, в целом, снижает требования к СПИ за счет ослабления на 50...70 дБ паразитного излучения с ортогональной поляризацией.

Достигнутые оптические потери гироскопического ОВ с сохранением поляризации 0,5 дБ/км на рабочей длине волны 1550 нм [7, 8] дают вклад в оптические потери интерферометра Саньяка 0,5...1,5 дБ, в зависимости от длины ВК, что немного по сравнению с вкладом СИОМ – 3...4 дБ (оптические потери без учета 3 дБ поляризационной экстинкции). Тем не менее, требуется сохранять определенный уровень вариации оптических потерь волоконных компонентов при вариации внешних действующих факторов (ВВФ), поскольку имеются ограничения как по входному диапазону оптической мощности фотоприёмного модуля, так и по выходной мощности источника излучения.

Гироскопическое ОВ также адаптировано для использования в ВК, т.е. обладает улучшенной изгибостойкостью оптических потерь и сохранения поляризации излучения. Это достигнуто, в первую очередь, за счет увеличения апертуры со стандартного для телекоммуникационных ОВ значения 0,12 до 0,16...0,22, что позволяет получать улучшенные характеристики ВК диаметром около 50...70 мм и уменьшить габариты ВОГ без снижения точностных характеристик.

Схема интегрально-оптическая многофункциональная

Компонентом интерферометра Саньяка, позволяющим управлять разностью фаз встречных волн для построения компенсационной схемы обработки сигнала ВОГ, является СИОМ (Рисунок 1.3). СИОМ изготавливается на подложке монокристаллического ниобата лития и состоит из двух электрооптических модуляторов (ЭОМ) фазы, расположенных в двух плечах симметричного Y-разветвителя (отклонение от симметричного деления 2-5 % в н.у. и дополнительная вариация до 1 % в диапазоне температур) и интегрального поляризатора с поляризационной экстинкцией около 50...70 дБ (поэтому есть полезные потери оптической мощности 3 дБ).

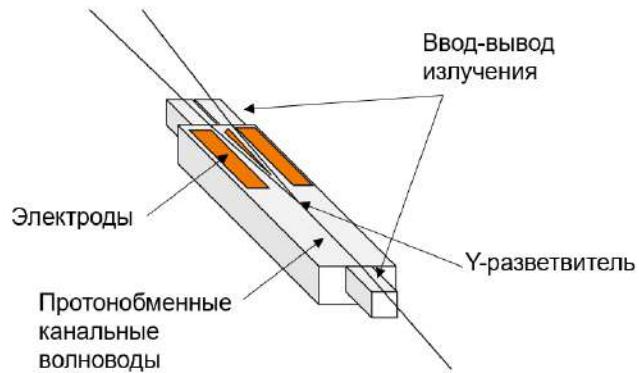


Рисунок 1.3 – Общий вид многофункциональной интегрально-оптической схемы (металлический защитный корпус не показан)

Наряду с оптическими потерями, одной из важнейших характеристик СИОМ является коэффициент сохранения поляризации излучения (СПИ), характеризующий качество ввода-вывода излучения:

$$\text{СПИ} = 10 \log \frac{P_{\text{негл}}}{P_{\text{гл}}}, \quad (1.2)$$

где $P_{\text{гл}}$ – выходная оптическая мощность в главной оптической оси,

$P_{\text{негл}}$ – выходная оптическая мощность в неглавной оптической оси.

СПИ на уровне 25-30 дБ обеспечивается точной ориентацией оптических осей ОВ и канального волновода в области их соединения, а также за счет минимизации механических напряжений в области крепления ОВ [17]. Обычно СПИ измеряют с помощью поляризационного экстинометра как, например, [18].

Также важным параметром СИОМ является поляризационная экстинкция (ПЭ) – параметр встроенного в СИОМ поляризатора, который определяется уровнем наводки на выходном ОВ переотражённого от граней чипа СИОМ радиационного (не волноводного) излучения с поляризацией соответствующего обыкновенному показателю преломления [1, с. 427]. Обычно ПЭ СИОМ более 55 дБ [19]. В данной работе исследовались СИОМ с ПИО, действующим за счет использования протонно-обменных канальных волноводов, которые являются поляризующими, поскольку в них обыкновенный показатель преломления уменьшен и условий для волноводного распространения света не возникает. Тем не менее, часть рассеянного света наводится в выходном ОВ, несмотря на применение пространственных фильтров. Менее технологичные СИОМ с поляризатором на базе пленочного ПИО на поверхности титанодиффузного канального волновода на той же подложке в данной работе не исследовались.

Предпосылок для деградации ПЭ протоннообменных волноводов при воздействии ИИ нет, поскольку для этого необходима кардинальная перестройка структуры $H_xLi_{1-x}NbO_3$ для возникновения положительного приращения обыкновенного показателя преломления (такой эффект не известен). Что касается величины паразитных переотражений от граней чипа, то это также слабо зависит от величины показателя преломления, а определяется размерами чипа и пространственных фильтров. Тем не менее, если бы ИИ приводило к катастрофическому ухудшению ПЭ до значений <40 дБ, то этот эффект был бы зафиксирован в процессе измерения СПИ, поскольку ПЭ также определяется формулой (1.2). Снижение ПЭ могло быть установлено по той же методике, что и измерение СПИ, если бы величина ПЭ была менее 40 дБ. Обычный для СИОМ уровень ПЭ ~60 дБ измеряют методом оптической когерентной поляриметрии (OCDP) [1, с. 114] прибором типа РХА-1000 [20], но данная методика имеет погрешность около 5-7 дБ и не является оперативной. Запись интерферограммы происходит в течение нескольких минут, дополнительного времени требует ее обработка, что не позволяет использовать методику для оперативного измерения

ПЭ во время воздействия ИИ. По этим причинам в данной работе ограничились измерением СПИ.

ЭОМ соединены электрически по двухтактной схеме, что обеспечивает двухкратное снижение полуволнового напряжения. Обычно полуволновое напряжение модулятора лежит в области 2,5...4,5 В (также используется обратный параметр – эффективность модуляции 0,7...1,3 рад/В) [19]. Весь тракт электрооптического модулятора СИОМ, включающий ЦАП, источник опорного напряжения ЦАП и буферный каскад усиления для согласования ЦАП и ЭОМ, подвержен температурным дрейфам. При этом качество этого тракта определяет погрешность схемы компенсации разности фаз, индуцированной вращением, т.е. определяет масштабный коэффициент ВОГ. Поэтому применяются специальные методы модуляции сигнала ВОГ, позволяющие постоянно отслеживать текущее значение вводимой в интерферометр разности фаз между встречными волнами и его цифровым кодом. Этот автоматический регулятор хорошо компенсирует относительно медленные дрейфы, связанные с температурными изменениями условий эксплуатации [1, с. 198].

Благодаря наличию в схеме ВОГ ПИО с высокой ПЭ, независящей в первом приближении от температуры, к СПИ СИОМ предъявляются требования на уровне 25 дБ в н.у. и несколько ниже в рабочем диапазоне температур.

Оптические потери СИОМ дают основной вклад в суммарные оптические потери оптического тракта ВОГ. Типичная величина потерь без учета работы поляризатора около 3...4 дБ (6...7 дБ с учетом ослабления одной из поляризаций) [19, 21]. При этом имеется вариация потерь (и как следствие, коэффициента деления) при температурном воздействии около 0,1...0,5 дБ из-за рассогласования ориентации волокна и кристалла в области kleевых соединений.

Непосредственно, уровень суммарных оптических потерь, как и мощность источника излучения не определяет погрешность ВОГ, поскольку ВОГ построен по компенсационной схеме – основной регулятор цифровой схемы обработки постоянно поддерживает рабочую точку интерферометра в

исходном состоянии (например, в $\pi/2$) с помощью пилообразного сигнала, наклон которого пропорционален измеряемой угловой скорости [1, с. 188]. Таким образом, эти параметры не входят непосредственно в масштабный коэффициент ВОГ. Однако, повышение суммарных оптических потерь, как и снижение мощности излучения источника, например, из-за температурного воздействия, уменьшает суммарное отношение сигнал-шум на ФПМ, что, в итоге, увеличивает погрешность прибора. Поэтому принято считать, что допустимые вариации мощности источника примерно $\pm 20\%$ от номинального уровня и вариации суммарных оптических потерь ВОГ, главный вклад в которых от СИОМ, примерно ± 1 дБ (примерно $\pm 25\%$).

Суперлюминесцентный волоконный источника излучения

Помимо основного интерферометра Саньяка в ВОГ возникают паразитные интерферометры из-за волн обратных отражений от мест стыковки ОВ контура ВОГ и СИОМ, а также центров рэлеевского рассеивания излучения в ВК. Для того, чтобы уменьшить вклад от паразитных интерферометров в общую интерференционную картину, необходимо применять широкополосный источник излучения [1, с. 89; 22, 23]. В таком случае, при уменьшении длины когерентности источника излучения до 30-350 мкм получается снизить видимость паразитной интерференционной картины до 3 %. Минимальные требования к СВИ, а также его преимущества сформулированы в работе [24].

Таблица 1.1 – Характеристики и требования к СВИ [24]

Характеристика	Назначение	Требуемая величина
Большая ширина спектра	Снижение погрешностей из-за: <ul style="list-style-type: none"> 1) обратного рэлеевского рассеяния в волокне контура 2) связи поляризационных мод 3) нелинейного эффекта Керра в волокне 	Не менее 5 нм Сейчас получено 25 нм
Высокая выходная мощность в одномодовом волокне	Получение высокого отношения сигнала к шуму Создание мультиплексных ВОГ	10 мВт Сейчас получено 200 мВт
Температурная стабильность средней длины волны	Получение стабильного масштабного коэффициента ВОГ	1 ppm Сейчас получено <1 ppm/ $^{\circ}$ C (до 0.13 ppm/ $^{\circ}$ C)
Большой ресурс	Надежность при длительной эксплуатации	Получено >100000 ч (больше чем у СЛД и других источников)
Слабая чувствительность к коротковолновой радиации	Эксплуатация в неблагоприятных условиях	Нужно иметь длину волны > 1.3 мкм 1,55 мкм

В СВИ обычно применяется легированное ионами эрбия активное ОВ (АОВ).

При поглощении фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного в верхнее возбужденное короткоживущее состояние с временем жизни $\tau_3 = 1$ мкс, затем переходят на метастабильное состояние с временем жизни $\tau_2 = 10$ мс. При этом создается инверсия заселенности между основным и метастабильным состоянием. Из-за взаимодействия с другими ионами эрбия состояния имеют подуровни, поэтому при переходе с подуровней метастабильного состояния на подуровни основного состояния образуется излучение с длинами волн в диапазоне 1530 – 1580 нм.

Применение СВИ в ВОГ предпочтительнее использования суперлюминесцентного лазерного диода (СЛД) из-за лучшей температурной стабильности [1, с. 218]. Реально достижимый температурный коэффициент изменения средневзвешенной длины волны СВИ менее 1 ppm/°C [24, 25], в то время как у СЛД примерно 400 ppm/°C (до 100 ppm/°C с элементом Пельтье) [1, с. 218].

СВИ содержит лазерный ДН на 980 нм или на 1480 нм, АОВ, РВОСС (Рисунок 1.1), также возможно применение других оптических компонентов для управления шириной спектра усиления выходного сигнала [25, 26].

Для правильного вычисления разности фаз Саньяка введено понятие средневзвешенной длины волны СВИ, λ_c , которая определяется по формуле:

$$\lambda_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (1.3)$$

где n – количество интервалов длин волн, на которое разделен измеряемый участок спектральной плотности мощности, далее для краткости, спектр, P_i – мощность, приходящаяся интервал спектра с центральной длиной волны λ_i .

Известно, что СВИ на базе изотропного АОВ, в отличие от СЛД, позволяют генерировать практически деполяризованное выходное оптическое излучение достаточно высокой мощности с малой длиной временной когерентности, это позволяет применять РВО между источником излучения и

ФПМ из ОВ, несохраняющего поляризацию. Также это исключает проблему совмещения поляризационных осей между СЛД и СИОМ [1, с. 207].

Показания ВОГ напрямую зависят от средневзвешенной длины волны СВИ, поскольку λ_c входит в формулу масштабного коэффициента (МК), которая связывает измеренное значение разности фаз Саньяка ($\Delta\varphi_c$) с величиной угловой скорости (Ω) [1]:

$$\text{МК} = \frac{\Delta\varphi_c}{\Omega} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot D}{\lambda_c \cdot c}, \quad (1.4)$$

где D – диаметр волоконного контура, L – длина волоконного контура.

В работе [25] со ссылкой на [27, 28] приводится расчет, по которому для получения отклонения детектируемой скорости не более 0,001 °/ч при измерении фактической угловой скорости ВОГ 3600 °/ч требуется стабилизация средневзвешенной длины волны с отклонением не более 0,27 ppm ($4,32 \cdot 10^{-4}$ нм).

Поэтому исходя из требований к погрешности ВОГ, предъявляются требования к стабильности λ_c , либо к наличию функционального описания ее изменения (например, коэффициенты полинома для коррекции МК). Стабильность λ_c поддерживается следящей системой регулирования БУ путем коррекции тока накачки ДН по отклонению тока диода и по отклонению оптической мощности излучения от заданного значения мощности и/или тока (например, с помощью фотодиода и РВО с коэффициентом деления 1 %). При этом, как правило, применяют лазерный ДН с элементом Пельтье для обеспечения длительной надежной работы в диапазоне температур минус 55 °C до плюс 90 °C (типичный диапазон от минус 20 °C до плюс 75 °C – для ДН с элементом Пельтье). Все это накладывает определенные требования на параметры АОВ и другие оптические компоненты СВИ.

Более узкая форма спектра СВИ (5-7 нм по ширине пика на полувысоте) в отличие от СЛД (около 20 нм по уровню 0,5) дает более высокий уровень шума источника [1, с. 220], но успешно компенсируется путем смещения рабочей точки интерферометра в область тёмной полосы, т.е. в область $(0,7-0,9) \cdot \pi$ [29].

Для построения инерциального измерительного модуля БИНС часто применяется схема трехосного ВОГ с одним СВИ, оптическим разветвителем 1×3 и далее тремя интерферометрами Саньяка, расположенными в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Такая схема требует увеличения оптической мощности СВИ. Величина оптической мощности на входе в разветвитель 1×3 желательна на уровне примерно 30 мВт для обеспечения около 5 мВт на каждом из интерферометров. Для выполнения этого требования необходимы как правильный подбор модели ДН, так и определенный уровень эффективности генерации АОВ.

Таким образом, основные требования к эрбиевому СВИ для ВОГ навигационного класса точности можно сформулировать так:

- форма спектральной плотности мощности (спектра) излучения близкая к гауссиану (максимально симметричная форма);
- ширина выходного спектра излучения не менее 5 нм;
- стабильность λ_c , исходя из требований стабильности МК ВОГ;
- выходная мощность излучения на уровне 30 мВт для трехосного ВОГ и на уровне 5 мВт для одноосного ВОГ.

Более точные допустимые диапазоны вариации параметров всех оптических компонентов обычно устанавливают исходя из конкретных инженерных расчетов узлов ВОГ, а здесь приведены общепринятые в настоящее время параметры для «среднестатистических» ВОГ навигационного класса точности. Также необходимо заметить, что вышеперечисленные параметры обсуждаемых оптических компонентов (и их температурная вариация) не позволяет кардинально повысить точностные характеристики ВОГ. Требования к оптическим компонентам и их фактические спецификации практически не изменились за последние 20 лет, при этом за счет алгоритмов цифровой обработки сигналов ВОГ был достигнут заметный прогресс [1, 2] в повышении точности и температурной стойкости ВОГ, поэтому современный БОС ВОГ может содержать порядка десяти цепей автоматического регулирования [30-35] и температурных калибровочных зависимостей, что компенсирует погрешности

оптических компонентов и аналоговых цепей. Тем не менее, в контексте проблемы радиационной стойкости требуется понять, какие именно параметры компонентов будут изменяться при воздействии ИИ и в каких пределах нуждаются в компенсации.

Выводы по разделу 1.1:

- Архитектура современного ВОГ предусматривает допустимость изменения оптической мощности в оптическом контуре до ± 1 дБ.
- Уменьшение оптической мощности ухудшает соотношение сигнал-шум и увеличивает случайную составляющую погрешности ВОГ.
- Изменение средневзвешенной длины волны источника излучения ведет к изменению МК ВОГ и ошибке определения угловой скорости.
- Для ВОГ навигационного класса точности предъявляется требование к ОВ с сохранением поляризации излучения: значение h -параметра должно быть не хуже $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, типичное значение двулучепреломления – не менее $6,5 \cdot 10^{-4}$.

1.2. Особенности воздействия непрерывного и импульсного ИИ применительно к оптическим компонентам ВОГ

В зависимости от источника, состав ИИ и условия воздействия могут значительно различаться. При этом, в идеальном случае, оптические компоненты ВОГ должны быть универсальны и иметь возможность применения для всех возможных условий ИИ.

Рассмотрим основные особенности воздействия непрерывного ИИ: космическое пространство или близость атомного реактора, также воздействия импульсного ИИ: ядерный взрыв, разряд молнии [36].

Непрерывное воздействие ИИ

Состав ИИ космического пространства довольно сложен и зависит от высоты орбиты объекта для околоземного пространства или удаленности от Солнца для межпланетных перелетов. В него входят потоки протонов, электронов, позитронов, нейтронов, гамма-квантов, тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Требования по стойкости к общей поглощенной дозе для орбитальных космических аппаратов вариируются от 1 кГр до 10 кГр для срока службы 5-15 лет, а для межпланетных перелетов до 100 кГр за 12 лет полета [37-39]. В то же время при наличии защитных экранов, а также для некоторых орбит требование по накопленной дозе может быть снижено. При наличии алюминиевого экрана толщиной 10 мм на геостационарной орбите типичная поглощенная доза для спутниковых систем составляет около 137 Гр за 20 лет работы (6,85 Гр/год), а для низких околоземных орбит суммарная поглощенная доза за 20-летний период составляет около 66 Гр (3,28 Гр/год) [40-42].

Для электронной аппаратуры, в основе которой полупроводниковые структуры, для подтверждения стойкости к ИИ требуются отдельные испытания на стойкость практически к каждому виду излучения, которые регламентированы соответствующими ГОСТ и руководящими документами. Для оптических компонентов ВОГ, поскольку оптическое волокно и монокристалл ниобата лития не являются полупроводниками, было показано,

что при небольших потоках и дозах до 1-10 кГр действие протонов, нейтронов, рентгеновского излучения приблизительно эквивалентно действию гамма-излучения с той же поглощенной дозой [40, 43]. Поэтому можно принять, что результаты исследования РОС оптических компонентов ВОГ к непрерывному гамма-излучению до накопленных доз 10 кГр будут справедливы и для других видов излучения с такой же дозой.

Особенностью ИИ космического пространства также является очень малая мощность дозы от 10^{-5} до 10^{-3} Гр/ч ($\sim 10^{-5}$ Р/с) [37]. В условиях реальных исследований сложно организовать такую малую мощность дозы, поэтому за рубежом получила распространение методика оценки экстраполяции РНП на большие времена облучения, которая представляет собой модель кинетики реакций n -го порядка [44-46]. В работе [46] сделана экспериментальная проверка модели и получено хорошее совпадение экстраполяционных и измеренных значений РНП, из двух экспериментов при значительно различающихся (в 50 раз) мощностях дозы. Для России эта методика не получила распространения и стойкость оптических компонентов оценивается по величине РНП во время воздействия [47].

Следует учесть, что в условиях работы вблизи атомного реактора мощность дозы может быть уже существенно выше, чем для космического пространства.

Исходя из требований унификации применения радиационно стойких компонентов, они должны отвечать требованиям малых значений РНП как во время воздействия ИИ (в том числе при значительной мощности дозы), так и иметь хорошую скорость релаксации характеристик после воздействия.

Импульсное воздействие ИИ

Основными поражающими факторами воздушного взрыва ядерного и термоядерного оружия, воздействующими на электронные приборы, считаются ударная волна, световое излучение и проникающая радиация — потоки гамма-квантов, нейтронов и рентгеновское излучение. Поскольку длина свободного пробега альфа- и бета-частиц довольно мала, их действием на элементы и материалы аппаратуры пренебрегают [48]. При ядерном взрыве основными источниками рентгеновского — и гамма-излучения являются радиоактивные осколки деления, находящиеся в зоне взрыва. Кроме того, эти излучения возникают в результате торможения заряженных частиц при прохождении их через вещество (тормозное излучение). Оптические компоненты ВОГ находятся в корпусе прибора, а также обычно защищены корпусом объекта, поэтому далее будем рассматривать только их устойчивость к потокам нейтронов и гамма-квантов.

Выводы по разделу 1.2

Обобщая рассмотренные случаи, выявляется необходимость трех различных проверок РОС оптических компонентов ВОГ:

- непрерывное гамма-излучение до накопленной дозы 1–100 кГр как при сверхмалой мощности дозы ($\sim 10^{-7}$ Гр/с), так и при достаточно большой мощности ($\sim 1 - 10^3$ Гр/с);
- импульсное гамма- или тормозное излучение;
- импульсное нейтронное излучение (моделирующие установки обычно генерируют его вместе с сопутствующим гамма-излучением).

При выборе конкретных условий проверок необходимо учитывать, как возможности установок, моделирующих ИИ, так и распространенные в литературе схемы экспериментов для возможности сопоставления результатов.

Результаты исследования РОС оптических компонентов ВОГ (ОВ и СИОМ) к действию непрерывного гамма-излучения до накопленных доз 10 кГр

предположительно могут быть распространены для других видов излучения с такой же поглощенной дозой.

Оптические компоненты ВОГ, предназначенные для унифицированного применения для нужд космической и атомной промышленности должны иметь малые значения РНП непосредственно во время воздействия непрерывного ИИ.

Для детального исследования РОС оптических компонентов ВОГ к воздействию импульсного ИИ необходимо изучение воздействия каждого по отдельности вида импульсного излучения: гамма-излучения (тормозного излучения) и быстрых нейtronов.

1.3. Стойкость СИОМ к воздействию ИИ

Активные исследования РОС различных интегрально-оптических схем на НЛ с разными типами волноводов к воздействию ИИ выполнялись в основном в 1990-е годы [49-54]. В основном проверялось оптическое пропускание на длине волны 1300 нм или 1310 нм, а также в более коротковолновой области. В современных СИОМ применяется рабочая длина волны 1550 нм и, хотя она близка к 1310 нм, численные значения могут отличаться из-за спектральной зависимости РНП.

Детальные исследования РОС монокристаллов ниобата лития были проведены для объемных кристаллов также в области коротких длин волн (300-800 нм), где, как было показано, располагаются центры, возникающих при воздействии ИИ полос поглощения [55, 56]. Ближний ИК диапазон для объемных кристаллов не исследовался. Также сообщается, что наибольшую стойкость к оптическому повреждению ионизирующего излучения показали кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}$ (0,26 мас. %), $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}$ (0,43 мас. %) и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (0,27 мас. %), в которых под воздействием гамма-излучения оптическое пропускание практически не изменялось [57].

В работе [58] рассмотрено влияние ИИ на СИОМ как классическая сумма ионизирующего и смещающего эффектов. Ионизирующий эффект отвечает за возникновение «центров окраски», образованных точечными дефектами в структуре кристалла, которые служат ловушками для заряженных частиц, формируя области с измененной электронной конфигурацией и поглощающей падающий на них свет с определенной длиной волны. Если поглощение «центров окраски» находится вблизи рабочей длины волны волновода, стоит ожидать существенного увеличения РНП. За эффект смещения отвечают протоны, нейтроны и ТЗЧ, которые попадая в кристаллическую решетку, разрушают ее, приводя к аморфизации решетки, изменению показателя преломления, радиационному распуханию и охрупчиванию. При этом в данной работе экспериментально показано, что РНП и коэффициент деления Y-разветвителя для СИОМ с рабочей длиной волны 1310 нм изменяются при воздействии гамма-

излучения от источника ^{60}Co с дозой до 5 кГр и мощностью дозы 50 рад/с не более чем на единицы процентов, при этом полуволновое напряжение ЭОМ остается неизменным, а СПИ изменяется незначительно как в лучшую, так и в худшую стороны (к сожалению, точность измерений не приведена, поэтому не понятно, эти изменения в пределах погрешности измерений или это истинные изменения величины). Исследования проводились также для потока протонов, исследовались два режима, в первом из них энергия протонов составляла 5 МэВ, скорость потока – $2,08 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, общий поток – $2,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; во втором – энергия протонов составляла 350 кэВ, скорость потока – $3,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, общий поток – $1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, и потока нейtronов, скорость потока – $4,46 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, общий поток – $1,56 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Кроме этого, в этой работе были проведены исследования долговременного поведения РНП после облучения. К сожалению, было обнаружено существенное увеличение РНП за последующие два года наблюдений, причем после протонного облучения РНП растут линейно. За время облучения прирост составил 0,02 дБ, а за два последующих года еще 0,05 дБ. Для случая гамма и нейтронного облучения картина была более сложной. В первый год наблюдалась слабая релаксация, а затем происходил рост РНП. Причины такого поведения авторами не объясняются, и не приводится точность методики измерений. Также не высказываются предположения, почему на фоне роста РНП не изменяется полуволновое напряжение, а значит не изменяется и электрооптический коэффициент, т.е. существенно не изменяется и кристаллическая решетка. Упущением авторов является и то, что полученные результаты не сравниваются с результатами для контрольного образца и его поведением за тот же период, поскольку рост РНП со временем может быть вызван не только повреждениями кристаллической решетки, а также деградацией полимерных kleев, используемых длястыковки с оптическим волокном.

Оба типа волноводов на монокристалле ниобата лития для рабочей длины волны 1300 нм считаются одинаково стойкими (РНП до 0,1 дБ) при облучении с дозой до 5 Мрад для гамма-излучения и потока нейтронов при медленном наборе

дозы и импульсе нейтронов с потоком 10^{12} н/см² и 10^{14} н/см², с временем импульса 100 - 300 мс, все эксперименты проводились при комнатной температуре [55, 59 - 62].

Литературных данных о стойкости волноводов при импульсном воздействии гамма-излучения с дозой в импульсе от 10 Гр и временем импульса десятки наносекунд, а также импульсном потоке нейтронов с временем импульса менее 0,1 мс практически нет. Также отдельной задачей выступает проверка свойства сохранения поляризации излучения для протонообменных волноводов при импульсном воздействии ИИ.

Есть работы по МЗМ с протонообменными волноводами, поскольку они широко применяются для бортовых ВОЛС и т.п. Однако, эффекты, исследуемые в МЗМ (дрейф рабочей точки модулятора интенсивности) [63] не обязательно должны проявляться в СИОМ.

Выводы по разделу 1.3

1. Предпочтительна протонообменная технология для изготовления СИОМ, поскольку для технологии диффузии титана замечены нестабильности поведения ТМ моды под действием ИИ [52], а также требуется изучение стойкости к ИИ пленочного поляризатора.
2. По литературным данным для длин волн 1300 нм и 1310 нм протонообменные волноводы показали удовлетворительный уровень РОС.
3. Не исследовались РНП протонообменных волноводов в зависимости от температуры в опыте, при воздействии импульсного ИИ с временем импульса менее 0,1 мс, не установлены причины слабой деградации величины пропускания протонообменных волноводов в ближнем ИК диапазоне, нет данных по РНП на рабочей длине волны 1550 нм.
4. Необходимо изучить поведение СИОМ при воздействии непрерывного и импульсного ИИ в активном режиме, проводя измерения непосредственно в процессе облучения на рабочей длине волны (1550 нм) с оптической мощностью, используемой в работе ВОГ (т.е. на уровне единиц мВт).

1.4. Стойкость активного эрбьевого ОВ для СВИ

Исследования радиационно стойких СВИ для ВОГ в литературе встречаются реже, чем исследования поведения активного волокна в усилителях [64-71], при этом известно, что активное волокно – наиболее чувствительный к ИИ элемент СВИ, вносящий вклад в радиационно-наведенные оптические потери при воздействии гамма-излучения [65, 66, 72-75].

Уровень РНП в волокнах, легированных ионами редкоземельных элементов, очень большой в сравнении с РНП в пассивных волокнах. Высокая чувствительность активных волокон к облучению связана с легирующими добавками – фосфором и алюминием, которые необходимы для предотвращения образования кластеров ионов, снижающих эффективность преобразования излучения накачки в выходное излучение [64].

В работах [76-78] продемонстрирована идентичность влияния протонного ИИ и гамма-излучения на АОВ. В работе [79] найдено, что относительная деградация усиления спонтанного излучения не зависит от концентрации ионов эрбия в АОВ, РНП в основном обусловлены точечными дефектами в структурной сетке кварцевого стекла, связанными с примесями Al_2O_3 в световоде. В работе [80] обнаружено, что ИИ вызывает изменения во временных параметрах люминесценции ионов эрбия, что также объясняется наличием примеси Al_2O_3 , при этом поскольку спектры поглощения АОВ до и после воздействия ИИ не отличались, был сделан вывод о влиянии ИИ только на кварцевую сетку стекла АОВ, без влияния на поглощающие свойства Al_2O_3/Er^{+3} .

При облучении потоком протонов показано, что ИИ вызывает резкое снижение уровня люминесценции, обусловленное двумя процессами: увеличением РНП в диапазоне длин волн 1,53 мкм и ослаблением накачки в АОВ, причем РНП спектрально зависимы, для длины волны 980 нм РНП растут в разы быстрее, чем для 1553 нм. Наглядно сравнение РНП на 980 нм и 1550 нм показано на Рисунке 1.4 из работы [81].

Поэтому при воздействии ИИ, из-за увеличения поглощения на длинах волн накачки и генерации, в СВИ наблюдается уменьшение выходной мощности

сигнала, а также изменение спектральных характеристик выходного излучения (изменение средневзвешенной длины волны) [72]. Это напрямую влияет на точностные характеристики ВОГ.

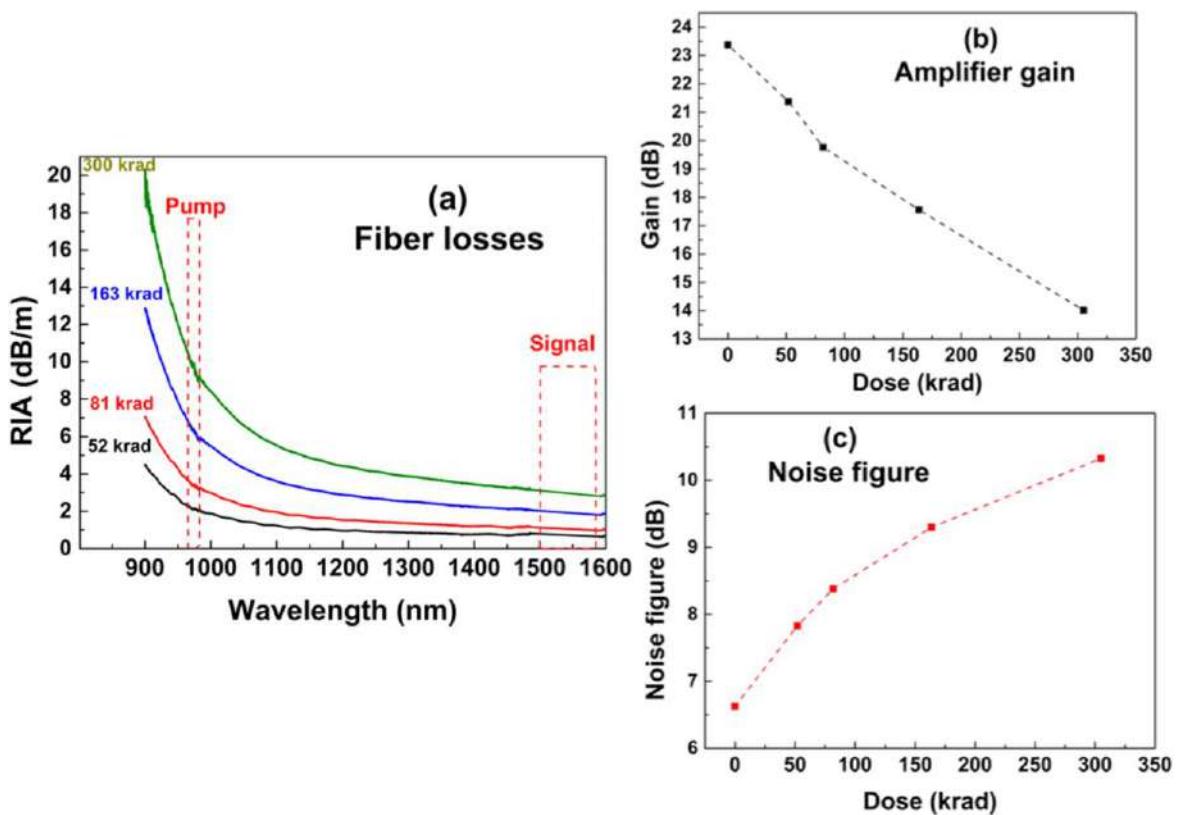


Рисунок 1.4 – Зависимость РНП (RIA) от длины волны для доз: 0,5, 0,8, 1,6 и 3 кГр (а); зависимость коэффициента усиления от дозы (эксперимент) (б); модельная зависимость шума усилителя от дозы (с) [81].

Известно несколько способов повышения стойкости к ИИ эрбьевых волокон.

Первый способ — нанесение на волокно во время вытяжки герметичного углеродного покрытия, а затем наводораживание или дейтеририрование при высокой температуре [73, 82]. Наличие водорода или дейтерия в сетке стекла препятствует возникновению радиационных центров окраски. Модификацией этого метода является предложение помещать АОВ в газостате с водородом или дейтерием прямо во время эксплуатации [83]. С точки зрения промышленной технологии производства АОВ и ВОГ такой метод вызывает много вопросов по надежности и гарантии срока службы АОВ. Использование газостата с

водородом или дейтерием в ВОГ выглядит еще более труднореализуемой задачей.

Второй способ — легирование сетки стекла ионами элементов переменной валентности, например, ионами церия. Для объемных стекол эта методика известна и широко применяется [84-86]. Для оптических волокон, легированных эрбием этот метод реализован компанией iXBlue (ранее iXFiber) [9, с. 7, 87-89]. Также известно эрбьевое АОВ НЕ980 и HG980 от компании Lucent Technologies, легированном ионами лантана [90].

Еще одним вариантом является объединение способов — легирование церием и насыщение водородом [91].

Помимо непосредственного изменения материала АОВ для повышение радиационной стойкости источника оптического излучения существует ряд методов, основанных на эффекте фотообесцвечивания. Известно, что для эрбьевых СВИ применяется накачка на длинах волн 980 нм либо 1480 нм, однако оказалось, что использование накачки на 980 нм является предпочтительнее [73]. Объясняется это тем, что в таком случае фотообесцвечивание РЦО происходит сильнее, так как энергия фотонов на 980 нм больше, чем у фотонов на 1480 нм.

Точный химический состав и конструкция волокон являются коммерческой тайной, поэтому типичное исследование стойкости АОВ сводится к сравнению одного АОВ неизвестного состава и конструкции с другим АОВ неизвестного состава и конструкции, у которого каким-то образом оптимизированы параметры, например, длина волны отсечки или состав легирующих добавок, а далее убедительно показывается улучшение характеристик при одном выбранном режиме облучения, упуская влияния данного изменения на поведение АОВ при использовании в других условиях. В качестве примера можно привести работу [92].

В основном, исследования АОВ проводились к только воздействию непрерывного ИИ для применения волокон в условиях космического пространства [91, 92]. После воздействия непрерывного ИИ на коммерчески доступные стойкие АОВ ухудшаются характеристики выходной мощности,

дифференциальной эффективности, уменьшается мощность накачки, увеличивается нестабильность выходной мощности на термоциклах (Рисунки 1.5 – 1.7), при этом ухудшение характеристик может быть компенсировано увеличением тока ДН, поэтому АОВ обеспечивают работу космической миссии в течение 7-10 лет на низко-, средне- и геостационарных орbitах [93].

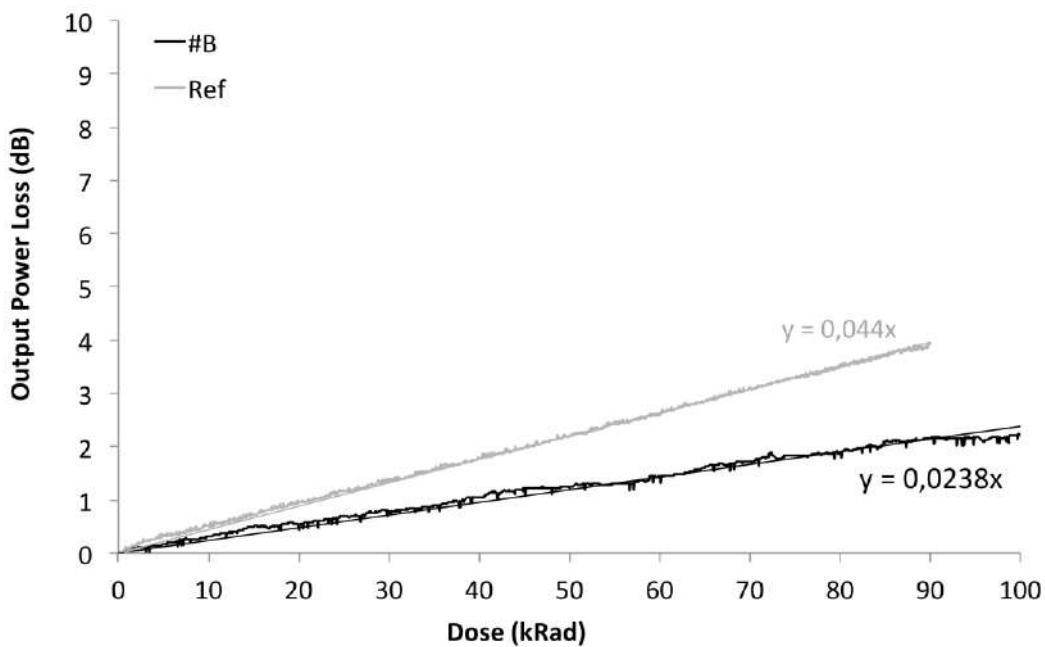


Рисунок 1.5 – Зависимость потерь выходной мощности накачки от дозы облучения – #B, без облучения – Ref [92]

Конфигурация схемы СВИ, в составе которой испытывается АОВ может влиять на результат исследования [65 -71]. В работе [65] исследовались параметры двухпроходного СВИ с встречной накачкой при воздействии на него непрерывного гамма-излучения, включая потери мощности и дрейф средневзвешенной длины волны. При непрерывном облучении с источника ^{60}Co с мощностью дозы 3,6 Гр/ч до дозы 200 Гр в конце облучения средняя длина волны дрейфовала на величину примерно 4 нм (0,256 %, или 2559 ppm), при этом выходная мощность снизилась на 18 – 19 дБ.

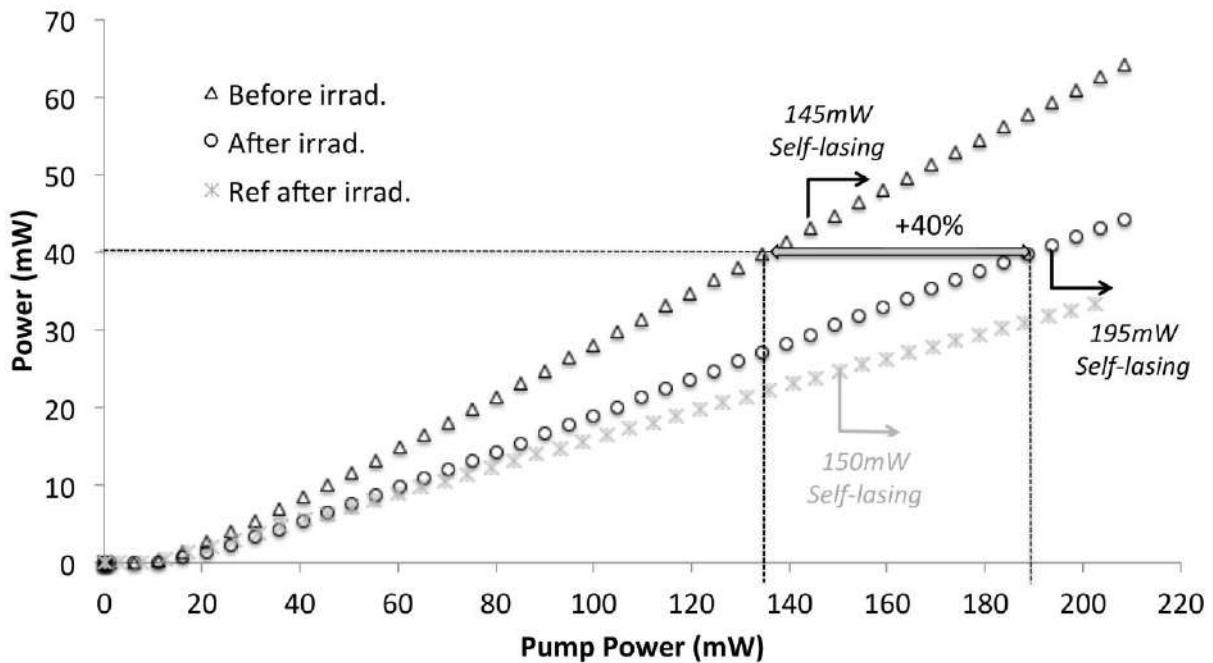


Рисунок 1.6 – Зависимости выходной мощности от мощности накачки для АОВ до и после воздействия ИИ (треугольники – данные до облучения, кружки – после облучения, крестики – контрольные данные после облучения) [92]

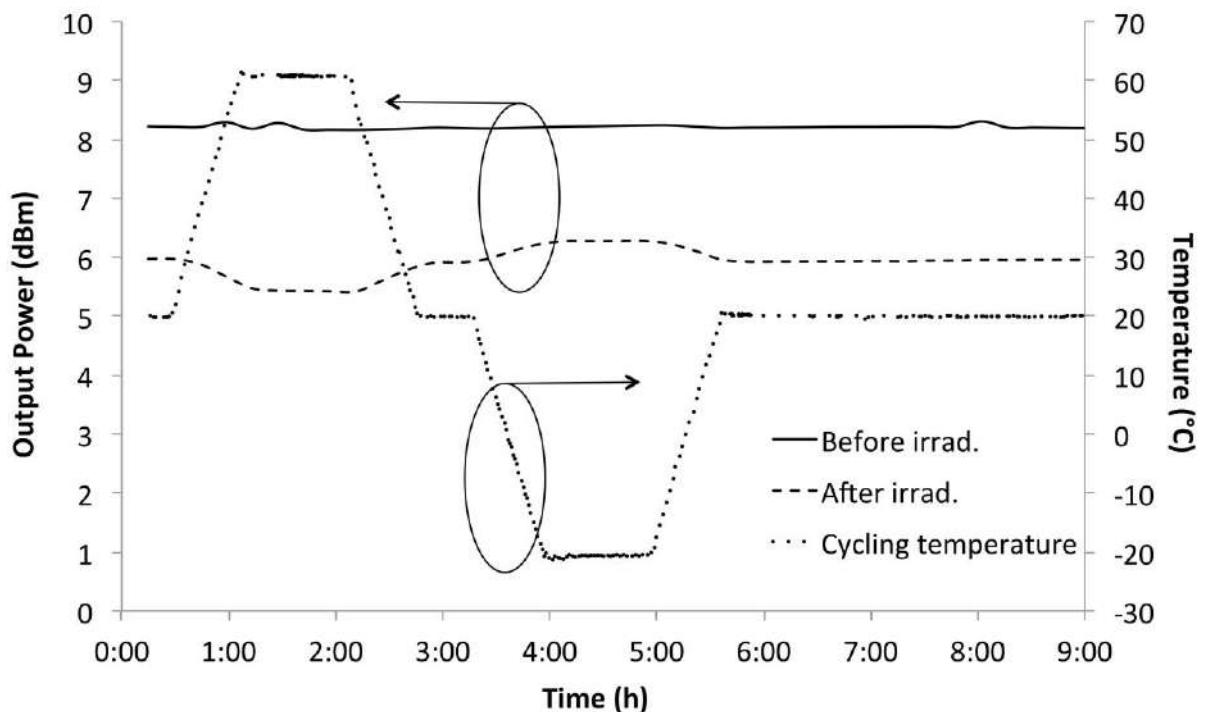


Рисунок 1.7 – Зависимости выходной мощности АОВ на термоциклах до и после воздействия радиации [92]

В работах [68 – 70] дана оценка изменения выходных параметров СВИ без обратной связи. В однопроходных конфигурациях с встречной накачкой уменьшение средневзвешенной длины волны достигает огромных величин порядка 5500 ppm, при этом мощность падает более чем на 60 % от исходной. Двухпроходная конфигурация [68], даже в отсутствие обратной связи, продемонстрировала более высокую стойкость к воздействию непрерывного гамма-излучения: дрейф средневзвешенной длины волны составил 210 ppm при поглощенной дозе 50 крад.

Использование в СВИ цепи обратной связи по стабилизации выходной мощности позволяет в значительной степени компенсировать изменение средневзвешенной длины волны. В работе [66] использование обратной связи позволило поддерживать уровень мощности практически постоянным. При общей поглощенной дозе 50 крад изменение выходной мощности составило менее 5 %, а форма спектра осталась достаточно стабильной.

По поведению характеристик АОВ для случая воздействия импульсного ИИ данные не найдены.

Обращает на себя внимание отсутствие устоявшейся методики исследований РОС АОВ. АОВ исследуется в схемах СВИ и усилителей, что не позволяет корректно оценить стойкость самого АОВ, поскольку конфигурация схемы оказывает влияние на РОС. А также нет четких требований к АОВ со стороны СВИ. Поэтому остается непонятным, где результаты достигнуты с помощью модификации схемы СВИ, а где основную роль играют свойства АОВ.

Выводы по разделу 1.4

Анализ литературы показывает, что АОВ, легированные церием или дополнительно насыщенные водородом, проверялись на стойкость к воздействию ИИ при комнатной температуре в различных конфигурациях СВИ и усилителей. При этом отсутствуют сведения о том, насколько ухудшаются характеристики АОВ в зависимости от мощности дозы и температуры эксперимента, также не проводились исследования по воздействию импульсного ИИ.

В России к моменту начала исследований отсутствовали промышленно производимые АОВ, стойкие к воздействию ИИ. По заказу ПАО «ПНППК» НЦВО РАН совместно с ИХВВ РАН проводили НИР по поиску состава и конструкции АОВ, стойкого к непрерывному ИИ и применимого в СВИ ВОГ. Были опробованы различные составы АОВ, которые показывали сравнимую стойкость к воздействию непрерывного гамма-облучения. Для выбора окончательного варианта состава и конструкции АОВ для постановки промышленной технологии требовалось проведение исследований по определению стойкости этих АОВ к воздействию импульсного ИИ, а после выбора, проведение более детальных исследований выбранного АОВ к воздействию непрерывного ИИ.

1.5. Радиационные эффекты в кварцевых стеклах и волокнах

1.5.1. Взаимодействие ИИ с кварцевым стеклом

Кварцевое стекло, в отличие от кристаллов, характеризуется наличием ближнего порядка и отсутствием дальнего [84, 94]. Структура стекла состоит из кремниево-кислородных тетраэдров, где каждый атом кремния окружен четырьмя атомами кислорода (Рисунок 1.8). Каждый из атомов кислорода принадлежит сразу двум тетраэдрам, т.е. как бы образует «мост» к другому атому кремния, являющемуся ядром соседнего кремниево-кислородного тетраэдра. Такие атомы кислорода называются мостиковыми. Углы $O - Si - O$ близки к идеальному углу тетраэдра ($109^\circ 28'$), и только углы между связями $Si - O - Si$ изменяются в пределах от 120° до 180° .

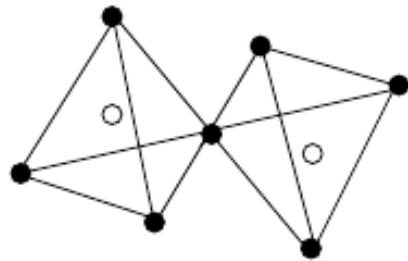


Рисунок 1.8 – Два соседних тетраэдра SiO_2 , светлые кружки – кремний, темные – кислород [84].

При взаимодействии ИИ с кварцевым стеклом для возникновения эффекта смещения требуется энергия для атомов кислорода, равная 16,5 эВ, а для атомов кремния – 33 эВ [95] (по данным работы [94] требуются энергии 18,8 эВ и 37,6 эВ, соответственно). Для образования вакансии кислорода минимальная энергия для налетающего электрона должна быть ~ 110 кэВ и для кремния ~ 320 кэВ [95], для выбивания электрона с внешней оболочки и образования вторичного гамма-кванта (эффект Комптона) достаточна энергия $\sim 10^5$ – 10^7 эВ [84, 96]. Максимальная энергия, которую приобретает электрон при комптоновском рассеянии гамма-кванта с энергией 1,25 МэВ (это типичная средняя энергия для источников излучения на основе изотопа ^{60}Co), равна

1,04 МэВ и этого оказывается достаточно для образования дефектов по ударному механизму [95].

Процессы образования и распада РЦО в процессе облучения согласно работе [84] происходят следующим образом:

- На начальных стадиях облучения возможен быстрый рост РЦО из-за заполнения носителями зарядов уже имеющихся ловушек.
- На последующих стадиях облучения может наблюдаться снижение скорости образования РЦО из-за уменьшения числа свободных ловушек, а также из-за возможности рекомбинации свободных носителей заряда с носителями противоположного знака, захваченными на соответствующих ловушках (дырочные центры захватывают электроны, а электронные – дырки).

Если наблюдается заметное снижение концентрации РЦО относительно уровня насыщения, то его называют процессом радиационного отжига РЦО.

1.5.2. Радиационно-наведенное поглощение в ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной и легированной германием сердцевиной

Исторически исследования механизмов, вызывающих РНП в ОВ, легированных германием, а затем в ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной проводились, в основном, на многомодовых конструкциях, у которых рабочие длины волн 850 нм и 1300 нм, и только последние два десятилетия исследования стали проводиться на одномодовых ОВ [93]. На Рисунке 1.9 очень наглядно показаны известные к настоящему времени полосы поглощения в таких ОВ. Следует отметить, что большинство из них находится в видимой или УФ области спектра.

Далее рассмотрим подробнее виды РЦО для каждого варианта состава сердцевины ОВ.

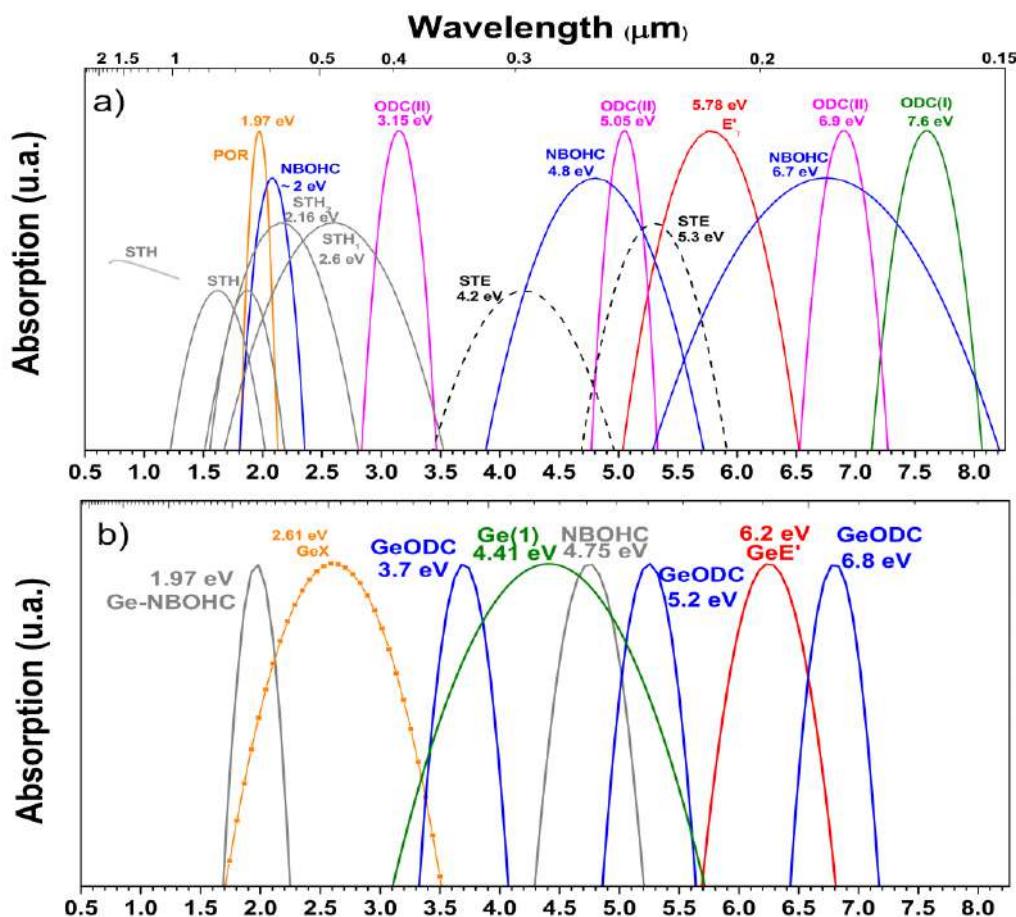


Рисунок 1.9 – Полосы поглощения в волокнах с нелегированной кварцевой сердцевиной (а) и в волокнах, легированных германием (б) [93]

1.5.2.1. Радиационно-наведенные полосы поглощения в волокнах с нелегированной кварцевой сердцевиной

К началу настоящей работы считалось, РНП ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной в области длин волн между 1000 нм и 1600 нм складываются из РПН от собственных РЦО кварцевого стекла и РЦО примесей, которыми, в первую очередь, являются фтор и хлор [97] (Рисунок 10 [98]). В сетке стекла в процессе осаждения оказывается хлор, поскольку используется тетрахлорид кремния $SiCl_4$. Наличие хлора в междоузлиях ведет к возникновению полос поглощения в широком диапазоне длин волн с максимумами на 300 и 330 нм (соответствует 3,26 и 3,68 эВ) и увеличению РНП [99 – 101]. Уменьшить включение хлора в стекло можно за счет фторирования. Фтор может быть специально введен в состав сердцевины ОВ или может диффундировать в сердцевину из фторсиликатной оболочки. При этом фторирование также может снизить РОС: в работе [102] показано, что у ОВ с сердцевиной, легированной малыми добавками фтора, при определенных условиях облучения снижается РОС.

РНП в коротковолновой области складываются из РЦО, образующихся при разрыве связи Si-O [103 – 105]. Это кислородно-дефицитные центры:

атомы кремния с оборванной четвертой связью (E^- -центры),

кислородно-дефицитные центры I и II типа (ODC(I) и ODC(II) – oxygen deficient center).

Это кислородно избыточные центры:

немостиковый кислород (NBOHC – non-bridging oxygen hole center),

пероксирадикал (POR – peroxy radical), пероксидные связи,

междоузельные молекулы кислорода – O_2 и озона – O_3 .

Причем для их образования требуется, чтобы связь была измененной длины – либо ослабленной, либо, наоборот, напряженной [106 – 107].

В РНП в УФ области спектра также вносят вклад короткоживущие самозахваченные экситоны [108 – 109] и самозахваченные электроны [110 – 111].

РНП в ближнем ИК-диапазоне складывается из двух типов короткоживущих РЦО с малой термостабильностью – самозахваченных дырок или по-другому – автолокализованных дырочных состояний (АДС-1 и АДС-2), в англоязычной литературе - STH – self-trapped holes, STH_1 и STH_2 [98, 112, 113]. Они возникают при условии, что химическая связь Si-O не разорвана, но у нее изменена длина или направление, т.е. сетка стекла деформирована. На два типа эти РЦО были поделены по поведению ЭПР-спектров, облученного кварцевого стекла. При комптоновском рассеянии гамма-квант выбивает р-электрон атома кислорода, который не участвует в химической связи и не имеет электронов на внешней оболочке. В этом случае электрон покидает свою орбиталь и оказывается в неглубокой ловушке вблизи дна зоны проводимости, а на месте электрона остается дырка, которая притягивает к себе электронные облака соседних атомов кремния, чтобы частично скомпенсировать положительный заряд. При этом происходит реконфигурация электронных облаков, изменение длин химических связей и валентных углов между близлежащими атомами [98, 112 – 116], что приводит к деформациям и напряжениям сетки кварцевого стекла (Рисунок 1.10). Дырка может быть локализована на р-орбитали одного атома кислорода (АДС-1) или одновременно на двух р-орбиталах соседних атомов кислорода, принадлежащих одному тетраэдру SiO_4 (АДС-2) (Рисунок 1.10). В работах [116, 117] было показано, что для возникновения АДС-2 необходимо, чтобы валентный угол O-Si-O был меньше нормального (109.4°), т.е. тетраэдры SiO_4 должны быть деформированы, а сетка стекла – напряженной. Как показано на Рисунке 1.9, к АДС (STH) относятся несколько полос поглощения с довольно сложной конфигурацией.

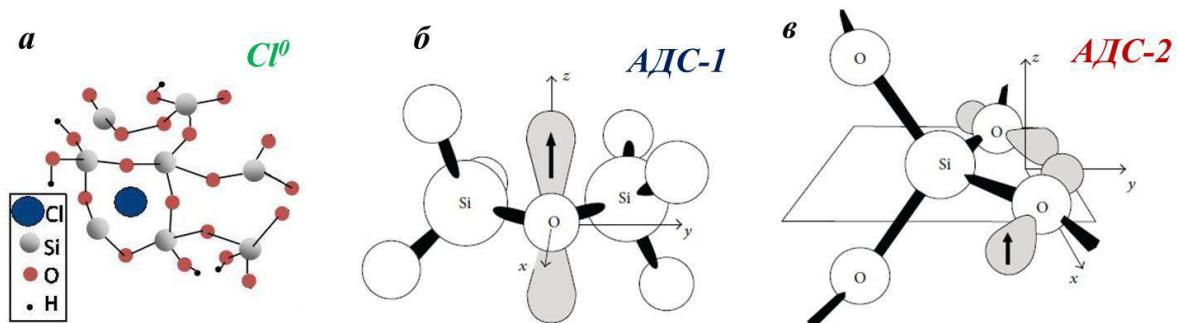


Рисунок 1.10 – Модели структуры дефекта Cl^0 -центр (а), АДС-1 (б), АДС-2 (в) [98]

В длинноволновой области спектра по итогам квантово-механических расчетов к АДС-1 отнесено низкотемпературное длинноволновое поглощение (LTIRA - «Low Temperature Infra-Red Absorption») ассиметричной формы с крутым спадом длинноволнового края и пологим коротковолновым краем с центром полосы поглощения на длине волны ~ 1700 нм [114], хвост которого существенно влияет на РНП в ближнем ИК диапазоне [118]. Также, с оговорками на высокую термостабильность, к АДС-1 относят высокодозную полосу поглощения с максимумом на длине волны 1800-2000 нм, которая является высокостабильной при комнатной температуре [119, 120]. Она растет монотонно с поглощенной дозой и становится основным механизмом РНП, ограничивающим радиационную стойкость, в ближнем ИК-диапазоне при больших поглощенных дозах (>100 кГр) [118]. Для волокон, легированных германием, эта полоса также наблюдалась [119].

Таким образом, к началу настоящей работы считалось, что РНП в области 1550 нм определяется «хвостами» полос из видимой и УФ области спектра [120, 121] и, наоборот, длинноволновой области [118, 120, 121], что наглядно изображено на Рисунке 1.11 [97].

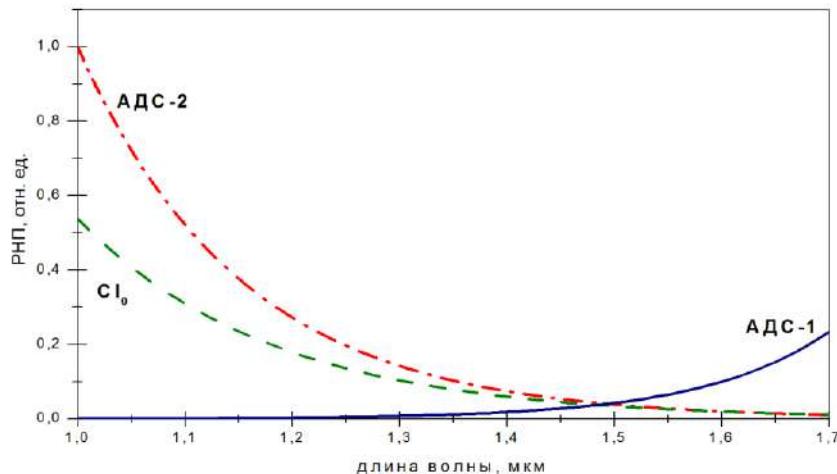


Рисунок 1.11 – Спектральные зависимости РНП, вызванных АДС-1, АДС-2 и Cl^0 -центром в ОВ с сердцевиной из нелегированного и легированного фтором кварцевого стекла (соотношение амплитуд трех РНП примерно соответствует неоптимизированному ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла при дозе излучения 100 кГр и мощности дозы 5 Гр/с) [97]

Одновременно с проведением настоящих исследований в работах [38, 122] обнаружена и исследована при различных температурах еще одна ранее неизвестная полоса РНП с центром на длине волны ~ 1250 нм (энергия ~ 1 эВ), которая особенно проявляется при низких температурах (ниже минус 30 $^{\circ}\text{C}$), причем она смещается в длинноволновую область в процессе набора дозы гамма-облучения и с повышением температуры от минус 60 $^{\circ}\text{C}$ до $+30$ $^{\circ}\text{C}$. Затем эту полосу наблюдали в работе [123].

Для коммерческих радиационно стойких ОВ с фторированной сердцевиной наблюдаются малодозные переходные РНП даже при комнатной температуре [124], и это может в значительной степени ограничивать радиационную стойкость в ближнем ИК-диапазоне. Такое поведение может быть связано как с возникновением полосы 1 эВ, так и с АДС-2, поскольку в [125] показано, что РНП от АДС-1 и Cl^0 -центра монотонно возрастают с увеличением дозы ИИ. В работе [127] делается предположение, что полоса 1 эВ принадлежит некоему промежуточному типу STH. В работе [38] предположено, что эта полоса может играть основную роль в ближнем ИК-диапазоне при импульсном облучении.

В патенте [126] предложен способ того, как в изотропном одномодовом ОВ с сердцевиной из кварцевого стекла без легирования фтора возможно подавить все три РЦО за счет оптимизации технологии производства ОВ. Детальных исследований по выявлению механизмов РНП в ближней ИК области для одномодовых волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной, сохраняющих поляризацию излучения, не проводилось.

1.5.2.2. Радиационно-наведенные полосы поглощения в волокнах с легированной германием сердцевиной

Для ОВ, легированных германием, известно довольно много полос поглощения, связанных с различными типами РЦО (Рисунок 1.9). Исследование температурной зависимости спектра РНП проводилось в работах [122, 128 – 136], что дало возможность идентифицировать новые типы РЦО и определить их основные свойства: GeY-центр [129] и Ge-LTIRA [130]. Основные РЦО в германосиликатных ОВ определяются вкладом от атомов германия [38, 137 – 140]:

1. Германиевый кислородно-дефицитный центр (ГКДЦ) (GeOGC-germanium oxygen deficient center) – незаряженный двухкоординированный атом германия с максимумом полосы поглощения на ~5,12 эВ и ~3,3 эВ [137];
2. Центр одиночной пары германия (GLPC- germanium lone pair center);
3. Трехкоординированный атом германия с одним неспаренным электроном (Ge-NBOHC), Ge E'-центр является аналогом E'-центра в нелегированном кварцевом стекле; максимум полосы поглощения на ~6,2 эВ;
4. Четырёхкоординированный кислородом атом кремния с захваченным электроном Ge(1) с максимумом полосы поглощения на ~4,4 эВ [138];
5. Ge(2) – природа неизвестна, максимум полосы поглощения на ~5,8 эВ [140];
6. GeX-центры, структура неизвестна, полоса поглощения с максимумом на длине волны ~2,61 эВ [137, 141];
7. GeY-центры с центром полосы на 1,38 эВ [38];
8. Переходные дефекты, которые имеют малое время жизни и возникают сразу после импульсного рентгеновского облучения; максимум полосы поглощения на 3,26 эВ [99, 142].

Все эти полосы поглощения находятся в коротковолновой области спектра. В видимом и ближнем ИК-диапазоне РНП монотонно уменьшаются с увеличением длины волны [137, 141].

В длинноволновой области спектра на РНП в ближнем ИК диапазоне (до 40 %–80 %) влияет полоса с длиной волны более 1700 нм неустановленной природы, имеющая высокую стабильность при комнатной температуре и растущая почти линейно до доз ~ 1 МГр без насыщения [119, 120, 137, 141]. Авторы [120] отнесли эту полосу к АДС, но связанную с германием (Ge-STH).

В работе [38] для ОВ с содержанием GeO_2 менее 3,5 мол.% обнаружена сравнительно долгоживущая полоса РНП гауссовой формы с максимумом на 1,38 эВ, с шириной на полувысоте 0,71 эВ, и энергией активации 0,15 эВ. Было установлено, что именно эта полоса ограничивает радиационную стойкость стандартных ОВ для оптической связи в ближнем ИК-диапазоне.

Выявление особенностей механизмов РНП в напряженно-деформированном состоянии структурной сетки стекла из-за напрягающих стержней для волокон с сохранением поляризации не проводилось.

1.5.2.3. Механизмы РНП в изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной и легированной германием сердцевиной при импульсном ИИ

Влияние импульсного ИИ на механизмы РНП изотропных оптических волокон (для волокон с сохранением поляризации таких исследований не проводилось) исследовано в очень небольшом числе работ. Это работы по влиянию импульсного потока протонов, нейтронов, рентгеновского излучения и тормозного излучения [112, 113, 142-148]. Каждый вид излучения имеет свои особенности, которые по-разному могут влиять на РНП. Также в имеющихся работах фигурируют разные условия облучения, разные энергии ИИ. Поэтому сведения получаются довольно отрывочными. Очень мало работ с использованием ИИ в диапазоне мощностей доз $10^6 - 10^{13}$ Гр/с, что может быть связано как с уникальностью установок (в России уникальная установка ЛИУ-30М в РФЯЦ ВНИИЭФ), так и с уровнем конфиденциальности работ.

Исследования в диапазоне поглощенной дозы менее 20 Гр показали меньшее РНП в волокнах с добавлением фосфора или азота по сравнению с волокнами из нелегированного кварца, хотя при больших поглощенных дозах волокна с фосфором демонстрируют очень большие РНП. Также, как и при непрерывном облучении, РНП уменьшается с увеличением длины волны. Для ОВ с германием, фосфором, азотом РНП почти линейно зависит от поглощенной дозы, волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной имеют нелинейную зависимость РНП. При пониженных температурах РНП растет и увеличивается время восстановления, при повышении температуры РНП уменьшаются при временах менее 10^{-4} с, также уменьшается время восстановления.

В работе [149] исследовали поведение полос поглощения с энергией 2,16 эВ и 2,60 эВ после импульсного облучения в объемных образцах кварцевого стекла. Было показано, что полоса поглощения с энергией 2,16 эВ более интенсивна, чем полоса с энергией 2,60 эВ сразу после импульса. Для волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной более интенсивной является полоса с энергией 1,63 эВ по сравнению с полосой с энергией 1,88 эВ. При непрерывном

облучении ситуация с интенсивностью соответствующих полос обратная. В работе [38] выдвинуто предположение, что полосы поглощения с энергиями 2,16 эВ и 1,63 эВ обусловлены присутствием STH 2, а полосы РНП с энергиями 2,60 и 1,88 эВ связаны с STH 1 по идентификации работы [149].

В работе [145] было высказано предположение, что за резкий рост РНП в оптических волокнах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла при воздействии импульсного излучения ответственны именно АДС (STH), что было подтверждено экспериментально.

АДС зависят, в большей мере, от мощности дозы, чем от величины дозы, поэтому при импульсном облучении эти дефекты являются доминирующими.

В работе [148] при импульсном воздействии (до 120 Гр в импульсе) РНП световодов с сердцевиной из нелегированного SiO_2 оказались тем больше, чем больше РНП в первые минуты их непрерывного облучения от источника ^{60}Co при мощности дозы $\sim 1\text{--}10$ Гр/с. Из этого был сделан вывод, что в обоих случаях РНП определяется поглощением АДС-2, которые являются короткоживущими дефектами и их концентрация сильно зависит от мощности дозы. Из-за поглощения АДС-2 у всех световодов с сердцевиной из нелегированного SiO_2 РНП оказались выше, чем у радиационно стойкого световода фирмы «J-fiber» и германосиликатного световода с приращением показателя преломления сердцевины $\Delta n \sim 0,01$, который продемонстрировал наименьшие из всех световодов РНП в интервале времен $(10^{-6} \text{--} 10^{-1})$ с (Рисунок 1.12).

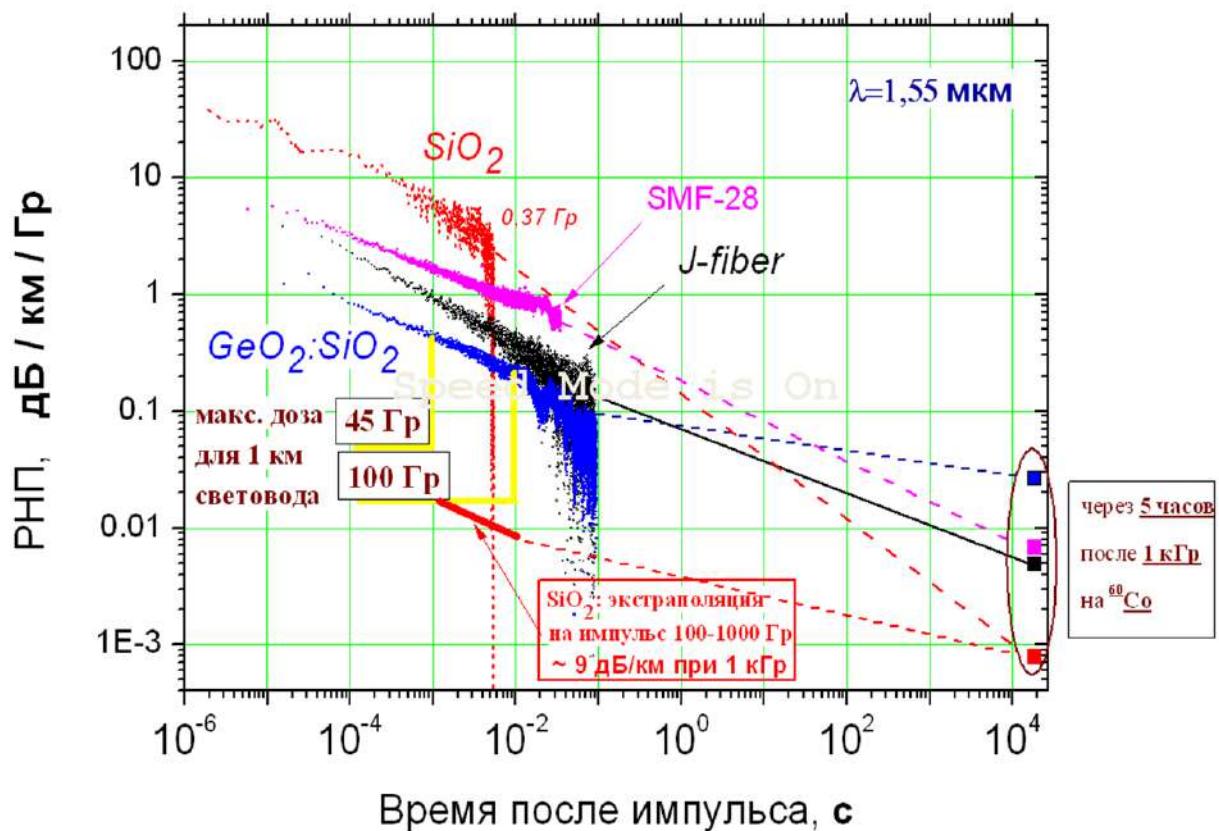


Рисунок 1.12 – Изменение во времени нормированных на дозу РНП в четырех световодах после воздействия на них γ -импульса: «SMF-28» – одномодовое ОВ; « SiO_2 » – световод с сердцевиной из нелегированного SiO_2 и фторсиликатной оболочкой, «J-fiber» – коммерческий радиационно стойкий световод MIL-PRF-49291/7-01 фирмы «J-fiber», « $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$ » – световод с высоколегированной германо-силикатной сердцевиной и оболочкой из нелегированного SiO_2 ($\Delta n = 0,01$). Символы \square и \blacksquare – нормированное на дозу РНП, измеренное через 5 часов после завершения непрерывного гамма-облучения от источника ${}^{60}\text{Co}$ до дозы 1 кГр, пунктир – интерполяция [148]

1.5.3. Влияние внешних факторов на РНП ОВ

Исследование РНП ОВ непосредственно во время и после облучения ИИ с точки зрения организации эксперимента уже является довольно непростой задачей. Возможно поэтому обычно опыты проводятся в условиях комнатных температур. При этом нельзя забывать о процессах термообесцвечивания и фотообесцвечивания РЦО – распада образовавшихся РЦО под действием температуры или проходящего оптического излучения. При этом знание температурной зависимости РНП необходимо, поскольку рабочий температурный диапазон ВОИД может начинаться от минус 60 °С и ниже [150]. Уровень оптической мощности, используемой в ВОИД зависит от конкретного назначения и конструктивных решений, и может быть в довольно широком диапазоне от микроватт до милливатт.

Влияние температуры на РНП в условиях непрерывного облучения исследовалось в небольшом числе работ и исключительно для изотропных ОВ, например, [38, 120, 125, 122, 151-155], где в диапазоне температур от 77 К до 400 К была показана общая для всех исследуемых волокон тенденция к увеличению РНП при понижении температуры с увеличением времени восстановления после облучения, а также неоднозначное поведение РНП волокон при повышении температуры. В зависимости от температуры и конкретного вида волокна зарегистрировано как снижение, так и рост РНП [156]).

Исследование температурной зависимости спектра РНП в изотропном одномодовом ОВ [122] позволило получить информацию о роли деформации при изготовлении ОВ в возникновении радиационно-индуцированных АДС, об одновременном существовании двух классов АДС (деформационных и собственных) в одном и том же ОВ, об их взаимном превращении при изменении температуры и т. д. [98, 112].

Эффект фотообесцвечивания для условий непрерывного облучения был зафиксирован еще в конце 1980-х гг. в работах [153, 157, 158], но до сих пор

исследование этого явления актуально [135]. В этих работах было показано, что увеличение оптической мощности проходящего излучения позволяет снизить РНП во время облучения. При этом чувствительность к данному эффекту у разных ОВ разная. Наиболее выражен эффект для ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной. В работе [153] удалось зафиксировать то, что увеличение оптической мощности препятствует релаксации РНП после облучения для ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной.

Для случая импульсного воздействия ИИ по исследованию температурной зависимости РНП известно еще меньше работ. Это работы зарубежных авторов – Girard S и Friebele E. J. [155, 159].

В России А.В. Филипповым недавно была выполнена обстоятельная работа [160]. В этой работе получен большой объем эмпирических данных по РНП изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной в условиях воздействия импульсного тормозного излучения при различных температурах и величинах проходящей оптической мощности, а также в зависимости от технологических факторов изготовления ОВ (вариации температуры вытяжки ОВ). Показано, что изменение температуры приводит к изменению количества РЦО, а большая мощность проходящего оптического излучения приводит к уменьшению времени жизни собственных дырок. Также установлено, что РНП в изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной при малых временах после импульса (менее 10 мс) определяются собственными дырками с полосой на 2,6 эВ и полосами вблизи 1 эВ – LTIRA, 0,94 и 1,2 эВ, при временах (от 10 мс до 2 сек) более долгоживущими РЦО с полосами поглощения вблизи 1 эВ и, в меньшей мере, деформационными дырками. Заключения о природе полос поглощения были получены из экспериментов по регистрации проходящего излучения на четырех длинах волн: 659 нм, 828 нм, 1310 нм, 1550 нм. К сожалению, в данной работе не было сделано попыток получения из экспериментальных данных аналитических зависимостей времени жизни РЦО от температуры и оптической мощности.

1.5.4. Радиационные эффекты в ОВ с сохранением поляризации излучения типа «Панда»

Исследования по возможности применения германосиликатной «Панды» в условиях космического пространства активно проводились, начиная с 1980-х гг. [161, 162].

В результате исследований установлено, что РНП в германосиликатных ОВ с сохранением поляризации излучения достаточно высокие, но при этом делается вывод о приемлемости использования таких ОВ в ВОГ в условиях космических миссий. В основном, исследования проводились для длин волн 850 нм и 1300 нм или 1310 нм. Зафиксированные РНП для длин волн 1300-1310 нм варьируются от 400 дБ/км для 100 крад с мощностью дозы 7,5 крад/мин (для длины волны 850 нм РНП составили 2000 дБ/км [163]) до 47,7 дБ/км для дозы 5 кГр с мощностью дозы 0,1 Гр/с [164]. Сообщается также о не ухудшении параметра СПИ.

В рассмотренных работах приводятся противоречивые данные по степени восстановлению характеристик ОВ после облучения – от почти полного восстановления до отсутствия восстановления. Возможно, столь различающиеся результаты вызваны различиями в используемой в то время технологией изготовления волокна. Так, стержни в работе [163] легированы алюминием, а в работе [164] уже, скорее всего, бором и фосфором или только бором, а такие характеристики, как величина двулучепреломления и коэффициент сохранения поляризации излучения в получаемых ранее ОВ значительно уступали современным. Технологии изготовления преформ и вытяжки ОВ также потерпели существенные изменения с 1980-х годов по настоящее время. Это свидетельствует о том, что РНП ОВ, скорее всего, определяются не только легирующими добавками и их концентрацией, но и, в не меньшей степени, технологией изготовления.

Очень интересные данные были получены в работе [162]. Это одна из немногих работ, где исследовалось поведение германосиликатной «Панды» (со стержнями, легированными алюминием) под импульсным потоком протонов с

энергией 200 МэВ с мощностью дозы $2,3 \cdot 10^8$ рад/с, длительностью импульса от 50 мкс до 425 мкс и дозой в импульсе от 2,6 крад до 17,4 крад. Исследование проводилось на длине волн 1300 нм и оптической мощности 1,3 мВт. Сообщается не только об ожидаемо высоких РНП, но и о различных РНП для двух поляризационных осей: вдоль медленной оси РНП тем больше, чем больше доза в импульсе (Рисунок 1.13). Сообщается также о восстановлении на 98 % характеристик волокна за 35-50 с после импульса в зависимости от величины дозы. Высокие, но обратимые РНП, авторами были связаны с действием больших полей от потока протонов линейного ускорителя, в большей степени, чем с возникновением центров окраски, связанных с атомами германия. Воздействие импульса потока протонов столь высоких энергий применительно к условиям космоса или ядерного взрыва все-таки очень экзотично. Исследований импульсного воздействия нейтронов и гамма-излучения на германосиликатную «Панду» с длиной волны 1550 нм не проводилось.

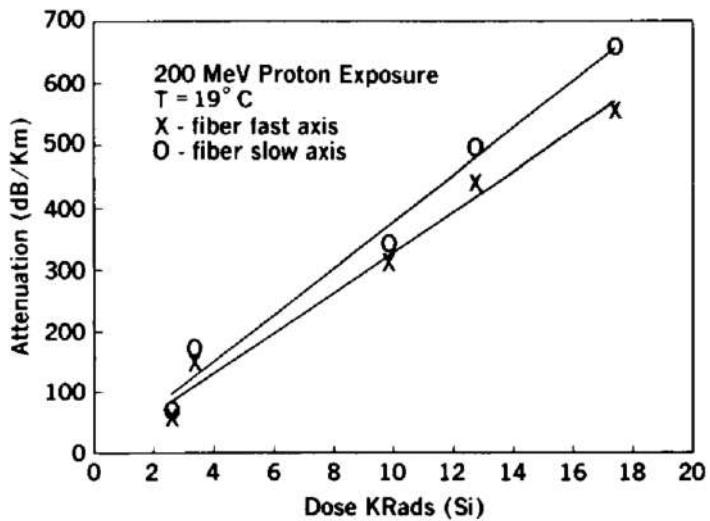


Рисунок 1.13 –Неэквивалентные РНП для быстрой (×) и медленной (○) поляризационных осей в зависимости от дозы излучения. Сплошная линия – линейная интерполяция [162]

В работе [165] показано, что в оптическом волокне, легированном германием, РНП составили $0,018$ дБ/м после облучения потоком нейтронов $4 \cdot 10^{13}$ н/см 2 . Гамма-излучение также вызывает большие потери в ОВ,

легированном германием, в интервале $0,06 \div 0,09$ дБ/м после дозы в 1 Мрад, по сравнению с $0,015$ дБ/м в волокне с сердцевиной из чистого кварца.

Литературных данных по стойкости ОВ к импульльному воздействию крайне мало. В работе [148] была проанализирована устойчивость изотропных ОВ различающимися составами сердцевины различных производителей к импульльному воздействию гамма-излучения (Рисунок 1.12). Показано, что ни один из известных типов световодов не проявил достаточной стойкости к импульльному воздействию ИИ при больших длинах световода (~ 1 км), кроме световода с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, образец которого был изготовлен в ИХВВ РАН по специально разработанной технологии.

Одной из давно известных альтернатив ОВ с германосиликатной сердцевиной в условиях воздействия ИИ, является волокно с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла (SiO_2). Для создания волноводных свойств, оболочка такого ОВ легирована фтором, который понижает показатель преломления оболочки относительно сердцевины. Изотропные ОВ с сердцевиной из нелегированного SiO_2 неплохо изучены, но до сих пор продолжается их оптимизация и выявляются механизмы для снижения РНП при импульсном и непрерывном облучении [100, 113, 122, 143, 144, 166, 167]. Для ОВ, сохраняющих поляризацию излучения, картина немного иная. Встречаются работы по исследованию анизотропных ОВ в условиях непрерывного облучения, для применения ВОГ в условиях космоса [93, 100, 128], где рассматриваются индуцированные ИИ РЦО, приводящие к затуханию проходящего оптического сигнала.

При этом крайне недостаточно работ по исследованию поведения в условиях импульсного ИИ. Параллельно с проведением настоящих исследований появились работы по сравнению ОВ с нелегированной кварцевой и германосиликатной сердцевинами при импульсном облучении [135, 136].

Эффекты различия РНП в зависимости от направления света по быстрой или медленной осям ОВ с сохранением поляризации при импульсном облучении

излучения пытались наблюдать в работах [168 – 170]. Результаты получились противоречивыми, не дающими однозначного ответа.

Дополнительная сложность сопоставления результатов исследований разных работ состоит в очень сильном влиянии технологических факторов на результат стойкости оптических волокон, а также в крайне скучных данных об условии проведения исследований и даже о характеристиках исследуемых волокон. Например, в работе [171] сообщается о результатах исследования по воздействию непрерывного гамма-излучения на три типа ОВ, сохраняющих поляризацию излучения. На Рисунке 1.14 приведены зависимости РНП от дозы, мощности дозы, времени релаксации после облучения. Поскольку в работе не приводятся данные ни о составе сердцевины ОВ, ни о начальных характеристиках, длине волны тестирования, вводимой оптической мощности, температуре эксперимента, то сделать какие-либо однозначные выводы крайне сложно. Из работы следует, что один из типов ОВ демонстрирует сильную зависимость РНП от мощности дозы, все ОВ демонстрируют релаксацию РНП до достаточно низких значений, но за очень большой промежуток времени, более двух лет. Из контекста можно предположить, что речь идет о гироскопических ОВ с рабочей длиной волны 1300 нм, возможно с эллиптической оболочкой, возможно, с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла (один из видов ОВ с наиболее низким РНП).

В работе [172], выполнено сравнение четырех типов ОВ с сохранением поляризации для длины волны 1,3 мкм при непрерывном гамма-облучении с (мощность дозы 0,087 Гр/с) до дозы 730 Гр при комнатной температуре с входной оптической мощностью 20 мкВт. Два типа ОВ были легированы германием и фосфором, третье ОВ было с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и четвертое было легировано германием и фтором по технологии PCVD. Другие виды ОВ были изготовлены по технологии MCVD. Исходные характеристики ОВ, такие как начальные оптические потери, величины двулучепреломления не были приведены. Не были приведены и сведения о степени легирования и составах, напрягающих стержней. Делается

вполне очевидный вывод, что ОВ легированные германием и фосфором показывают неприемлемый уровень РНП.

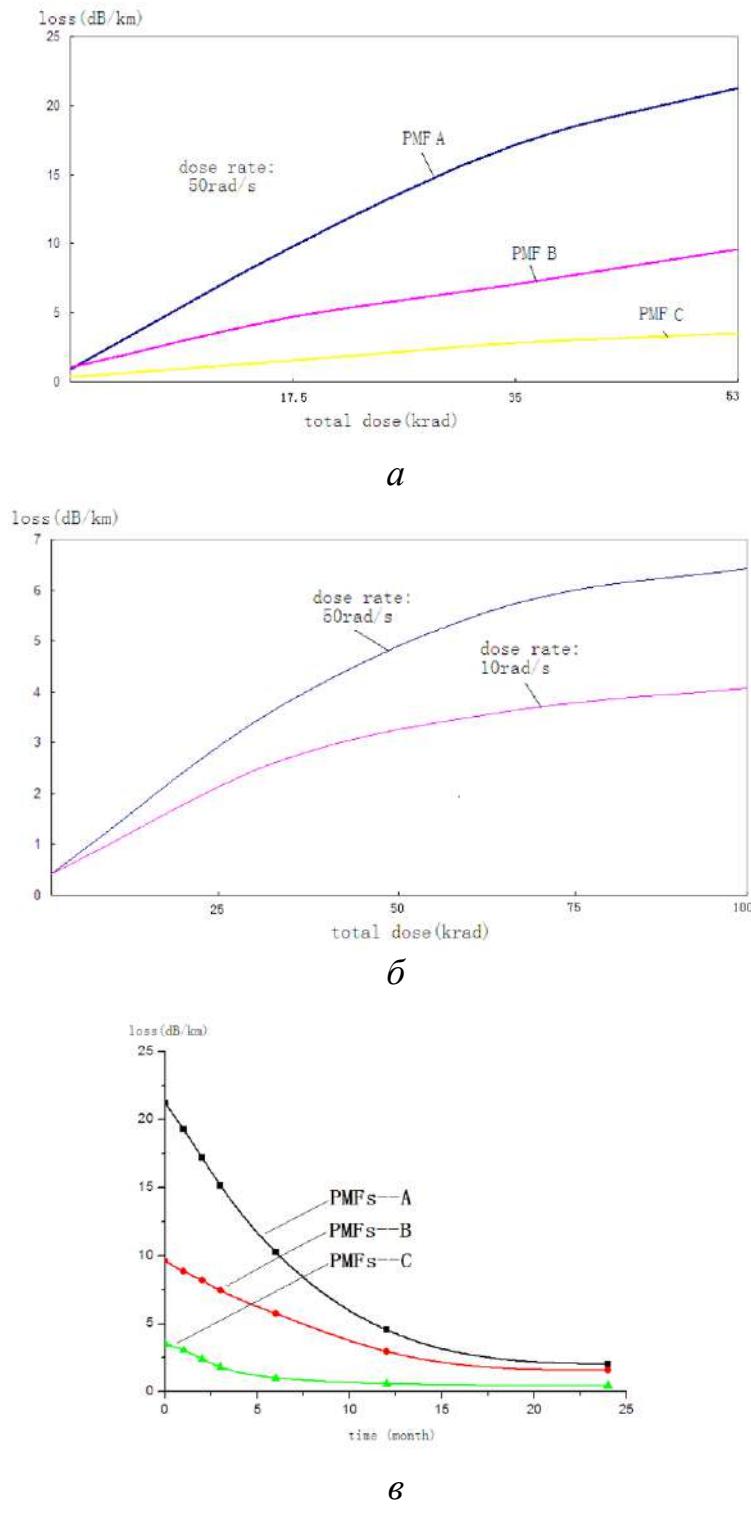


Рисунок 1.14 – РНП трех типов сохраняющих поляризацию волокон от дозы, мощность дозы 50 рад/с (*а*), РНП ОВ в зависимости от мощности дозы (*б*), релаксация РНП после облучения в месяцах-(*в*) [171].

Из результатов работы следует отметить то, что ОВ, полученное по технологии PCVD, несмотря на легирование германием показало РНП ниже, чем РНП ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной. Детального анализа полученных результатов не проведено, сделана отсылка к разности технологий изготовления волокон и наличия примесей в чистом кварцевом волокне из-за недостаточно хорошо отлаженного процесса.

Коммерчески доступные гироскопические ОВ с сохранением поляризации излучения, выпускают компании Fibercore, Nufern, IXblue, J-fiber, YOFC, OFS. Эти же компании производят ОВ, предназначенные для использования в условиях космической радиации. Однако только компании OFS (волокно GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining [173]), IXblue (волокно IXF-PMG-1550-80-019-E [174]), Fibercore (волокна HB1500G-RT, HB1500G-RT-SB [175]) производят гироскопические ОВ с сохранением поляризации излучения, предназначенные для условий космоса (параметры ОВ приведены в Таблице 1.2). Большинство этих ОВ имеют сердцевину с пониженным содержанием германия или полностью нелегированную кварцевую сердцевину (в спецификациях, к сожалению, не приводится состав сердцевины). В сравнении с характеристиками германосиликатных волокон с сохранением поляризации излучения, волокна с радиационной стойкостью проигрывают по таким параметрам как коэффициент затухания и величина длины биений (двулучепреломление).

К сожалению, реальную стойкость производимых волокон декларирует только OFS (GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining, тип «Панда»), и только при комнатной температуре. В дополнительной информации к спецификации [176] сообщается о РНП примерно 3 дБ/км для дозы 100 крад при мощности дозы 133 рад/с на длине волны 1550 нм и 2,5 дБ/км при дозе 100 крад при мощности дозы 1 рад/с. Для дозы 1 Мрад (мощность дозы 1 рад/с) приводятся РНП равные 14 дБ/км и 15 дБ/км при мощности дозы 150 рад/с (Рисунок 1.15 и 1.16), при этом не сообщается при какой оптической мощности происходит тестирование. Приводится также сравнение РНП (Рисунок 1.16) ОВ

GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining классического ОВ SMF28 (по материалам работы [177]) и изотропного одномодового ОВ производства Sumitomo (из работы [178]). Интересно отметить, что разница в РНП изотропного одномодового ОВ Sumitomo и сохраняющего поляризацию ОВ GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining никак не комментируется, поэтому непонятно, связана она с технологией производства или же с наличием напрягающих стержней в конструкции волокна.

Таблица 1.2 – Характеристики коммерчески доступных ОВ с сохранением поляризации излучения с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла или с пониженным содержанием германия

Производитель	OFS	IXblue	Fibercore	
Наименование волокна	GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining [173]	IXF-PMG-1550-80-019-E [174]	HB1500G-RT [175]	HB1500G-RT-SB [175]
Тип волокна	Панда	Эллипс	Галстук бабочка	Галстук бабочка
Рабочая длина волны, нм	1550	1500 – 1600	1520 – 1650	1520 – 1650
Коэффициент затухания на длине волны 1550 нм, дБ/км, не более	< 1,0	< 1,4	≤ 2	≤ 2
Длина волны отсечки, нм	< 1550	< 1480	1230 - 1520	1360 – 1520
Длина поляризационных биений, мм	< 4 на длине волны 1550 нм	< 1,5 на длине волны 633 нм	≤ 1,5 на длине волны 633 нм	
<i>h</i> -параметр, м ⁻¹	2·10 ⁻⁵ при намотке 200 м волокна на диаметр 20 мм	< 1·10 ⁻⁵		
Числовая апертура	-	0,19 ± 0,02	0,14 – 0,18	0,19 – 0,21
Диаметр модового поля на длине волны 1550 нм, мкм	8,9 ± 0,5	6,7 ± 0,5	6,9 – 9,3	6,0 – 7,0
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	80 ± 1	80 ± 1	80 ± 1	80 ± 1
Диаметр по полимерному покрытию, мкм	145 ± 7	172 ± 2	170 ± 5	165 ± 5
Рабочий диапазон температур	от -65 °C до +110 °C	от -40 °C до +85 °C	от -55 °C до +85 °C	от -55 °C до +85 °C
Пруф-тест, %	1	1	1 или 2 и больше	1 или 2 и больше
Данные по стойкости к ИИ, λ=1550 нм	3 дБ/км (100 крад, 133 рад/с) и 2,5 дБ/км (100 крад, 1 рад/с), а также 14 дБ/км (1 Мрад, 1 рад/с) и 15 дБ/км (1 Мрад 150 рад/с)	численные данные отсутствуют		

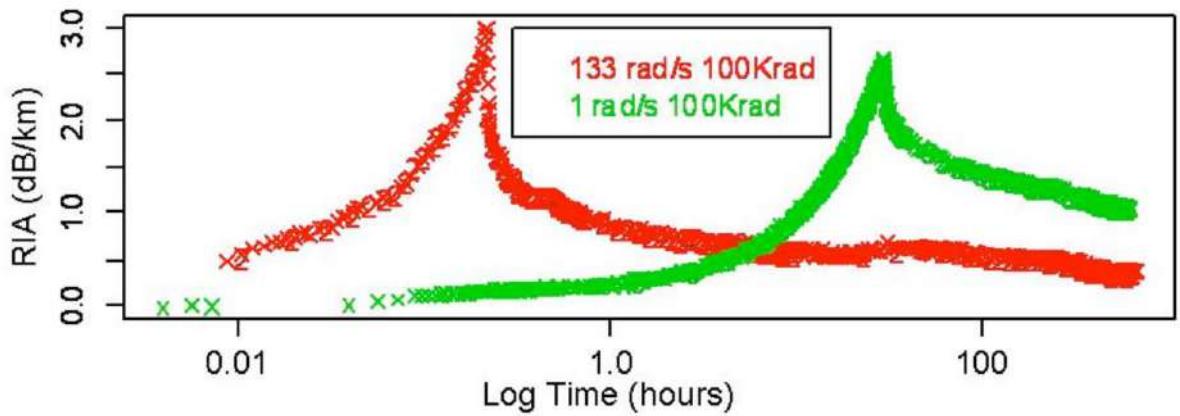


Рисунок 1.15 – РНП ($\lambda=1550$ нм) волокна GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining производства компании OFS после облучения (доза 100 крад, мощности дозы 1 рад/с и 133 рад/с) и при последующем отжиге при 35°C в течение 500 ч [176].

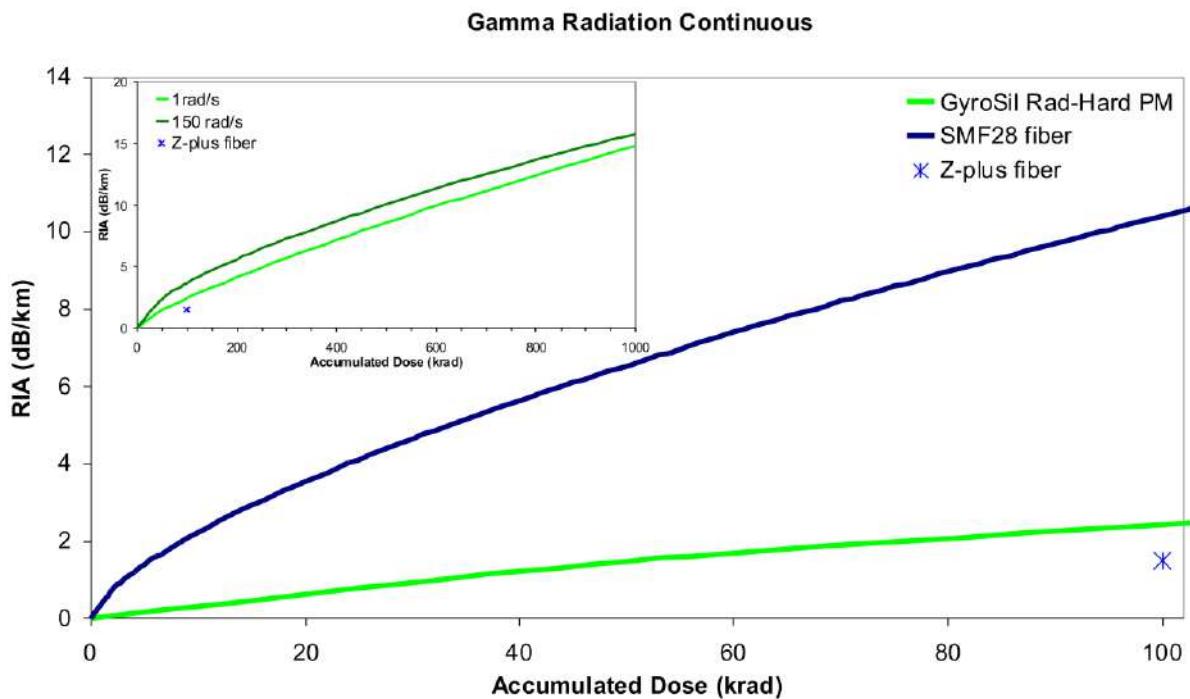


Рисунок 1.16 – РНП ($\lambda=1550$ нм) волокна GyroSil 1550 Rad-Hard PM по отношению к классическому волокну SMF28 по материалам работы [177] и к изотропному одномодовому волокну Z-plus производства Sumitomo [178]; на вставке РНП ($\lambda=1550$ нм) волокна GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining при двух мощностях дозы 1 рад/с и 150 рад/с до достижения дозы 1 Мрад [176]

Для волокон IXblue (IXF-PMG-1550-80-019-E, «эллипс») из данных работы [179] известно о высоком значении величины фотообесцвечивания суммарно для АОВ и гироскопического ОВ, что позволило навигационной системе работать на орбите на несколько лет дольше рассчитанного срока службы.

Для сравнения в Таблице 1.3 приведены данные по коммерчески доступным изотропным одномодовым ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, в том числе для высокотемпературных применений. Данных по радиационной стойкости таких ОВ значительно больше, хотя также, как правило, данные по условиям испытаний в части вводимой оптической мощности отсутствуют.

К началу диссертационной работы в России существовало несколько опытных производств радиационно стойких ОВ с небольшими объемами выпуска:

1. ФИРЭ РАН: одномодовое радиационно стойкое ОВ типа Панда с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом, изготовленное методом PCVD [180, 181];

2. НИТИОМ ГОИ им. Вавилова: одномодовое радиационно-стойкое ОВ с фторсиликатной оболочкой и сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, изготовленное методом MCVD [182–184];

3. ИХВВ РАН, НЦВО: одномодовое радиационно стойкое изотропное ОВ с фторсиликатной оболочкой и сердцевиной из кварцевого стекла, изготовленное методом MCVD [166].

Стойкость одномодового радиационно стойкого оптического волокна типа Панда с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом, изготовленного методом PCVD исследовалась также только при комнатной температуре и к воздействию непрерывного ИИ. При этом в работе [185] показано, что при облучении ОВ возникают близкие к рабочей длине волны РНП на длине волны 1380 нм из-за OH-групп и на длине волны 1510 нм из-за NH-групп, что ограничивает стойкость ОВ.

Таблица 1.3 – Характеристики изотропных одномодовых волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной

Компания производитель и марка волокна	Fibercore SM1500SC [186]	Draka RadHard SM Optical Fibre [187]	Draka Super RadHard SM Optical Fibre [188]	Nufern NuSENSOR Pure Silica Core SM Fiber [189]	IXblue IXF-RAD-SM-1550-014-PI [190]	IXblue IXF-SM-1550-125-0.14-PI [191]	J-fiber SMF 09/125 RH [192]	YOFC RD SM-G3 [193]
Коэффициент затухания на длине волны 1310 нм / 1550 нм, дБ/км, не более	нет данных 0,4 / 0,3 0,8 / 0,8				нет данных / 0,6	0,6 / 0,4	0,4 / 0,3	0,4 / 0,3
Рабочий диапазон температур, °C	от -55 до +300	от -60 до +85	от -60 до +85	от -40 до +300	от -60 до +300	от -60 до +300	от -60 до +85	от -65 до +85
Радиационно-наведённое затухание (РНП)	нет данных	~30 дБ/км (λ =1570 нм, 24 °C, 10 кГр, скорость набора дозы 0,45 Гр/с) ~2,5 дБ/км (λ =1300 нм, 24 °C при дозе 10 кГр, скорость набора дозы 0,2 Гр/с); ~5 дБ/км (100 кГр, скорость набора дозы 1,6 Гр/с) ~10 дБ/км (2 МГр, скорость набора дозы 1,25 Гр/с)	нет данных	~25 дБ/км (λ =1550 нм, 1 МГр)	~100 дБ/км (λ =1550 нм, 1 МГр)	не более 15 дБ/км (доза и скорость набора дозы не указаны, - 28 °C); не более 5 дБ/км (25 °C); не более 5 дБ/км (85 °C)	не более 3 дБ/км (λ =1310 нм, 25 °C, 50 крад, скорость набора дозы 0,1 рад/с); не более 20 дБ/км ((λ =1310 нм, λ =1550 нм, 25 °C, 0,2 МГр, скорость набора дозы 0,5 Гр/с)	

1.5.5. Методы изготовления ОВ типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной

1.5.5.1. Методы изготовления изотропных волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной

Парофазные методы получения заготовок волокна по характеру образования и осаждения оксидов кремния и легирующих компонентов подразделяются следующим образом: – метод внутреннего парофазного осаждения (модифицированное химическое парофазное осаждение – MCVD – modified chemical vapor deposition); – метод внешнего парофазного осаждения (OVD – outside vapor deposition); – метод парофазного осевого осаждения (VAD – vapor axial deposition); – плазмохимические методы (PMCVD, PCVD и т.д.). Сравнение данных методов приведено в Таблице 1.4. Наибольшими преимуществами обладает метод PCVD, благодаря наибольшей эффективности осаждения, легкому контролю профиля показателя преломления и приемлемой скоростью осаждения для серийного производства. Также, в отличие от метода MCVD, он позволяет легировать кварцевое стекло азотом и имеет большую эффективность осаждения фтора для увеличения разности показателей преломления между сердцевиной и оболочкой. Технология PCVD требует чистоту входящих материалов на порядок выше, чем применяется в MCVD. Поскольку в РФ едва достигнуты требования по чистоте исходных материалов для MCVD, технология PCVD в полном объеме может оказаться нереализуемой из-за отсутствия требуемых особо чистых материалов, которые запрещены к поставке в РФ.

Таким образом, для создания высокотехнологичного серийного производства заготовок оптического волокна с нелегированной, либо фторированной сердцевиной и фторированной оболочкой на территории РФ, подходят две технологии:

- MCVD, технология проста в освоении, при этом позволяет ввести только невысокую концентрацию фтора в кварцевое стекло, значения числовой апертуры ОВ от 0,15 до 0,19;
- PCVD, технология требует освоения и приобретения соответствующего оборудования, позволяет ввести высокую концентрацию фтора в кварцевое стекло по сравнению с MCVD, что обеспечивает достижения значений числовой апертуры до 0,24.

Таблица 1.4 – Сравнение парофазных методов

Основные характеристики	Наименование метода				
	MCVD	PMCDV	PCVD	OVD	AVD
Тип хим. реакции	Окисление	Окисление	Окисление	Гидролиз	Гидролиз
Вид подачи энергии	О ₂ -Н ₂ -горелка	ВЧ-плазма, О ₂ -Н ₂ -горелка	СВЧ-плазма	О ₂ -Н ₂ -горелка	О ₂ -Н ₂ -горелка
Скорость осаждения, г/мин	0,5-2	3-6	0,5-2,5	до 6	до 4,5
Эффективность осаждения SiCl ₄ , %	50-60	70-90	100	50-70	50-70
Кол-во ОВ из заготовки, км	5-10	20-50	5-10	>50	50-100
Контроль профиля ПП	Очень легко осуществим	Нелегко осуществим	Очень легко осуществим	Легко осуществим	Осуществим

Все вышеперечисленные технологии не открыты к изучению и являются ноу-хау лидеров среди мировых производителей оптического волокна.

Ни в одной научной статье детально не описывается, а только называется технология изготовления преформ оптических волокон с сердцевиной нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой, либо с сердцевиной и оболочкой из кварцевого стекла, легированного фтором. Данные технологии запатентованы и описаны общими терминами, которые сложно применить на практике, особенно в отсутствии соответствующего оборудования.

Возможность изготовления радиационно стойких ОВ путем создания нелегированной кварцевой сердцевины и отражающей оболочки с пониженным показателем преломления показана в работах [124, 194, 195]. Понижение показателя преломления достигалось путем легирования фтором или бором. Сравнительные исследования ОВ с легированной германием и нелегированной

кварцевой сердцевинами показало наглядное преимущество чистого кварца в сердцевине [196].

Отдельным направлением следует выделить фторирование сердцевины ОВ. Малое количество фтора может там оказаться в результате диффузии из оболочки. В этом случае точное количество фтора определить сложно, как и наличие положительного эффекта от его наличия. Сознательное фторирование ОВ исследовалось в работах [154, 197]. Авторы [107] показали, что фтор не образует РЦО в видимом и ИК диапазонах, а также подавляет образование других РЦО. Причиной такого поведения в работе [181] назван разрыв фтором напряженных 3-х и 4-х-звенных колец Si-O, которые являются предшественниками РЦО. В изотропных ОВ фторирование применяет компания Draka. При этом в работе [102], показана ограниченность такого подхода – ОВ с сердцевиной, легированной малыми добавками фтора при определенных условиях облучения теряют РОС.

Вынужденной примесью в сердцевине ОВ является хлор, попадающий в сетку стекла в процессе распада хлорида кремния во время осаждения. «Хвост» полосы поглощения хлора вносит ощутимый вклад в РНП во всех окнах прозрачности кварца [101, 103]. Поэтому логичным ответом являются технологические приемы, препятствующие входу хлора в сетку стекла. При этом в отсутствие хлора более интенсивными становятся РЦО, связанные с АДС с максимумами на длинах волн 660 и 760 нм [101, 198].

В работе [181] была продемонстрирована возможность получения методом MCVD заготовок одномодовых оптических волокон с кварцевой сердцевиной и фторсиликатной светоотражающей оболочкой с разностью показателей преломления между сердцевиной и оболочкой $\Delta n = (8,5 \div 10) \cdot 10^{-3}$. Для формирования фторсиликатной оболочки использовался фторид кремния SiF_4 . Были показаны преимущества и недостатки двух технологических приемов:

- одностадийного, в котором одновременно осаждали и остекловывали слои; такой метод прост в реализации, но не позволяет получить величину Δn , такую, как в двухстадийном методе;

- двухстадийного, в котором первоначально осаждали пористые слои кварцевого стекла, а затем их остекловывали в атмосфере SF_4 или SF_4+O_2 ; данный метод позволяет получить величину $\Delta n = 0,01$, но довольно сложен и капризен в реализации.

В работе [121] убедительно показано преимущество формирования кислородно дефицитной нелегированной кварцевой сердцевины ОВ для достижения высокой радиационной стойкости.

В противовес этому в работах [38, 124, 199, 200] предлагается для подавления деформационных АДС использовать избыток кислорода, согласованный с количеством фтора в отражающей оболочке.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения процесса MCVD для изготовления одномодового волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной с высокой радиационной стойкостью. При этом следует учесть, что выводы в приведенных работах были сделаны для конкретного парка оборудования и используемых материалов. Они могут быть не полностью воспроизводимыми для другого парка оборудования и других используемых материалов.

Вопрос о предпочтительности кислородно-избыточной или кислородно-дефицитной среды в сердцевине анизотропных ОВ остается открыт, особенно с учетом того, что в таких ОВ в сердцевине обязаны быть сформированы довольно сильные напряжения для создания двулучепреломления, и неизвестна какая среда к воздействию напряжений сетки стекла будет менее чувствительна.

Необходимость уделения особого внимания этапу вытяжки заготовок ОВ отражена в работах [38, 99, 126, 160, 181, 198, 201-207]. Вариация параметров вытяжки – температуры, натяжения, скорости, в том числе, скорости охлаждения ОВ, в сочетании с конкретным составом сердцевины ОВ могут привести как существенному снижению РНП, так и к росту РНП в разы и на порядки величины. При этом для каждого состава сердцевины ОВ оптимальным будет свое сочетание параметров.

1.5.5.2. Конструкция ОВ типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной

Определенные технологические и конструктивные особенности радиационно стойкого ОВ с сохранением поляризации излучения, кроме научных статей, отражены патентах, действующих на территории РФ. Проанализируем патенты наиболее близкие к задаче создания ОВ с высокими показателями как сохранения поляризации излучения (а значит высокими значениями двулучепреломления), так и РОС, низкими оптическими потерями и высокой стабильностью геометрических и оптических характеристик по длине ОВ.

Патенты [208-210] объединяет техническое решение – выполнение сердцевины ОВ из легированного кварцевого стекла, в первом и втором случае азотом (требует наличия плазменных технологий), в третьем случае азотом или германием. Такие технические решения по радиационной стойкости будут уступать ОВ с сердцевиной из чистого кварцевого стекла. Радиационная стойкость во втором и третьем случаях повышается уменьшенным значением содержания легирующих добавок, а требуемая для изгибоустойчивости апертура достигается введением отражающих оболочек с пониженным показателем преломления. При этом соотношение диаметров сердцевины к диаметру фторированной оболочки заявляется небольшим. В патенте [209] отражающую оболочку световода формируют из кварцевого стекла с пониженным показателем преломления относительно показателя преломления кварцевого стекла защитной оболочки, равного показателю преломления нагружающих зон с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-3}$. При этом обеспечивается следующее соотношение $1,3 \leq \tau/\rho \leq 4,6$, где τ – радиус отражающей оболочки, ρ – радиус световедущей жилы. Недостатком данной конструкции является недостаточное соотношение радиуса отражающей оболочки к радиусу сердцевины, так как такое отношение приводит к высоким потерям. Также во третьем патенте описывается техническое решение для повышения анизотропии – создание дополнительной отражающей оболочки непосредственно вокруг сердцевины ОВ с показателем

преломления ниже, чем первая отражающая оболочка. Создание такой оболочки также требует наличия плазменных технологий. Из содержания первого и второго патента не понятно, насколько высоких показателей по двулучепреломлению можно достигнуть. В третьем патенте содержится информация, согласно которой по расчетам возможно достижение очень высокого значения двулучепреломления: $10 \cdot 10^{-4}$, но при этом оптические потери в ОВ будут ~ 10 дБ/м, что является неприемлемо при использовании ВК длиной даже 500 м. Поэтому такое ОВ скорее применимо для волоконных поляризаторов, чем для ВК.

Патент [211] посвящен ОВ с сохранением поляризации излучения, которое содержит отражающую оболочку световедущей жилы из кварца, легированного фтором, круглые нагружающие стержни из кварца, легированного бором, защитную оболочку из кварца и защитно-упрочняющее полимерное покрытие. Легирование подобрано таким образом, чтобы вязкость расплавленной массы круговой оболочки была больше вязкости расплавленной массы материала нагружающих стержней. Толщина оболочки стержней, равна или меньше толщины отражающей оболочки световедущей жилы. При этом нагружающие стержни размещены на расстоянии от центра световедущей жилы, равном или большем радиуса световедущей жилы. Такая конструкция ОВ обладает некоторыми недостатками: во-первых, легирование сердцевины фтором уменьшает числовую апертуру, что негативно сказывается на изгибных потерях, а изготовить высокоапертурное волокно с фторированной сердцевиной методом MCVD технологически трудно, во-вторых, из-за того, что в данной конструкции вязкость расплавленной массы круговой оболочки больше вязкости расплавленной массы материала нагружающих стержней, требуется большая температура консолидации, что увеличивает потери и может нарушать форму и целостность заготовки. Кроме того, данное волокно не позиционируется как радиационно стойкое. Приведенная конструкция не гарантирует высокого значения двулучепреломления. Также нет данных по РОС такого ОВ.

ОВ типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной защищается в следующих патентах.

В патенте [212] защищается конструкция радиационно стойкого ОВ, содержащего световедущую жилу из кварца или из кварца, легированного азотом, отражающую оболочку из кварца, легированного фтором, круглые нагружающие стержни из кварца, легированного бором, в оболочке из чистого кварца или из кварца, легированного фтором, и защитно-упрочняющее полимерное покрытие. Нагружающие стержни размещены на расстоянии от центра световедущей жилы до оболочки нагружающих стержней, равном или большем диаметра световедущей жилы. Преимущество такого расположения заключается в том, что исключается диффузия примесей, образующих РЦО, из нагружающих стержней в защитную оболочку, но при этом ухудшаются анизотропные свойства ОВ. Кроме того, легирование азотом сердцевины до высокого уровня числовой апертуры не позволяет достигать таких же высоких характеристик радиационной стойкости как при использовании сердцевины из высокочистого кварцевого стекла, поскольку любое легирование вносит искажения в сетку стекла, что способствует возникновению радиационных центров окраски, вызывающих радиационно наведенное затухание.

В патенте [213] защищается способ изготовления одномодового ОВ, сохраняющего поляризацию излучения, включающий выполнение продольных пазов на наружной поверхности цилиндрической заготовки, имеющей центральную световедущую жилу с отражающей оболочкой, покрытой защитной оболочкой, образованной кварцевой трубой, последующее помещение указанной заготовки в кварцевую трубу, сплавление кварцевой трубы с указанной заготовкой с образованием продольных отверстий из указанных пазов, размещение в указанных отверстиях боросиликатных стержней и вытяжку полученной заготовки с размещенными в указанных отверстиях боросиликатными стержнями, отличающийся тем, что указанные пазы выполняют на глубину 3 – 5 мм, в качестве боросиликатных стержней используются стержни из кварцевого стекла, легированного бором без внешнего

слоя кварцевого стекла, а в процессе вытяжки полученной заготовки с размещенными в указанных отверстиях боросиликатными стержнями осуществляют сплавление боросиликатных стержней с заготовкой, однако изготовление с помощью пазов усложняет технологию изготовления и увеличивает количество технологических операций, в то время, как сверление обеспечивает более высокую точность, меньшее количество технологических операций, и, как следствие, количество брака.

В патенте [214] также защищается способ изготовления одномодовых ОВ с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и легированной фтором оболочкой методом MCVD, включающий операцию высокотемпературного сжатия трубчатой заготовки с продувкой ее внутреннего канала газами, снижающими содержание OH групп в стеклообразном слое сердцевины, где в качестве продувочного газа используют сухой (с точкой росы менее минус 50 °C) аргон или азот с содержанием примесного кислорода не более 10^{-4} об. %. При этом не приводится исчерпывающей информации о необходимости уменьшения содержания OH групп в материале сердцевины волокна для достижения РОС. Необходимость такого технологического приема зависит от исходной чистоты применяемых материалов и не является обязательной.

В патенте [215] раскрывается способ изготовления радиационно стойких ОВ методом MCVD с фторсиликатной оболочкой и сердцевиной из кварцевого стекла, обедненного кислородом. Отличие от других методов изготовления заключается в том, что в трубчатую заготовку слои оболочки и сердцевины наносят двухстадийным способом, состоящим из осаждения пористого слоя при обратном ходе горелки и потока газовой смеси, затем остекловываются при прямом ходе горелки в процессе продувки сухим азотом или аргоном с содержанием примесного кислорода не более 10^{-4} об. %. В результате при двухстадийном методе осаждения слоев оболочки и сердцевины исключается внедрение хлора в стекло, а процесс высокотемпературного остекловывания пористых слоев в газовой смеси, содержащей влагу и кислород в количестве не более 10^{-4} об. %, обеспечивает необходимый дефицит кислорода в кварцевом

стекле сердцевины и во фторсиликатной оболочке. Повышение РОС ОВ происходит за счет снижения содержания хлора и кислорода в сердцевине и оболочке оптического волокна, позволяя проявить высокую РОС при дозах менее 1 МГр. Недостатком данной конструкции является проявление конусности при двухстадийном методе осаждения сердцевины, данный метод усложняет технологию изготовления и увеличивает количество технологических операций, требований к оборудованию и операторам. Недостатком полученного таким образом ОВ является радиационная стойкость при дозах более 1 МГр, свойственных для реакторного применения, поскольку из-за значительного длинноволнового поглощения имеет место снижение РОС по сравнению ОВ, изготовленными другими методами (к сожалению, такая информация следует пока только из устных докладов на профильных конференциях).

Следует отметить, что патенты отражают технологические возможности и ограничения заявителей. Если исключить из рассмотрения патенты, требующие для реализации технологию PCVD, а также патенты о микроструктурированном волокне и ОВ типа «Эллипс» [208-210, 216, 217], то остаются патенты [211-215], в которых обсуждается конструкция и положение относительно сердцевины ОВ напрягающих стержней, которые должны быть легированы только бором, а также обязательность фторсиликатной оболочки вокруг стержней и сердцевины, что неудивительно. У каждого заявителя различные подходы к конструкции и технологии изготовления такого волокна. К сожалению, не приводится численных данных по достигнутой величине двулучепреломления, а также реальных данных по РОС и условиям экспериментов.

Выводы по разделу 1.5

1. В ближнем ИК диапазоне РНП изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной при непрерывном облучении определяется хвостами длинноволновых АДС-1, коротковолновых АДС-2, полосы поглощения, обусловленной присутствием хлора, а также полосой поглощения с энергией 1 эВ, которая может быть отнесена к промежуточному типу.

2. При импульсном облучении изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной в ближнем ИК диапазоне основную роль играют собственные АДС, имеющие малое время жизни и незаметные при непрерывном ИИ.

3. Для изотропных волокон с легированной германием сердцевиной при непрерывном облучении РНП в ближнем ИК диапазоне определяется хвостами длинноволновой полосы АДС $\lambda > 1700$ нм и коротковолновой с максимумом на 1,38 эВ. Собственных АДС в этих световодах не наблюдается, поэтому при импульсном облучении они способны показать меньшие РНП, чем волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной.

4. Для изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной исследовалось влияние на РНП температуры, величины оптической мощности, а также условий вытяжки ОВ. При этом все наблюдения сделаны для конкретных ОВ в определенных условиях, что не позволяет получить количественные соотношения, которые бы выполнялись для других типов ОВ и при других условиях эксперимента, не описанных в рассмотренных ранее публикациях.

5. Влияние температуры на РНП для изотропных ОВ с легированной германием сердцевиной исследовалось в широком диапазоне легирования германием.

6. Для ОВ с сохранением поляризации излучения не проводилось детальных исследований спектра РНП ближнего ИК диапазона.

7. Не выполнялось исследований влияния напряженно-деформированного состояния ОВ на РНП при импульсном или непрерывном ИИ.

8. Для ОВ с германосиликатной сердцевиной типа «Панда» с рабочей длиной волны 1550 нм современной конструкции и полученных с использованием современной технологии изготовления отсутствуют данные по стойкости к непрерывному и импульльному ИИ. Не выяснены механизмы возможного быстрого восстановления характеристик ОВ после импульсного воздействия, не исследовались зависимости от температуры в опыте, величины вводимой оптической мощности, отсутствуют сведения по поведению параметра СПИ.

9. В мире существуют всего несколько центров производства коммерчески доступного радиационно стойкого гироскопического ОВ с сохранением поляризации излучения (типа «Панда»), в частности, его производят компании - OFS (сердцевина из нелегированного кварцевого стекла) и ФИРЭ РАН (сердцевина легирована азотом). При этом характеристики этих радиационно стойких ОВ уступают аналогам с германосиликатной сердцевиной по начальным оптическим потерям и двулучепреломлению (длине поляризационных биений).

10. Все исследования по стойкости ОВ с сохранением поляризации излучения к воздействию ИИ проводились только для случая непрерывного ИИ и только при комнатной температуре. Нет данных по температурной зависимости РНП, нет данных по стойкости к воздействию импульсного ИИ.

11. Не исследовалось влияние величины двулучепреломления на РНП.

12. Не установлены причины повышенного РНП в ОВ с сохранением поляризации по сравнению с изотропными одномодовыми ОВ.

13. Недостаточно исследовалась спектральная зависимость РНП.

14. Не выявлены причины, ответственные за эффект фотообесцвечивания на длине волны 1550 нм.

15. Не исследовалось влияние напряженно-деформированного состояния ОВ на РНП.

16. Технология MCVD в состоянии обеспечить радиационную стойкость ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной на уровне мировых аналогов, при этом не требуя таких степеней чистоты используемых материалов, как в технологии PCVD.

17. Действующие на территории России патенты по конструкции «Панды» позволяют изготавливать ОВ, но при этом неизвестно какой уровень радиационной стойкости может быть достигнут. Однако эти конструкции не обеспечивают высокое двулучепреломление, а значит и сохранение поляризации излучения одновременно с низкими оптическими потерями, требуемые для ВОГ навигационного класса точности.

1.6. Выводы по литературному обзору

Из рассмотренных в главе известных научно-технических данных следует, что для создания ВОГ навигационного класса точности, стойкого к воздействию непрерывного и импульсного ИИ, требуются оптические компоненты, автономно стойкие к воздействию как непрерывного, так и импульсного ИИ. Для оценки возможности применения ВОГ в условиях импульсного ИИ требуется проводить комплексные исследования, поскольку нет открытых данных. Для радиационно стойкого ОВ, сохраняющего поляризацию, предъявляются требования к значению h -параметра не хуже $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, что можно обеспечить только высоким значением двулучепреломления, желательно более $5,5 \cdot 10^{-4}$, а лучше более $7,0 \cdot 10^{-4}$, а также к минимизации РНП, поскольку длина ОВ в ВК может быть более 1 км. Для радиационно-стойкого АОВ источника излучения кроме минимизации РНП под действием ИИ, предъявляется также требование по стабильности средневзвешенной длины волны, чтобы избежать изменения масштабного коэффициента ВОГ и ошибки определения угловой скорости.

Из предыдущих исследований известно, что СИОМ, изготовленные по протонообменной технологии, демонстрируют хорошую стойкость к непрерывному ИИ (РНП составляет единицы процентов), хотя исследования, в основном, проводились для рабочей длины волны 1300 нм. Остается непонятным, с чем связаны РНП, поскольку в объемных кристаллах в ближнем ИК диапазоне не выявлено полос поглощения. Радиационная стойкость ОВ к действию импульсного ИИ не проверялась.

Коммерчески доступные радиационно стойкие гироскопические АОВ производит только компания IXBlue. Для них доступны данные по радиационной стойкости по отношению к непрерывному ИИ при комнатной температуре. В качестве технологического решения для повышения радиационной стойкости известны подходы по дополнительному легированию матрицы стекла церием и/или по насыщению водородом или дейтерием.

Для изотропных ОВ с сердцевиной, легированной германием, и нелегированной кварцевой сердцевиной неплохо изучены механизмы РНП в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. В недавних работах показано, что в ближнем ИК диапазоне РНП германосиликатных волокон определяются хвостами длинноволновой и коротковолновой полос поглощения. Для ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной РНП определяются не только хвостами коротковолновой полосы поглощения дефекта, связанного с атомом хлора, коротковолновой и длинноволновой полосами поглощения от АДС, но также полосой с энергией 1 эВ, связанной с АДС промежуточного типа. Сделано предположение, что эта полоса может вызывать значительные РНП при импульсном воздействии.

Гироскопическая германосиликатная «Панда» не подходит для использования в космосе из-за высоких РНП, при этом в условиях воздействия импульсного ИИ радиационная стойкость данного ОВ не известна. Собственных АДС в изотропных волокнах, легированных германием, не наблюдается, поэтому при импульсном облучении они способны показать меньшие РНП по сравнению с волокнами с нелегированной кварцевой сердцевиной.

Коммерчески доступное гироскопическое радиационно стойкое ОВ, сохраняющее поляризацию излучения типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной, уступает по уровню оптических потерь и двулучепреломления радиационно нестойкому германосиликатному аналогу.

Все исследования по радиационной стойкости такого волокна к воздействию ИИ проводились только для случая непрерывного ИИ и при комнатной температуре. Нет данных по температурной зависимости РНП, нет данных по стойкости к воздействию импульсного ИИ. Не установлены причины повышенного РНП в волокнах с сохранением поляризации по сравнению с изотропными одномодовыми волокнами. Не исследовалась спектральная зависимость РНП в ближнем ИК диапазоне. Не выявлены причины, ответственные за эффект фотообесцвечивания на длине волны 1550 нм. Не исследовалось влияние внутренних напряжений в волокне на РНП.

Технология MCVD в состоянии обеспечить радиационную стойкость волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной на уровне мировых аналогов, при этом не требуется высокой чистоты используемых материалов необходимой в технологии PCVD.

Действующие на территории России патенты на ОВ типа «Панда» не обеспечивают высокое двулучепреломление и сохранение поляризации излучения, требуемое для ВОГ навигационного класса точности. Кроме того, неизвестно какой уровень радиационной стойкости ОВ может быть достигнут при использовании конструкций и технологических приемов, охраняемых этими патентами.

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: 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.

Глава 2. Методики и исследуемые образцы

Основными причинами возникновения погрешности показаний ВОИД при воздействии ИИ можно считать возникновение РНП в оптическом тракте и изменение средневзвешенной длины волны СВИ, поэтому методы исследования РОС компонентов ВОИД построены на контроле этих оптических характеристик до, во время и после воздействия ИИ. Эксперименты проводились как при комнатной температуре, так и в крайних температурах рабочего диапазона ВОИД. Полученные температурные зависимости РНП исследуемых компонентов дают возможность прогнозировать их РОС при других температурах.

Для возможности сопоставления данных РОС ОВ, СИОМ и активного волокна в схеме СВИ исследования проводились в одинаковых условиях по уровням и видам воздействия ИИ.

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.

Изменения в спектре пропускания ОВ во время непрерывного облучения позволили выявить РЦО, возникающие во время облучения и оказывающие влияние на РНП на длине волны 1550 нм, а исследование радиационного отклика на длине волны 1550 нм после воздействия импульсного ИИ позволило судить о характерных временах жизни РЦО на этой длине волны.

Методы экспериментального исследования образцов пассивных ОВ основывались на сочетании контроля уровня напряженно-деформированного состояния образцов, уровня входящей оптической мощности и анализе их оптических характеристик во время и после воздействия ИИ. В исследовании

использовали образцы ОВ с нелегированной кварцевой и германосиликатной сердцевинами, изготовленные на одном 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 исследованием 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.

Выбор ОВ типа PGeO_2 в качестве объекта исследования, несмотря на известную низкую РОС ОВ с германосиликатной сердцевиной, обусловлен как возможностью посредством легирования германием матрицы стекла снизить компактность решетки стекла [4] для оценки влияния этого параметра на время релаксации после воздействия импульсного ИИ, так и недостаточностью данных о РОС ОВ PGeO_2 по сравнению с изотропным вариантом, чтобы оценить влияние на РНП анизотропии напряженного состояния сердцевины ОВ.

Методы математической аппроксимации РНП применены для выявления спектрального состава РЦО в исследуемых ОВ, а также связи эмпирических коэффициентов аппроксимации с варьируемыми параметрами исследования.

Для сопоставления результатов были проведены в одинаковых условиях сравнительные испытания по воздействию непрерывного и импульсного ИИ радиационно стойкого одномодового ОВ, сохраняющего поляризацию излучения, полученного по вновь созданной технологии производства, и ОВ типа «Панда» с сердцевиной, легированной азотом (ПН).

Также приведены сведения о используемых в экспериментах источниках ИИ, а также методиках измерения контролируемых параметров исследуемых образцов.

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, поток нейтронов до $5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма-излучения до 60 Гр (установка «БР-1М», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). Температура в экспериментах варьировалась от минус 60 °С до + 110 °С.

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

РНП в момент времени t определялись как

$$\text{РНП}(t) = \frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_0}{P_1}, \quad (2.1)$$

где P_0 – начальный сигнал на фотоприемнике до воздействия,

P_1 – текущий сигнал для времени t ,

L – длина образца.

2.1. Установки для воздействия импульсным и непрерывным ИИ

Исследования на воздействие импульсного и непрерывного ИИ на оптические компоненты ВОГ: СИОМ, АОВ и пассивное волокно, сохраняющее поляризацию излучения, а также на изотропное одномодовое и многомодовое волокна, проводились в:

1. НИЦ «Курчатовский институт» на установке ГУТ200М на основе источника ^{60}Co , обеспечивающей непрерывный поток гамма-излучения с мощностью дозы от 0,01 до 5 Гр/с. Источник представляет собой цилиндр, составленный из 140 стержней высотой 20 см. Каждый стержень, состоит из таблеток, содержащих оксид ^{60}Co . Все это покрыто защитной рубашкой. Установка располагается ниже уровня лаборатории и обложена свинцовыми блоками для того, чтобы излучение не попадало в лабораторию.

2. РФЯЦ ВНИИЭФ на установке линейного индукционного ускорителя ЛИУ30, с непрерывным спектром тормозного излучения и длительностью импульса ~ 20 нс [218], импульсном реакторе нейtronов БР1М, линейном ускорителе ЛУ10-20, обеспечивающем квазинепрерывный поток тормозного излучения [219].

Основные характеристики излучений и исследуемые диапазоны доз и мощностей доз приведены в Таблице 2.1.

Дозиметрия во всех опытах, кроме облучения потоком нейtronов, проводилась с помощью термolumинесцентной методики дозиметрии (ИКС), которая дает возможность сразу получать значения поглощенной дозы в кварцевом стекле. Дозиметры представляют из себя сборку, из двух стекол, в виде таблетки диаметром примерно 10 мм и толщиной примерно 4 мм. Точность определения поглощенной дозы $\pm 20\%$ [220].

Таблица 2.1 – Моделирующие установки, применённые в исследовании

Режим	Моделирующая установка	Основные характеристики установки	Мощность дозы	Доза, поток нейtronов
Импульсный	Линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ30	Энергия электронов до 40 МэВ, время импульса ~20 нс	$3 \cdot 10^{10} - 22,5 \cdot 10^{12}$ Р/с	6 – 450 Гр
	Импульсный реактор нейtronов БР1М	Время импульса 65 мкс, 150 с		$100 - 1,2 \cdot 10^3$ Гр, $3 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{13}$ н/см ²
Непрерывный	ГУТ – 200М (на основе изотопа ⁶⁰ Со)	Средняя энергия гамма-квантов 1,25 МэВ	0,01 – 5 Гр/с	До $1,5 \cdot 10^6$ Гр
	Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20	Энергия электронов 7 МэВ, частота импульсов до 1000 Гц, длительность импульса 2,3 мкс	40 Р/с	До $1,5 \cdot 10^3$ Гр

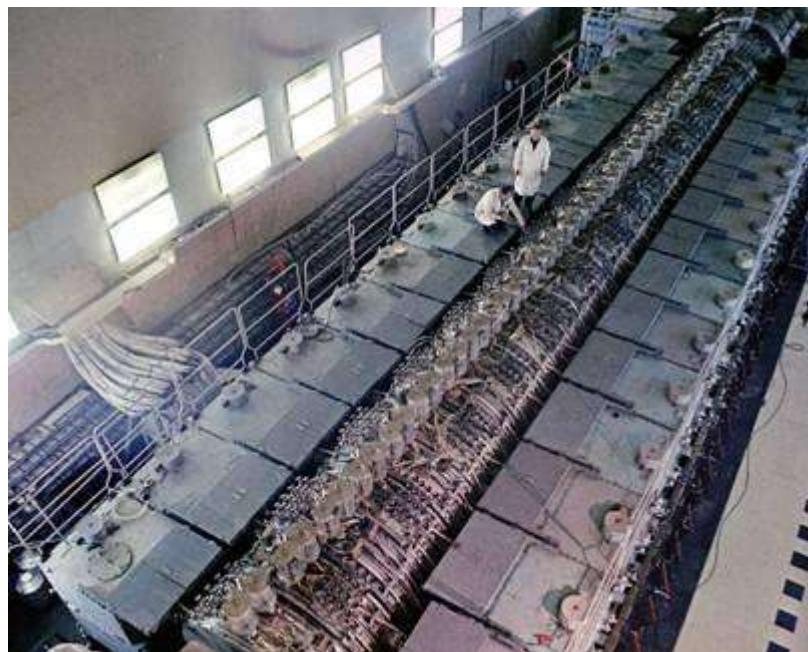


Рисунок 2.1 – Общий вид ускорителя ЛИУ-30 [219]



Рисунок 2.2 – Общий вид БР1М [219]



Рисунок 2.3 – Общий вид ЛУ-10-20 [219]



Рисунок 2.4 – Внешний вид видимой части установки ГУТ 200М [219]

2.2. Исследуемые образцы

2.2.1. Образцы СИОМ

В качестве исследуемых образцов СИОМ в данной работе использовались серийно изготавливаемые на ПАО «ПНППК» гироскопические СИОМ, изготовленные по протонообменной технологии на подложке монокристаллического ниобата лития. Типичные характеристики образцов приведены в Таблице 2.2. Изделие является серийным со стабильно повторяющимися от изделия к изделию характеристиками. Экспериментальная выборка включала более 20 образцов СИОМ. Если не оговорено особо, для каждого опыта использовались «чистые» образцы (не подвергавшиеся облучению ИИ). После всех опытов (кроме облучения потоком нейтронов), образцы возвращались на завод-изготовитель, где повторно проверялись все характеристики.

Таблица 2.2 – Характеристики образцов СИОМ

Наименование параметра	Значение
Габаритные размеры $D \times Ш \times В$ (в корпусе), мм	$70 \times 20 \times 10$
Рабочая длина волны, нм	1550 ± 10
Оптические потери (включая 3 дБ поляризационной экстинкции), дБ	$\leq 7,0$
Коэффициент деления, %	47... 53
Обратное отражение, дБ	≤ -50
Поляризационная экстинкция чипа, дБ	≥ 50
Амплитудная модуляция, %	$\leq 0,1$
Сохранение поляризации излучения, дБ	≤ -27
Эффективность модуляции (двуухтактный режим), рад/В	$0,9 \pm 0,25$
Емкость электродов, пФ	17... 25
Допустимый уровень постоянного напряжения, В	≤ 15
Рабочий диапазон температур в сухой атмосфере, $^{\circ}\text{C}$	-60...+60

2.2.2. Образцы активных АОВ

К началу данной работы НЦВО РАН совместно с ИХВВ РАН по заказу ПАО «ПНППК» и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) Пермского края в рамках проекта РФФИ № 14-42-08025 проводили научно-исследовательскую работу по поиску составов стекла для создания радиационно стойких гироскопических АОВ, легированных ионами эрбия. Кроме требования радиационной стойкости к АОВ предъявлялись требования по ширине спектра в СВИ не менее 5 нм [24, 25].

В качестве способа повышения радиационной стойкости сотрудниками НЦВО РАН и ИХВВ РАН был выбран метод легирования матрицы стекла АОВ ионами церия. При примерно одинаковой концентрации ионов церия и эрбия в АОВ варьировались составы в части легирования оксидом фосфора (P_2O_5), оксидом алюминия (Al_2O_3), оксидом германия (GeO_2). Схематично это отражено в Таблице 5.1, там же приведены характеристики АОВ.

Часть компонентов сердцевины стекла (Si, P, Al, Ge) вводилась из газовой фазы во время осаждения на внутреннюю поверхность опорной кварцевой трубы пористого слоя стекла в процессе MCVD. Затем пористый слой пропитывался раствором, содержащим ионы Er^{3+} , Ce^{3+} , и после процедуры удаления растворителя сплавлялся в прозрачный слой. На завершающем этапе изготовления трубчатая заготовка схлопывалась в стержень. Из заготовок были вытянуты оптические волокна, одномодовые на длине волны накачки вблизи 980 нм, затухание в области 1150 нм составляло не более 25 дБ/км.

Типичные характеристики образцов АОВ производства ПАО «ПНППК» приведены в Таблице 2.3 [221, с. 12].

Таблица 2.3 – Характеристики АОВ [221, с. 12]

Характеристика	Типичное значение
Длина волны отсечки, мкм	0,860
Коэффициент затухания на длине волны 1200 нм, дБ/км, не более	13
Уровень поглощения вблизи длины волны 980 нм, дБ/м	15,6
Уровень поглощения вблизи длины волны 1530 нм, дБ/м	19,0
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	125
Диаметр ЗУП, мкм	251
Диаметр сердцевины, мкм	4,6
Неконцентричность кварцевой оболочки и ЗУП, мкм, не более	1,0
Неконцентричность сердцевины и кварцевой оболочки, мкм, не более	0,3
Перемотка с относительным удлиннением, %	1,0

2.2.3. Образцы пассивных ОВ

Исследования РОС ОВ обычно проводятся в виде его свободной намотки, хотя в ВОИД ОВ используется в виде чувствительных элементов, имеющих внесенные внутренние напряжения из-за натяжения при изготовлении. Для того, чтобы выявить как уровень напряженно-деформированного состояния влияет на радиационный отклик ОВ, в исследовании использовали образцы ОВ с нелегированной кварцевой и германосиликатной сердцевинами, изготовленные на одном оборудовании с применением одинаковых исходных материалов и методов обработки заготовок, что позволило варьировать степень компактности решетки стекла сердцевины ОВ, изотропные и анизотропные образцы ОВ с одним составом стекла сердцевины, а также образцы 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.

Выбор ОВ типа PGeO_2 в качестве объекта исследования, несмотря на известную низкую РОС ОВ с германосиликатной сердцевиной, обусловлен возможностью посредством легирования германием матрицы стекла снизить компактность решетки стекла [4] для оценки влияния этого параметра на время релаксации после воздействия импульсного ИИ, так и недостаточностью данных о РОС ОВ PGeO_2 по сравнению с изотропным вариантом, чтобы оценить влияние на РНП анизотропии напряженного состояния сердцевины.

2.2.3.1. Образцы гироскопического германосиликатного сохраняющего поляризацию волокна типа «Панда» (PGeO_2)

В качестве исследуемых образцов гироскопического германосиликатного сохраняющего поляризацию ОВ типа «Панда» в данной работе были использованы серийно выпускаемые ОВ ПАО «ПНППК», характеристики волокна приведены в Таблице 2.4 [221, с. 19]. Конструкция волокна схематично изображена на Рисунке 1.2, а. Поскольку данное волокно является для данного

предприятия серийным изделием, характеристики волокна от образца к образцу повторялись. Если не оговорено особо, для каждого опыта по облучению ИИ использовался «чистый» образец ОВ (не подвергавшийся облучению).

Таблица 2.4 – Характеристики гироскопического германосиликатного сохраняющего поляризацию волокна типа «Панда» [221, с. 19]

Параметр	Значение
Числовая апертура	$0,18 \pm 0,2$
Длина волны отсечки, мкм	$1,425 \pm 0,075$
Коэффициент затухания на длине волны 1550 нм, дБ/км	$<1,5$
Двулучепреломление	$>6,5 \cdot 10^{-4}$
h -параметр на транспортной катушке, 1/м	$<0,5 \cdot 10^{-5}$
Экстинкция в состоянии свободной намотки диаметром 100 мм при температуре 20 °С (измеряется на 100 м световода), дБ	>35
Диаметр модового поля на длине волны 1550 нм, мкм	$7,4 \pm 0,9$
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	80 ± 2
Разница диаметров кварцевой оболочки по концам отрезка длиной 1000 м, мкм	0,5
Диаметр защитно-упрочняющего покрытия, мкм	166 ± 3
Изменение диаметра защитно-упрочняющего покрытия по концам контура, мкм, не более	1,5
Неконцентричность кварцевой оболочки и защитно-упрочняющего покрытия, мкм	<5
Неконцентричность сердцевины и кварцевой оболочки, мкм	$<0,5$
Перемотка под нагрузкой, %	0,6
Рабочая температура, °С	от -50 до +60

ОВ с сохранением поляризации излучения типа «Панда» с германосиликатной сердцевиной (PGeO_2) исследовалось в свободном состоянии (в виде свободной намотки диаметром 170 мм), а также в виде гироскопических бескаркасных волоконных контуров (БВК) и волоконных контуров на каркасе (ВК) – представляют собой катушку с квадрупольной или октупольной намоткой волокна, пропитанного эпоксидным компаундом.

2.2.3.2. Образцы гироскопического сохраняющего поляризацию волокна типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной ($PSiO_2$)

В данной работе была разработана конструкция и освоена промышленная технология изготовления радиационно-стойкого сохраняющего поляризацию ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной в рамках выполнения комплексного проекта П-218 "Создание высокотехнологичного производства специальных оптических волокон, стойких к воздействию высоких и низких температур, водородосодержащих сред и ионизирующего излучения для систем телеметрии объектов нефтегазовой, аэрокосмической и атомной промышленности" (Соглашение № 075-11-2019-059).

Достигнутые и стабильно повторяющиеся в рамках серийного производства ПАО «ПНППК» характеристики ОВ приведены в Таблице 2.5 [221, с. 20].

Для изготовления преформ с нелегированной кварцевой сердцевиной и фторсиликатной оболочкой был выделен отдельный промышленный станок MCVD с автоматизированным программным управлением, обеспечивающий поддержание заданных параметров и оптимизированный для изготовления преформ со сложным профилем показателя преломления, пользователь может внести рецепт изготовления в систему станка перед выполнением процесса, а также вносить коррекции в процессе изготовления (Рисунок 2.5). Технология осаждения фторсиликатной оболочки и нелегированной сердцевины выстраивалась из требований максимизации площади осаждения фторсиликатной оболочки для сокращения времени изготовления преформы, а также стабилизации параметров по длине преформы.

Напрягающие стержни изготавливались также по технологии MCVD. Для получения отверстий для стержней в заготовке волокна использовали станок сверления с цифровым программным управлением и предназначенный для сверления кварцевых стекол.

Таблица 2.5 – Основные характеристики радиационно стойкого оптического волокна типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной
ПАО «ПНППК» [221, с. 20]

Параметр	Значение
Длина волны отсечки, мкм	$1,425 \pm 0,075$
Числовая апертура	$0,17 \pm 0,02$
Диаметр модового поля на длине волны 1550 нм, мкм	$8,6 \pm 0,6$
Рабочая длина волны, нм	1550
Двулучепреломление на длине волны 1550 нм, не менее (наибольшее)	$5,0 \cdot 10^{-4}$ ($7,3 \cdot 10^{-4}$)
Коэффициент затухания на длине волны 1550 нм, дБ/км, не более (типичное)	1,5 (0,9-1,0)
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	80 ± 2
Защитно-упрочняющее покрытие	двойное акрилатное
Диаметр защитно-упрочняющего покрытия, мкм	166 ± 3
Неконцентричность сердцевины и кварцевой оболочки, мкм	0,6
h -параметр, м ⁻¹	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Перемотка под нагрузкой, %	0,6
РНП, дБ/км, не более (оптическая мощность 5 мВт, доза излучения 1 кГр, +25 °C)	3,5-2,7
РНП (через 10 минут после воздействия дозы 1 кГр, +25 °C), дБ/км	2,5
Радиационно-наведенное затухание 2 на длине волны 1550 нм, (при оптической мощности не менее 0,5 мВт, при дозе 1 кГр, при скорости набора дозы 1 Гр/с, при температуре + 25 °C), дБ/км, не более	5
Рабочая температура, °C	от -50 до +60

Для процесса вытяжки волокна использовалась также промышленная башня вытяжки высотой 15 м, предназначенная для вытяжек специальных оптических волокон и оснащенная системами измерения, регулирования и логирования всех значимых параметров процесса вытяжки (Рисунок 2.6). В процессе вытяжки на волокно наносилось двойное защитно-упрочняющее

акрилатное покрытие. После вытяжки волокна все требуемые параметры измерялись в оптической лаборатории завода оптических компонентов ПАО «ПНППК» на поверенном и калиброванном оборудовании.



Рисунок 2.5 – Фотография станка MCVD в ПАО «ПНППК»



Рисунок 2.6 – Фотография башни вытяжки на ПАО «ПНППК»

Технологические процессы изготовления напрягающих стержней, сверления заготовки и вытяжки настраивались на получение высоких характеристик по двулучепреломлению (более $5,0 \cdot 10^{-4}$), минимизацию начальных оптических потерь, минимизацию РНП и стабильность оптических и геометрических характеристик по длине волокна.

В ходе выполнения работы было создано два варианта технологии изготовления ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной. В рамках одной технологии параметры конструкции и изготовления, если особо не оговорено, не изменялись. Оба варианта технологии стабильно обеспечивают требуемые характеристики волокна (Таблица 2.5). Разница заключается в поведении РНП ОВ при малой вводимой оптической мощности. Каждый технологический вариант имеет свои достоинства и недостатки в поведении РНП и должен выбираться из конкретных требований к эксплуатации волокна. Повторяемость обоих вариантов была подтверждена изготовлением более 30 км волокна каждого вида. Каждая вытяжка волокна в обязательном порядке проходила тестирование на воздействие непрерывного ИИ по разработанной методике, поскольку РНП являются паспортизуемым параметром. В итоге выбор был сделан в пользу технологии, позволяющей достигнуть малых РНП при малой оптической мощности. Этот вариант технологии основан на данных статьи [121], в которой обосновывается преимущество кислороднодефицитной среды кварцевого стекла.

2.2.3.3. Образцы изотропного одномодового ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной ($lSiO_2$)

Для выявления физических причин поведения РНП в ОВ $PSiO_2$ из этих преформ также изготавливались изотропные одномодовые ОВ с диаметром кварцевой оболочки 80 мкм и 125 мкм. Отсутствие напрягающих стержней позволило добиться в волокнах начальных оптических потерь на длине волны 1550 нм не более 0,4 дБ/км. Лучшие образцы показали 0,27 дБ/км.

2.3. Методики исследования

2.3.1 Оценка уровня напряженно-деформированного состояния ОВ

Экспериментальное определение продольной компоненты тензора деформаций в исследуемых образцах ОВ (компоненты ε_{zz})

Наиболее удобным способом экспериментальной оценки уровня напряженно-деформированного состояния (НДС) в образцах ОВ является измерение сдвига частоты Бриллюэна f_b с помощью бриллюэновского анализатора BOTDA. Изменение величины f_b позволяет качественно оценить, как изменение компактности решетки стекла сердцевины ОВ [4, 222, 223], так и внесенные напряжения, поскольку можно оценить только продольную деформацию по длине ОВ – компоненту тензора деформаций ε_{zz} .

Бриллюэновскую частоту f_b можно записать как линейную функцию от деформаций по длине волокна:

$$f_b = f_0 + \Delta f_b, \quad (2.2)$$

$$\Delta f_b = C \varepsilon_{zz}, \quad (2.3)$$

где f_0 – Бриллюэновская частота ОВ,

Δf_b – изменение Бриллюэновской частоты за счет деформаций по длине ОВ,
 C – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности определялся экспериментально для образцов ОВ с германосиликатной сердцевиной PGeO_2 и с нелегированной кварцевой сердцевиной ISiO_2 и PSiO_2 . В пределах погрешности измерений для всех трех типов ОВ коэффициент пропорциональности можно принять одинаковым:

$$C = (47,46 \pm 0,46) \text{ ГГц.} \quad (2.4)$$

Этот результат согласуется с приведенными в работе [5] данными для PGeO_2 .

В работе использовался бриллюэновский анализатор DITEST STA-R производства OMNISENS (Швейцария) с разрешением 0,1 МГц.

Для определения коэффициента пропорциональности собрана установка (Рисунок 2.7). Длина измеряемого участка ОВ – 1 м, ОВ без покрытия (чтобы исключить влияние полимерного покрытия) закреплялось в зажимах (в их роли удобно было использовать комплект для защиты сварки – КДЗС), исключающих проскальзывание волокна, и растягивалось перемещением позиционеров с шагом 1 мм. Деформирование ОВ находилось в упругой зоне, это контролировалось возвращением ОВ в исходное состояние после снятия растяжения (также это подтверждало отсутствие проскальзывания волокна). После каждого удлинения измерялась величина f_b . Затем из экспериментальной зависимости f_b от величины относительного удлинения (Рисунок 2.8) определялся коэффициент пропорциональности (2.4).

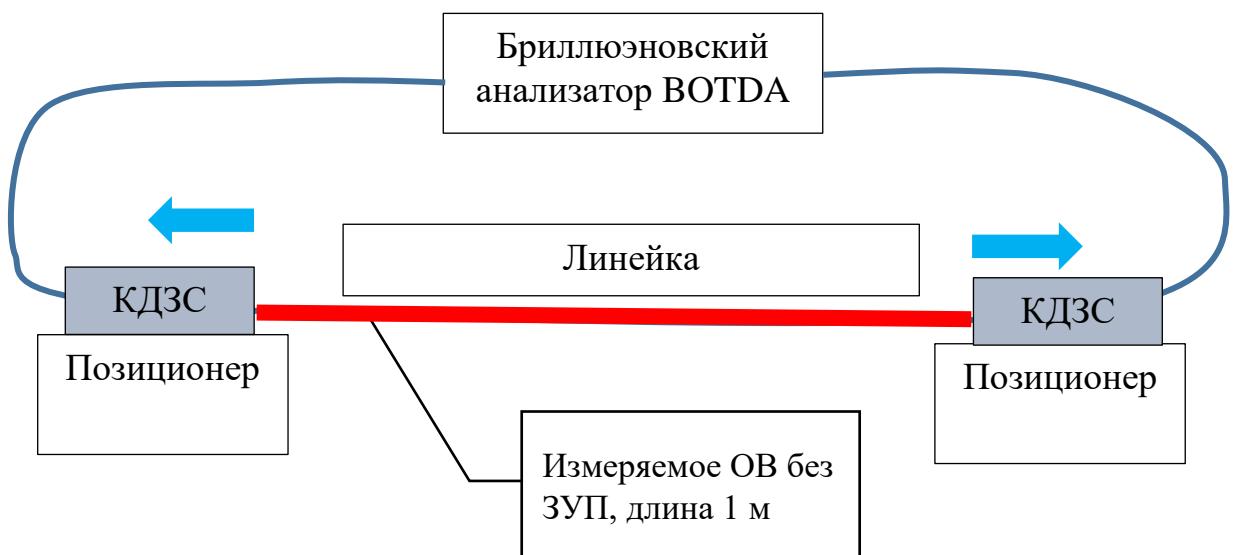


Рисунок 2.7 – Схема установки для определения коэффициента пропорциональности C

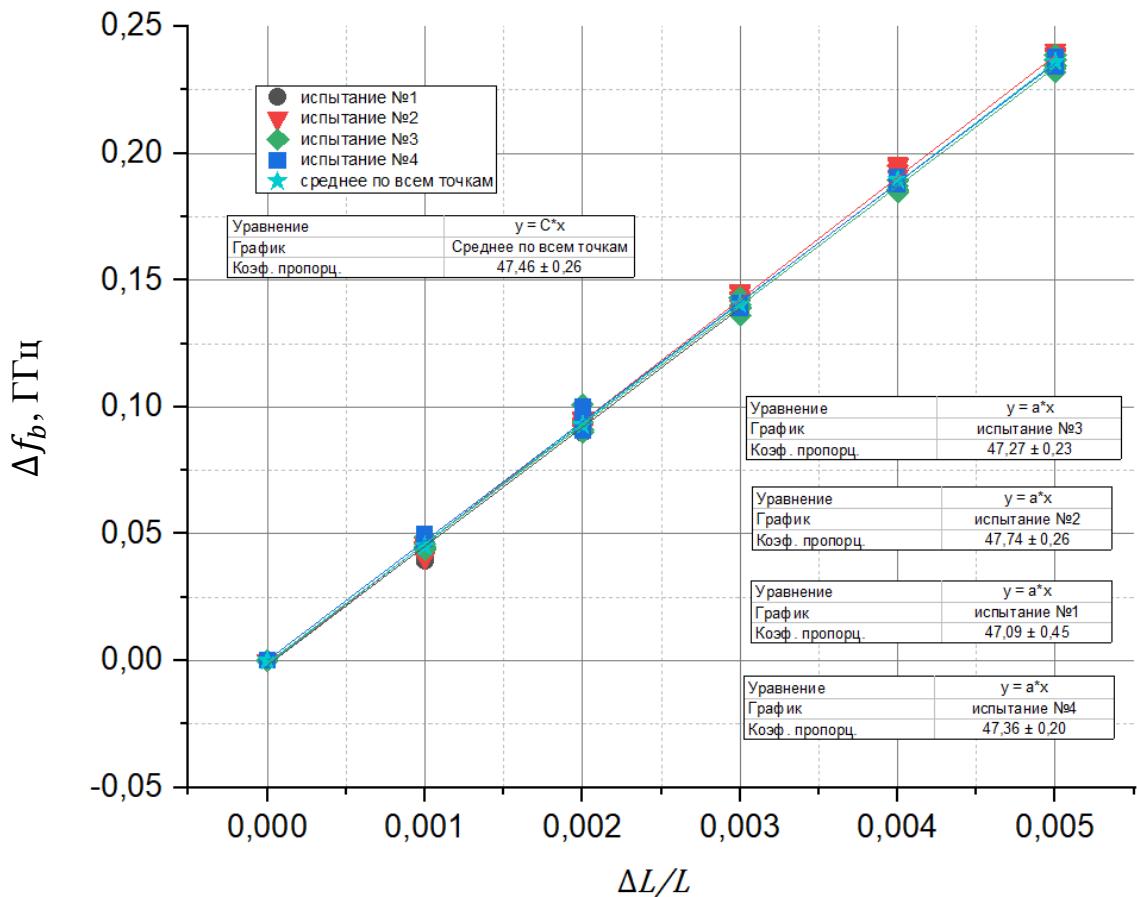


Рисунок 2.8 – Изменение Бриллюэновской частоты от растяжения ОВ ИSiO₂ (точки – эксперимент, прямые – линейная аппроксимация)

В результате измерений для всех типов всех типов образцов были определены свойственные им типичные f_b и ε_{zz} (Рисунок 2.9). Как и следовало ожидать, образцы ПGeO₂ в свободной намотке (СН) характеризуются наименьшими значениями f_b и ε_{zz} , поскольку имеют наименьшую компактность решетки, по сравнению с ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной, и наименьшие внесенные напряжения благодаря свободной намотке. Затем идут образцы ПGeO₂ в виде бескаркасного и каркасного гироскопического волоконных контуров (обозначения БК и К, соответственно), поскольку отсутствие каркаса позволяет частично релаксировать напряжениям, внесенным при изготовлении катушки.

Такая же картина наблюдается для ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной: сначала образцы ISiO_2 в свободной намотке, затем PSiO_2 в свободной намотке и в самом конце PSiO_2 в виде каркасных катушек.

При этом следует учитывать, что результаты измерений дают возможность провести качественную оценку общего уровня НДС образцов, поскольку напрямую не измеряются деформации в поперечном сечении ОВ. Особенно это актуально для гироскопических контуров.



Рисунок 2.9 – Значение частоты Бриллюэна для ОВ с разной степенью напряженно-деформированного состояния кварцевого стекла сердцевины

2.3.2. Методики исследования характеристик образцов при воздействии ИИ

2.3.2.1. Общие положения

Измерения характеристик всех исследуемых образцов производились до, во время и после воздействия как непрерывного, так и импульсного ИИ. Контролируемые параметры исследуемых образцов приведены в Таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Контролируемые параметры исследуемых образцов до, во время и после воздействия ИИ

Объект исследований	Измеряемая величина	Контролируемый параметр
ОВ PSiO_2 и PGeO_2 в виде свободной намотки, БВК, ВК	Уровень сигнала оптической мощности на фотоприемнике (мВт или В, в зависимости от модели) или спектроанализаторе (в относительных единицах); коэффициент поляризационной экстинкции на экстинометре	РНП, в дБ/км, в зависимости от времени облучения, дозы, времени после воздействия или от длины волны излучения при определенной дозе или времени после облучения; параметр сохранения поляризации излучения (h -параметр), 1/м
ОВ ISiO_2	Уровень сигнала оптической мощности на фотоприемнике (мВт или В, в зависимости от модели) или спектроанализаторе (в относительных единицах)	РНП, в дБ/км, в зависимости от времени облучения, дозы, времени после воздействия или от длины волны излучения при определенной дозе или времени после облучения
АОВ	Уровень сигнала оптической мощности на фотоприемнике (мВт или В, в зависимости от модели) или спектроанализаторе (в относительных единицах)	РНП, в дБ/м, в зависимости от длины волны излучения
СИОМ	Уровень сигнала оптической мощности на фотоприемнике (мВт или В, в зависимости от модели), наличие выходного сигнала на электродах (В) в отсутствие подаваемого сигнала, коэффициент	РНП, в дБ, коэффициент деления, (в %), уровень сигнала на электродах, в В

	поляризационной экстинции на экстинометре	
--	--	--

При измерении характеристик образцов использовалось калиброванное и поверенное оборудование. Используемое оборудование и его основные характеристики приведены в Таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Используемое оборудование и его основные характеристики

Наименование, модель	Основные параметры
Измеритель оптической мощности EXFO LTB-1	погрешность измерения оптической мощности $\pm 10^{-5}$ мВт; диапазон длин волн: 750 – 1650 нм; частота измерений: 1 Гц
Измеритель оптической мощности EXFO FTB-1750	диапазон длин волн: 800 до 1700 нм; диапазон измерений: -80 до 6 дБм; погрешность: не более $\pm(5\% + 3$ пВт); частота измерений: 1 Гц; автоматическая запись и сохранение производимых измерений
Спектрофотометр Ocean Optics NIR Quest 512	разрешение по длине волны $\sim 3,1$ нм; время интегрирования 1 мс; диапазон длин волн: 900 – 1700 нм
Рефлектометр оптический Yokogawa AQ7280	погрешность измерения обратного отражения оптического сигнала: 0,03 дБ; диапазоны длин волн: 850 – 1300 нм и 1310 – 1550 нм
Источник широкополосного излучения Thorlabs SLS201L	стабильность мощности излучения: не менее 0,05 %; мощность выходная в волокне: 10 мВт диапазон длин волн: 360 – 2600 нм
Портативный измеритель мощности FOD1204H	диапазон измерений: от -53 до 23 дБм; разрешение: 0,001 дБ; относительная погрешность: не более $\pm 0,15$ дБ; диапазон длин волн: 850; 980; 1310; 1480; 1550 нм
Портативный источник оптической мощности FOD2114	выходная мощность: -3 дБм диапазон длин волн: 635; 1310; 1550 нм
СВИ с деполяризованным излучением (макетный образец)	выходная оптическая мощность излучения на прямом выходе: $5 \pm 0,5$ мВт; нестабильность выходной мощности излучения в диапазоне рабочих температур: не более 5 %;

Наименование, модель	Основные параметры
	ширина оптического спектра (по уровню 0,5): не менее 7 нм
Источник питания для СВИ GW Insteek GPS-3303	стабильность напряжения: 0,01 %; пульсации напряжения: 1 мВ
Измеритель поляризационной экстинкции Santec PEM-330	диапазон длин волн: 1260-1630 нм; погрешность измерения поляризации: $<\pm 0,3$ дБ; динамический диапазон: 40 дБ; частота измерений: 2-10 Гц
Лазерный диод с оптоволоконным выводом Thorlabs LPSC-1550-FC	центральная длина волны: 1550 нм; ширина полосы (среднеквадратическое значение): 6 нм; максимальная выходная мощность 50 мВт
Фотоприемник Newport New Focus 1811	диапазон длин волн: 900-1700 нм полоса пропускания по уровню 0,5: 25 кГц – 125 МГц; спектральная плотность шума: 22,5 пВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что соответствует интегральному (0-130 МГц) среднеквадратическому значению шума по напряжению 5,9 мВ
Осциллограф Lecroy 4096 HD	полоса пропускания: 500 МГц; частота дискретизации: 2,5 ГГц
Установка для сварки волокна с сохранением ориентации стержней оптического волокна Fujikura FSM-100P	оптические потери на сварке: до 0,05 дБ; обратные отражения на сварке: до -60 дБ
Оптический аттенюатор переменный одномодовый	рабочая длина волны: 1260 – 1620 нм; ослабление: 1 до 30 дБ; точность: $\pm 0,8$ дБ
Анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370C	спектральный диапазон: 1500 – 1620 нм; разрешение по длине волны: 0,1 нм

Общий подход к проведению экспериментов строился из необходимости удаленного проведения измерений. Измеряемый образец или образцы располагались в облучательном зале на расстоянии от моделирующей установки, обеспечивающим с одной стороны равномерное облучение образцов, с другой стороны требуемую мощность дозы. Все используемое в опыте оборудование располагалось в измерительном зале. Для уменьшения погрешности измерений

поглощенной дозы детекторы ИКС ставились по окружности образцов не менее 4-х штук через равные расстояния. При исследовании на воздействие непрерывного ИИ погрешность от опыта к опыту дополнительно уменьшали путем размещения образцов строго в одном месте относительно установки с точностью ± 5 мм. Удаленность измерений обеспечивалась использованием для подключения ко всем образцам кроме АОВ кабелей с транспортным волокном того же вида, что и измеряемое волокно. Для образцов АОВ использовался транспортный кабель со специальным волокном с заниженной длиной волны отсечки, для передачи как излучения накачки на 980 нм, так и вывода излучения на 1550 нм. Длина транспортных кабелей варьировалась в зависимости от используемой моделирующей установки и составляла от 15 м до 30 м. Пример схемы опыта представлен на Рисунке 2.10.

Эксперименты при отрицательных температурах, и положительных температурах выше комнатной проводились с помощью управляемого термостата. В служебный отсек термостата наливался жидкий азот, а встроенный нагреватель с помощью вынесенного за пределы облучательной камеры блока автоматического регулирования обеспечивал заданную температуру. Для опытов при непрерывном ИИ термостат был предоставлен сотрудником НЦВО РАН Кашайкиным П.Ф., для опытов при воздействии импульсного ИИ термостат предоставил сотрудник РФЯЦ ВНИИЭФ Филиппов А.В. Фотография термостата, размещенного у облучательной установки ГУТ-200 М в калиброванной по мощности дозы точке, приведена на Рисунке 2.11. Точность поддержания температуры в обоих термостатах составляла ± 2 $^{\circ}$ С. Величина РНП рассчитывалась по формуле 2.1.

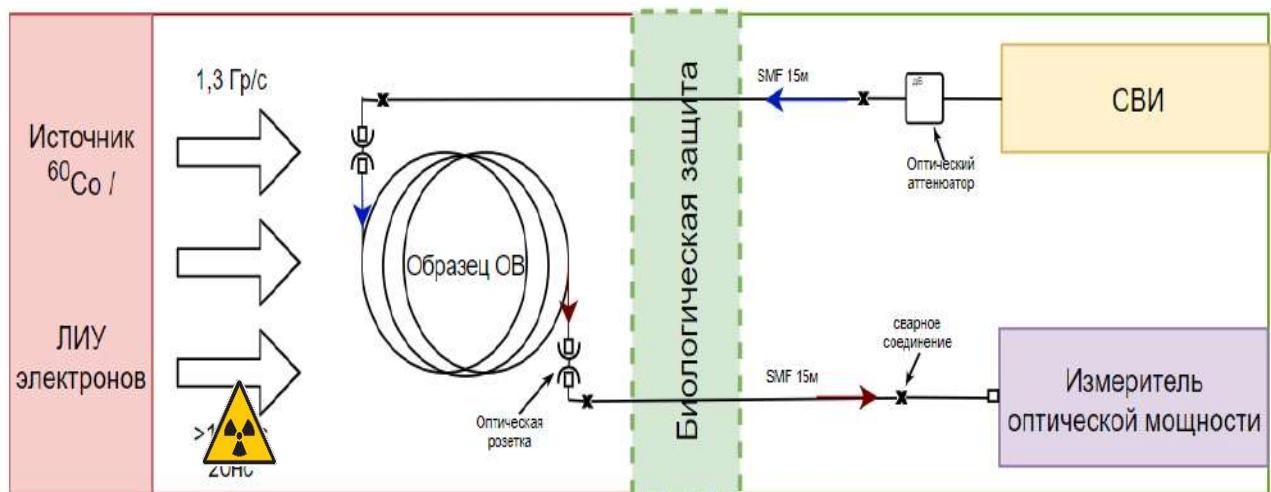


Рисунок 2.10 – Пример схемы проведения опыта



Рисунок 2.11 – Фотография установки ГУТ-200 М непрерывного гамма-излучения и термостата (отмечен стрелкой) с образцом ОВ в калиброванной по дозе излучения точке

2.3.2.2. Методика исследования образцов СИОМ

При воздействии непрерывного и импульсного ИИ у образцов СИОМ до, во время и после воздействия измерялись выходная оптическая мощность (образцы тестировались при оптической мощности не более 5 мВт, используемой при реальной эксплуатации) для измерения оптических потерь, коэффициента деления и их изменения. В качестве источника излучения использовался СВИ (Таблица 2.7). Коэффициент поляризационной экстинции измерялся с помощью экстинометра PEM-330 (Таблица 2.7) только при воздействии непрерывного ИИ из-за достаточно медленной скорости измерений экстинометра. Схема измерений поляризационной экстинции приведена на Рисунке 2.12, фотография рабочего места на Рисунке 2.13. При измерении оптической мощности к каналам СИОМ вместо экстинометров в схему (Рисунок 2.12) подключались измерители оптической мощности EXFO LTB-1 или EXFO FTB-1750 (Таблица 2.7). Запись значений оптической мощности проводилась с частотой 1 Гц для испытаний длительностью до 1 ч и с частотой 0,01 Гц для более длительных испытаний.

При исследовании влияния импульсного ИИ на характеристики СИОМ измерение оптической мощности проводилось с помощью высокочастотных фотоприемников New Focus 1811 и многоканального осциллографа Lecroy 4096 HD (Таблица 2.7).

Поскольку СИОМ крайне чувствителен к изменению поверхностной проводимости межэлектродного пространства, для измерения возможного искажения сигнала модуляции во время воздействия импульсного ИИ дополнительно измерялся электрический импульс, приходящий с электродов СИОМ. Для этого экранированные кабели подключались к электродам СИОМ и сигнал выводился на осциллограф. На другой канал осциллографа выводился сигнал с реперного такого же экранированного кабеля, подключенного к конденсатору с соответствующей СИОМ емкостью, для учета возможных наводок во время опыта.

Коэффициент деления СИОМ рассчитывался по формуле:

$$КД(t) = \frac{P_1(t)}{P_1(t)+P_2(t)} \cdot 100 \%, \quad (2.5)$$

где $КД(t)$ – коэффициент деления правого канала СИОМ в момент времени t , %,

$P_1(t)$ – оптическая мощность на выходе 1 канала («правый») СИОМ, мВт,

$P_2(t)$ – оптическая мощность на выходе 2 канала СИОМ, мВт.

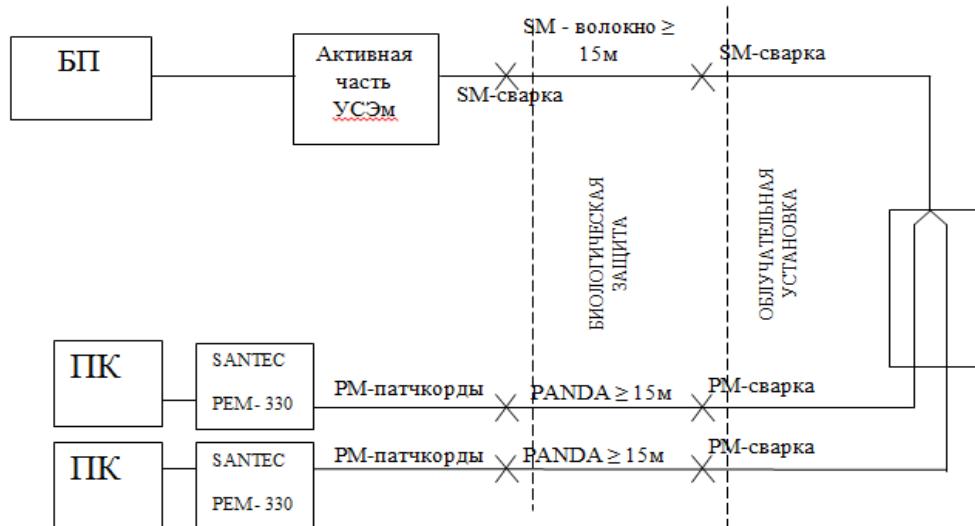


Рисунок 2.12 – Схема измерений поляризационных характеристик СИОМ при исследовании воздействия непрерывного ИИ на установке ГУТ-200М



Рисунок 2.13 – Рабочее место регистрации данных с PEM-330 за биологической защитой

2.3.2.3 Методика исследования образцов АОВ при воздействии импульсного ИИ

Для исследования характеристик АОВ в составе СВИ выбрана однопроходная схема СВИ со встречной накачкой (Рисунок 2.14). Данная схема обладает рядом недостатков: уступает по ширине спектра, измеренного на полувысоте [25], а также с точки зрения радиационной стойкости – у этой конфигурации СВИ наблюдается значительная нестабильность средневзвешенной длины волны при воздействии облучения [66]. Однопроходная схема СВИ позволяет наблюдать за спектром люминесценции АОВ, без искажений в следствие использования отражателя или спектральных фильтров, как в более сложных схемах. Использование встречной накачки обусловлено необходимостью использования только одного транспортного кабеля из измерительного бокса до облучательного зала, что также уменьшает погрешность.

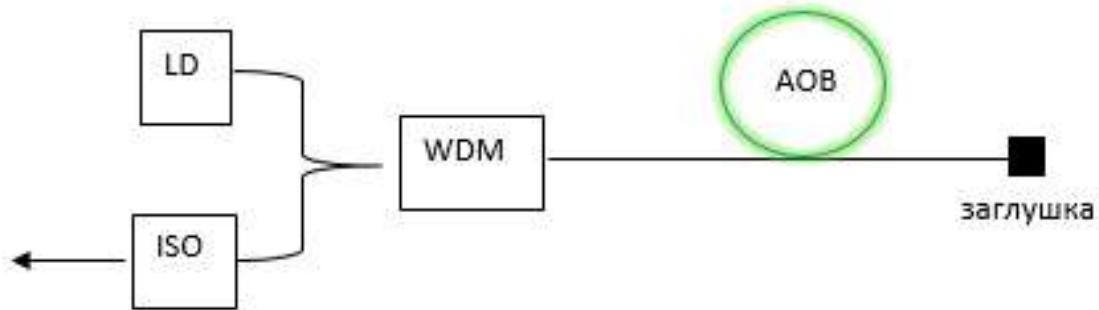


Рисунок – 2.14 – Принципиальная схема однопроходного СВИ с встречной накачкой: LD – лазерный диод накачки с длиной волны излучения 980 нм, WDM – спектрально-селективный ответвитель, ISO – оптический изолятор на 1550 нм, АОВ – активное оптическое волокно, заглушка – бессердцевинное оптическое волокно

Для макета СВИ был выбран полупроводниковый лазерный диод накачки с длиной волны излучения 980 нм для обеспечения более высокого уровня заселенности инверсного уровня по сравнению с накачкой на длине волны

1480 нм, а также для использования более интенсивного фотообесцвечивания [71]. Излучение от лазера накачки вводилось в катушки активных световодов через спектрально-селективный ответвитель (ССО) 0,98/1,55 мкм. На выходе устройства устанавливался оптический волоконный изолятор для подавления генерации на паразитной обратной связи. Длины активных световодов в схеме СВИ выбирались таким образом, чтобы поглощение в АОВ излучения накачки 980 нм мощностью 150 мВт составляло не менее 30 дБ [A3, A32].

Спектры излучения СВИ измерялись до, во время и после воздействия ИИ. Спектры излучения до и после воздействия ИИ регистрировались с помощью анализатора оптического спектра Yokogawa AQ6370C (Таблица 2.7).

Влияние импульсного воздействия тормозного излучения и смешанного нейтронного и гамма-излучения на образцы АОВ исследовалось как в составе СВИ, так и автономно, чтобы контролировать РНП на длине волны 1300 нм, схема опыта представлена на Рисунке 2.15. Для исследования РНП использовались образцы АОВ с длиной в два раза короче, чем при исследовании АОВ в составе СВИ. Под облучение ИИ ставились только намотанные в кольцо диаметром около 100 мм образцы АОВ, остальные оптические и электронные компоненты были в измерительном зале за биологической защитой. Транспортный кабель, по которому передавалось излучение накачки и отводилось излучение АОВ в составе схемы СВИ был изготовлен из волокна с заниженной отсечкой, чтобы на длине волны 980 нм это волокно было одномодовым. Длина кабеля составляла примерно 30 м.

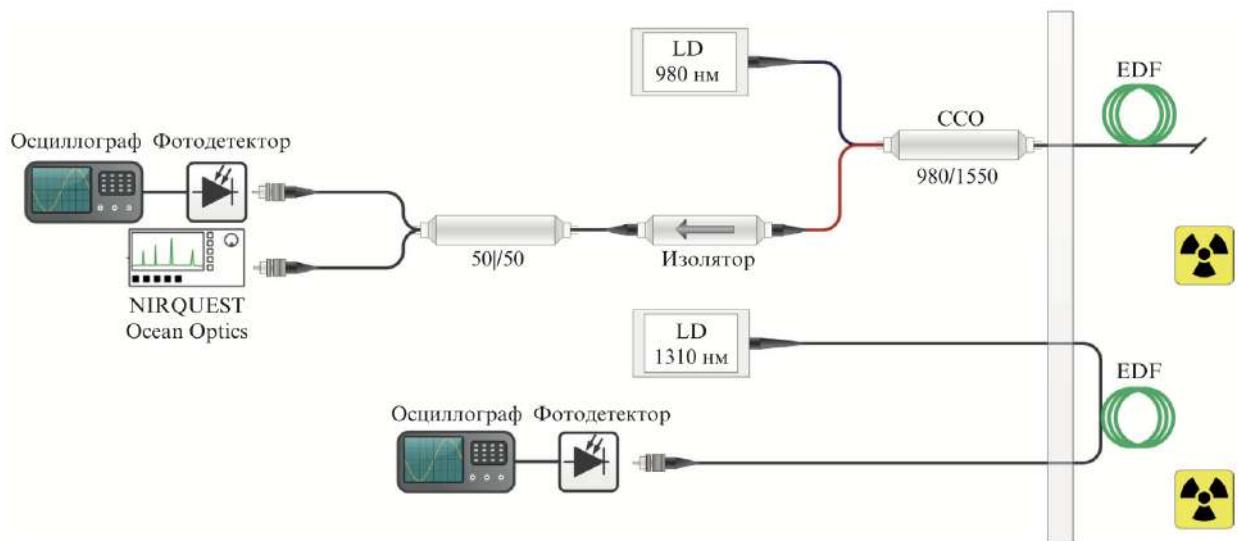


Рисунок 2.15 – Схема эксперимента по исследованию поведения образцов АОВ под воздействием импульсного ИИ

Эксперименты с АОВ в составе макета СВИ проводились при комнатной температуре и при температуре минус 60 °С. В составе макета СВИ контролировались выходная мощность СВИ и спектр выходного излучения.

Для оценки изменения мощности СВИ и определения уровня РНП при воздействии импульсного излучения с помощью фотодетектора и осциллографа детектировалась выходная мощность излучения в течение примерно 20 мс до импульса ИИ и 100 мс после облучения.

Спектры излучения СВИ измерялись непрерывно в процессе облучения ИИ в спектральном диапазоне от 1500 нм до 1600 нм с помощью спектрофотометра Ocean Optics NIRQUEST. Спектральное разрешение составляло ~3 нм, а временной интервал между последовательными измерениями спектров составлял ~15 мс. Средневзвешенная длина волны определялась по формуле (1.3).

2.3.3. Методика исследования образцов ОВ на воздействие непрерывного и импульсного ИИ

Образцы, сохраняющих поляризацию оптических волокон (ПSiO₂, ПGeO₂), исследовались на воздействие ИИ в виде свободной намотки диаметром 150-170 мм, а также в виде гироскопических каркасных и бескаркасных волоконных контуров диаметром 120 мм с длиной волокна 1000 м. Образцы изотропных волокон ISiO₂И1, исследовались только в виде свободной намотки диаметром 150-170 мм. В свободной намотке для исследования РНП в диапазоне длин волн от 1700 нм до 900 нм длина волокна составляла не менее 100 м, для исследования в диапазоне длин волн менее 900 нм длина волокна была уменьшена до 10 м и менее.

В работе проводились исследования РНП от длины волны зондирующего излучения и от величины вводимой оптической мощности на длинах волн излучения 1550 нм, 1300 нм и 850 нм.

Для исследования РНП на длине волны 1550 нм в диапазоне мощности оптического излучения от 100 нВт до 5 мВт, в качестве источника деполяризованного излучения использовался СВИ (Таблица 2.7). Для диапазона выше 5 мВт для исследования воздействия импульсного ИИ был применен лазерный диод LPSC-1550-FC (Таблица 2.7). В качестве источников излучения на 850 нм и 1300 нм применялся FOD (Таблица 2.7). Величина вводимой оптической мощности регулировалась перестраиваемым аттенюатором (Таблица 2.7).

В качестве приемника излучения в опытах с непрерывным ИИ применялся 4-х канальный измеритель мощности EXFO FTB-1750, с возможностью измерений на длинах волн 850 нм, 1310 нм, 1550 нм, а в опытах с импульсным ИИ регистрация оптической мощности производилась с помощью высокочастотного фотоприемника New Focus 1811 и записывающего осциллографа Lecroy 4096 HD (Таблица 2.7).

Характеристика сохранения поляризации излучения исследовалась на образцах ОВ длиной не менее 1000 м. В опытах с непрерывным ИИ поляризационная экстинкция измерялась экстинометром РЕМ-330 (Таблица 2.7), схема измерений приведена на Рисунке 2.16. Деполяризованное излучение СВИ на длине волны 1550 нм поляризуется с помощью СИОМ, в составе которого поляризатор с экстинкцией около 60 дБ. Дополнительно СИОМ позволяет разделить излучение пополам и через транспортные кабели с волокном типа «Панда» линейно поляризованное излучение вводится в два испытываемых одновременно волоконных контура, обозначенных ВК. Выходное излучение с обоих ВК через транспортные кабели с волокном «Панда» попадает на экстинометры, подключенные к ПК для записи измерений. В опытах с импульсным ИИ схема на Рисунке 2.16 модифицировалась – на выходе волоконного контура ставился поляризационный делитель, разводящий выходное излучение по быстрой и медленной оси на два высокочастотных фотоприемника, подключенных к отдельным каналам осциллографа. Далее величина h -параметра вычислялась по формуле (т.е. был реализован высокочастотный экстинометр с постобработкой сигнала):

$$h(t) = \frac{10}{L} \cdot \log_{10} \frac{P_f(t)}{P_s(t)} \quad (2.7)$$

где $h(t)$ — h -параметр в момент времени t ,

$P_f(t)$ и $P_s(t)$ – оптические мощности по быстрой и медленной оси в момент времени t , соответственно,

L — длина волокна, м.

Стандартные коннекторы (отрезки патчкордов с одним коннектором) использовались только для подключения измерительных приборов, а испытываемые образцы и другие волоконные компоненты соединялись путем сварных соединений с последующей защитой в КДЗС. Сварные соединения выполнялись на сварочном аппарате FSM-100Р с возможностью сварки волокон с сохранением поляризации излучения (Таблица 2.7).

Исследования РНП в зависимости от длины волны проводились с помощью источника широкополосного излучения SLS201L (Таблица 2.7) с помощью стенда, собранного по схеме на Рисунке 2.17. Измерения в диапазоне длин волн от 900 нм до 1700 нм проводились как с фильтром, отсекающим длины волн менее 900 нм, так и без фильтра, чтобы за счёт эффекта фотообесцвечивания уменьшить интенсивность полосы поглощения в коротковолновой области спектра для более чёткого выявления структуры спектра РНП в ближнем ИК диапазоне. Регистрация спектров РНП проводилась с помощью спектрофотометра NIRQuest-512 (Таблица 2.7).

Исследования ОВ проведены под руководством и при личном участии автора в постановке и проведении опытов. В проведении опытов и расчетах характеристик участвовали Филиппов А.В. (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Кашайкин П.Ф. (НЦВО РАН), специалисты ПАО «ПНППК» Вохмянина О.Л., Шаронова Ю.О., Лунегова (Поспелова) Е.А., Хисамов Д.В.

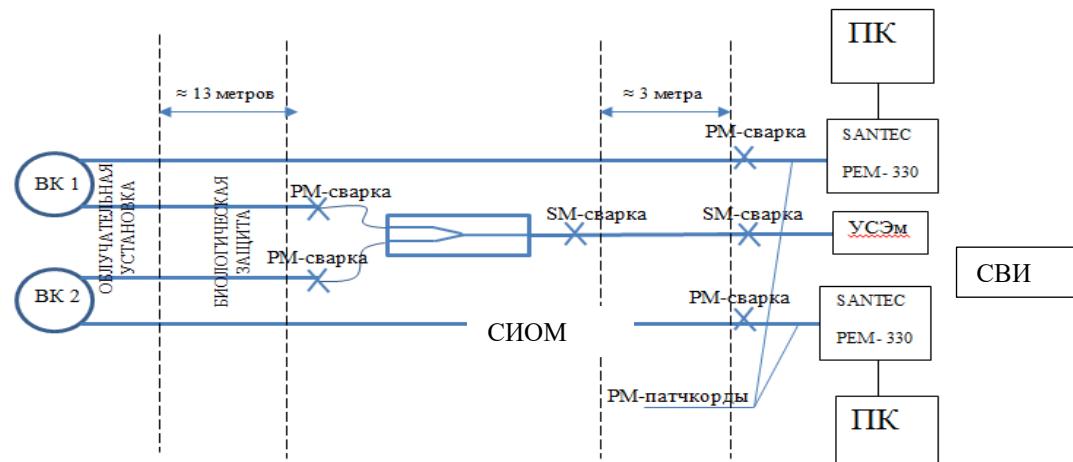


Рисунок 2.16 – Схема измерений поляризационной экстинции

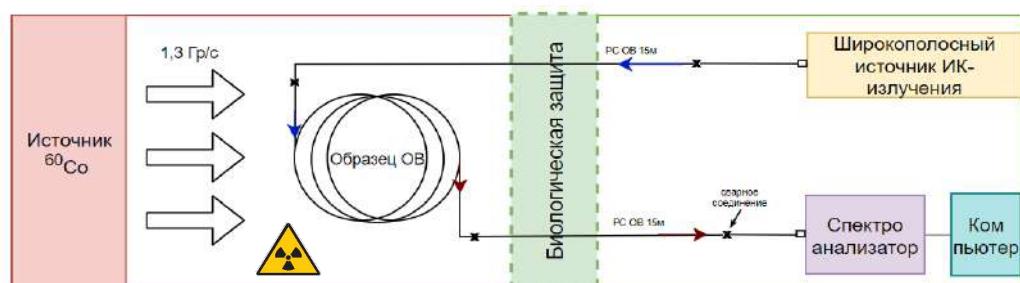


Рисунок 2.17 – Схема измерений РНП в зависимости от длины волны

2.3.3.1 Методика проведения математической обработки экспериментальных результатов

Обработка экспериментальных данных по воздействию облучения на оптические волокна осуществлялась при помощи ряда аналитических функций. Каждая из аналитических функций имеет свои границы применимости. Также на практике в зависимости от типа исследуемого волокна и воздействия (с германосиликатной или нелегированной кварцевой сердцевиной) разные математические функции дают отличные по точности результаты аппроксимации.

Для описания процесса релаксации оптического волокна после воздействия применялась функция растянутой экспоненты Кольрауша, которая хорошо описывает процессы восстановления в веществах в конденсированном состоянии. Данное соотношение по отношению к оптическим волокнам представлено в работе [154] в виде:

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta}, \quad (2.8)$$

где $q(t)$ – измеряемая величина,

q_0 – начальное значение величины,

τ – наблюдаемая постоянная времени,

β – число от 0 до 1.

В качестве измеряемой величины выступает значение РНП(t). При обработке экспериментальных данных начальным значением q_0 выступает максимальное значение потерь РНП_{max} в момент завершения воздействия.

Зависимость (2.8) в исходном виде позволяет аппроксимировать экспериментальную кривую, описывающую процесс восстановления параметров волокна после непрерывного воздействия. Такие зависимости (кривые восстановления) после импульсных воздействий, в свою очередь, имеют более сложную форму, и, соответственно, требуют для описания функции другого вида. В работе [224] на основе выводов о природе образования РЦО различных

типов было предложено добавить дополнительное слагаемое в функциональную зависимость кинетики второго порядка (будет обсуждаться ниже). Поэтому в данной работе предложено также два слагаемых для функциональной зависимости «растянутой экспоненты» (2.8) для разделения вклада короткоживущих и долгоживущих РЦО [A12]. Так соотношение приобрело вид:

$$РНП = A_{соб} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_{соб}}\right)^{\beta_{соб}}} + A_{деф} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_{деф}}\right)^{\beta_{деф}}}, \quad (2.9)$$

где эмпирические коэффициенты:

$A_{соб}$, $A_{деф}$ – РНП в момент времени $t = 0$ для РЦО своего типа, т.е. это эмпирические коэффициенты, характеризующие степень концентрации образовавшихся короткоживущих (собственных АДС) и долгоживущих (деформационных АДС) РЦО, соответственно;

$\tau_{соб}$, $\tau_{деф}$ – характерное время жизни РЦО;

$\beta_{соб}$, $\beta_{деф}$ – показатель степени от 0 до 1 для РЦО своего типа.

В данном случае добавление второго слагаемого позволило не только достичь высокой точности аппроксимации, но и выявить функциональные зависимости эмпирических коэффициентов, характеризующих определенный вид РЦО, от внешних факторов при облучении – уровня напряженно-деформированного состояния, температуры при облучении, уровня вводимой оптической мощности.

В той же работе [232], а также в работах [224, 225] для описания процесса релаксации характеристик оптических волокон как процесса распада двух видов РЦО предложена формула кинетики 2-го порядка из двух слагаемых:

$$РНП = \frac{C_{соб}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{соб}}\right)^{\alpha_{соб}}} + \frac{C_{деф}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{деф}}\right)^{\alpha_{деф}}}, \quad (2.10)$$

где эмпирические коэффициенты:

$C_{соб}$, $C_{деф}$ – РНП в момент времени $t = 0$ для РЦО своего типа;

$\tau_{соб}$, $\tau_{деф}$ – характерное время жизни РЦО;

$\alpha_{соб}$, $\alpha_{деф}$ – показатель степени от 0 до 1 для РЦО своего типа.

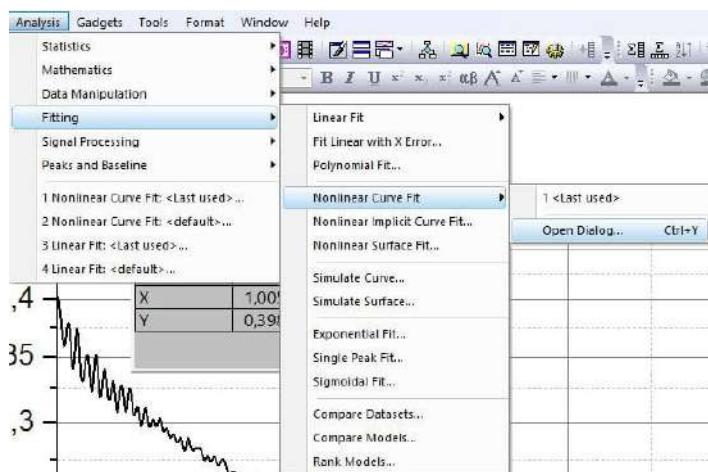
Аппроксимация при помощи функциональных зависимостей (2.9) и (2.10)

осуществлялась в программном пакете OriginPro инструментом Fitting, предназначенном для подбора аналитических функций для экспериментального набора точек на графике.

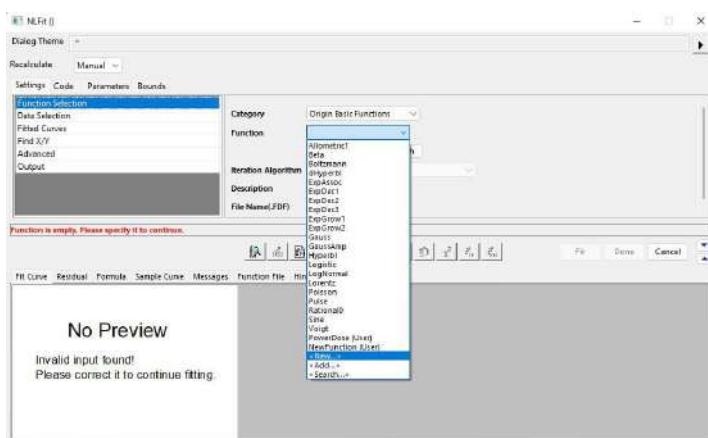
В ходе аппроксимации можно было широко варьировать вид аналитической функции. Коэффициенты, времена жизни, показатели степеней в этих функциональных зависимостях были определены путем многократного использования инструмента Fitting с ручным заданием начального диапазона этих эмпирических параметров для поиска наилучшего соответствия аналитической функции и экспериментальных точек в заданном диапазоне. В результате этот инструмент позволил достичь показатель качества подгонки (коэффициент детерминации R^2) не ниже 0,91 (Таблицы 4.2, 4.1).

Процесс математической аппроксимации кривых после импульсного воздействия осуществлялся следующим образом:

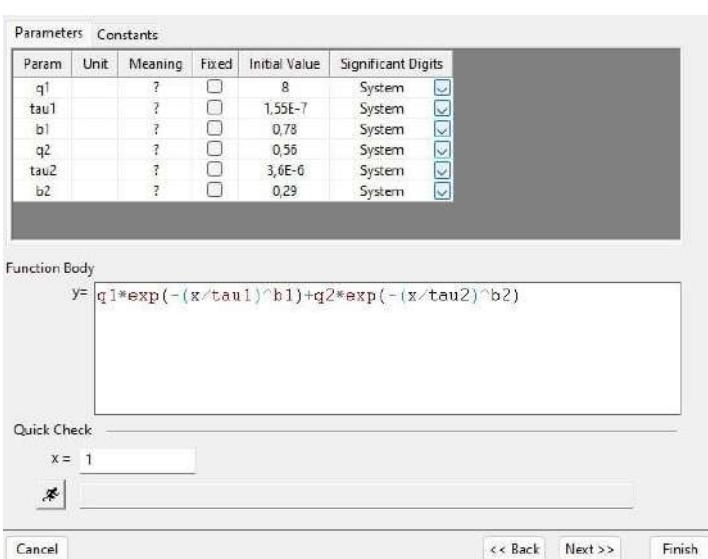
- 1) Производилось построение графика зависимости РНП от времени на основе, полученных в опыте данных, зарегистрированных фотоприемником/осциллографом. Расчет значения РНП производился в пакете OriginPro по формуле (2.1);
- 2) Построенный график визуально оценивался, при необходимости смещался по оси времени для осуществления дальнейшей обработки. Для лучшего выявления особенностей реакции характеристик волокна на импульсное воздействие, работа с графиком осуществлялась в логарифмических осях;
- 3) На графике определялась точка, соответствующая максимальным потерям после импульсного воздействия. При помощи инструмента Data Reader устанавливался, соответствующий этому значению РНП момент времени $t_{\text{нач}}$, после которого начинался процесс релаксации. Далее, в разделе данных для графика зависимости РНП(t) производилось выделение только того объема точек, который соответствовал рассматриваемому процессу релаксации;
- 4) В разделе Analysis выбирался инструмент Fitting -> Nonlinear Curve Fit (Рисунок 2.18, а);



a



5



6

Рисунок – 2.18. Этапы проведения аппроксимации экспериментальных данных: *а* – выбор инструмента, *б* – создание специализированной функции, *в* – задание функциональной зависимости и начальных значений параметров

5) В окне с заданием функции создавалась новая функция <New...> (Рисунок 2.18, б) в соответствии с функциональными зависимостями (2.7) и (2.8), поскольку функции такого вида отсутствуют в каталоге пакета. В дальнейшем созданная функция применялась для обработки других экспериментальных кривых;

6) После выбора функции производилась ее корректировка в разделе Edit Fitting Function (Рисунок 2.18, в). Уточнение кривых производилось через подбор эмпирических коэффициентов функциональной зависимости;

7) Первичная оценка подобранный кривой осуществлялась визуально. При недостаточном соответствии кривых производилась уточнение параметров функциональной зависимости по п. 6;

8) При должном визуальном соответствии двух кривых диалоговое окно Fitting закрывалось через кнопку Done. При закрытии диалогового окна программный пакет OriginPro запускает процесс оценки подобранный функции на основе расчета регрессионного уравнения. Величина R-Square в итоговом окне подбора функции варьируется от 0 до 1 и характеризует степень подгонки – коэффициент детерминации R^2 . Чем ближе данное значение к 1, тем выше лучше подобранный функция соответствует экспериментальной кривой.

В число инструментов обработки экспериментальных данных после импульсного воздействия вошла модель кинетики n -го порядка. Для описания импульсных воздействий данный подход в литературе широко не применялся. В данной модели процесс термического распада РЦО описывается как необратимый процесс химической реакции [226]. Для определения порядка реакции строится график зависимости логарифма скорости изменения РНП от логарифма РНП. Скорость РНП обозначим РНП* и определим по формуле:

$$\text{РНП}^* = \frac{\text{РНП}(t - h) - \text{РНП}(t + h)}{2h}, \quad (2.11)$$

где h – шаг по времени,

РНП($t+h$), РНП($t-h$) – значение РНП в следующий и предыдущий момент времени соответственно.

На графике зависимости логарифма скорости изменения РНП от логарифма РНП определяются участки с разным наклоном. Для каждого участка вычисляется свой порядок реакции n , который равен коэффициенту наклона прямой для данного участка.

Константа скорости реакции для каждого участка кривой РНП вычисляется по формуле:

$$k = \frac{1}{(n-1)t} \left(\frac{1}{\text{РНП}_{\text{norm}}^{n-1}} - \frac{1}{P_{\text{norm}0}^{n-1}} \right), \quad (2.12)$$

где k – константа скорости реакции,

t – время после воздействия, с;

n – порядок реакции;

$P_{\text{norm}0}$ – величина нормированной оптической мощности в нулевой момент времени;

P_{norm} – величина нормированной оптической мощности в момент времени t .

По рассчитанным константам скорости реакции вычисляются характерные времена процесса распада собственных дефектов – времена уменьшения концентрации дефектов в e раз ($\tau_{1/\text{exp}}$) по формуле:

$$\tau_{1/\text{exp}} = \frac{\exp^{n-1} - 1}{(n-1)kP_{\text{norm}0}^{n-1}}. \quad (2.13)$$

Модель кинетики n -порядка описывается зависимостью:

$$\text{РНП}(t) = (A_0 - A_f)(1 + ct)^{-x} + A_f, \quad (2.14)$$

где A_0 – РНП при окончании,

A_f – окончательные РНП (окончание релаксации),

$$c = \frac{1}{\tau} (2^{n-1} - 1), \quad x = \frac{1}{n-1},$$

τ – время уменьшения РНП в 2 раза,

n – порядок кинетики восстановления.

С учетом двух процессов с разными показателями порядка кинетики зависимость (2.14) принимает вид:

$$РНП(t) = (A_{01} - A_{f1})(1 + c_1 t)^{-x1} + (A_{02} - A_{f2})(1 + c_2 t)^{-x2} + A_f, \quad (2.15)$$

где индекс «1» обозначает эмпирические коэффициенты для первого процесса, а индекс «2» – для второго.

Для описания экспериментальных кривых роста РНП при непрерывном воздействии была применена степенная функция, предложенная в [154], и дополненная в данной работе до вида

$$РНП(D) = A \cdot D^\alpha \dot{D}^\beta, \quad (2.16)$$

где A – эмпирический коэффициент,

D, \dot{D} – поглощенная доза и мощность дозы, соответственно,

α, β – показатели степени от 0 до 1.

Глава 3. Результаты исследования влияния непрерывного ИИ на характеристики анизотропного ОВ

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.

3.1. Влияние непрерывного гамма-излучения на характеристики образцов PGeO_2

ОВ с германосиликатной сердцевиной известно своим монотонным и предсказуемым поведением во время облучения [154], в отличие от ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной, в которых могут наблюдаться РЦО, приводящие к немонотонному радиационному отклику [38]. Поэтому основная цель данного раздела исследований – определение влияния наличия напрягающих стержней и изменения уровня напряженно-деформированного состояния ОВ PGeO_2 при изготовлении гироскопических контуров на радиационный отклик образцов.

Воздействие непрерывного гамма излучения на образцы ОВ PGeO_2 исследовалось при температурах минус 50 °C, +25 °C, +60 °C, доза в опыте составляла от 1 кГр до 2 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с и 0,13 Гр/с, использовались установки ГУТ-200М на основе источника ^{60}Co , а также линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20, работающий в режиме тормозного излучения. Длина образцов составляла более 500 м для возможности корректно оценить поведение коэффициента сохранения поляризации излучения в волокне под действием облучения. Образцы исследовались как в виде свободной намотки, так и в составе гироскопических контуров.

3.1.1. РНП в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм

Установлено, что наличие напрягающих элементов (стержней) в ОВ не привело к образованию дополнительных РЦО (Рисунки 3.1, 3.2).

При регистрации спектров РНП в диапазоне длин волн видимого и ближнего ИК диапазона оптическая спектральная мощность вводимого излучения не превышала 0,5 мкВт. Типичный спектр РНП в ближнем ИК диапазоне образца PGeO_2 во время облучения и релаксации при комнатной температуре приведен на Рисунке 3.1. Разложение спектра РНП на составляющие показывает, что основную роль в РНП играют центры окраски, связанные с присутствием германия [38, 93]. Величина РНП на длине волны 1550 нм (0,8 эВ) наименьшая по сравнению с другими длинами волн. При небольших дозах основной вклад в РНП на длине волны 1550 нм дает GeY центр, полоса которого имеет центр на 900 нм (1,4 эВ) и длинноволновый хвост STH(Ge) (Рисунок 3.2, *a*). Существование GeY центра было показано в работе [38]. С ростом дозы начинает дополнительно вносить вклад хвост коротковолнового центра Ge(*x*). При этом Ge(1) центр непосредственно не вносит вклад в РНП на длине волны 1550 нм. Полос поглощения короткоживущих РЦО, характерных для ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной, в ближней ИК области в диапазоне температур от минус 50 °C до + 60 °C и в диапазоне мощностей доз от 0,1 Гр/с до 1,1 Гр/с не наблюдалось. Для длины волны 1310 нм (0,95 эВ) РНП намного выше, чем для 1550 нм, поскольку на этой длине волны выше вклад РЦО, связанных с германием GeY и Ge(*X*) (Рисунок 3.1).

Рост РНП образцов PGeO_2 на длине волны 1550 нм с увеличением поглощенной дозы остался монотонным (Рисунок 3.3) как и у изотропных ОВ, легированных германием (Рисунок 3.4). Тем не менее, при одинаковой поглощенной дозе на длинах волн 1310 нм и 1550 нм РНП у образцов PGeO_2 значительно выше, чем у стандартного изотропного одномодового волокна SMF28 Corning (Рисунок 3.3, 3.4). Это связано как с повышенным содержанием германия в образцах PGeO_2 , так и с наличием напрягающих стержней, обеспечивающих двулучепреломление волокна для сохранения поляризации излучения.

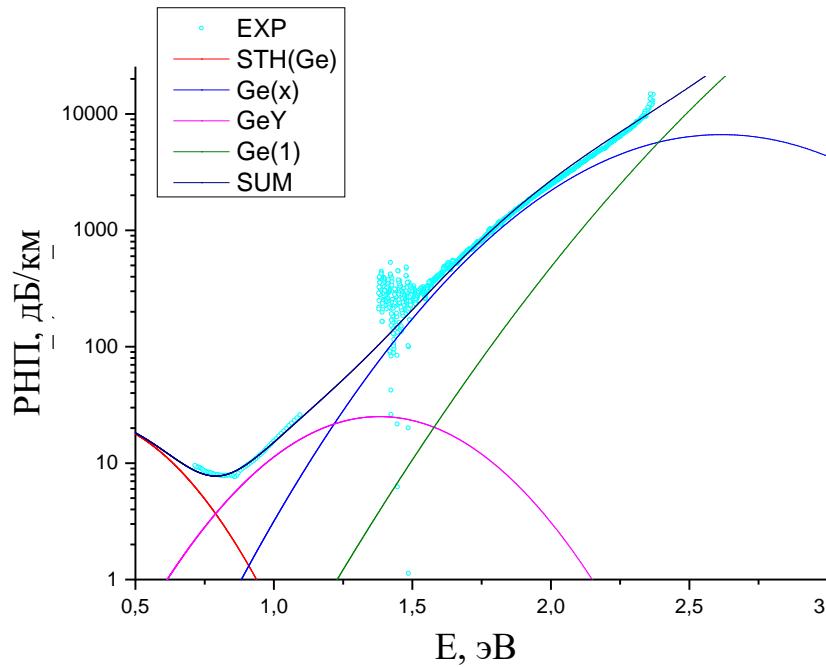
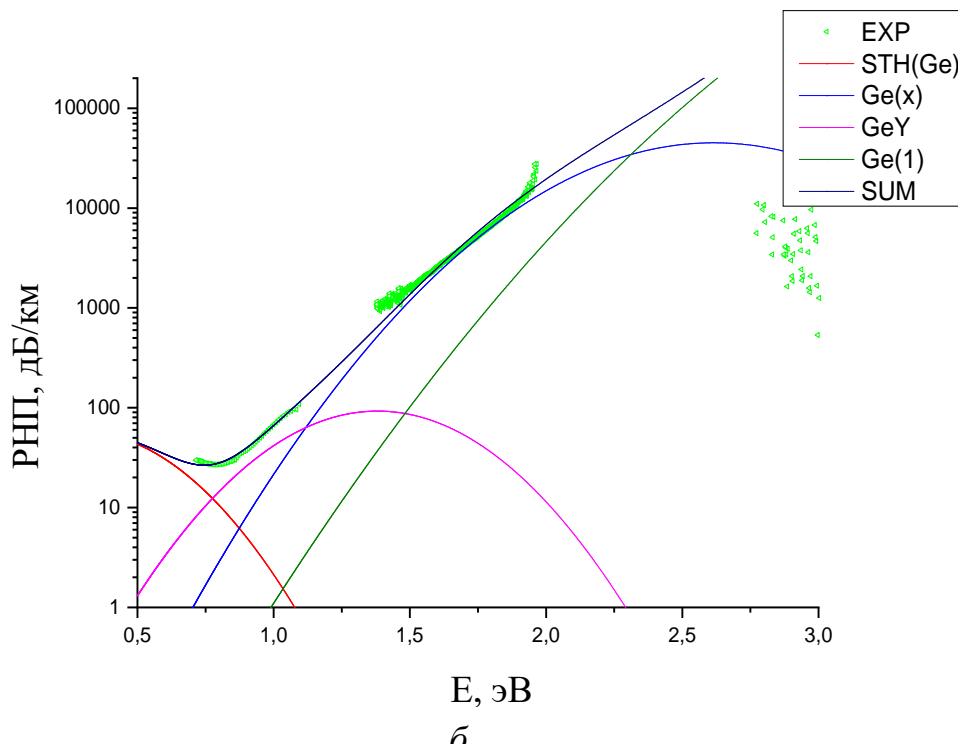
*a**b*

Рисунок 3.1 – Экспериментальная зависимость (зеленые точки), аппроксимация (SUM) и разложение спектра РНП образца GeO_2 Панда при комнатной температуре на четыре составляющие при дозе 165 Гр (*a*), при дозе 1 кГр (*б*); в легенде приведены названия центров окраски

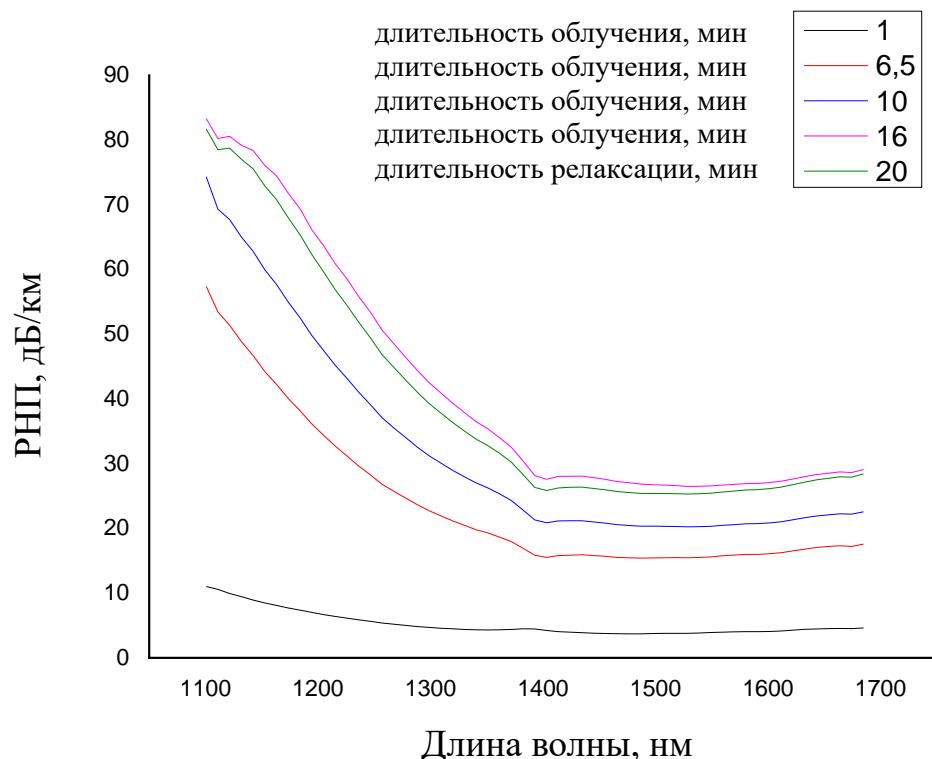


Рисунок 3.2 – Спектр РНП образца ПGeO₂ при комнатной температуре во время облучения (длительностью 1 мин, 6,5 мин, 10 мин, 16 мин) и после 4 мин релаксации (зеленая линия – обозначено 20 минут с начала опыта), максимальная доза 1 кГр (сиреневая линия), мощность дозы 1,1 Гр/с

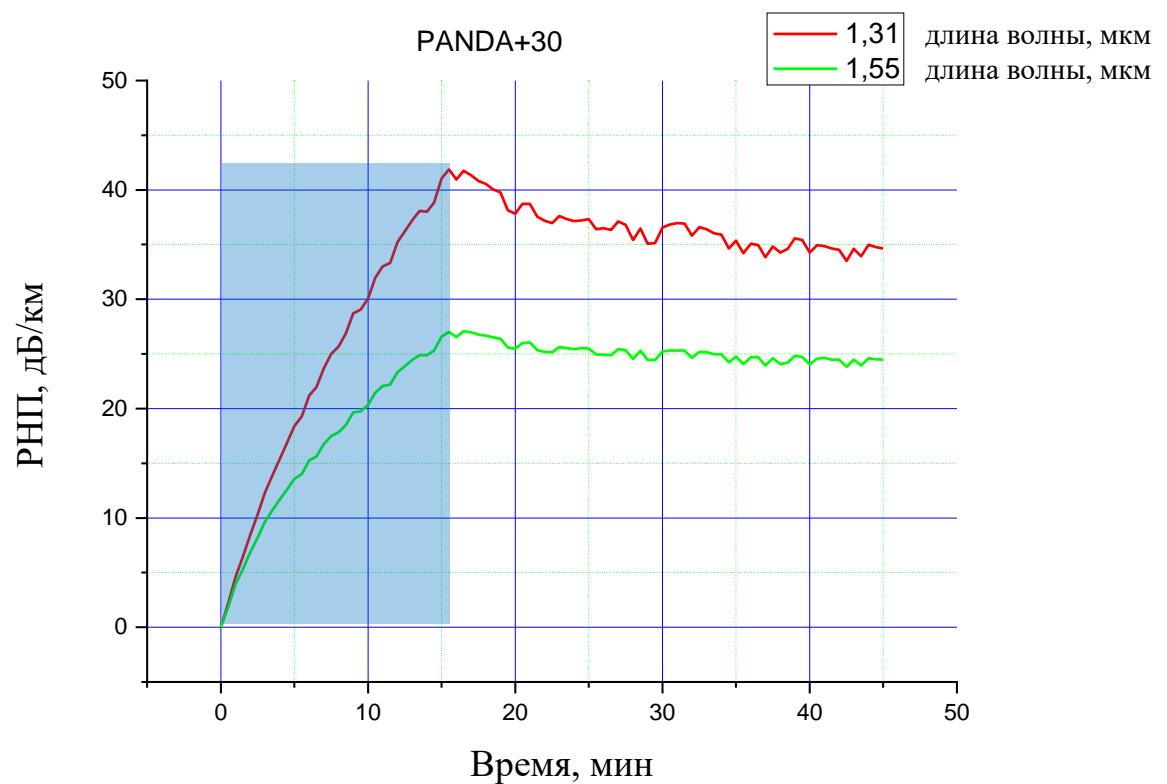


Рисунок 3.3 – РНП образца GeO₂Панда на длинах волн 1310 нм (красная линия) и 1550 нм (зеленая линия) во время облучения и релаксации (синий прямоугольник показывает длительность облучения 16 мин) при комнатной температуре, мощность дозы 1,1 Гр/с, облучение до дозы 1 кГр, $P_0 = 0,1$ мкВт

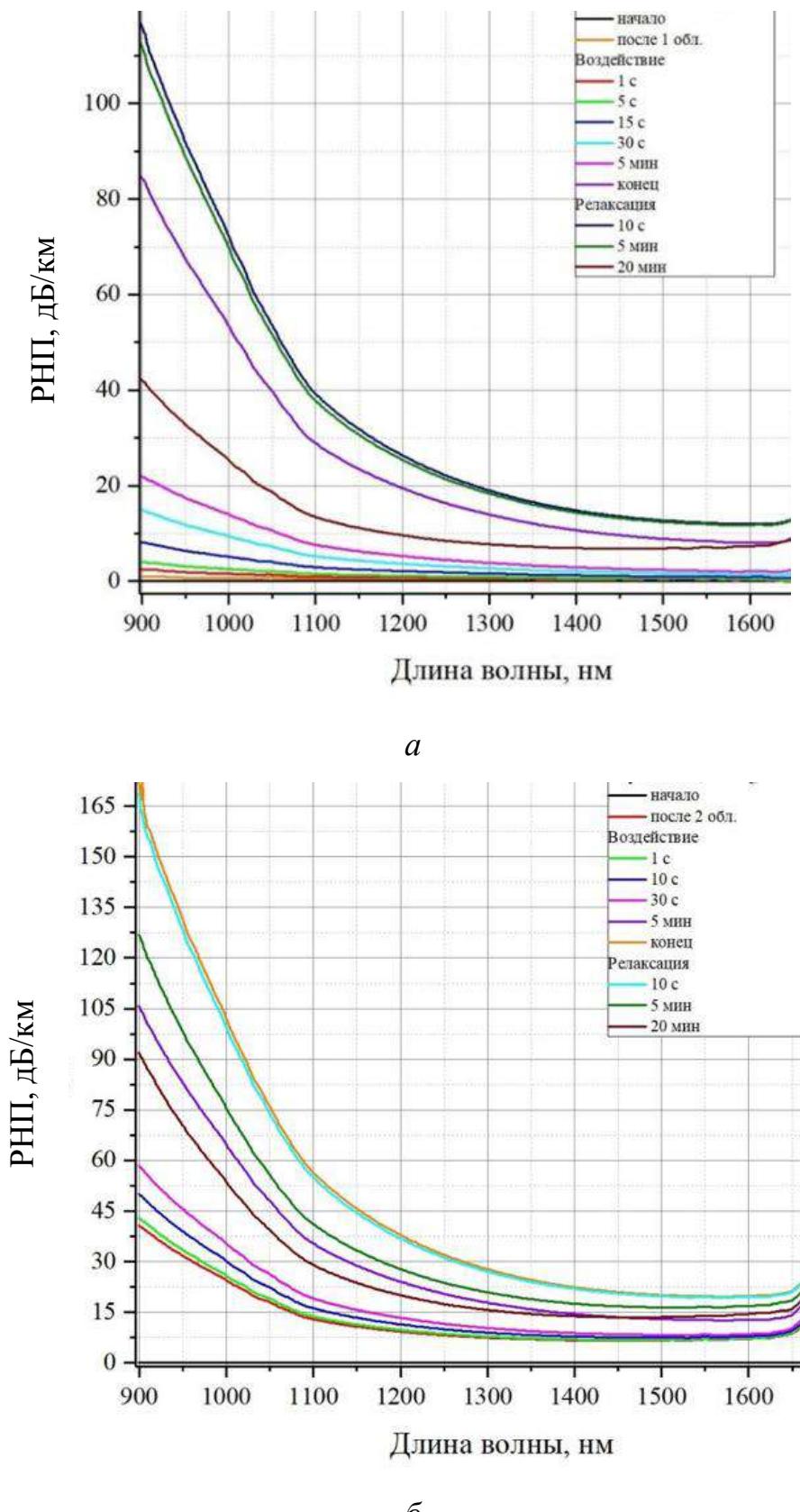


Рисунок 3.4 – Спектры РНП волокна SMF28 Corning во время облучения и релаксации при комнатной температуре, мощность дозы 0,9 Гр/с, максимальная доза облучения 530 Гр (а), 910 Гр (б)

3.1.2. Аналитическое описание РНП PGeO_2 в свободной намотке для длины волны 1550 нм

Для определения вида аналитической зависимости РНП от поглощенной дозы проанализированы данные нескольких образцов PGeO_2 в свободной намотке из разных преформ и вытяжек, отличающихся также по величине двулучепреломления. Данные по условиям облучения и РНП образцов PGeO_2 в свободной намотке для длины волны 1550 нм, а также начальные данные по оптическим потерям, величине двулучепреломления для исследованных образцов приведены в Таблице 3.1 и на Рисунках 3.5, 3.6.

Таблица 3.1 – Сводные результаты образцов GeO_2 Панда для облучения с вводимой оптической мощностью от 1 мВт до 2 мВт.

Образцы	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
ПС 175- С200912- 1/1-6	ПС 531-2- 2/1-2	ПС 069- 1/1-3-1	ПС 205 2- 1/1-3-1	ПС 244- С300113- 2-11-2-1	ПС 150 1- 1/1-6	ПС 419 2/1-7-3	
Начальные оптические потери, дБ/км	0,578	0,523	1,018	0,787	0,647	0,659	0,645
$\text{B} \cdot 10^{-4}$	6,2 -6,0	6,4-6,5	7,4-7,8	6,6-6,6	6,2-6,6	6,5-6,9	6,3-6,8
Длина образца, км	0,566	0,513	0,513	0,513	0,521	0,512	0,512
Температура, °C	-50	-50	+25	+25	+25	+60	+60
Мощность дозы, Гр/с	1,1	1,1	1,1	1,1	0,13	1,1	1,1
Доза облучения, кГр	1	1	1	1	0,6	1	1
Вводимая оптическая мощность, мВт	1,4	0,8	1,37	1,38	1,2	0,6	1,7
РНП при максимальной поглощенной дозе, дБ/км	36	32	21	25	20	33	24
РНП через 2 недели после опыта, дБ/км	19,1	23,1	17,8	20,8	17,7	21,2	20,4

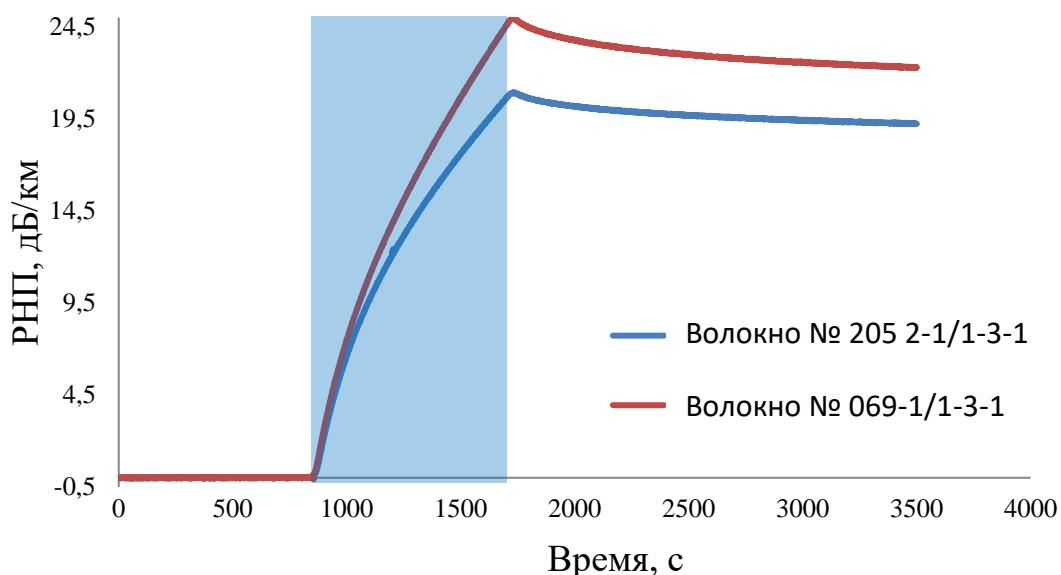


Рисунок 3.5 – РНП в образцах ПGeO₂ во время и после облучения; температура 25 °C, доза облучения 1 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с, синий прямоугольник показывает длительность облучения

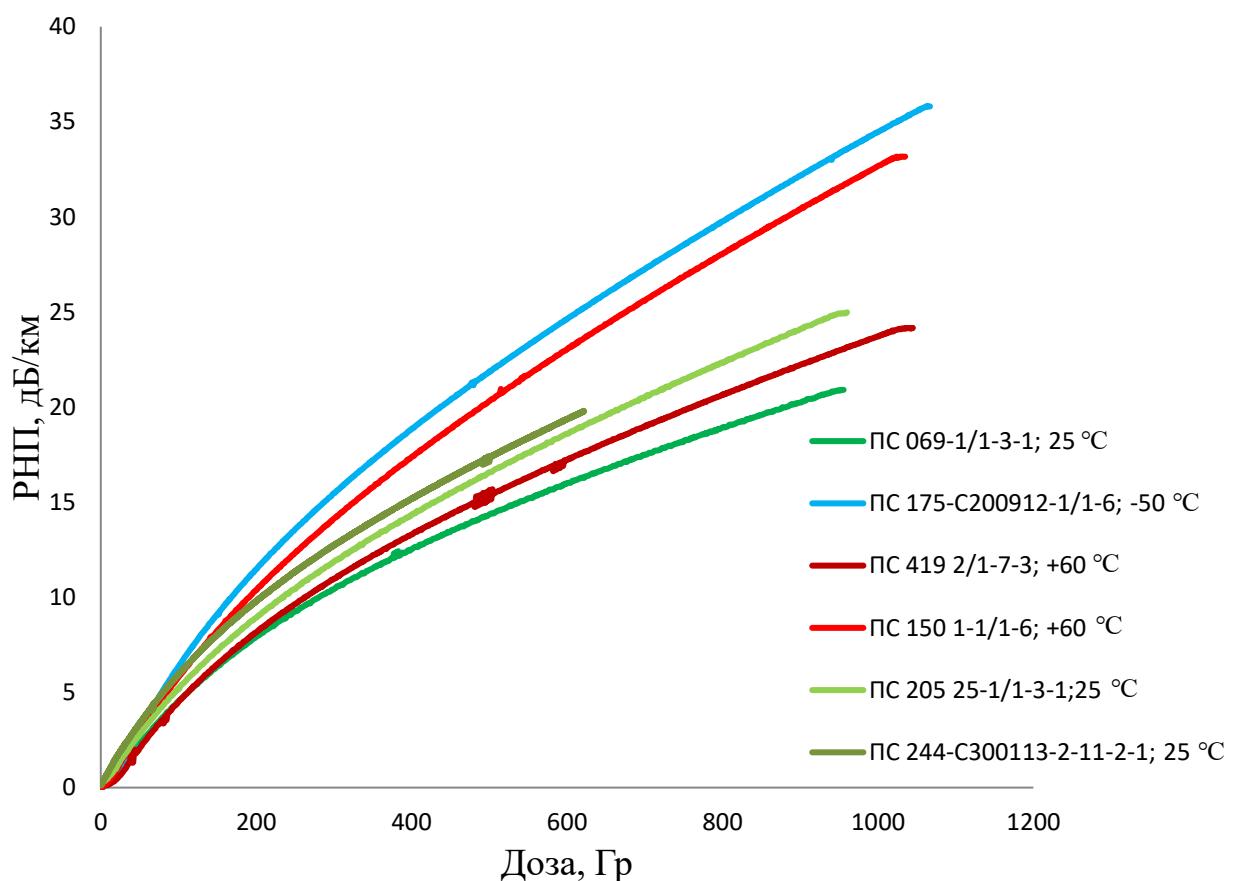


Рисунок 3.6 – Зависимость РНП от дозы для разных образцов ПGeO₂Панда при различных температурах; мощность дозы 0,13 Гр/с для ПС 244-C300113-2-11-2-1, для остальных световодов – 1,1 Гр/с

Разброс значений РНП при одной температуре связан скорее с технологическими допусками на режимы изготовления, чем с конструкцией ОВ, поскольку, например, образец № 3, имеющий наибольшее значение двулучепреломления показал наилучшие РНП, при этом у образца № 6 высокие РНП без явных предпосылок. Поэтому величину разброса РНП исследованных образцов PGeO_2 можно принять как случайную погрешность из-за технологических факторов изготовления ОВ, и на данном этапе определить вид зависимости РНП в целом для исследуемой группы образцов.

РНП на длине волны 1550 нм удовлетворительно описывается функциональной зависимостью (2.16). Параметры C , α и β вычислялись по данным измерений РНП при разной мощности дозы облучения. Аппроксимационная зависимость для волокна PGeO_2 в свободной намотке

$$\text{РНП} = 0,255 \cdot D^{0,7} \cdot \dot{D}^{0,06}. \quad (3.1)$$

Для расчета эмпирических коэффициентов были выбраны две экспериментальные зависимости РНП от поглощенной дозы с различной мощностью дозы (1,1 Гр/с и 0,13 Гр/с). Алгоритм определения коэффициентов заключался в их последовательном варьировании, построении модельных кривых РНП с помощью программ Excel и Origin и достижении минимального отклонения расчетных кривых от экспериментальных. Пример аппроксимационной зависимости показан на Рисунке 3.7. Из экспериментальной зависимости РНП от поглощенной дозы при мощности дозы 1,1 Гр/с были определены коэффициенты α (показатель степени поглощенной дозы) и C (коэффициент пропорциональности) $\alpha = 0,7$, $C = 0,255$. Из экспериментальной зависимости РНП от поглощенной дозы при мощности дозы 0,13 Гр/с был определен коэффициент β (показатель степени мощности дозы) $\beta = 0,06$, показавший достаточно слабую зависимость РНП от мощности дозы. Полученная расчетная зависимость дает хорошее совпадение с экспериментальными данными для других образцов, облучавшихся в таких же условиях (Рисунок 3.8).

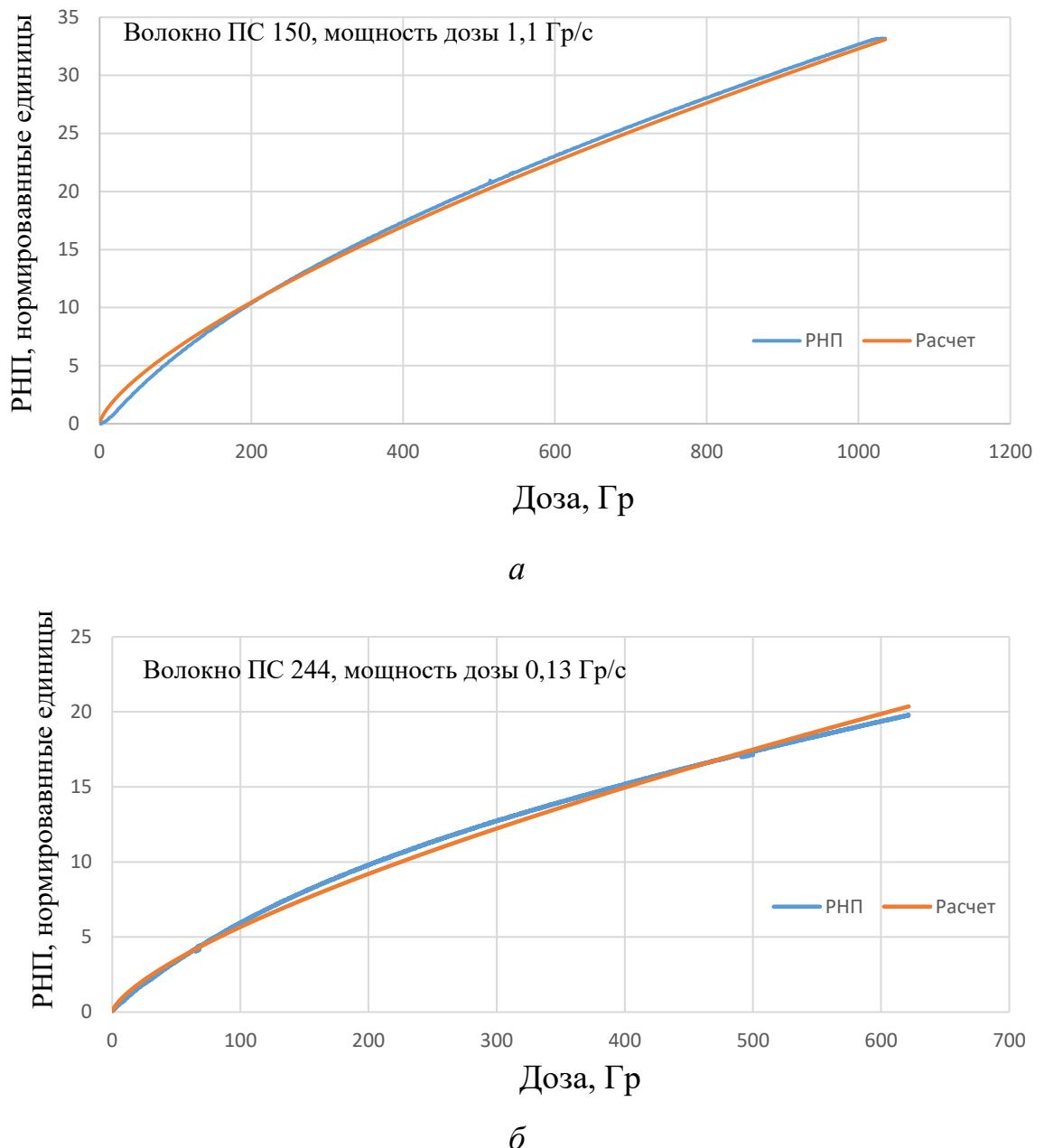


Рисунок 3.7 – Пример определения модельных коэффициентов для волокна $\text{GeO}_2\text{Панда}$; (—) – эксперимент, (—) – расчет

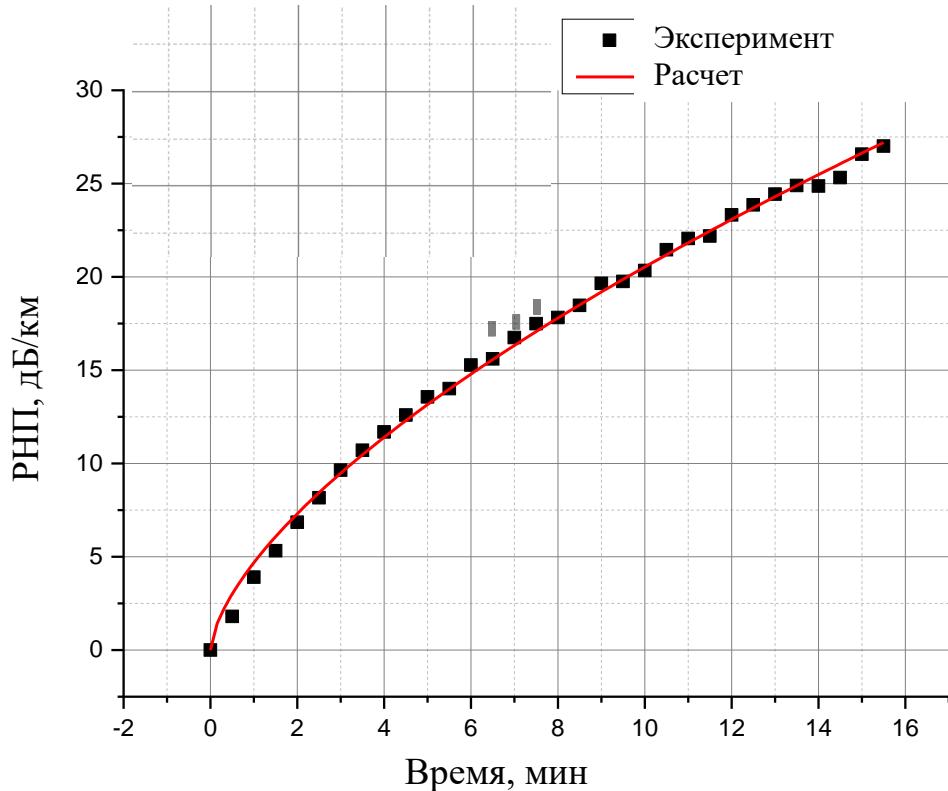


Рисунок 3.8 – Экспериментальная и расчетная кривые РНП для случайно взятого образца ПGeO₂

3.1.3. Влияние уровня НДС ОВ на зависимость РНП от поглощенной дозы

Впервые показано, что величина РНП зависит не только от содержания германия в сердцевине (в GeO₂ «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 образцах ВК величина РНП при дозе 1 кГр достигает 55 дБ/км при комнатной температуре (Рисунок 3.9), 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 [93].

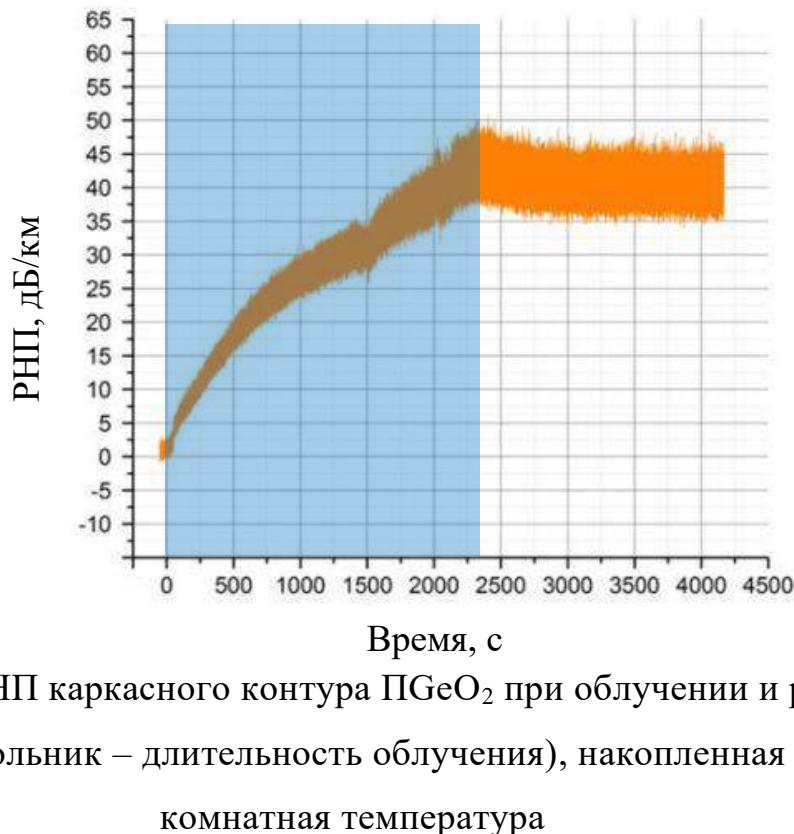


Рисунок 3.9 – РНП каркасного контура PGeO_2 при облучении и релаксации (синий прямоугольник – длительность облучения), накопленная доза 1 кГр, комнатная температура

Величина относительной продольной деформации ОВ, вызванная намоткой в гироскопический волоконный контур, составляет $\Delta\varepsilon_{zz} \approx 0,009$. Она получена путем определения средней величины частотного сдвига Бриллюэна ВК $\Delta f_b \approx 11,01$ ГГц с учетом экспериментально определенного коэффициента пропорциональности [5].

Функционально учет деформаций может быть выражен независимым множителем в зависимости РНП:

$$\text{РНП} = CE^\gamma \cdot D^\alpha \cdot \dot{D}^\beta \quad (3.2)$$

где E^γ – множитель, отвечающий за уровень относительной деформации, γ – показатель степени от 0 до 1.

3.1.4. Зависимость РНП от температуры

Зависимость РНП PGeO_2 от температуры довольно слабая (Рисунок 3.10), и может быть аппроксимирована с помощью экспоненты (Рисунок 3.11) $y = A_1 e^{(-\frac{x}{t})} + y_0$, где $A_1=34779$; $t=29,12$ К; $y_0=24,88$; x – температура, К; при этом коэффициент детерминации $R_2 = 0,92$. Облучения соседних участков одной

вытяжки образца PGeO_2 с вводимой оптической мощностью 0,5 мкВт показали разницу в РНП примерно 20 дБ/км в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 60 °С при дозе 1 кГр на длине волны 1550 нм, причем при положительных температурах РНП практически одинаковы.

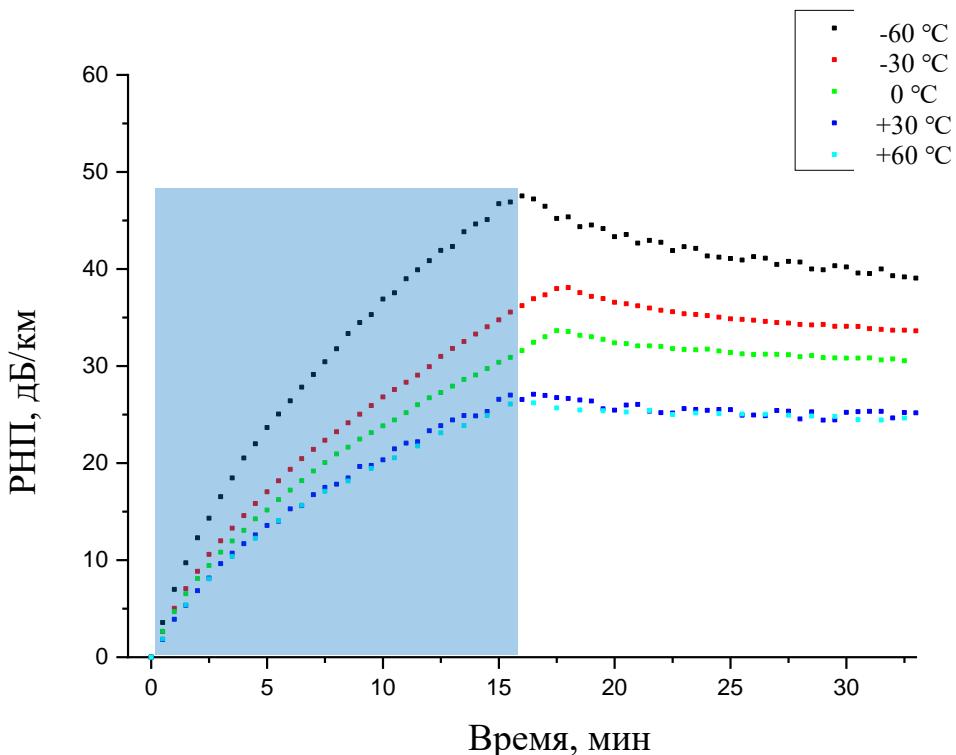


Рисунок 3.10 – Зависимость РНП ($\lambda=1550$ нм) образца $\text{GeO}_2\text{Панда}$ от времени (синий прямоугольник – длительность облучения) при различных температурах

При этом разброс в значениях РНП номинально одинаковых образцов при дозе 1 кГр при комнатной температуре составил от 21 дБ/км до 25 дБ/км, при минус 50 °С – от 32 дБ/км до 36 дБ/км и самый большой разброс наблюдался при плюс 60 °С – от 24 дБ/км до 33 дБ/км. Таким образом, оказалось, что РНП при минус 50 °С для одного образца меньше, чем РНП при плюс 60 °С для другого (Рисунок 3.6). Такое стало возможно из-за слабой зависимости РНП этих образцов от температуры, разброс РНП между образцами оказался примерно равен разнице РНП в температурном диапазоне.

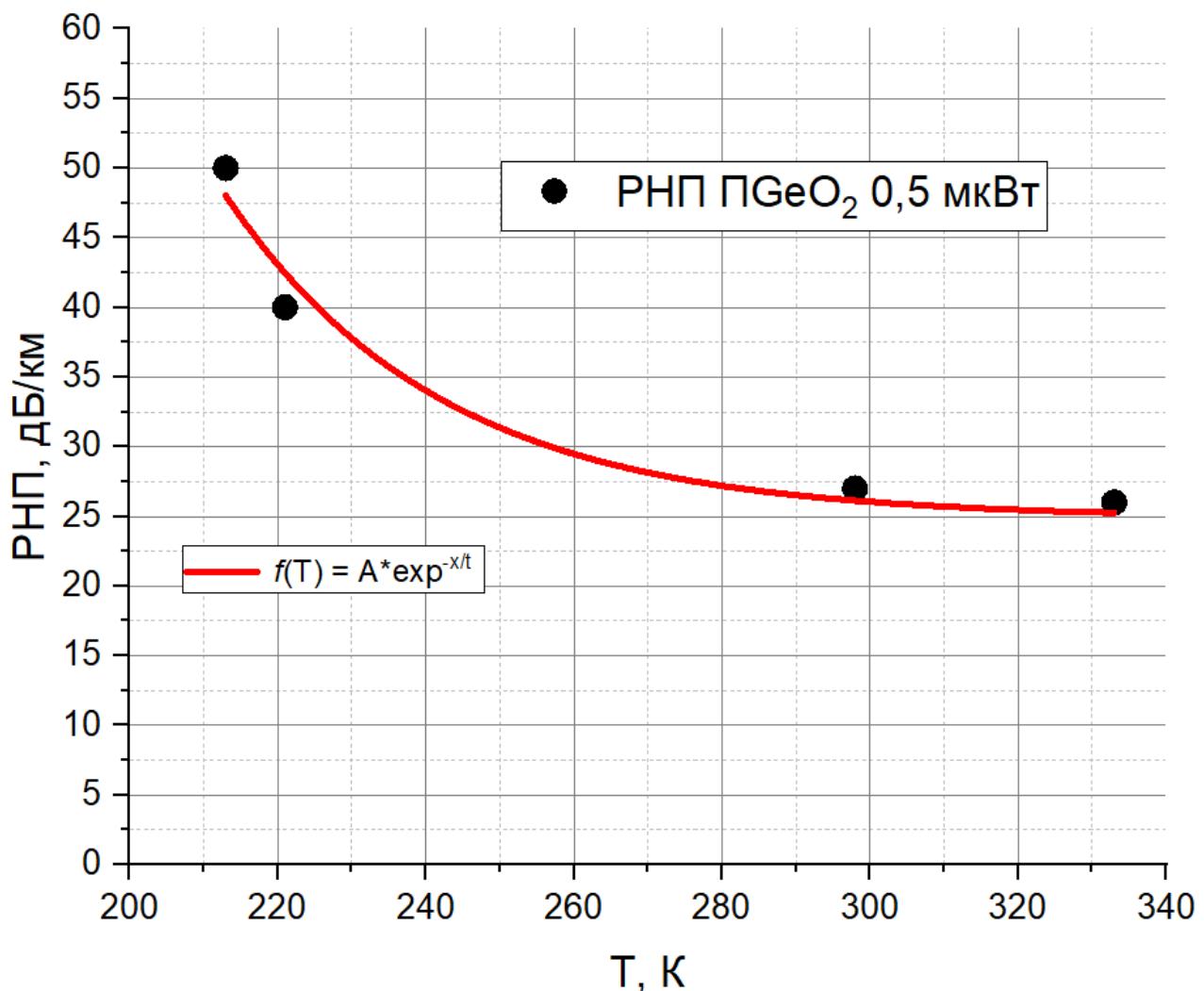


Рисунок 3.11 – Зависимость РНП от температуры во время облучения соседних участков образца GeO₂Панда длиной 200 м каждый, $P_0 = 0,5$ мкВт;
 • – эксперимент; (—) – экспоненциальная аппроксимация

Уровень РНП при температурах от минус 50 °С до минус 60 °С вполне согласуется с данными работы [227] (Рисунок 3.12), в которой исследовались РНП на длине волны 1310 нм одномодовых изотропных германосиликатных волокон при температуре минус 55 °С в зависимости от вводимой оптической мощности в диапазоне от 10 нВт до 100 мкВт. При этом следует учесть, что при примерно равных значениях диаметра сердцевины с образцами ПGeO₂, из-за наличия фтороборосиликатной оболочки, содержание GeO₂ может быть меньше, чем в ПGeO₂.

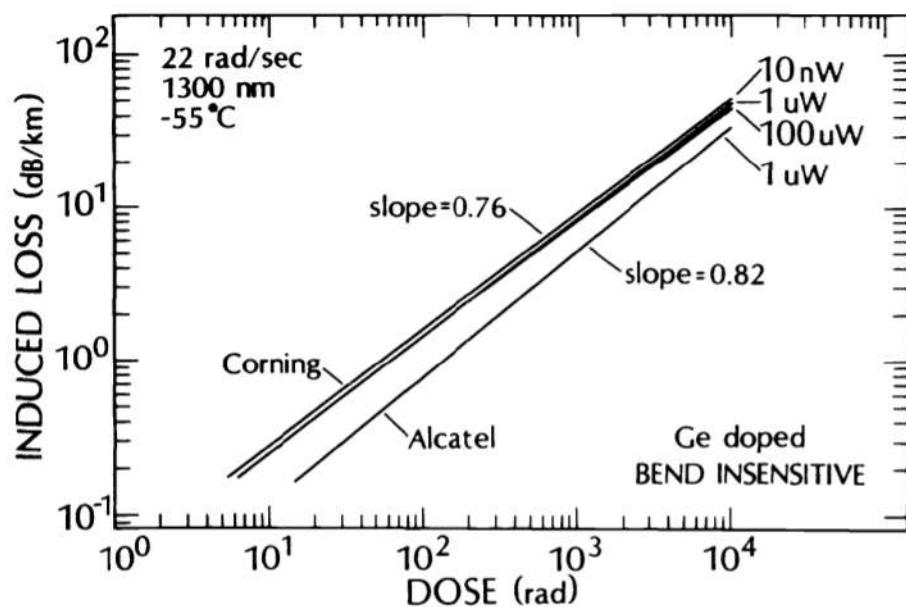


Fig. 3. Radiation-induced loss versus dose in two germanium doped, small mode-field diameter fibers.

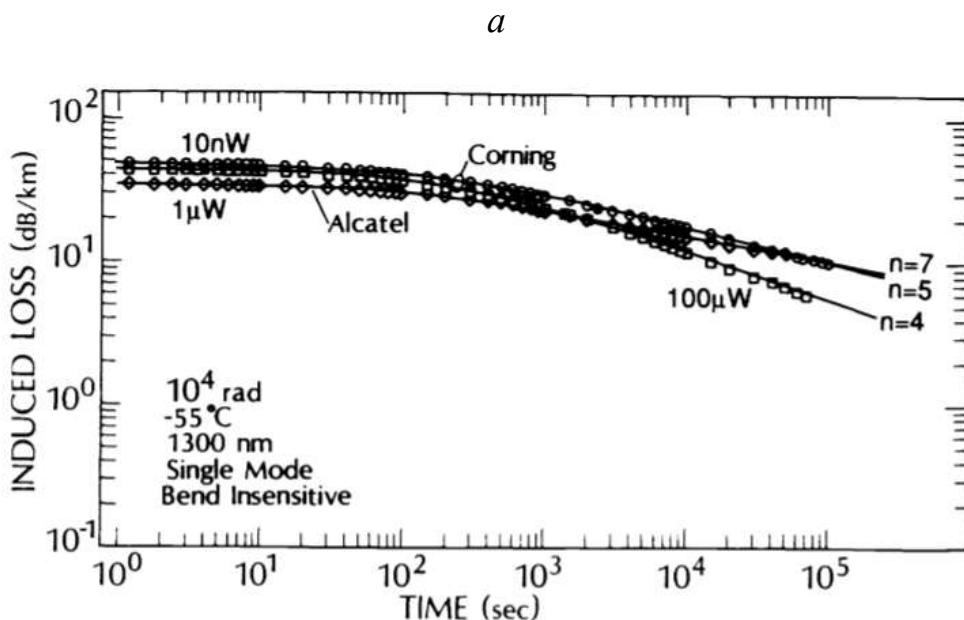


Fig. 6. Induced loss versus recovery time for the doped, single mode fibers shown in fig. 3.

б

Рисунок 3.12 – Зависимость РНП от дозы при различной вводимой мощности для германосиликатных одномодовых оптических волокон Corning, сердцевина $\text{SiO}_2:\text{Ge}$ 6,0 мкм, $\text{SiO}_2:\text{F},\text{B}$ -оболочка (а), зависимость релаксации РНП от времени при разной вводимой мощности (б) [227]

3.1.5. Коэффициент сохранения поляризации излучения во время облучения

Для проверки поведения коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ), а также влияния фотообесцвечивания, была проведена серия опытов по облучению образцов PGeO_2 , изготовленных в одних технологических режимах, причем регистрировалось прошедшее через образец линейно поляризованное излучение с помощью измерителя мощности и экстинометра. Во всех образцах линейно поляризованное излучение было направлено по «медленной» оси, проходящей по направлению через центры напрягающих стержней. Оптическая мощность вводимого излучения в образец была от 0,5 мВт до 2 мВт. Данные по условиям облучения и РНП, а также начальные данные по оптическим потерям, величине двулучепреломления для исследованных образцов приведены в Таблице 3.1 и на Рисунках 3.5, 3.6.

Ухудшения коэффициента сохранения поляризации излучения не наблюдалось, наоборот, показания экстинометра фиксировали слабое увеличение поляризационной экстинции (СПИ) (Рисунок 3.13). Этот эффект нельзя связать с недостаточной чувствительностью экстинометра для регистрации уровня оптической мощности в неосновной оси, поскольку динамического диапазона прибора было вполне достаточно. Поскольку СПИ пропорционален логарифму отношения оптических мощностей по двум перпендикулярным оптическим осям, то наиболее вероятной причиной его увеличения является эффект фотообесцвечивания. Во время облучения РНП в неосновной оптической оси нарастают быстрее, чем в основной, где оптический сигнал большей мощности способствует частичному отжигу РЦО. Это приводит к уменьшению оптической мощности в неосновной оси по сравнению с уровнем оптической мощности в основной и увеличению СПИ.

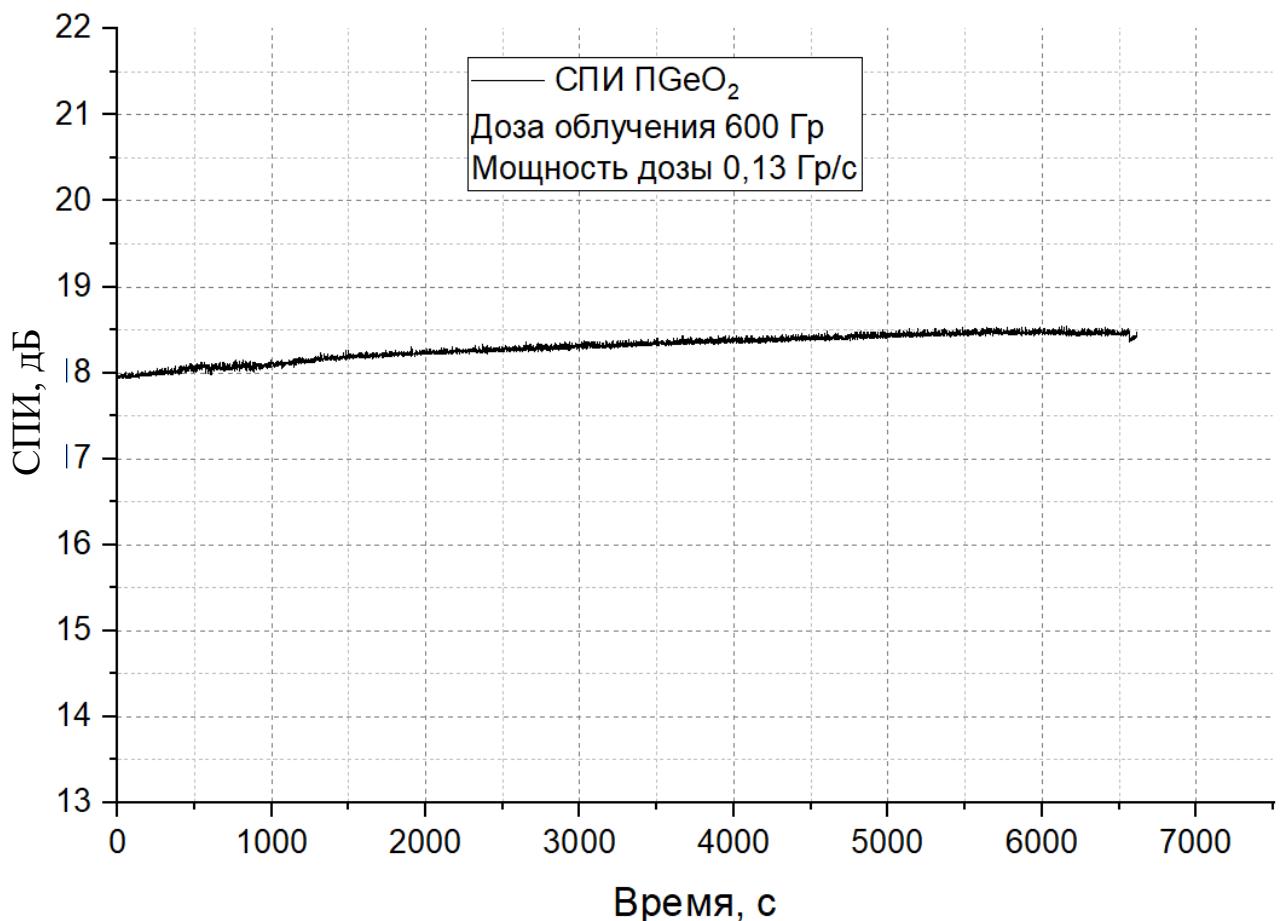


Рисунок 3.13 – СПИ ОВ «Панда» с германатной сердцевиной при воздействии ИИ

3.1.6. Возможность применения в космических миссиях

Для заключения о возможности применимости волокна в условиях космоса знания РНП при довольно высоких мощностях дозы недостаточно, поскольку космические мощности дозы на порядки величины меньше. Поэтому для оценки РНП волокна при космических мощностях дозы в литературе используется методика аппроксимации релаксации РНП на требуемый срок службы [45, 46, 150].

Для удовлетворительного результата аппроксимации необходима достаточно явная релаксация РНП на длине 1550 нм после облучения. При этом образцы ОВ ПGeO₂ показали более медленную релаксацию РНП (Рисунок 3.14) по сравнению с образцами изотропного ОВ из работы [227] (Рисунок 3.12), а

также образцами ОВ SMF28 Corning (Рисунок 3.4). Такое поведение связано со слабой релаксацией длинноволнового хвоста РНП (Рисунки 3.1, 3.2). Из всех образцов более выраженную релаксацию на начальном этапе показал образец №1 (Рисунки 3.14, 3.15), у которого наименьшее значение двулучепреломления. Возможно, напряжения структурной сетки стекла способствуют образованию РЦО в длинноволновой области, которые слабо релаксируют со временем.

Для образцов ОВ ПGeO₂ расчеты дают неутешительный результат, РНП в конце срока службы 15 лет в космосе будут более 16 дБ/км (Рисунок 3.14). С учетом невозможности уменьшения РНП за счет фотообесцвечивания и/или повышения температуры среды, использование ПGeO₂ в условиях космоса возможно только при наличии полной защиты от радиации, что делает это волокно неприменимым для использования в большинстве миссий.

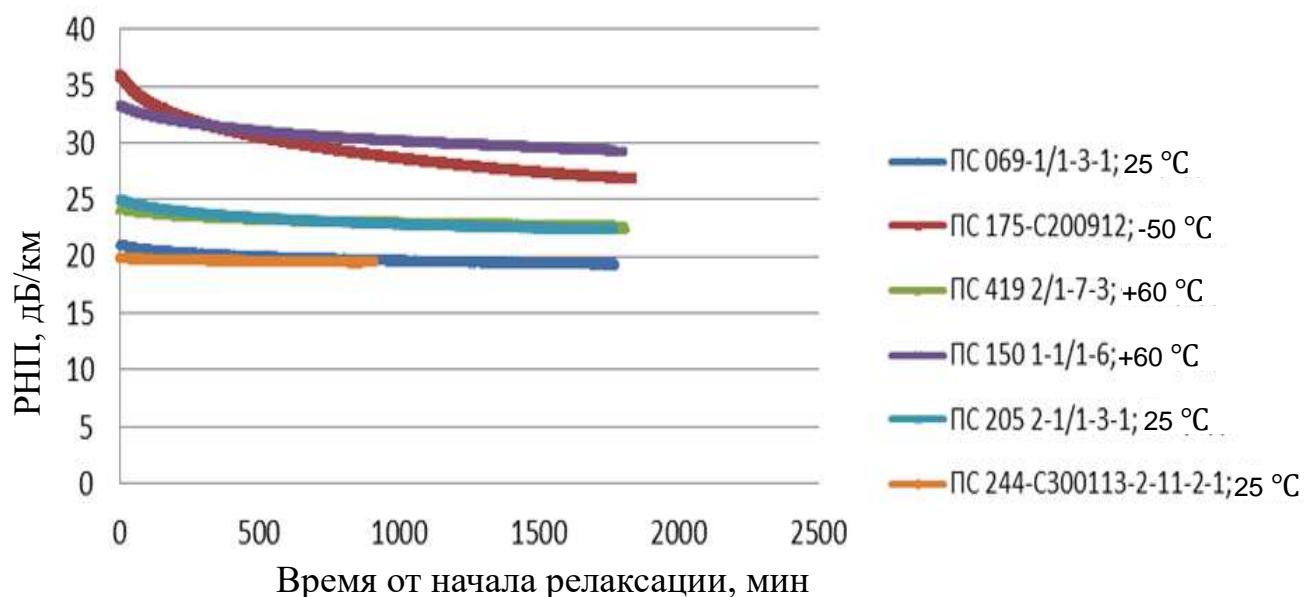


Рисунок 3.14 – Зависимость РНП от времени релаксации для разных образцов ОВ ПGeO₂ при различных температурах, вводимая оптическая мощность более 0,5 мВт, доза 600 Гр для образца №5, для остальных – 1 кГр

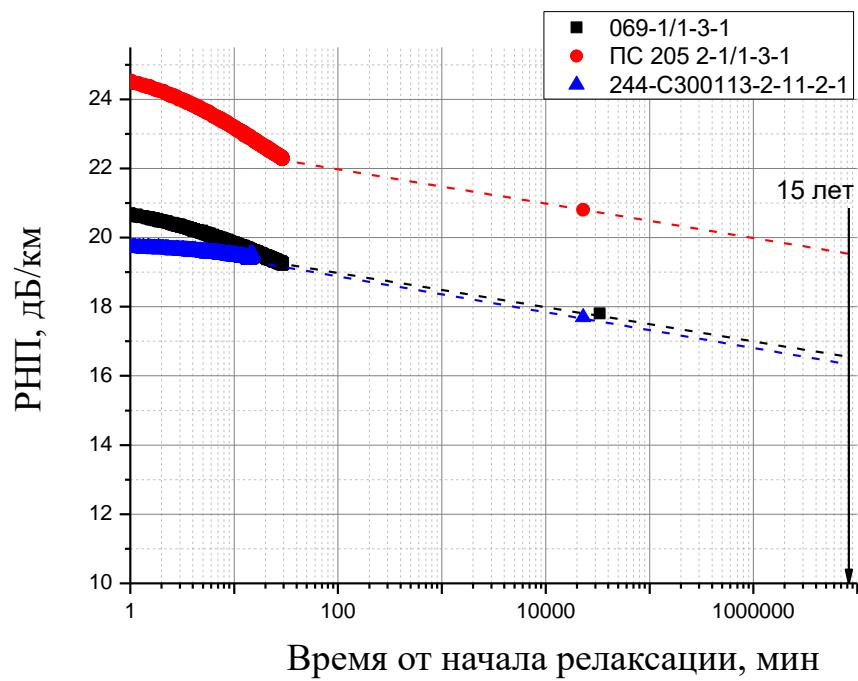


Рисунок 3.15 – Экспериментальные кривые релаксации после гамма-облучения до дозы 1 кГр разных образцов ОВ GeO_2 Панда при комнатной температуре (сплошные кривые); символы – измерение полных потерь на рефлектометре через 2 недели после облучения. Штриховые линии – экстраполяция РНП на момент времени 15 лет

3.2. Влияние непрерывного гамма-излучения на образцы ПSiO₂

Раздел 3.2 посвящен результатам исследования радиационно-стойких ОВ ПSiO₂ при воздействии непрерывного гамма-излучения.

3.2.1. Первый вариант технологии изготовления ОВ ПSiO₂.

При разработке технологии изготовления преформ с нелегированной кварцевой сердцевиной и фторированной оболочкой анализировались известные на тот момент работы специалистов центров ФИРЭ, ГОИ им. Вавилова, НЦВО РАН и других, где прослеживались технологические особенности изготовления преформ по отношению к повышению РОС. Проведенный анализ показал отсутствие явного пути повышения РОС, поскольку авторы, учитывая одни технологические факторы, не указывали влияние других, а также то, что каждый комплекс технологического оборудования изготовления преформ и вытяжки ОВ требует своей настройки технологических режимов из-за конструктивных особенностей оборудования. Поэтому технология изготовления ОВ ИSiO₂ учитывала рекомендации литературных источников, но ориентиром выступал уровень РНП на длине волны 1550 нм – не более 5 дБ/км при дозе 1 кГр при комнатной температуре.

РНП первых образцов ИSiO₂ показали выполнение этого требования. На Рисунке 3.16 приведено сравнение ИSiO₂ с оптимизированным по требованию минимальных РНП образцом №1510, изготовленным в ИХВВ РАН. Образец ИSiO₂ при большем уровне РНП все же не катастрофически проигрывает.

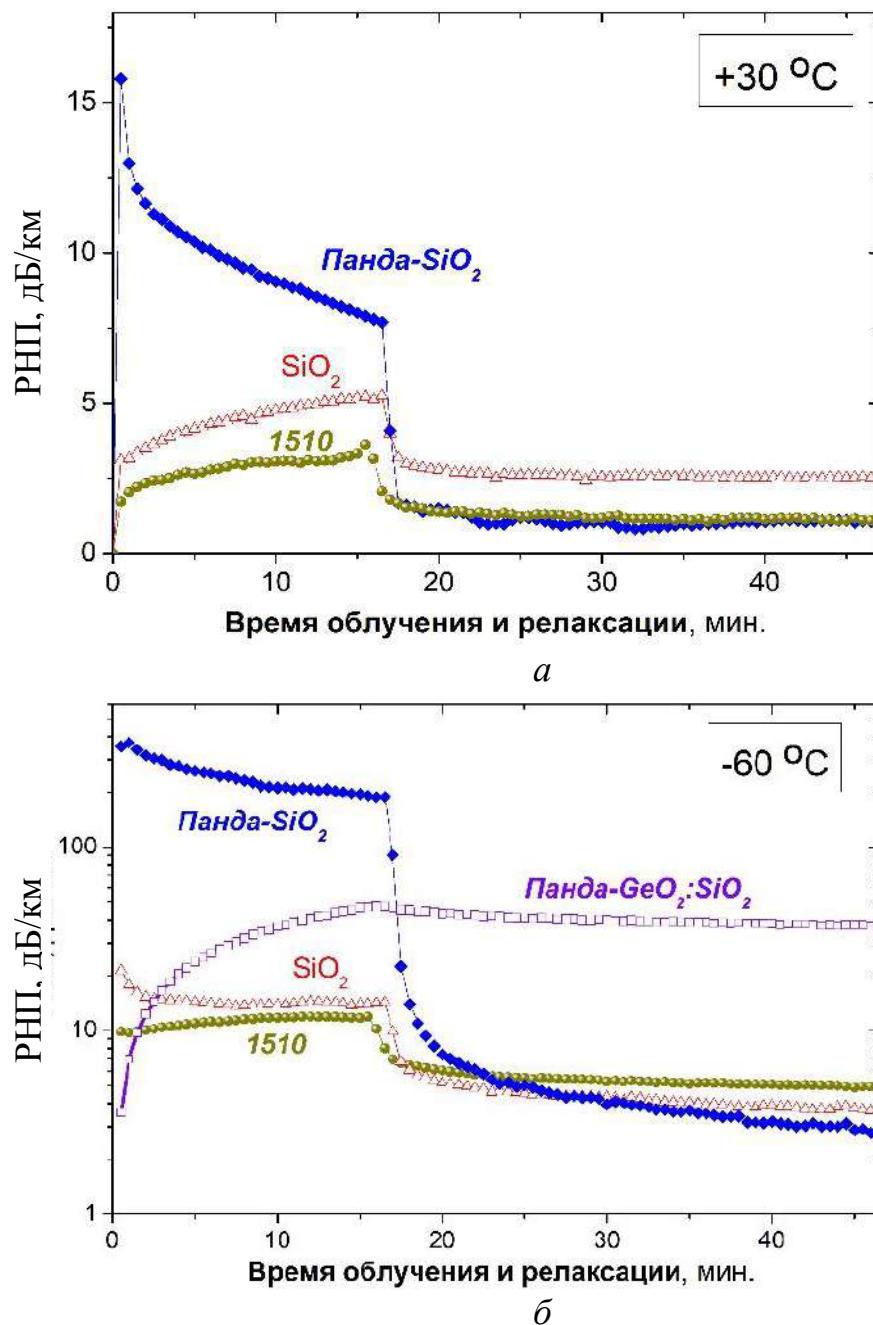


Рисунок 3.16 – РНП ОВ ($\lambda=1550$ нм) в процессе гамма-облучения при мощности дозы 1,0 Гр/с и 1,1 Гр/с до дозы 1,0 кГр в ходе последующей релаксации в течение ~ 30 мин, $P_0 = 0,5$ мкВт; \blacklozenge – PSiO_2 ; \blacktriangle – ISiO_2 , вытянутый из той же преформы; \bullet – изотропный одномодовый образец ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной №1510, изготовленный в ИХВВ РАН и НЦВО РАН; \square – PGeO_2 , температура $+30^{\circ}\text{C}$ (а) и минус 60°C (б)

ОВ ПSiO₂ изготовленные из этих преформ показали неожиданные результаты (Рисунки 3.16):

- очень высокие РНП при малой вводимой оптической мощности (до 15 дБ/км при комнатной температуре в начальные времена облучения и до 400 дБ/км при температуре минус 60 °C);
- очень быструю релаксацию при окончании облучения, лучше, чем у образца №1510;
- явную зависимость уровня РНП от величины двулучепреломления (Рисунок 3.18, *a*);
- крайне высокую чувствительность к фотообесцвечиванию – уровня входящей оптической мощности (P_0) несколько мВт оказалось достаточно, чтобы РНП ПSiO₂ стали на уровне ИSiO₂ (снижение РНП на 15 дБ/км и более).

Оценка возможности применения ПSiO₂

По той же методике [150], что и для образцов ПGeO₂, проведена оценка возможности применения в космических миссиях ПSiO₂. Для расчета приняты: поглощенная доза за всю миссию спутника – 1 кГр, продолжительность ~10-15 лет, минимальная рабочая температура – минус 60 °C. Аппроксимация релаксации РНП ПSiO₂ на срок службы 15 лет для данных, приведенных на Рисунке 3.16, показала РНП ~1 дБ/км при температуре +30 °C и ~3 дБ/км при температуре минус 60 °C в конце срока службы. Результат вполне достаточный для построения ВОГ навигационного класса точности с длиной ВК ~1 км.

Возможность применения ПSiO₂ в областях, где требуется стойкость к ИИ с мощностью дозы на уровне единиц Гр/с ограничивается требованием достаточного для фотообесцвечивания уровня входящей оптической мощности (не менее 0,5 мВт). Это ограничение возможности применения ПSiO₂ потребовало выяснения причин высоких РНП и доработки конструкции и технологии изготовления ОВ.

Спектр РНП $PSiO_2$

Исследование спектров РНП образцов ОВ PSiO_2 показало наличие в спектре полос поглощения в области 1305 нм и 1107 нм (0,95 эВ и 1,12 эВ, соответственно), далее для краткости «полоса 1 эВ», (Рисунок 3.17), величина которых определяла уровень РНП на длине волны 1550 нм.

В изотропных ОВ РЦО с полосой поглощения 1 эВ связывают с собственными автолокализованными дырками (АДС) или некоторым их промежуточным типом, которые возникают обычно в начальные времена облучения, а также при низких температурах, но в отдельных случаях и во всем процессе облучения могут вносить заметный вклад в РНП на длине волны 1550 нм [127].

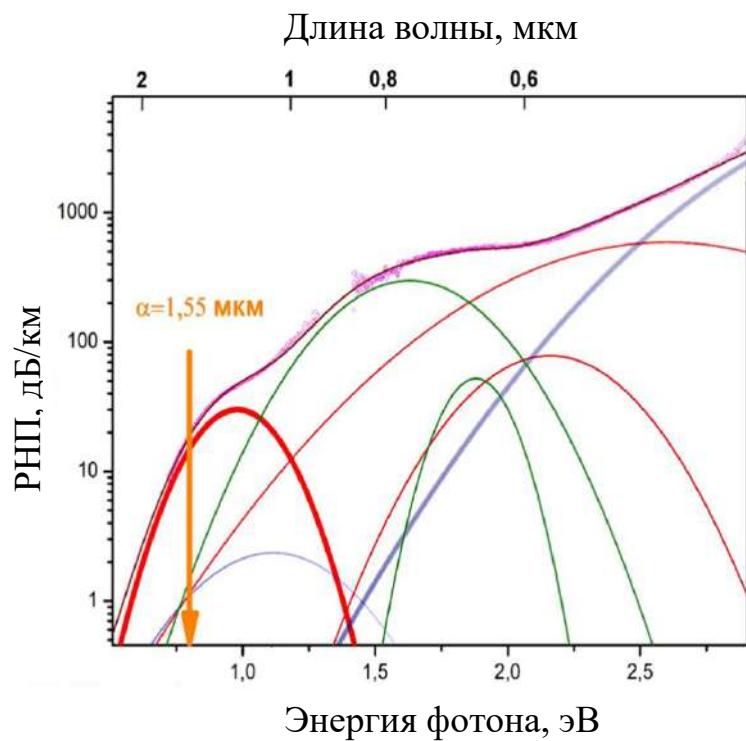


Рисунок 3.17 – Разложение спектра РНП образца ОВ ПSiO₂ (1-й вариант технологии) на составляющие АДС в диапазоне $\lambda=900\div1600$ нм в процессе облучения от источника ⁶⁰Со с мощностью дозы 1,1 Гр/с при дозе 27 Гр (30 с облучения) при комнатной температуре: красным – собственные центры (жирным полоса 0,95 эВ), зеленым – деформационные центры, синим – неизвестная малоинтенсивная полоса с центром 1,12 эВ, голубым – «хвост» УФ поглощения; $P_0=0,5$ мкВт

Возникло предположение, что именно наличие в спектре РНП PSiO_2 высокоинтенсивной полосы 1 эВ при комнатной температуре является причиной высокого уровня РНП и чувствительности как к уровню напряжений, так и фоточувствительности. Поэтому если модифицировать технологию и снизить интенсивность полосы поглощения с энергией 1 эВ, то получится существенно улучшить показатели РОС ОВ PSiO_2 .

3.2.2. Технологические возможности влияния на образование РЦО 1 эВ в ОВ PSiO_2

Варьирование конструктивных особенностей и технологических режимов изготовления ОВ PSiO_2 показало, что на интенсивность полосы поглощения в области 1 эВ влияют не столько конструкционные особенности ОВ, сколько технологические факторы его изготовления, связанные с избытком или недостатком кислорода в структурной сетке стекла.

Использование результатов работы [121] позволило доработать технологию изготовления ОВ. Создание кислороднодефицитной среды при осаждении фторсиликатной оболочки и сердцевины ОВ, подбор режимов вытяжки, изменение конструкции ОВ с целью снижения напряжений в сердцевине ОВ привели к существенному уменьшению интенсивности полос поглощения в области 1 эВ.

На графиках 4 и 4" (Рисунок 3.18, *а*) и 3 и 3" (Рисунок 3.18, *б*) приведены РНП ОВ PSiO_2 и ОВ ISiO_2 , соответственно, изготовленных с использованием доработанного варианта технологии. Это привело к снижению РНП для ОВ ISiO_2 и еще более значительному снижению РНП для ОВ PSiO_2 .

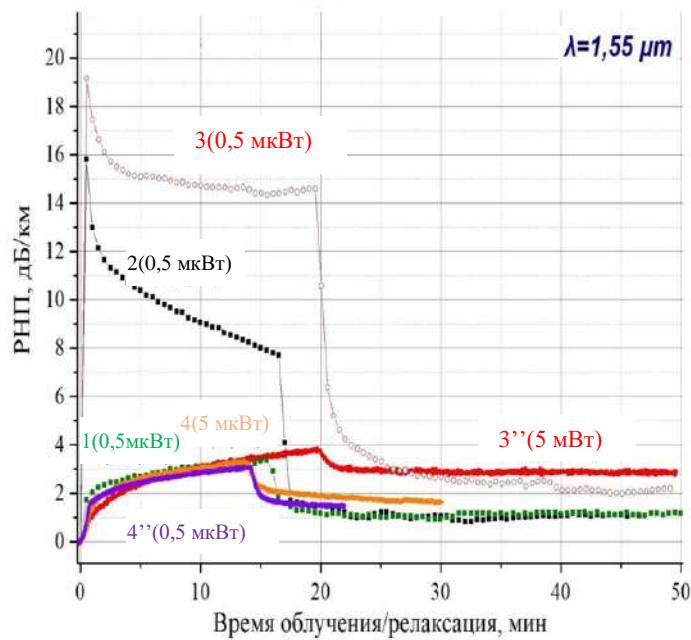
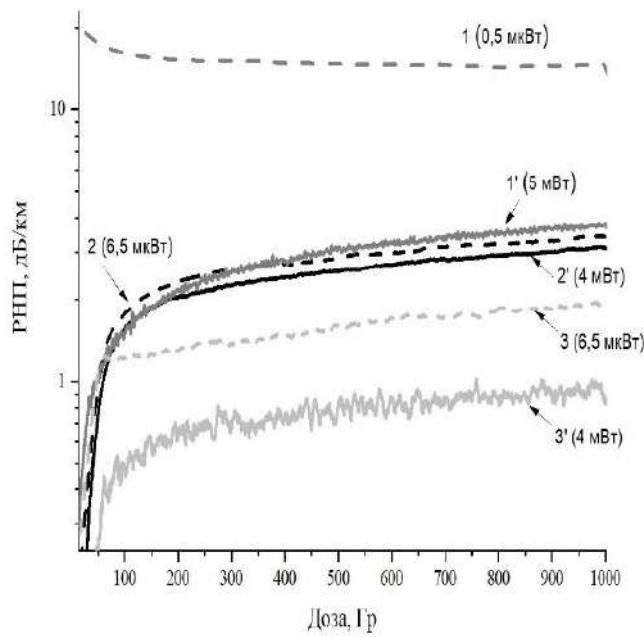
*a**b*

Рисунок 3.18 – Зависимости РНП ($\lambda=1550$ нм) от времени (а) и от дозы (б) в процессе облучения с мощностью дозы 0,9-1,3 Гр/с до дозы 1 кГр от источника ^{60}Co и релаксации при комнатной температуре: 1 – изотропное ОВ ISiO_2 (доработанная технология); 2 – ОВ PSiO_2 (состав стекла как для 1); 3 и 3" – ОВ PSiO_2 (состав стекла как для 1); 4 и 4" – ОВ PSiO_2 (доработанная технология); двулучепреломление: 2 – $5,9 \cdot 10^{-4}$; 3, 3" – $6,3 \cdot 10^{-4}$; 4, 4" – $6,4 \cdot 10^{-4}$; P_0 , мкВт: 1 – 4 – 0,5; 3", 4" – 5

РНП ОВ PSiO_2 в спектральном диапазоне приведены на Рисунках 3.19, 3.20. Малые РНП из-за полосы поглощения с энергией 1 эВ на фоне существенно больших РНП от других типов РЦО не позволили встроить эту полосу в модель составляющих спектра. На Рисунке 3.19 РПН на длине волны 1550 нм определяются «хвостами» полос поглощения, которые обусловлены деформационными центрами окраски (АДС2) и собственными центрами окраски (АДС1) с максимумами энергии поглощения 1,63 эВ и 2,60 эВ, соответственно. Наличие полосы с энергией 1 эВ заметно по небольшой разнице между расчетом и экспериментом.

Для более четкой фиксации РЦО в области спектра от 900 нм до 1600 нм эксперимент провели, используя источник излучения белого света без фильтра, отсекающего коротковолновую область. Это позволило обесцветить РЦО коротковолновой области и четко выявить полосы поглощения с энергией 1 эВ (Рисунок 3.20). За первые 30 с облучения РНП формируются в коротковолновой области, спектроанализатор фиксирует их «хвост» (черная кривая, Рисунок 3.20), в отличие от РНП ОВ, изготовленного по первому варианту технологии (Рисунок 3.17), где РНП в области 1 эВ составили уже 15 дБ/км при 30 с облучения. При этом образование РЦО с полосой поглощения 1 эВ также происходит и эти образовавшиеся РЦО вносят вклад в РНП в течение всего времени облучения, но их концентрация существенно меньше по сравнению с концентрацией РЦО, образующихся в ОВ, полученному по первому варианту технологии.

Подавление образования РЦО, связанных с полосой поглощения с энергией 1 эВ, привело к существенному снижению чувствительности как к фотообесцвечиванию, так и к величине напряжений структурной сетки стекла, внесенных напрягающими элементами и намоткой гироскопического контура. Разница частотного сдвига Бриллюэна между ОВ ISiO_2 и ОВ PSiO_2 составляет $\Delta f_b = 0,45$ ГГц. С учетом экспериментально определенного коэффициента пропорциональности по изменению Δf_b при растяжении ОВ $C_e = 47,5$ ГГц разница относительной продольной деформации составляет $\Delta \varepsilon_{zz} \approx 0,6 \times 10^{-3}$. В

ОВ, полученном по первому варианту технологии это приводило к разнице РНП на длине волны 1550 нм у ОВ SiO_2 и ОВ PSiO_2 более 10 дБ/км (Рисунок 3.16) при дозе 1 кГр при комнатной температуре и величине $P_0 = 0,5$ мкВт. В волокне, полученном по доработанному варианту технологии разница РНП при тех же условиях составила не более 2 дБ/км (Рисунок 3.18, б).

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 (между графиками 4 и 4" на Рисунке 3.18 минимальная разница). При этом чем больше величина P_0 , тем меньше скорость релаксации РНП ОВ после облучения.

Еще одной особенностью оказалась более замедленная релаксация РНП образцов ОВ, изготовленных по доработанному варианту технологии (кривые 3 и 4 на Рисунке 3.18).

На основе сравнения результатов исследования образов обоих вариантов технологии изготовления впервые показано, что в PSiO_2 (также и в ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной) концентрация РЦО с полосами поглощения в области 1 эВ определяет:

- величину РНП на длине волны 1550 нм в процессе облучения,
- зависимость РНП от уровня входящей оптической мощности (P_0), температуры, уровня напряженно-деформированного состояния сетки стекла,
- скорость восстановления характеристик после облучения.

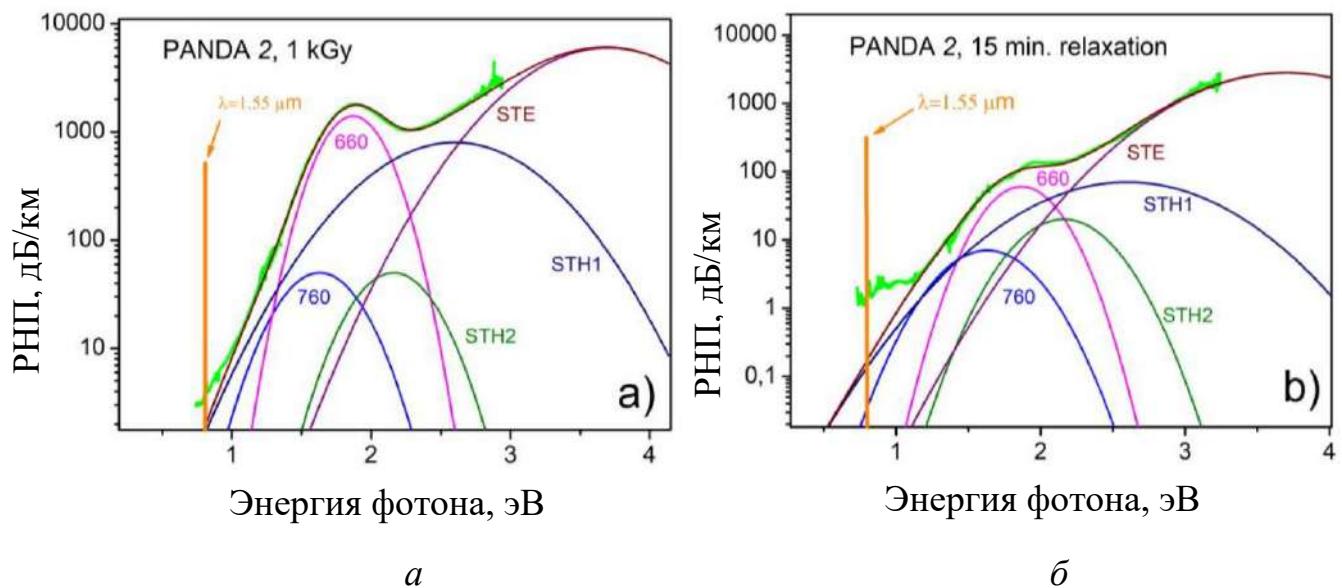


Рисунок 3.19 – Спектр РНП ОВ PSiO_2 , измеренный в процессе гамма-облучения при дозе 1 кГр и мощности дозы 1 Гр/с непосредственно перед прекращением облучения (а), через 15 мин после окончания облучения (б) и его деконволюция на гауссовые составляющие [A1]

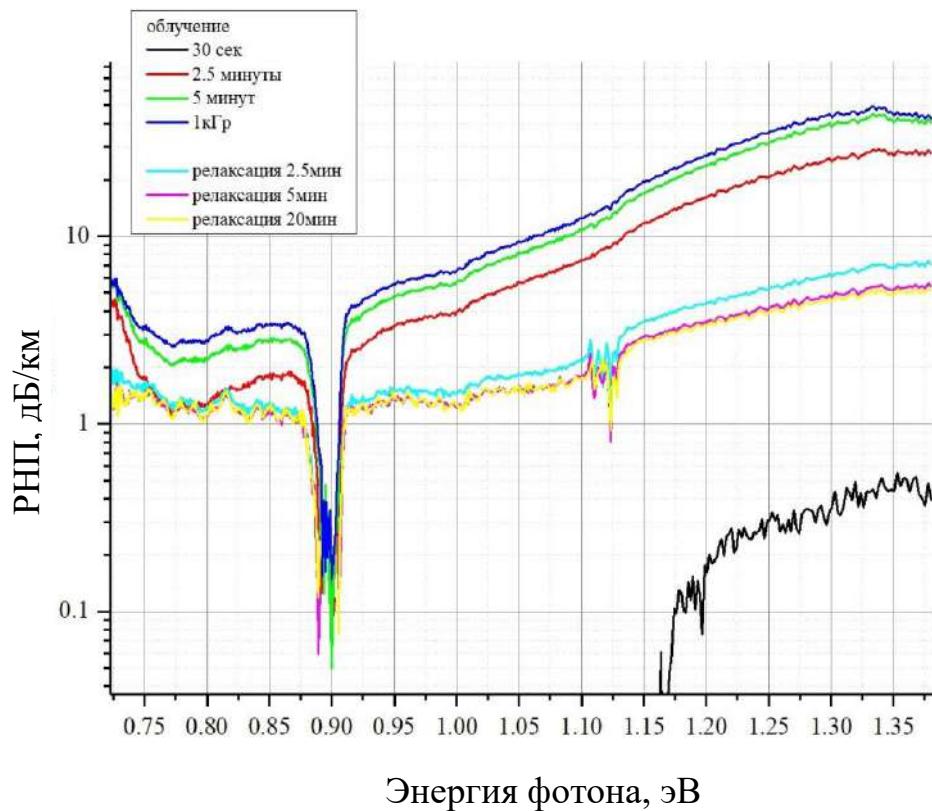


Рисунок 3.20 – РНП ОВ PSiO_2 в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм в процессе облучения с мощностью дозы 1 Гр/с до дозы 1 кГр от источника ^{60}Co и их релаксация при комнатной температуре

3.2.3. Чувствительность к фотообесцвечиванию ОВ PSiO_2

Для образцов ОВ PSiO_2 , полученных по первому варианту технологии, ярко выражено влияние на величину РНП величины входящей оптической мощности (кривые 3 и 3", Рисунок 3.18, а). Входящей в образец оптической мощности $P_0 = 5$ мВт оказалось достаточно, чтобы подавить полосу поглощения с энергией 1 эВ и получить значения РНП как у изотропного ОВ.

Получение ОВ с использованием доработанного варианта технологии снижает интенсивность его полосы поглощения с энергией 1 Эв, но также и снижает чувствительность ОВ к фотообесцвечиванию. Однако возможность снижения РНП путем повышения входной оптической мощности ($\lambda=1550$ нм) сохраняется.

Для выяснения возможностей снижения РНП этим способом провели исследование зависимости РНП образцов ОВ PSiO_2 и ОВ ISiO_2 от уровня P_0 .

При комнатной температуре гамма-излучением от источника ${}^{60}\text{Co}$ с мощностью дозы 1,3 Гр/с провели облучение до дозы 1 кГр образцов из соседних участков вытяжек ОВ PSiO_2 и ОВ ISiO_2 , изготовленных по доработанной технологии. Образцы в свободной намотке были собраны в одну сборку для исключения влияния условий опыта. Мощность P_0 от образца к образцу варьировалась от единиц микроватт до единиц милливатт.

Оптимизация технологии изготовления привела к неожиданному эффекту – к слабой зависимости РНП ОВ PSiO_2 от входной оптической мощности (Рисунки 3.21, 3.22). Эта зависимость была более слабой по сравнению с зависимостью для изотропных ОВ того же химического состава (Рисунок 3.21, б). При этом для обоих типов ОВ зависимость РНП от величины P_0 была пропорциональна $\exp(-AP_0)$ (Рисунок 3.22).

Для ОВ ISiO_2 РНП зависят от величины входящей оптической мощности как в процессе облучения, так и при последующей релаксации (Рисунок 3.21, б). Увеличение P_0 с 6,5 мкВт до 4,4 мВт привело к снижению РНП при дозе 1 кГр на 0,8 дБ/км (с 1,9 дБ/км до 1,1 дБ/км). Интересно отметить, что скорость релаксации РНП в первые минуты после облучения, соответствующая

релаксации короткоживущих центров окраски, оказалась обратно пропорциональна входной оптической мощности. При этом скорость релаксации долгоживущих центров окраски была прямо пропорциональна входной оптической мощности. Через 30 мин. после окончания облучения РНП составили от 0,6 дБ/км для входной оптической мощности 6,5 мкВт до 0 дБ/км для 4,4 мВт, соответственно.

Для образцов ОВ PSiO_2 РНП в процессе облучения, а особенно при релаксации несколько больше, чем для ОВ ISiO_2 , но вид зависимости РНП от дозы аналогичен. Увеличение входной оптической мощности с 3,8 мкВт до 4,3 мВт привело к снижению РНП менее чем на 0,5 дБ/км и практически не повлияло на скорость релаксации РНП после облучения.

Сравнивая чувствительность к фотообесцвечиванию (фотобличинг) изотропного ОВ и ОВ «Панда», полученных из преформ с одинаковой технологией изготовления, можно предположить, что при снижении возможности образования РЦО, соответствующих полосе поглощения с энергией 1 эВ, наличие напряжений в структурной сетке стекла способствует стабилизации РЦО ($\lambda=1550$ нм) и затруднению их релаксации после облучения.

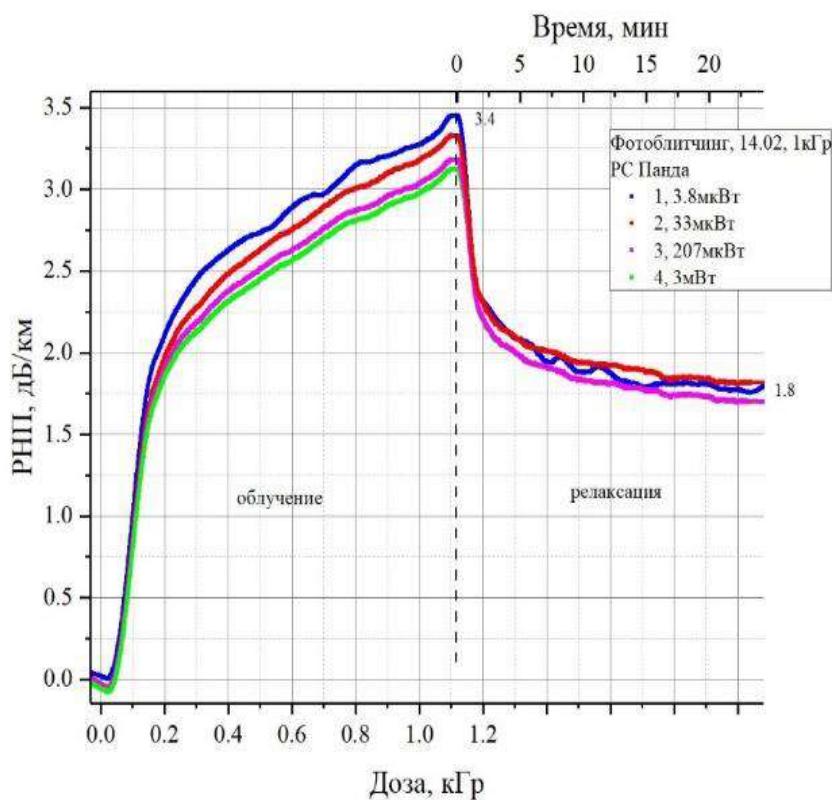
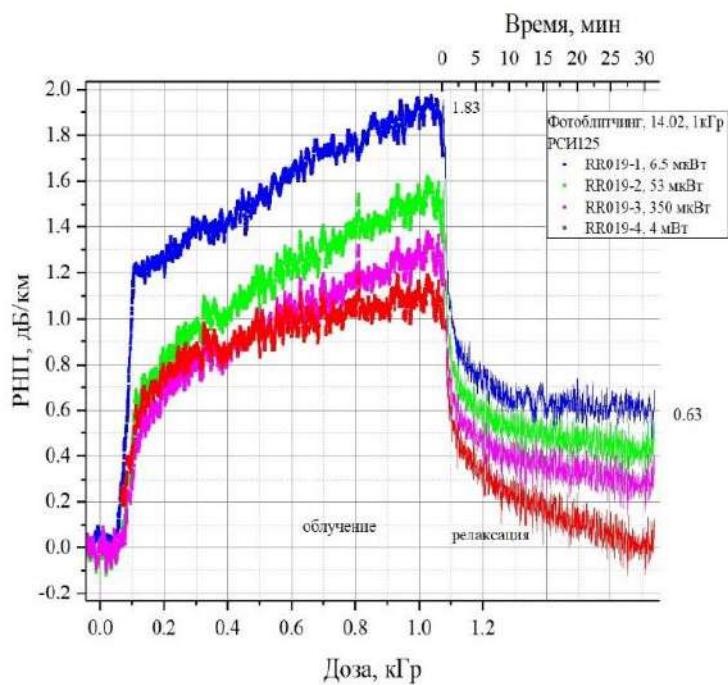
*a**б*

Рисунок 3.21 – Зависимость РНП от дозы и времени релаксации после облучения при различных значениях входной оптической мощности для ОВ PSiO_2 (*а*) с величиной двулучепреломления $6,0 \cdot 10^{-4}$ (образцы – последовательные участки световода одной вытяжки) и для образцов ОВ ISiO_2 того же химического состава (*б*)

Повторное облучение образцов при меньшей входной световой мощности выявило наличие эффекта предоблучения (снижение РНП при повторном облучении) для образцов ОВ PSiO_2 , в отличие от ОВ ISiO_2 (Рисунок 3.22). Наличие и отсутствие эффекта предоблучения хорошо заметно для оптической мощности в несколько микроватт. РНП ОВ PSiO_2 при повторном облучении снизились на 0,3 дБ/км для дозы 300 Гр и на 0,6 дБ/км для дозы 1000 Гр, а РНП изотропного световода, наоборот увеличились на 1,0 дБ/км для 300 Гр и на 0,6 дБ/км для 1000 Гр. При этом при первичном облучении на обоих образцах была наибольшая входящая оптическая мощность – 4,3 мВт и 4,4 мВт, соответственно. Возможно, эффект предоблучения связан с распадом РЦО полосы поглощения с энергией 1 эВ, которых из-за напряжений в сердцевине волокна в PSiO_2 существенно больше, чем в ISiO_2 .

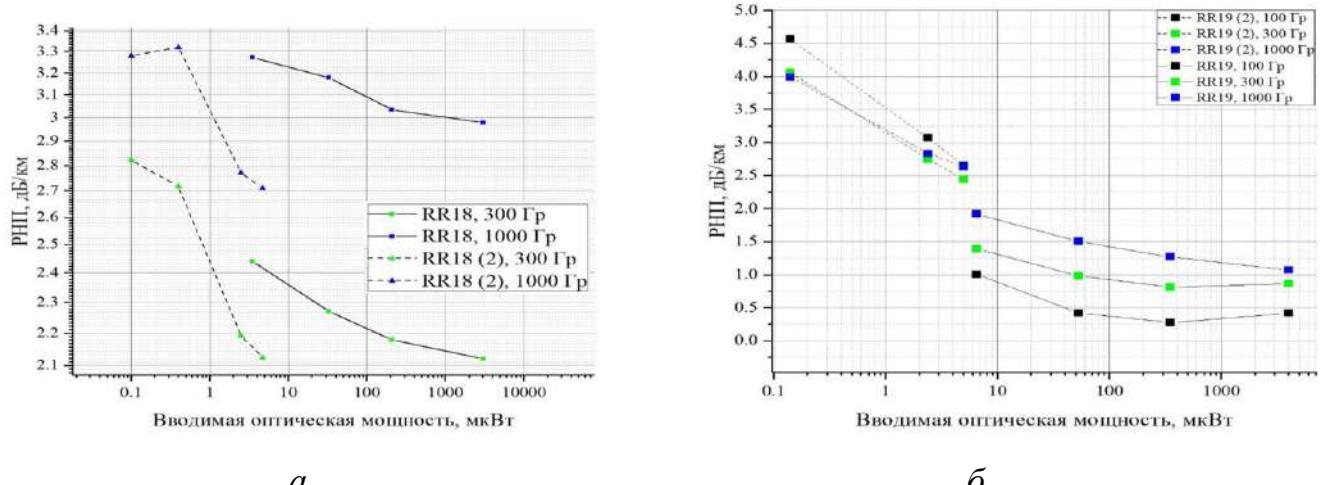


Рисунок 3.22 – Зависимость РНП от P_0 при различных дозах облучения: *a* – PSiO_2 (величина двулучепреломления $6,0 \cdot 10^{-4}$), доза, Гр: \blacktriangle – 300, \blacktriangle – 1000; *б* – ISiO_2 (тот же химический состав), доза, Гр: \blacksquare – 100, \blacksquare – 300, \blacktriangle – 1000; сплошная линия – 1-е облучение, пунктирная линия – 2-е облучение; мощность дозы 1,3 Гр/с, все образцы – последовательные участки световодов одной вытяжки

Наибольший интерес представляет возможность снижения РНП при повышении уровня P_0 при отрицательных температурах.

Опыты с облучением образцов PSiO_2 и ISiO_2 при пониженной температуре показали, что фотообесцвечивание полосы поглощения в области 1 эВ позволяет при величине входной оптической мощности более 1 мВт существенно снизить зависимость РНП от температуры в опыте. Например, при температуре минус 60 °С уровня $P_0 = 2,9$ мВт оказалось достаточно, чтобы РНП образца ISiO_2 стали меньше, чем РНП при комнатной температуре с уровнем $P_0 = 0,1$ мкВт (Рисунок 3.23).

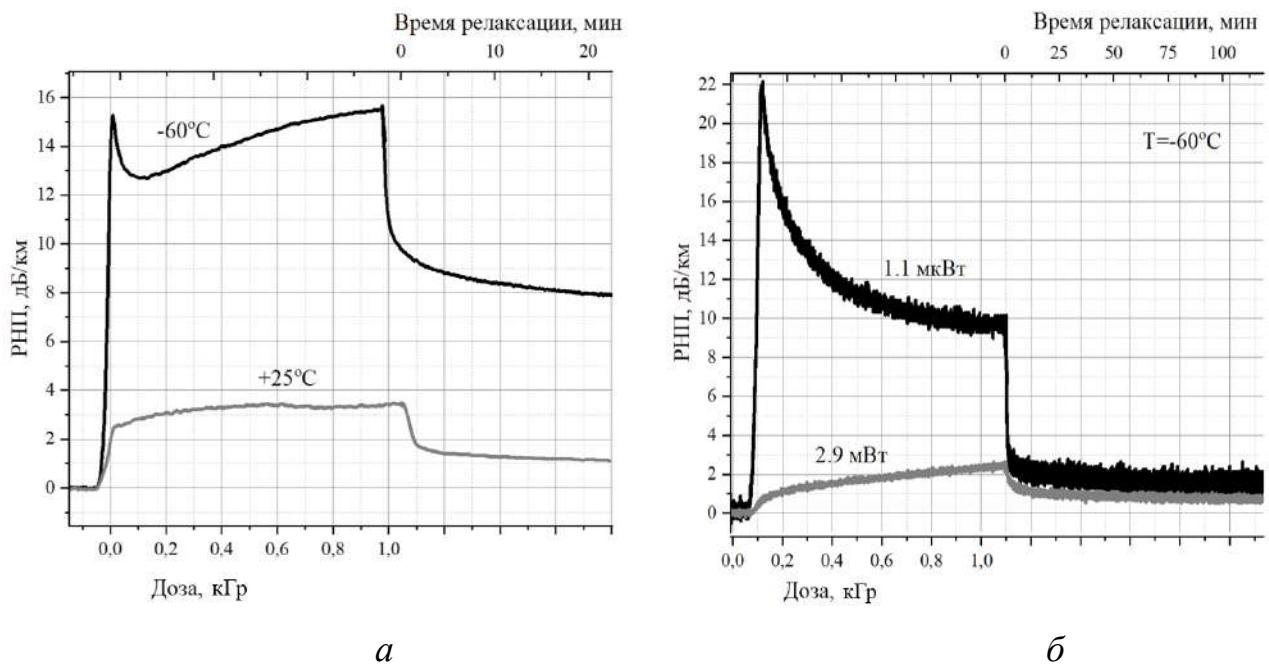


Рисунок 3.23 – Зависимость РНП ISiO_2 от поглощенной дозы ИИ

(максимальная доза 1,10 кГр, мощность дозы 1,40 Гр/с): *a* – $P_0=0,1$ мкВт при температурах минус 60 °С и 25 °С; *б* – при P_0 , мкВт: 1 - 1,1; 2-2,9; температура минус 60 °С

3.2.4. Зависимость РНП PSiO_2 от мощности дозы

Целью доработки конструкции и технологии изготовления PSiO_2 являлась необходимость получения при средних мощностях дозы достаточно низкого уровня РНП (не выше 5 дБ/км для дозы 1 кГр при комнатной температуре, чтобы в ВОГ была возможность использовать ВК длиной ~1 км) при уровне P_0 менее 1 мВт.

Для определения зависимости РНП PSiO_2 от мощности дозы проведены исследования на образцах PSiO_2 в свободной намотке, которые являлись соседними участками одной вытяжки (для исключения разницы РНП из-за случайных отклонений технологии) с вариацией значений P_0 и мощности дозы при комнатной температуре.

В первой серии опытов облучения проводились на источнике ${}^{60}\text{Co}$ на установке ГУТ-200М (НИЦ «Курчатовский институт»). Мощность дозы варьировалась от 3,5 Гр/с до 0,005 Гр/с (от 350 рад/с до 0,5 рад/с, далее в этом пункте для удобства будет использоваться мощность дозы в рад/с). Результаты приведены на Рисунке 3.24.

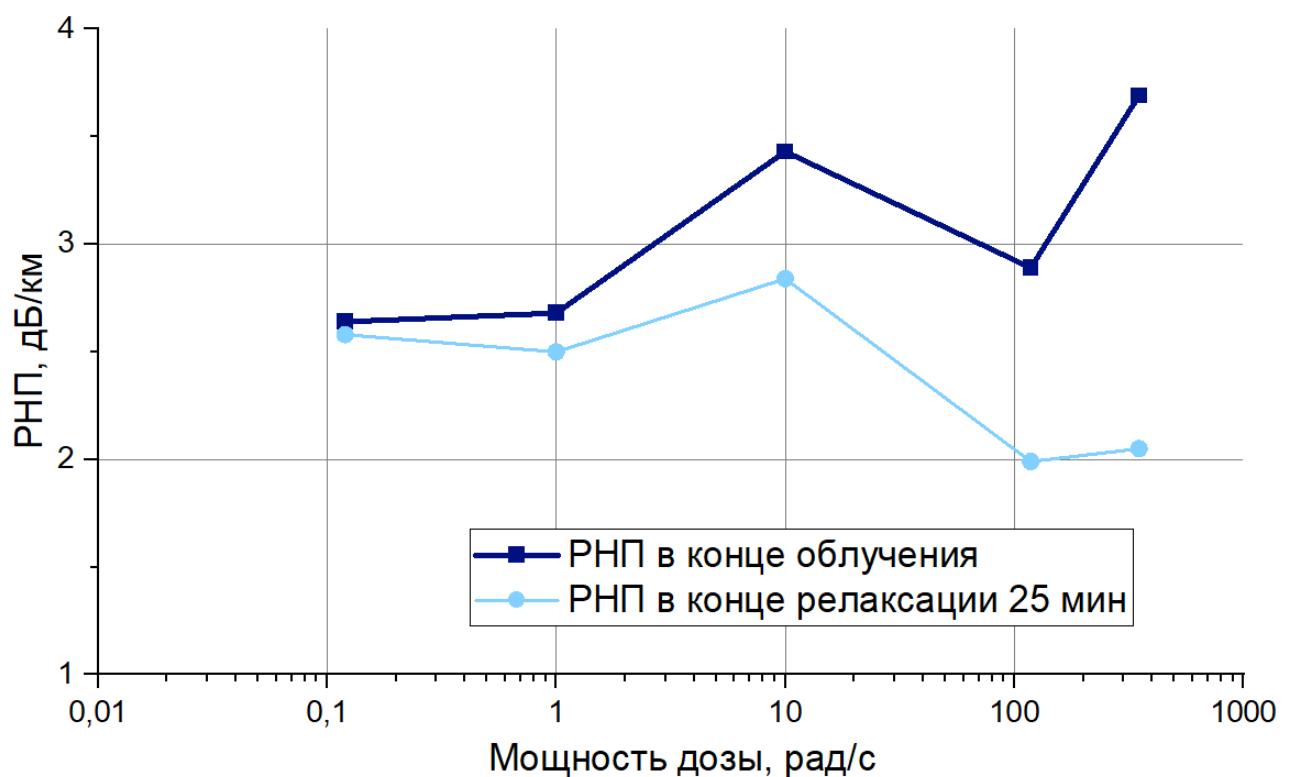


Рисунок 3.24 – Зависимость РНП PSiO_2 ($\lambda=1550$ нм) в конце облучения (доза 1,2 кГр) и через 25 мин релаксации при комнатной температуре, $P_0=2$ мВт

Вполне закономерно, что РНП PSiO_2 растут с увеличением мощности дозы. При этом выявились особенность – немонотонный характер зависимости РНП. Поскольку повтор опытов с другой выборкой образцов показал схожие результаты, то немонотонное изменение РНП связано именно со свойствами

стекла ОВ, а не с особенностями проведения эксперимента. Возможно, вид зависимости характеризует разную динамику роста РНП, обусловленную различными РЦО в зависимости от мощности дозы.

Отдельно необходимо отметить замедление релаксации РНП с уменьшением мощности дозы, при мощности дозы 0,5 рад/с релаксация наиболее затруднена. Если принять в качестве консервативной оценки, что с уменьшением мощности дозы РНП не будут уменьшаться, то результат 2,6 дБ/км при дозе 1 кГр вполне достаточен и может быть компенсирован увеличением входной оптической мощности источника излучения.

Применение к этим результатам расчетной методики по аппроксимации релаксации РНП дало разброс значений от 0,2 дБ/км до 3,0 дБ/км, в зависимости от мощности дозы облучения (Рисунок 3.25). Такой разброс значений РНП поставил вопрос о корректности применения данной расчетной методики к PSiO_2 .

Примерно равные РНП для мощности дозы 1 рад/с и 0,5 рад/с выявили необходимость в проведении дополнительной серии опытов при вариации мощности дозы в области значений долей рад/с для более корректной оценки РНП в космических миссиях, поскольку для космических применений ОВ необходимо убедиться в отсутствии нежелательных эффектов, вызванных малой мощностью дозы.

Вторая серия опытов проводилась на установке гамма-излучения в АО «НИИП» (г. Лыткарино). Данная установка позволила корректно моделировать воздействие гамма-излучения с малой мощностью дозы – 0,13 рад/с и 0,011 рад/с. Опыты проведены при пониженном уровне входной оптической мощности – 5 мкВт, для возможности фиксации нестационарных РЦО в начальные моменты облучения. Сравнение результатов этих опытов и РНП при мощности дозы 1 рад/с приведено на Рисунке 3.26.

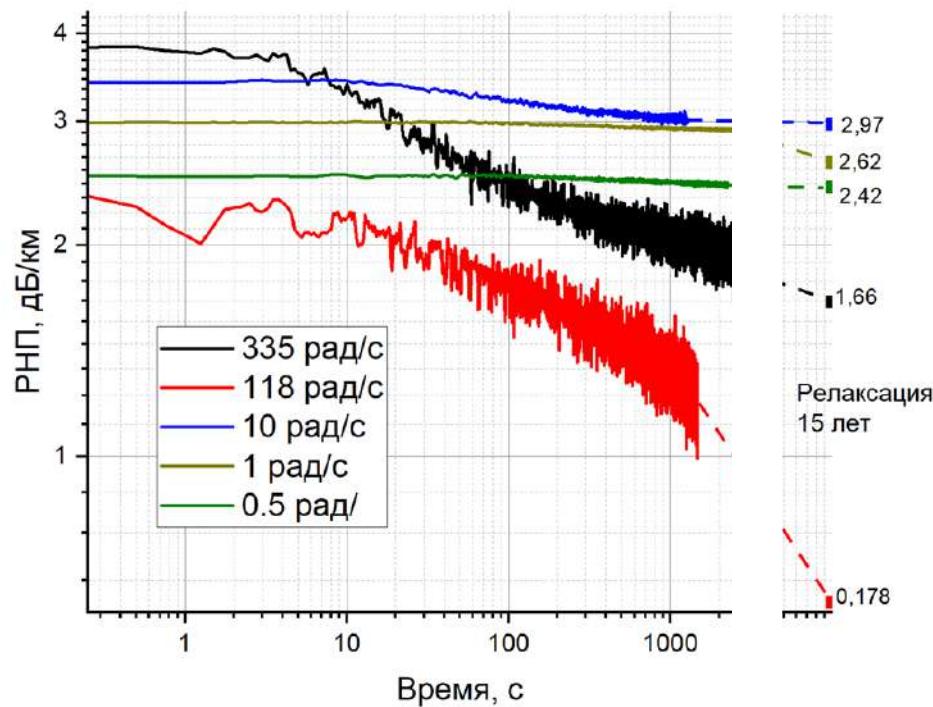


Рисунок 3.25 – Релаксация РНП после облучения до дозы 1,20 кГр при различных мощностях дозы и аппроксимация релаксации РНП на 15 лет, $P_0=2$ мВт

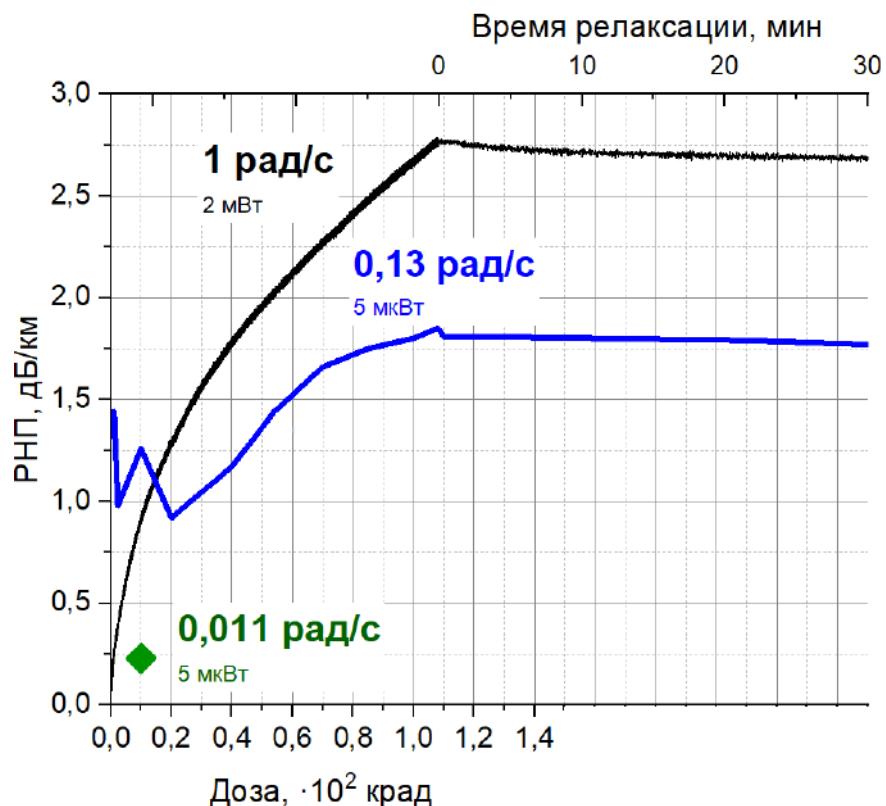


Рисунок 3.26 – Зависимость РНП PSiO₂ ($\lambda=1550$ нм) от поглощенной дозы (максимальная доза 110 крад) при различных мощностях дозы и значениях P_0 ; $+25$ °C

Ожидания отсутствия возникновения нестационарных РЦО в начальные моменты облучения при малой мощности дозы в PSiO_2 оправдались только для мощности дозы 0,011 рад/с (точнее их возникновение не привело к ощутимому росту РНП). На кривой РНП для мощности дозы 1 рад/с короткоживущие центры обесцвечены благодаря оптической мощности 2 мВт.

Снижение уровня РНП оказалось также не столь значительным: уменьшение мощности дозы с 1,1 Гр/с до $1,3 \cdot 10^{-3}$ Гр/с привело к снижению РНП с 3,5 дБ/км до 1,8 дБ/км при поглощенной дозе 1 кГр. К сожалению, для получения данных РНП для дозы 1 кГр при мощности дозы 0,011 рад/с не хватило времени опыта, поэтому предсказать результат точно не представляется возможным. Поэтому проверку при мощности дозы ~ 1 Гр/с можно считать достоверной оценкой сверху.

Таким образом, для исследуемых волокон можно ожидать РНП при дозе 1 кГр не более 1,8 дБ/км для мощности дозы менее 0,13 рад/с при комнатной температуре. С учетом возможности фотообесцвечивания РНП при отрицательных температурах это позволяет использовать чувствительный элемент ВОГ с длиной волоконного контура до ~ 2 км и построить систему навигационного класса точности.

3.2.5. Сравнение характеристик ОВ PSiO_2 с ОВ других производителей

Разработанная конструкция [A16] и технология изготовления ОВ PSiO_2 позволила обеспечить высокие значения двулучепреломления до $7,3 \cdot 10^{-4}$, а также технологичность изготовления ОВ. В ПАО «ПНППК» освоен серийный выпуск ОВ PSiO_2 , а также ISiO_2 (обоим типам ОВ присвоен статус серийной продукции). Достигнутые значения характеристик ОВ PSiO_2 (Таблица 3.2): коэффициент затухания на длине волны 1550 нм – 0,8 дБ/км при величине двулучепреломления $6,5 \cdot 10^{-4}$ и значении числовой апертуры 0,16, при этом РНП не более 3,5 дБ/км при комнатной температуре на длине волны 1550 нм при дозе 1 кГр, мощности дозы 1 Гр/с и вводимой мощности $P_0 = 5$ мкВт. Технологический разброс РНП от партии к партии при этих условиях не более

1 дБ/км (Рисунок 3.27). Далее, если не оговорено особо, все результаты приведены для ОВ, изготовленных по доработанному варианту технологии.

Аналогичные ОВ американской фирмы «Nufern», с сердцевиной, легированной малыми добавками фтора (модель волокна PM1550G-80), существенно уступают по РНП ОВ ПСиО₂ [228].

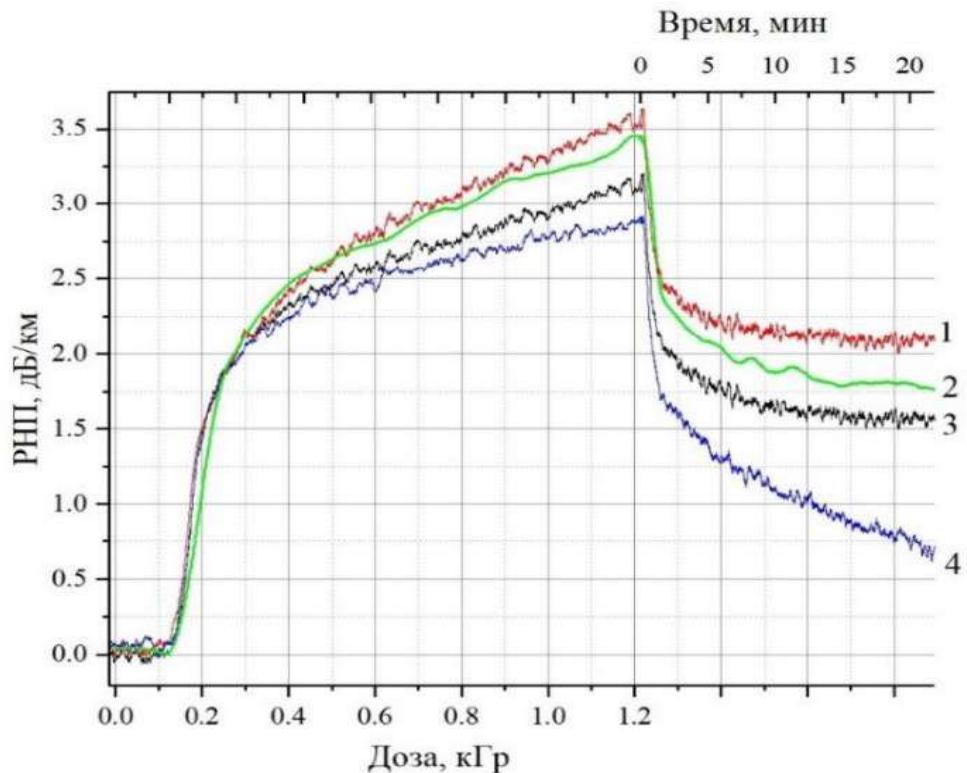


Рисунок 3.27 – Зависимость РНП ($\lambda=1550$ нм) от поглощенной дозы (максимальная доза 1,2 кГр), мощность дозы 1,31 Гр/с, $P_0 = 5$ мкВт: кривые 1 – 4 ОВ разных партий ПСиО₂; комнатная температура

Разработанные ОВ ПСиО₂ существенно выигрывают у мировых аналогов [173 - 178] как по РОС, так и по оптическим потерям, поляризационной устойчивости, что обеспечивает более высокие точностные характеристики ВОГ. Сравнение параметров ПСиО₂ и ОВ «панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной компании OFS приведено в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение параметров ОВ «панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной производства ПАО «ПНППК» и компании OFS

Параметр ОВ	ПНППК PSiO_2 [221, с. 20]	OFS GyroSil 1550 Rad-Hard [173, 176]
Диаметр модового поля ($\lambda=1550$ нм), мкм	$8,6 \pm 0,6$	$8,9 \pm 0,5$
Рабочая длина волны, нм	1550	1550
Двулучепреломление ($\lambda=1550$ нм), не менее	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент затухания ($\lambda=1550$ нм), дБ/км, не более	1,0	1,0
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	80 ± 2	80 ± 1
Диаметр защитно-упрочняющего покрытия, мкм	166 ± 3	145 ± 7
h-параметр, 10^{-5} , м^{-1} , не более	0,5	-
Перемотка с относительным удлинением, %	0,6	1,0
Диапазон рабочих температур, °C	От минус 60 до плюс 85	Не указано
РНП, дБ/км, не более ($P_0 = 5$ мВт, доза радиационного излучения 100 крад, $+25$ °C)	3,5-2,7	3,0*
*Примечание: не известна величина входящей оптической мощности		

Сравнение PSiO_2 с альтернативными решениями изготовления преформы

Для сопоставления возможности разработанной технологии с альтернативными решениями проведены сравнительные испытания образцов PSiO_2 производства ПНППК с образцами ОВ «Панда» с сердцевиной, легированной азотом (ПН), предоставленными ФИРЭ и ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова. Эти образцы отличались существенно меньшим значением двулучепреломления (не более $4 \cdot 10^{-4}$) по сравнению с ОВ PSiO_2 , где величина двулучепреломления составила от $6,2 \cdot 10^{-4}$ до $6,7 \cdot 10^{-4}$ в зависимости от образца.

Образцы ПН показали существенно более высокие РНП при непрерывном облучении – 38 дБ/км, против 5 дБ/км у образцов PSiO_2 производства ПАО «ПНППК» при поглощенной дозе 79,2 кГр и мощности дозы 1,27 Гр/с [A1] (Рисунок 3.28). Хотя образцы ПН продемонстрировали более быструю релаксацию после окончания облучения, что позволяет ожидать малые значения РНП в условиях сверхмалой мощности дозы космического пространства, но высокие значения РНП в условиях, например, работы по ликвидации последствий радиационной аварии не позволяют использовать такое ОВ.

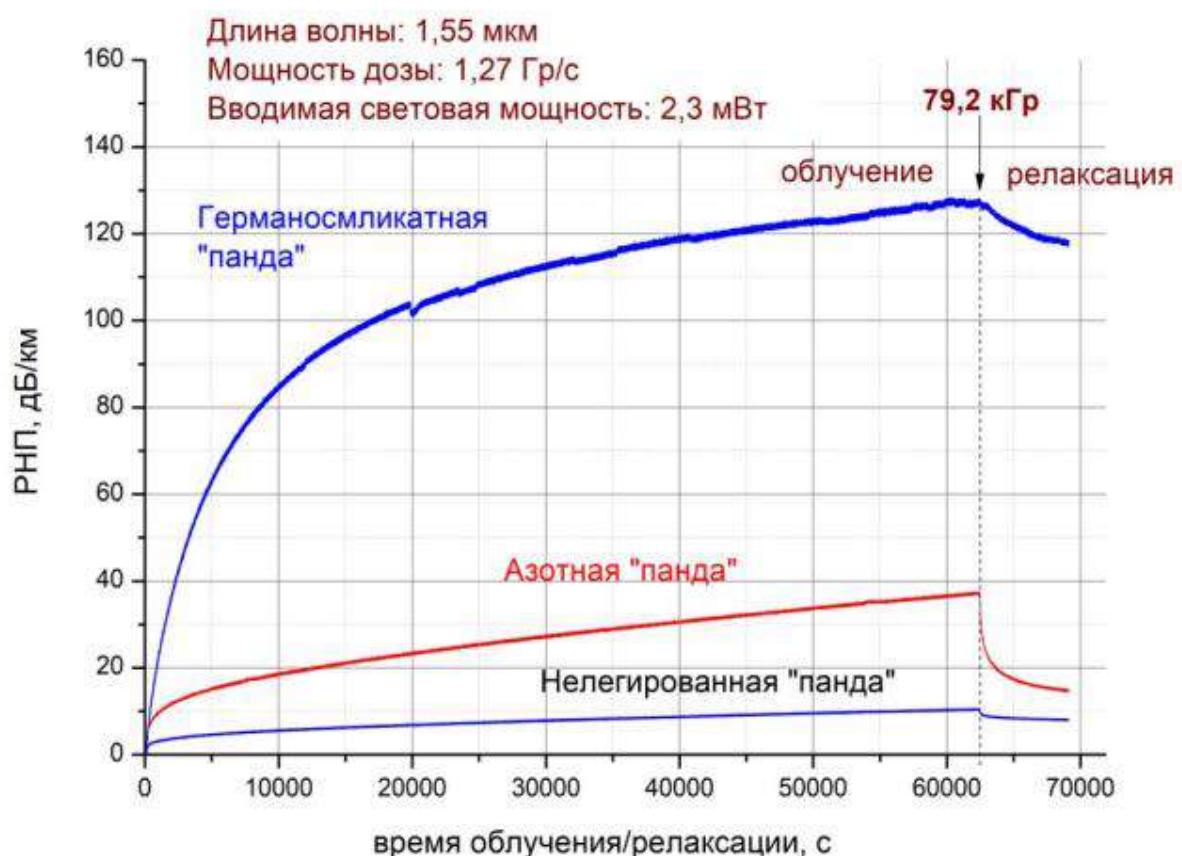


Рисунок 3.28 – Сравнение РНП ($\lambda=1550$ нм) образцов PSiO_2 (тонкая синяя линия), PGeO_2 (синяя линия), ПН (красная линия) в процессе облучения и релаксации; мощность дозы 1,27 Гр/с, максимальная доза 79,2 кГр, источник ^{60}Co , $P_0=2,3$ мВт, комнатная температура [A28]

Для описания процесса релаксации применена аппроксимация с использованием модели кинетики n -порядка (2.14).

Экстраполяция РНП на длине волны 1550 нм на срок службы 15 лет для дозы 1 кГр по модели кинетики n -порядка показала сопоставимые значения: для образцов ПН – 0,32 дБ/км, а для образцов PSiO_2 – разброс от 0,20 дБ/км до 0,67 дБ/км (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Коэффициенты экстраполяции образцов ПН и PSiO_2

Тип образца	A_0 , дБ/км	A_f , дБ/км	n	τ , с	A (15 лет), дБ/км	Коэффициент детерминации R^2
ПН	8,94	0,34	3,5	157	0,32	0,999
PSiO_2	2,97	0,57	6,6	377	0,67	0,991

На Рисунках 3.19, 3.29 приведены спектры РНП, в Таблице 3.4 – типы РЦО, формирующие спектр РНП образцов PSiO_2 и ПН во время облучения и релаксации. РПН на длине волны 1550 нм образцов ПН во время облучения определяются собственными АДС2 с полосой поглощения с энергией 1,63 эВ и деформационными АДС1 с полосой поглощения с энергией 2,60 эВ. В спектре РНП образцов PSiO_2 следует отметить намного более низкие РНП, обусловленные РЦО с энергиями 1,36 эВ и 2,6 эВ. РНП на длине волны 1550 нм определяются, в основном, РЦО полосой поглощения с энергией 1 эВ. При разложении спектра РНП на составляющие эта полоса не принималась в расчет, поэтому различие экспериментальных и расчетных данных связано с наличием этих РЦО (Рисунки 3.19, *a* и 3.20). Сравнение спектров РНП во время релаксации выявило, что разница в скорости релаксации РНП на длине волны 1550 нм образцов PSiO_2 и ПН определяется разницей релаксации РЦО с полосой поглощения с энергией 2,6 эВ, соответствующей собственным АДС1 (STH1), а для PSiO_2 также релаксацией РЦО с полосой поглощения 1 эВ. В образцах PSiO_2 релаксация этих РЦО затруднена. Более быстрая релаксация образцов ПН, возможно, связана с существенно меньшим значением двулучепреломления, а значит и уровнем напряжений в структурной сетке стекла.

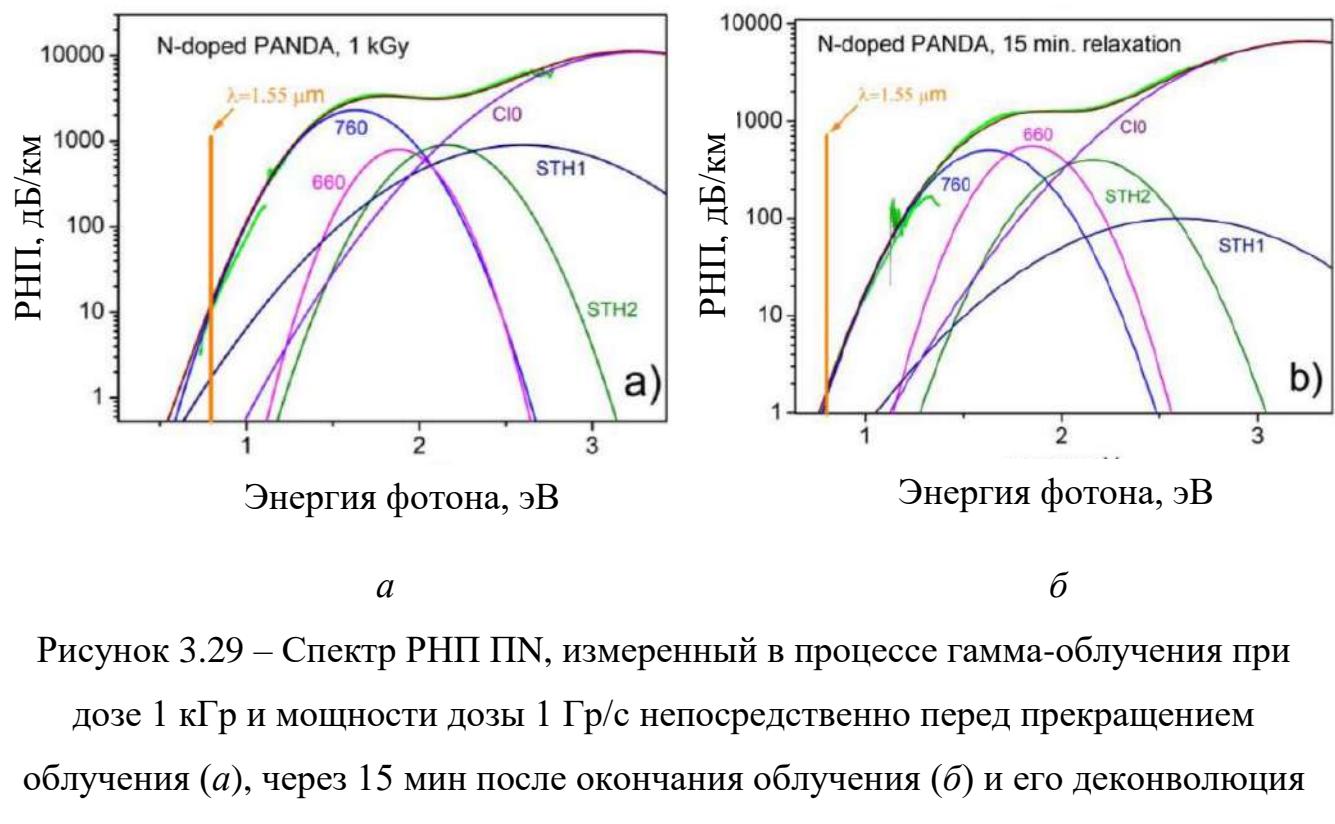


Рисунок 3.29 – Спектр РНП ПН, измеренный в процессе гамма-облучения при дозе 1 кГр и мощности дозы 1 Гр/с непосредственно перед прекращением облучения (а), через 15 мин после окончания облучения (б) и его деконволюция на гауссовые составляющие [А1]

Таблица 3.4 – РЦО в спектрах РНП образцов PSiO_2 и ПН [А1]

РЦО	Цвет на Рисунке 3.19, 3.29	Максимум, эВ	Ширина на полувысоте, эВ
Деформационные АДС1 (STH1)	розовый	1,88	0,47
Деформационные АДС2 (STH2)	синий	1,63	0,60
Собственные АДС1 (STH1)	темно-синий	2,60	1,20
Собственные АДС2 (STH2)	оливковый	2,16	0,60
Cl^0	фиолетовый	3,26	1,20
Самозахваченные электроны (STE)	пурпурный	3,70	1,25

Сравнение РНП при импульсном воздействии показало меньшие максимальные РНП у образцов ПН, однако снижение РНП до требуемого уровня у образцов PSiO_2 происходит быстрее (Рисунок 3.30) [А1, А2]. Это обеспечивает преимущество ОВ PSiO_2 по сравнению с ОВ ПН благодаря меньшему времени неработоспособности ВОГ после импульсного воздействия ИИ (подробнее в главе 4).

Разброс в скорости релаксации РНП образцов PSiO_2 , изготовленных по одной технологии, следует отнести к неконтролируемым случайным отклонениям режимов на всех операциях изготовления волокна. При этом наблюдения выявили, способность к релаксации РНП после облучения при непрерывном и импульсном воздействии в ОВ проявляется одинаково. Если после облучения при непрерывном воздействии ИИ релаксация РНП затруднена, то и после воздействия импульсным ИИ, релаксация также будет медленной. Таким образом, по результатам технологических проверок по воздействию непрерывного ИИ возможно дать прогноз по восстановлению ОВ после воздействия импульсного ИИ.

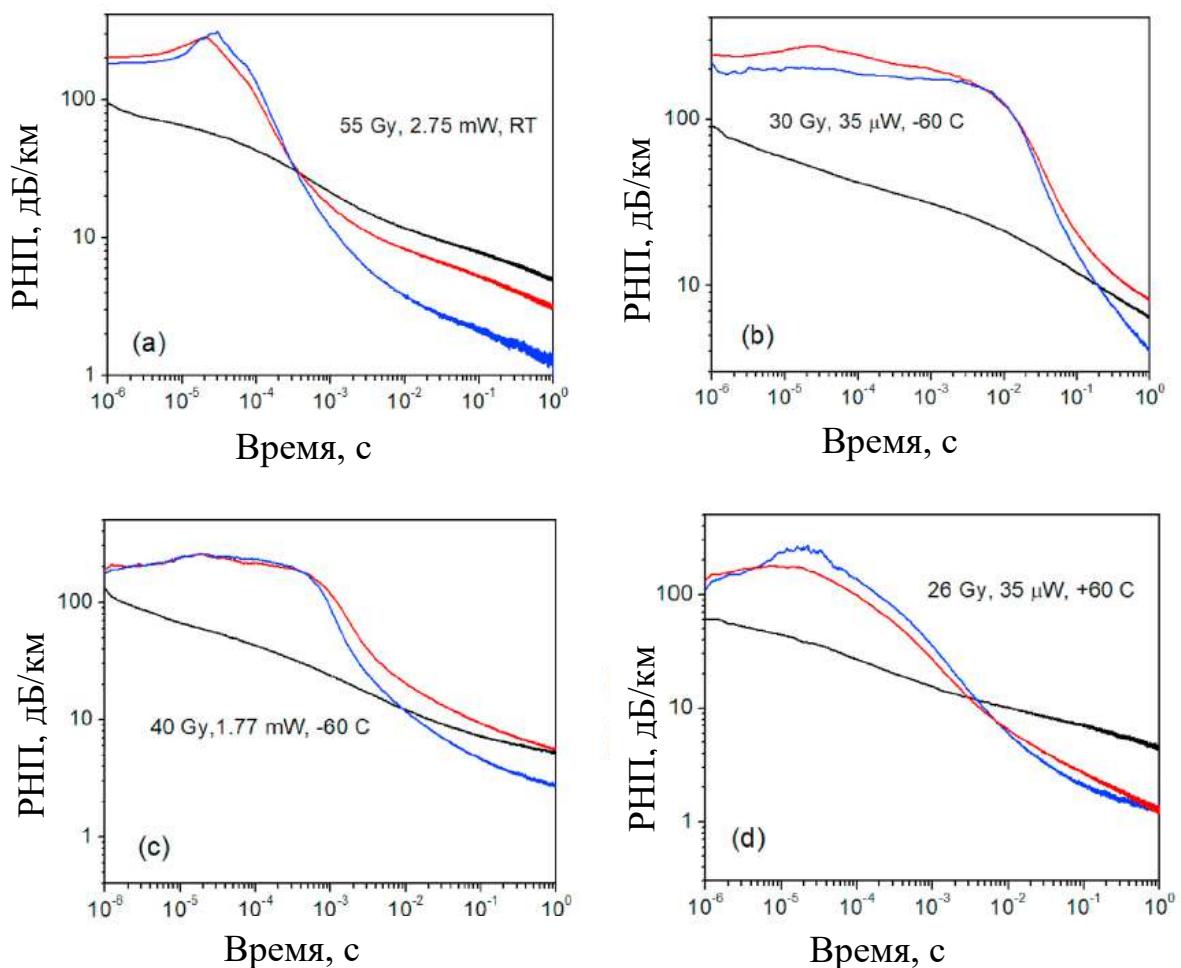


Рисунок 3.30 – РНП ($\lambda=1550$ нм) образцов PSiO_2 (красным и синим) и ПН (черным) после воздействия импульсного ИИ (тормозное излучения ускорителя ЛИУ-30М): *a* – комнатная температура, 55 Гр в импульсе, $P_0 = 2,75$ мВт; *b* – температура минус 60 °С, 30 Гр в импульсе, $P_0 = 35$ мкВт; *c* – температура минус 60 °С, 40 Гр в импульсе, $P_0 = 1,77$ мВт; *d* – температура 60 °С, 26 Гр в импульсе, $P_0 = 35$ мкВт [A1, A2]

Параметр сохранения поляризации излучения при воздействии непрерывного ИИ на образцы PSiO_2

Поведение параметра СПИ образцов PSiO_2 аналогично образцам PGeO_2 . На Рисунке 3.31 приведен типичный график экспериментальной зависимости СПИ (в дБ) ОВ PSiO_2 , изготовленного по доработанному варианту технологии, на котором наблюдается слабое монотонное улучшение параметра СПИ во время облучения. Поскольку у ОВ, изготовленных по доработанному варианту технологии, уменьшена концентрация РЦО, соответствующих полосе поглощения с энергией 1 эВ, из-за чего наблюдается относительно слабая чувствительность к фотообесцвечиванию, то изменение СПИ аналогично изменению СПИ ОВ с германосиликатной сердцевиной, у которых эта зависимость также слабо выражена.

Отсутствие деградации СПИ снимает вопросы к функционированию ОВ во время облучения, поскольку важнейший параметр ОВ – сохранение поляризации излучения – не ухудшается.

Таким образом, конструкция и технология изготовления ОВ PSiO_2 позволили достичь характеристик ОВ на уровне и выше мировых аналогов.

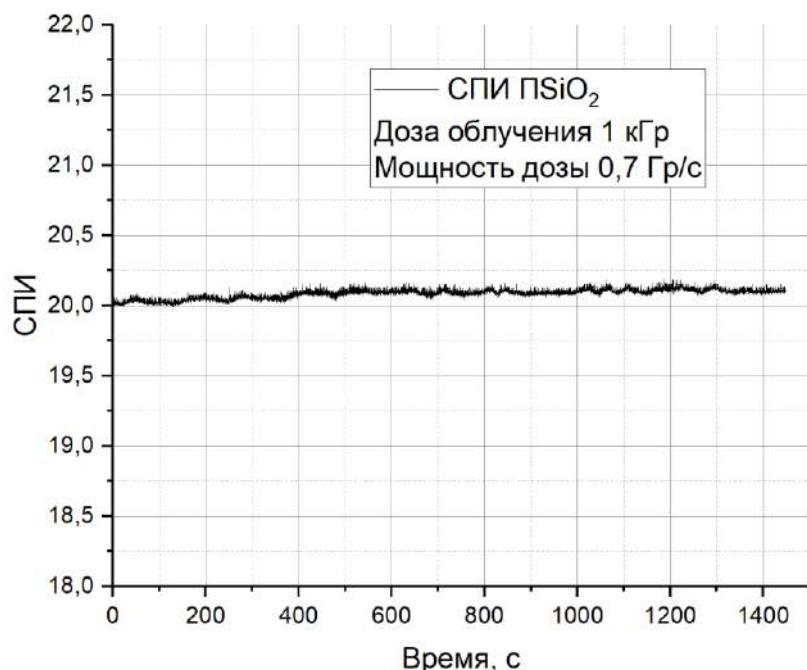


Рисунок 3.31 – СПИ ОВ «панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной при воздействии ИИ

Выходы по главе 3

1. В ОВ ПGeO₂ 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 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 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 $7,3 \cdot 10^{-4}$), 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.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующее защищаемое положение:

1. Установленный автором научный факт, что именно режимы осаждения фторсиликатной 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.

Глава 4. Результаты исследования влияния импульсного ИИ на образцы ИSiO₂, ПSiO₂ и ПGeO₂

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния импульсного ионизирующего излучения на РНП в спектральном диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм ОВ ИSiO₂, ПGeO₂, ПSiO₂ в виде свободной намотки и в виде волоконных контуров ВОГ (для последних двух типов ОВ).

4.1. Влияние импульсного фотонного (тормозного) излучения

В разделе 4.1 приведены результаты исследования релаксационных процессов РНП ОВ после воздействия импульсного фотонного излучения с энергией до 40 МэВ [219] линейного индукционного ускорителя электронов в зависимости от температуры, дозы в импульсе, входящей оптической мощности и уровня напряжений в сетке стекла ОВ.

Все эксперименты по воздействию импульсного фотонного излучения проводились на линейном импульсном ускорителе электронов ЛИУ-30М (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров). Эта моделирующая установка позволяет генерировать импульс фотонов с длительностью на полувысоте импульса – 20 нс, а у подножия импульса – примерно 100 нс.

Длина образцов ОВ в экспериментах составляла более 100 м. С учетом времени прохождения света по волокну, можно считать, что для образцов ОВ длиной 100 м, начиная с 0,3 мкс, а для образцов ОВ длиной 1000 м – с 3 мкс, все процессы в ОВ проходят после окончания воздействия.

В большинстве экспериментов запись сигнала осциллографа проводилась в течение 1 с. При выставлении времени записи приоритет отдавался возможности записать малые времена с большим количеством точек. Опыты с большим временем записи показали, что для полного восстановления образцов

требуется 2-3 с (в зависимости от условий опыта). При этом времени записи 1 с вполне достаточно, чтобы выявить основные происходящие процессы.

Воздействие импульсного фотонного излучения с временем импульса 20 нс, когда поглощенная доза может достигать от единиц и десятков до сотен Грей с максимальной энергией квантов излучения до 40 МэВ, приводит к возникновению РНП на порядки величины больше, чем при непрерывном воздействии. Поэтому в случаях применения в ВОИД достаточно больших длин ОВ (более сотен метров) имеет смысл следить не столько за уровнем РНП при воздействии, сколько за временем восстановления характеристик ОВ после импульса ИИ до максимально допустимого уровня РНП.

Данные образцов и условия проведенных опытов, обсуждаемые в разделе 4.1 приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры образцов и условия опыта

Тип ОВ (номер образца)	$B, 10^{-4}$	$\Delta f_b, \text{ ГГц}$	$\Delta \varepsilon_{zz}$	$P_0, \text{ мкВт}$	$D, \text{ Гр}$	$T, ^\circ\text{C}$
ИSiO ₂ (ИХВВ РАН)	-			40	20	25
ИGeO ₂ (Corning)	-			$5 \cdot 10^3$	20	25
ПSiO ₂ (1вар,1)	7,2	-	-	25	28	25
ПSiO ₂ (1вар,2)	6,0	-	-	25	27	25
ПSiO ₂ (1вар,3)	4,4	-	-	$2 \cdot 10^3$	15, 20	25
ПSiO ₂ (1вар,4)	7,3	-	-	$2 \cdot 10^3$	15, 20, 20, 18, 20	25
ПGeO ₂ (1)	7,3	10,58	0	31	6	25
ПGeO ₂ (2)	7,3	10,58	0	31	29	25
ПGeO ₂ (3)	7,3	10,58	0	31	650	25
ПGeO ₂ (БВК4)	7,3	10,73	$3.2 \cdot 10^{-3}$	31	20	25
ПGeO ₂ (BK5)	7,3	11,01	$9.1 \cdot 10^{-3}$	31	20	-60
ПGeO ₂ (БВК6)	7,3	10,73	$3.2 \cdot 10^{-3}$	31	20	-60
ПGeO ₂ (BK7)	7,3	11,01	$9.1 \cdot 10^{-3}$	31	20	25
ИSiO ₂ (1)	-	11,047	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^3$	20	25
ПSiO ₂ (0)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	10	21	25
ПSiO ₂ (1)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	5	25
ПSiO ₂ (2)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^2$	5	25
ПSiO ₂ (3)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^3$	5	25
ПSiO ₂ (4)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^4$	5	25
ПSiO ₂ (5)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	22	25
ПSiO ₂ (6)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	450	25
ПSiO ₂ (7)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	20	-56
ПSiO ₂ (8)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	20	25
ПSiO ₂ (9)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	20	60
ПSiO ₂ (10)	6,1	11,075	$10,5 \cdot 10^{-3}$	31	20	110
ПSiO ₂ (BK11)	6,1	11,50	$19,5 \cdot 10^{-3}$	31	20	25
ПSiO ₂ (BK12)	6,1	11,50	$19,5 \cdot 10^{-3}$	31	20	-60

4.1.1. Влияние технологических факторов изготовления ОВ

Сравнение РНП ОВ с германосиликатной и нелегированной кварцевой сердцевинами

Для случая непрерывного воздействия, поглощенная доза в несколько десятков Грей является небольшой, графики зависимости РНП для ОВ с германосиликатной и нелегированной кварцевой сердцевинами в этой области близки (Рисунки 3.6, 3.27). Если прекратить воздействие, ОВ восстановятся до исходного состояния. Поэтому для случая импульсного воздействия в этих типах ОВ можно ожидать сопоставимой реакции на воздействие.

На Рисунке 4.1 приведены типичные зависимости РНП от времени после импульсного воздействия (доза в импульсе 20 Гр) для образцов ISiO_2 (ИХВВ РАН), PSiO_2 (ПАО «ПНППК») и IGeO_2 (Corning). Условия эксперимента приведены в Таблице 4.1. Зависимость РНП ($\lambda=1550$ нм) от времени после воздействия образца PSiO_2 отличает наличие выраженного перегиба для времени ~ 1 мс после воздействия и затем более быстрое снижение РНП при временах больших 1 мс в отличии от других ОВ. Две временных области, в которых скорость релаксации РНП заметно отличается, позволяет предположить наличие двух процессов релаксации РНП, вызванных распадом двух разных типов дефектов, являющихся РЦО с разными характерными временами жизни. Далее, также как в работе [225], будем называть первую группу РЦО – короткоживущими или собственными, а вторую – долгоживущими или деформационными автолокализованными дырками. Визуальное отсутствие перегиба на зависимости РНП(t) для образца IGeO_2 можно отнести к релаксации РЦО с одним характерным временем релаксации [154].

Для выяснения, какую роль в возникновении короткоживущих РЦО играют состав сердцевины ОВ и уровень напряженно-деформированного состояния, проведена серия опытов, в которых использовались образцы с разным составом сердцевины и уровнем НДС.

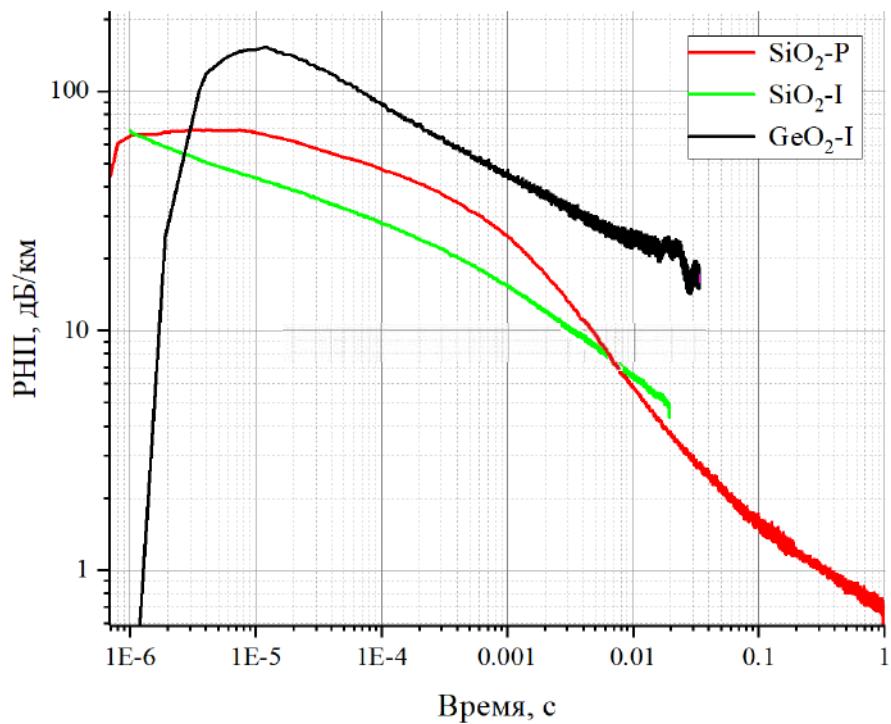


Рисунок 4.1 – Зависимость РНП ($\lambda=1550$ нм) после воздействия импульсного излучения с дозой 20 Гр для образцов: ИSiO₂ (—), ИGeO₂ (—), ПSiO₂ (—)

Сравнение РНП ОВ ПSiO₂, изготовленных по первому и по доработанному вариантам технологии

Сравнение результатов исследования образцов ОВ ПSiO₂, изготовленных по первому и доработанному вариантам технологии показало, что чувствительность к напряжениям структурной сетки 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 4.2, а). Логично предположить, что это связано с характерным временем распада РЦО, связанных с избытком кислорода в структурной сетке стекла, и маркером которых является наличие полосы поглощения с энергией 1 эВ. Чем выше напряжение в структурной сетке стекла, тем больше характерное время жизни РЦО. В ОВ, изготовленном по

доработанному варианту технологии, таких дефектов значительно меньше, что существенно уменьшает 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 ИИ явного проявления полосы с энергией 1 эВ уже не наблюдается (Рисунок 4.2, *б*). Это согласуется с данными по зависимости РНП(*t*) на длине волны 1550 нм, где после 1 мс наблюдается изменение скорости релаксации РНП. Отсюда можно сделать предположение, что короткоживущие РЦО обуславливают, в том числе, возникновение полосы поглощения с энергией 1 эВ.

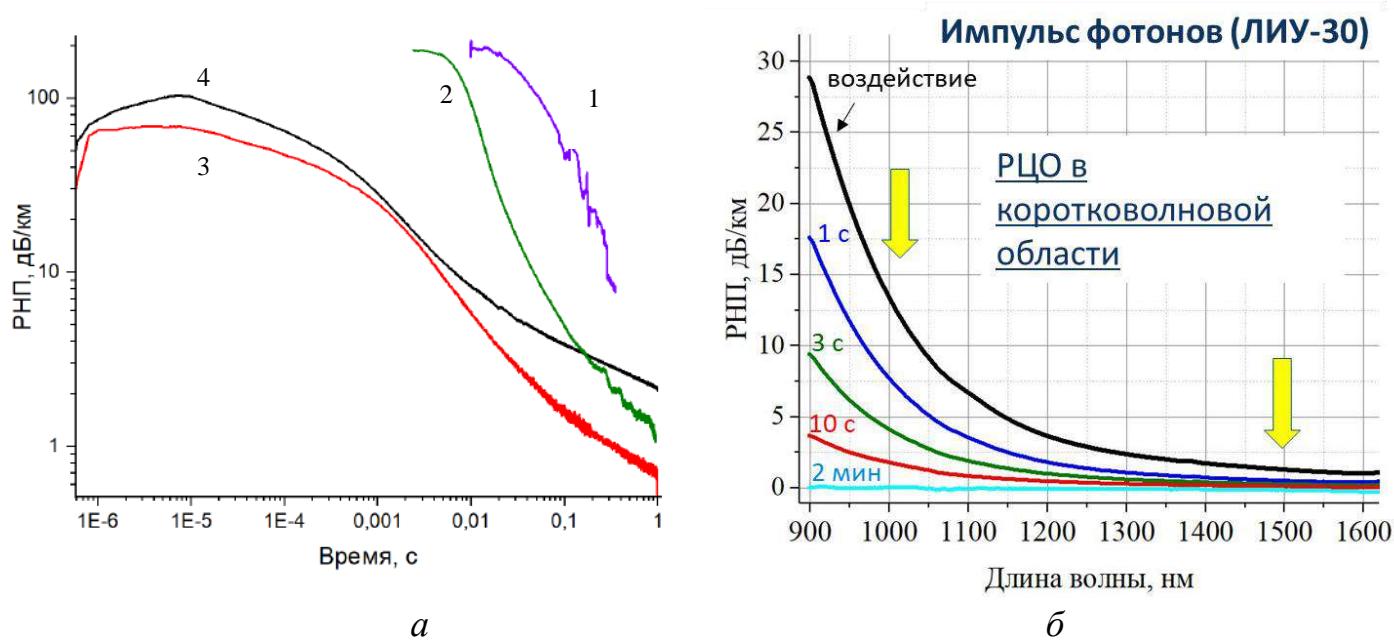


Рисунок 4.2. – РНП PSiO_2 : (*а*) на $\lambda = 1550$ нм, кривые 1,2 – PSiO_2 с большой интенсивностью полосы 1 эВ, 3,4 – PSiO_2 с малой интенсивностью полосы 1 эВ ($1 - B = 7,2 \cdot 10^{-4}$, $D = 28$ Гр, $P_0 = 25$ мкВт; $2 - B = 6,0 \cdot 10^{-4}$, $D = 27$ Гр, $P_0 = 25$ мкВт, $3 - B = 6,1 \cdot 10^{-4}$, $D = 21$ Гр, $P_0 = 10$ мкВт, $4 - B = 6,1 \cdot 10^{-4}$, $D = 450$ Гр, $P_0 = 31$ мкВт); (*б*) – РНП PSiO_2 с малой интенсивностью полосы с энергией 1 эВ ($B = 6,1 \cdot 10^{-4}$) 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

РНП ОВ ПSiO₂, изготовленных по первому варианту технологии, при серии последовательных облучений

Для образцов ПSiO₂, изготовленных по первому варианту технологии, проведена уникальная серия экспериментов по последовательному облучению образцов на ускорителе ЛИУ-30М. Два образца ПSiO₂ с величиной двулучепреломления $B = 7,2 \cdot 10^{-4}$ и $B = 6,0 \cdot 10^{-4}$ в виде свободной намотки были установлены в облучательном зале на определенном расстоянии от выходного окна ускорителя. Без разборки оптической схемы и передвижения образцов (за исключением переустановки дозиметров ИКС для каждого опыта) проведено 5 последовательных облучений. Доза в импульсе при каждом облучении составила от 15 до 20 Гр. Данные опыты позволили проследить реакцию образцов на повторные облучения и чувствительность РНП (t) к дозе в импульсе.

Результаты опытов приведены на Рисунках 4.3 и 4.4. Для образца ПSiO₂ с более высоким значением двулучепреломления выявлена высокая степень повторяемости кривой РНП(t) от опыта к опыту, несмотря на разброс дозы в импульсе (от 15 до 20 Гр), что говорит о слабой зависимости кривой релаксации РНП от дозы в импульсе (Рисунок 4.4).

При этом для образца с более низким значением двулучепреломления выявлено наличие эффекта предоблучения: РНП образца при втором облучении заметно меньше, хотя доза в импульсе при повторном облучении оказалась чуть больше, чем в первом (Рисунок 4.3). Для образцов ПSiO₂ второго варианта технологии эффект предоблучения при повторных облучениях образцов значимо не проявлялся. Наиболее вероятной причиной данного эффекта является частичный отжиг (распад) РЦО с полосой поглощения 1 эВ при воздействии ИИ. Для образцов с меньшим значением двулучепреломления уменьшение концентрации таких РЦО оказалось заметно, для образцов с большим двулучепреломлением, видимо, менее заметно на фоне большой концентрации РЦО, а для образцов, изготовленных по второму варианту технологии, концентрация таких РЦО сразу невысокая.

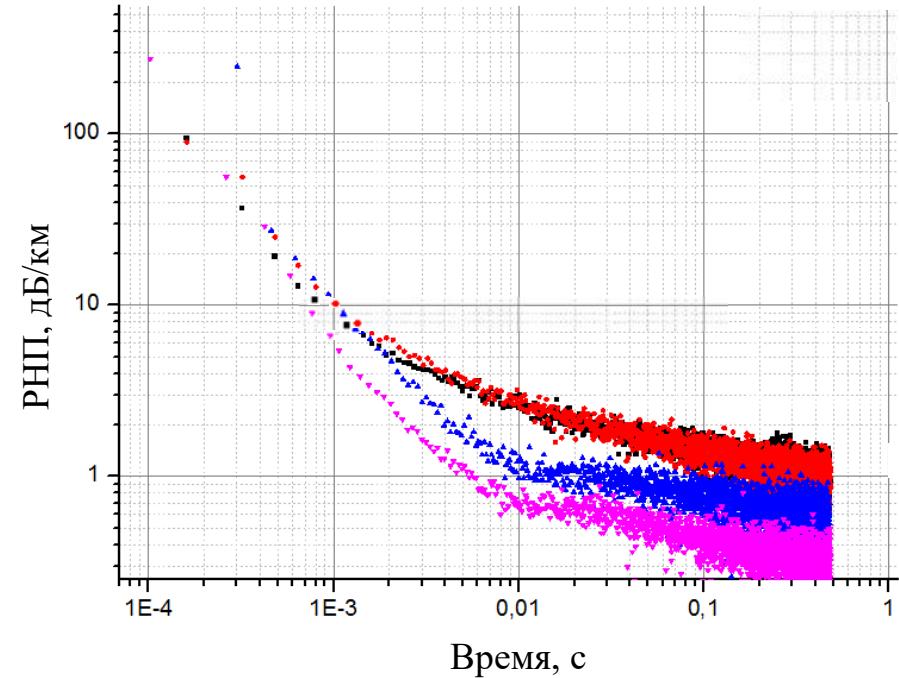


Рисунок 4.3 – Зависимость величины РНП PSiO_2 , отнесенных к дозе в импульсе от времени после облучения: $B = 7,2 \cdot 10^{-4}$, доза в импульсе 15 – 20 Гр (красная и черная кривые); $B = 6,0 \cdot 10^{-4}$, доза в импульсе 15 Гр (синяя кривая), 20 Гр (розовая кривая), $P_0 = 2$ мВт

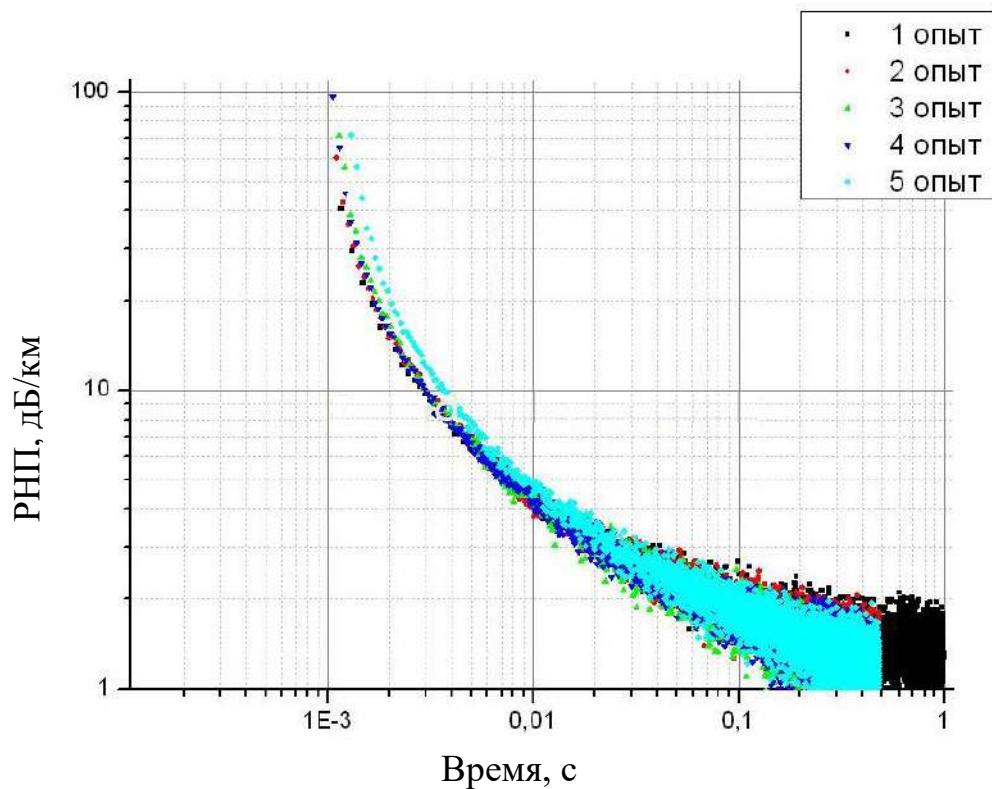


Рисунок 4.4 – Зависимость величины РНП PSiO_2 от времени после облучения, , доза в импульсе от 15 до 20 Гр

4.1.2. Зависимости РНП(t) образцов PGeO_2 и PSiO_2 в виде свободной намотки, бескаркасных и каркасных гироскопических волоконных контуров

Зависимости РНП(t) образцов PGeO_2 и PSiO_2 в виде свободной намотки, БВК и ВК приведены на Рисунках 4.5-4.6. Зависимости РНП(t) для образцов PGeO_2 и PSiO_2 имеют схожий характер, визуально наблюдаются два релаксационных процесса. При комнатной температуре для ОВ с германосиликатной сердцевиной такие данные получены впервые. Поскольку для изотропного ОВ с германосиликатной сердцевиной такого эффекта не наблюдается, то, вероятно, наличие короткоживущих РЦО связано с уровнем НДС.

На Рисунке 4.5, *a* объединены зависимости РНП(t) образцов PGeO_2 для различных доз в импульсе: 6 Гр, 29 Гр и 650 Гр (Таблица 4.1), а на Рисунке 4.6, *a* – зависимости РНП(t) образцов PSiO_2 для сопоставимых доз в импульсе: 4 Гр, 22 Гр и 450 Гр.

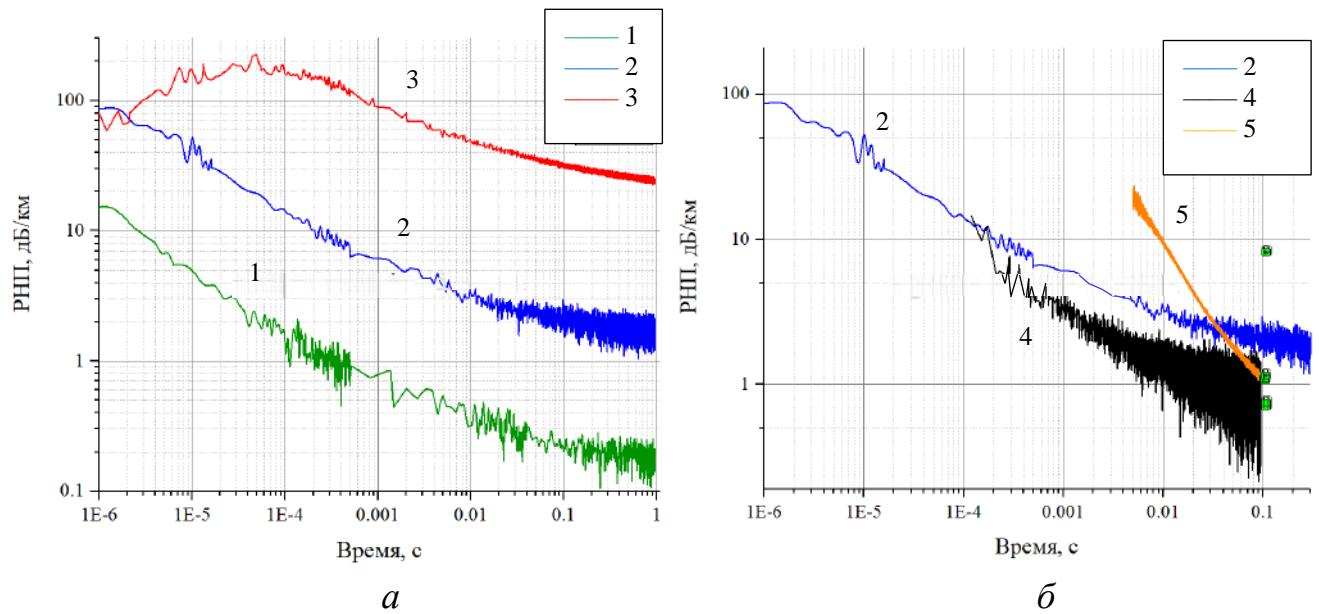


Рисунок 4.5 – Зависимость РНП от времени ($P_0=31$ мкВт, $\lambda=1550$ нм) для ОВ PGeO_2 (*a*) при разных дозах в импульсе, Гр: 1 – 6, 2 – 29, 3 – 650; для ОВ PGeO_2 с разным уровнем НДС (*б*): в свободной намотке PGeO_2 (2), БВК (4), ВК (5), доза в импульсе 20 Гр

Для образцов PSiO_2 интересно отметить практически полное совпадение величины РНП для доз в импульсе 22 Гр и 450 Гр для времени примерно 3 мс (Рисунок 4.6, *a*). Также обращает на себя внимание существенно меньшие значения РНП PGeO_2 для малой дозы в импульсе (Рисунок 4.5, *a*, зеленая кривая), по сравнению с аналогичным случаем для PSiO_2 (Рисунок 4.6, *a*, синяя кривая). При импульсном воздействии ОВ PGeO_2 ведет также как при непрерывном воздействии: для малых поглощенных доз характерны низкие значения РНП [225].

Для больших доз в импульсе наблюдается отложенная реакция РНП на воздействие. Для дозы в импульсе 650 Гр рост РНП у PGeO_2 образца продолжался вплоть до 50 мкс после воздействия (Рисунок 4.5, *a*, красная кривая). У образца PSiO_2 для дозы в импульсе 450 Гр он продолжался до 10 мкс после воздействия (Рисунок 4.6, *a*). Такое поведение также наблюдается и для средних доз в импульсе, но при низкой температуре и малой величине P_0 (Рисунок 4.6, *г*, черная кривая, образец PSiO_2). Получается, что РЦО продолжают образовываться уже после окончания воздействия.

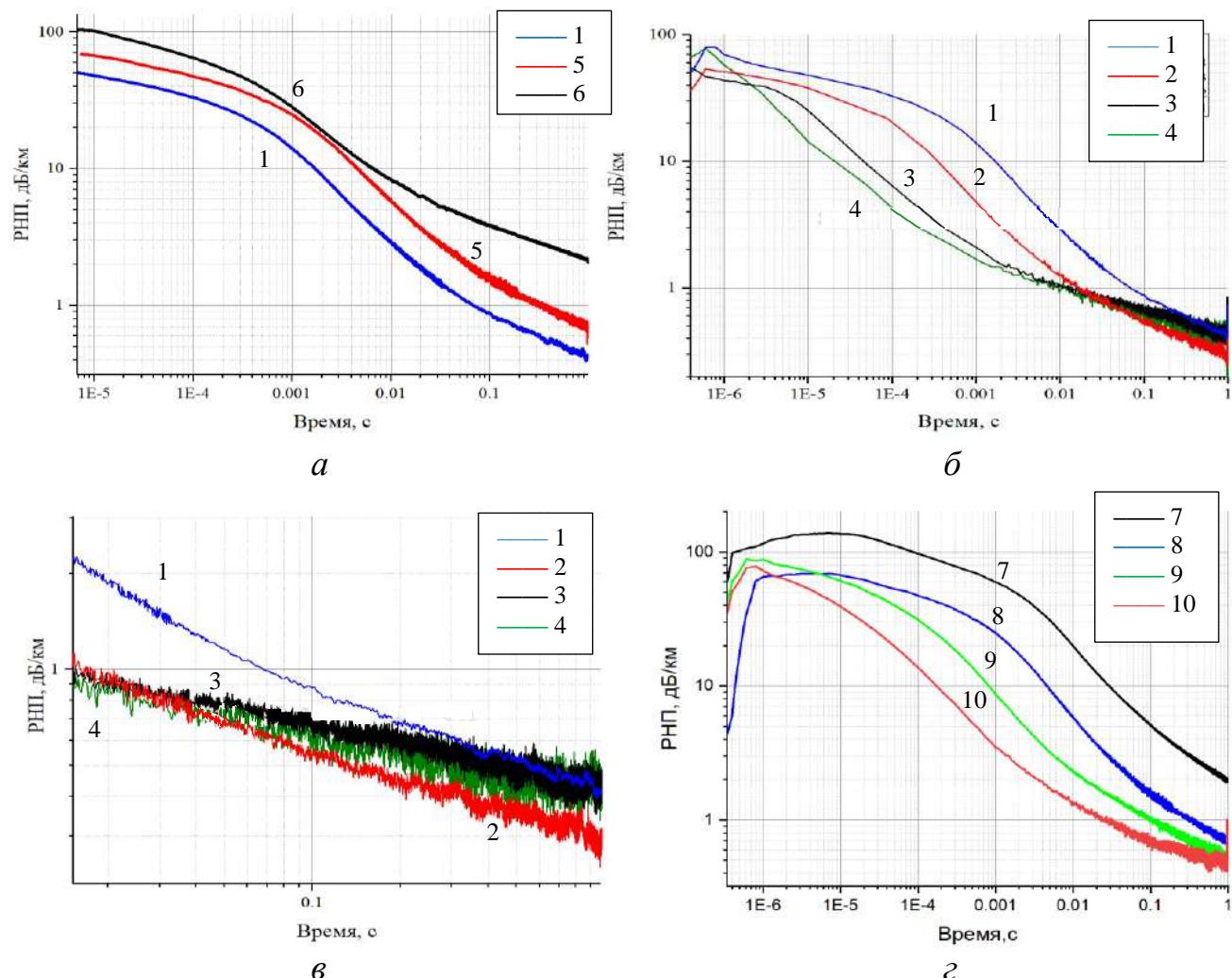


Рисунок 4.6 – Зависимости РНП от времени для ОВ ПSiO₂: *а* – при разных дозах в импульсе, Гр: 1 – 5, 5 – 22, 6 – 450 ($P_0=31$ мкВт, $\lambda=1550$ нм); *б* – при дозе в импульсе 5 Гр, $\lambda=1550$ нм и различных значениях P_0 , мкВт: 1 – 31, 2 – 300, 3 – 4000, 4 – 40000; *в* – для медленных процессов в период времени 0,01 с – 1 с, обозначения аналогично (*б*); *г* – при различных температурах (доза в импульсе 20 Гр, $P_0=31$ мкВт), °С: 7 – минус 56, 8 – 25, 9 – 60, 10 – 110.

Чтобы образовался РЦО, необходимо время для уменьшения энергии в каскадах вторичных и последующих электронов и гамма-квантов за счет соударений и радиационного рассеяния энергии, поскольку энергия образования РЦО намного меньше энергии воздействующего гамма-кванта. Поскольку при пониженной температуре интенсивность теплового движения частиц меньше, то и потеря энергии электронами происходит медленнее, это позволяет увидеть

отложенную реакцию РНП и при меньших дозах в импульсе, т.е. когда первичные гамма-кванты имеют меньшую энергию. Процесс образования РЦО накладывается на процесс их релаксации, это приводит к образованию точки перегиба на зависимости РНП(t) в области малых времен до ~ 20 мкс после импульса (как на Рисунках 4.5 *а* (кривая 3), 4.6 *а* (кривая 6), 4.6 *г* (кривая 7)).

Для образцов PSiO_2 при комнатной температуре влияние мощности P_0 отразилось на виде РНП(t) в промежутке времени от 1 мкс до 0,1 с при дозе в импульсе 4 Гр (Рисунок 4.6, *б*). При увеличении уровня P_0 РНП на этом промежутке времени существенно уменьшаются и качественно изменяется вид зависимости. Для промежутка времени более 0,01 с при увеличении уровня P_0 РНП изменяются как в большую, так и в меньшую сторону (Рисунок 4.6, *в*). Для изотропных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной схожее поведение наблюдалось в [224].

Изменения РНП(t) при изменении температуры эксперимента (Рисунок 4.6, *г*) очень схожи с изменением РНП(t) при изменении мощности P_0 (Рисунок 4.6, *б*): повышение температуры в опыте приводит к ускорению процесса релаксации РНП.

Для определения влияния уровня НДС на РНП(t) образцов PGeO_2 и PSiO_2 образцы в свободной намотке, ВК и БВК облучались при одной дозе в импульсе. Выбран средний уровень 20 Гр (для свободной намотки $\text{PGeO}_2(2)$ наиболее близким оказался – 29 Гр), поскольку ВК и БВК имели длину 1000 м, было опасение, что при больших дозах в импульсе из-за больших оптических потерь не получится зарегистрировать полезный сигнал в исследуемом промежутке времени.

Для образцов PGeO_2 на Рисунке 4.5, *б* приведены РНП(t) для одних условий опыта, но для различного уровня НДС: образцы в свободной намотке, в виде БВК и ВК (Таблица 4.1). Внесение дополнительных напряжений при изготовлении БВК и ВК привело к увеличению РНП из-за короткоживущих РЦО, затруднению их релаксации и снижению РНП(t) по сравнению с РНП(t) образца со свободной намоткой из-за долгоживущих РЦО. При этом временные области,

когда РНП становятся меньше, чем для свободной намотки, для БВК при $t \geq 2 \cdot 10^{-4}$ с, а для ВК – $t \geq 0,04$ с.

4.1.3. Анализ зависимостей РНП(t) с помощью подходов химической кинетики

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.

С учетом закона Бугера-Ламберта-Бера считали, что зависимость РНП(t) пропорциональна концентрации центров окраски $C(t)$ (поскольку выходная оптическая мощность $P(t)$ пропорциональна $C(t)$):

$$P(t) = P_0 \exp(-k(\lambda)C(t)L), \quad (4.1)$$

где P_0 – входящая в ОВ оптическая мощность,

$P(t)$ – выходящая из ОВ оптическая мощность для времени t после воздействия,

$k(\lambda)$ – коэффициент поглощения света веществом,

$C(t)$ – концентрация центров окраски в момент времени t после воздействия,

L – длина ОВ.

Для понимания временных границ, где процесс релаксации РНП является диффузионным, все зависимости РНП(t) $\sim C(t)$ были проанализированы с помощью уравнения Колмогорова - Аврами [229]:

$$\alpha = 1 - \exp(-kt^n), \quad (4.2)$$

где α – доля центров окраски, претерпевших превращение к моменту времени t ,

k – константа скорости,

t – время,

n – величина показателя степени.

В начальный момент времени после воздействия РНП максимальны, поэтому α определяется как $\alpha=1$ - (РНП(t)/РНП(0)).

Принято считать процесс бездиффузионным при n больше 1 и диффузионным при $n < 1$ [229].

Для всех РНП(t) качественный вид кривых зависимости $\ln(-\ln(1-\text{РНП}(t)))$ от $\ln(t)$ оказался одинаковым (пример на Рисунке 4.7). Различались границы по времени для разных n . В целом получилось, что на начальном этапе (до нескольких микросекунд после импульса) процесс следует отнести к бездиффузионным, поскольку n существенно больше 1, а в остальной временной области процесс диффузионный, т.к. $n < 1$.

Диффузионная область, где $n < 1$, представляет собой функциональную зависимость, отличную от прямой линии, при этом можно выделить два участка с разными наклонами: $n \approx 0,27$ и $n \approx 0,02$. Поэтому для временной области более 10 мкс можно предположить наличие двух релаксационных процессов.

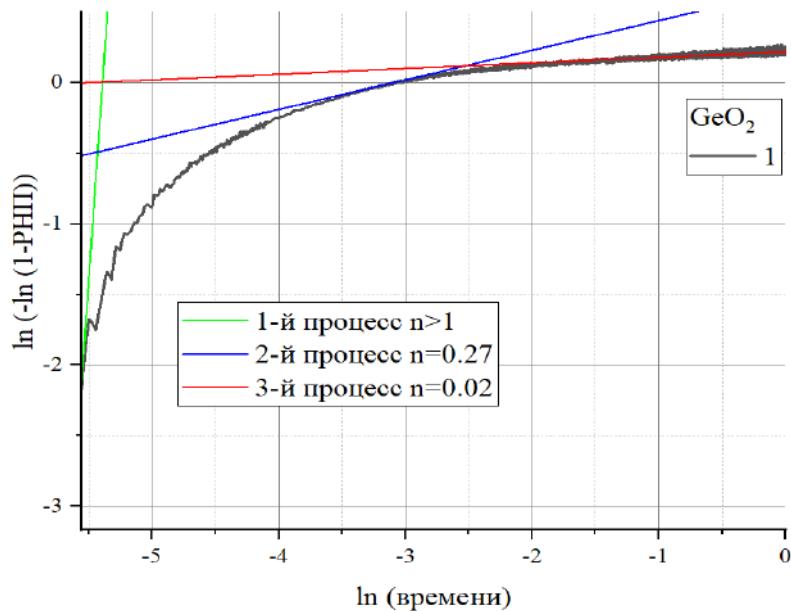


Рисунок 4.7 – Анализ зависимости $\ln(-\ln(1-\text{РНП}(t)))$ для ОВ GeO_2 с помощью уравнения Колмогорова-Аврами, $P_0=31$ мкВт, доза в импульсе 600 рад

Для всех зависимостей РНП(t) определили наблюдаемый порядок реакции, константу скорости и время релаксации в e раз. Для определения наблюдаемого порядка реакции для всех образцов построили зависимости

логарифма скорости релаксации РНП(t) (производная по t РНП(t)) от логарифма РНП(t) – пример зависимости для образца $\text{PGeO}_2(2)$ на Рисунке 4.8.

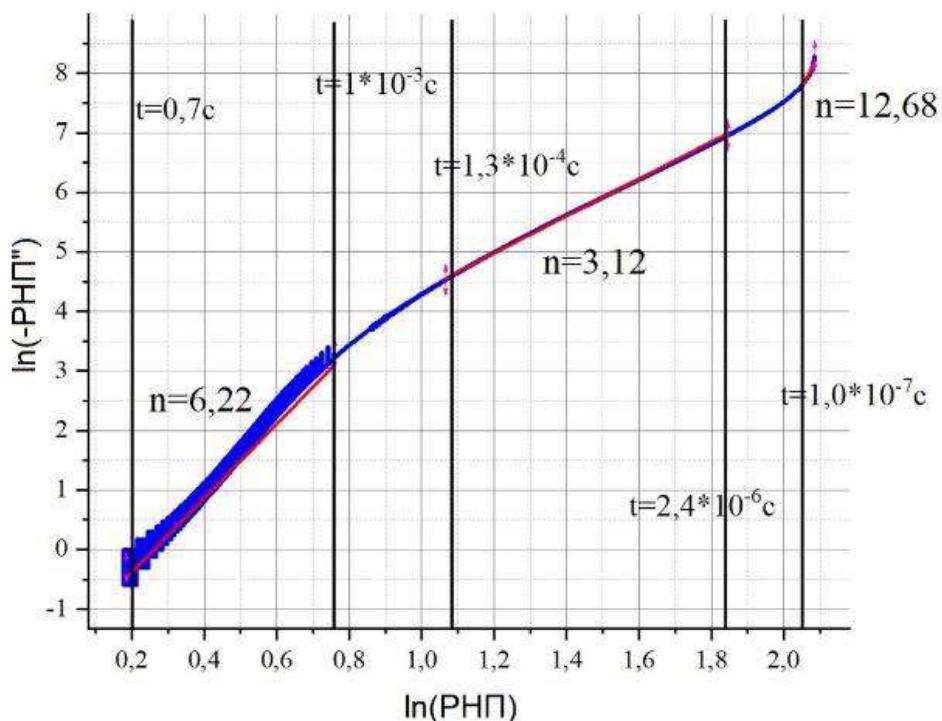


Рисунок 4.8 – Зависимость логарифма скорости релаксации РНП от логарифма РНП для образца $\text{PGeO}_2(2)$

Графики зависимости логарифма скорости релаксации РНП(t) от логарифма РНП(t) отличаются от прямой линии, поэтому, наблюдаемый порядок реакции более правильно считать функционально зависимым от времени, т.е. на каждом участке времени у него должно быть свое значение. При этом, так же, как и в предыдущем случае, для всех образцов, включая PGeO_2 , визуально выделяются два продолжительных участка, близких к прямым линиям, что свидетельствует в пользу предположения о двух процессах распада (рекомбинации) РЦО с разными характерными временами. Для обоих участков наблюдаемый порядок реакции дробный и больше 2.

Дробный порядок реакции означает, что на самом деле рекомбинация РЦО является сложным, возможно многостадийным процессом, но разрешить эти процессы при данной постановке опыта не представляется возможным.

Поэтому остановимся на предположении, что в релаксации РНП образцов участвуют два различных типа РЦО, характеризующихся разными характерными временами релаксации.

Для образцов PGeO_2 впервые показано наличие процессов релаксации РЦО с двумя разными характерными временами после воздействия импульсного ИИ, аналогичных ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной. Возможно, обнаружить два типа РЦО получилось из-за наличия напряжений в структурной сетке стекла сердцевины из-за напрягающих стержней. На Рисунке 4.9 приведена зависимость логарифма скорости релаксации $\text{РНП}(t)$ от логарифма $\text{РНП}(t)$ для образца PGeO_2 в свободной намотке волокна, на которой явно прослеживаются два участка с разным наклоном. Для единообразия РЦО ОВ в PGeO_2 будем также называть собственные и деформационные, при этом их физическая природа может отличаться от РЦО в ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной.

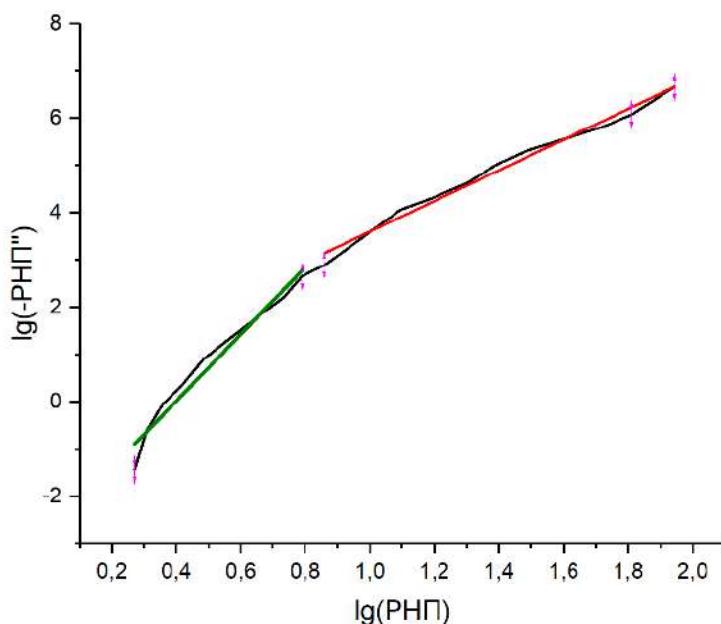


Рисунок 4.9 – Зависимость логарифма скорости релаксации РНП от логарифма РНП для образца PGeO_2 в свободной намотке после воздействия импульса фотонов; $D = 29 \text{ Гр}$, 22°C , $n_1 = 3,24$, $n_2 = 7,08$

4.1.4. Математическая аппроксимация РНП(t)

Поскольку для времен более 1-10 мкс процесс релаксации РЦО находится в диффузионной области, для математической аппроксимации РНП(t) опробованы три варианта зависимостей, в основе которых формулы, применяемые для описания диффузионных процессов. Каждая зависимость составлена из двух слагаемых, чтобы учитывать процессы релаксации собственных (первое слагаемое) и деформационных РЦО (второе слагаемое). Аппроксимация выполнялась для времен более 10 мкс при дозах в импульсе 45 крад, 65 крад и более 1 мкс в остальных случаях. Для каждого РНП(t) вычислялись эмпирические коэффициенты для всех трёх вариантов зависимостей по формулам (2.9, 2.10, 2.15), приведенным в п.2.3.3.1. Результаты всех расчетов приведены в Таблицах 4.2 – 4.4.

Третий вариант – функциональная зависимость для кинетики реакции n -порядка (формула (2.15)). В этом случае аппроксимационные 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 логарифма скорости изменения РНП от логарифма РНП соответствующего образца. Также определялись константы скорости реакции и характерные времена релаксации (Таблица 4.4).

Таблица 4.2 – Результаты расчетов эмпирических коэффициентов по формуле «растянутая» экспонента (2.9)

Тип ОВ, (номер образца)	$A_{\text{соб}}$	$\tau_{\text{соб}}, \text{с}$	$\beta_{\text{соб}}$	$A_{\text{деф}}$	$\tau_{\text{деф}}, \text{с}$	$\beta_{\text{деф}}$	R^2
ИGeO ₂ (Corning)	177	8,00E-05	0,4	47	0,08	0,2	0,93
ПSiO ₂ (1в1)	230	0,06	0,97	20	0,01	0,01	0,98
ПSiO ₂ (1в2)	230	8,00E-03	0,95	25	0,02	0,3	0,96
ПGeO ₂ (1)	36	1,00E-06	0,32	1,7	0,0008	0,119	0,93
ПGeO ₂ (2)	170	1,50E-06	0,26	11	0,0009	0,1	0,97
ПGeO ₂ (3)	230	2,5E-04	0,4	90	0,11	0,135	0,99
ПGeO ₂ (БВК4)	100	1,50E-05	0,4	5	0,004	0,2	0,92
ПGeO ₂ (BK5)	220	3,45E-04	0,35	4	0,0008	0,07	0,99
ПGeO ₂ (БВК6)	300	2,70E-05	0,95	5	8,00E-03	0,125	0,82
ПGeO ₂ (BK7)	220	3,50E-04	0,355	4	0,0008	0,12	0,98
ПSiO ₂ (0)	80	4,00E-04	0,32	3,2	0,13	0,2	0,99
ПSiO ₂ (1)	70	2,00E-04	0,3195	2	0,13	0,2	0,99
ПSiO ₂ (2)	95	1,10E-05	0,25	1,55	0,09	0,22	1,00
ПSiO ₂ (3)	95	1,50E-06	0,25	1,9	0,1	0,18	0,94
ПSiO ₂ (4)	260	3,00E-07	0,32	3	0,08	0,2	0,99
ПSiO ₂ (5)	78	4,30E-04	0,38	7,2	0,01	0,19	1,00
ПSiO ₂ (6)	120	2,40E-04	0,4	8,7	0,2	0,2	1,00
ПSiO ₂ (7)	130	1,00E-03	0,36	26	2,00E-03	0,15	0,99
ПSiO ₂ (8)	73	5,00E-04	0,37	20 (10)	1E-4 (0,001)	0,14 (0,132)	0,99 (0,99)
ПSiO ₂ (9)	112	3,00E-05	0,3	8	7,00E-04	0,14	1,00
ПSiO ₂ (10)	130	4,00E-06	0,26	6	2,00E-04	0,112	0,99
ПSiO ₂ (BK11)	45	5,2E-3 (4,6E-3)	0,92	25 (6)	5E-6 (0,0092)	0,12 (0,27)	0,99 (0,99)

Таблица 4.3 – Результаты расчетов эмпирических коэффициентов по формуле кинетики второго порядка (2.10)

Тип ОВ, (номер образца)	$C_{\text{соб}}$	$\tau_{\text{соб}}, \text{с}$	$\alpha_{\text{соб}}$	$C_{\text{деф}}$	$\tau_{\text{деф}}, \text{с}$	$\alpha_{\text{деф}}$	R^2
ИSiO ₂ (ИХВВ РАН, [240])	89,52	3,79E-05	0,40	0	0	0	-
ИGeO ₂ (Corning)	158	7,00E-05	0,7	32	0,08	0,22	0,95
ПSiO ₂ (1в1)	200	0,06	1,85	6	0,01	0,47	0,98
ПSiO ₂ (1в2)	200	9,00E-03	2,3	10	0,02	0,47	1,00
ПGeO ₂ (1)	24	1,69E-06	0,76	0,75	0,0008	0,15	0,96
ПGeO ₂ (2)	150	1,50E-06	0,67	6	0,0009	0,16	0,99
ПGeO ₂ (3)	195	2,15E-04	0,69	60	0,11	0,2	0,99
ПGeO ₂ (БВК4)	135	1,00E-05	0,99	4,5	0,0001	0,2	0,93
ПGeO ₂ (БВК5)	270	3,50E-04	0,99	0,07	0,0004	0,4	0,99
ПGeO ₂ (БВК6)	400	1,80E-05	2,7	3,5	0,015	0,25	0,91
ПGeO ₂ (БВК7)	290	3,00E-04	0,99	0,06	1,00E-02	0,4	0,95
ИSiO ₂ (1)	220	2,00E-05	1,2	3	1,20E-04	0,2	0,90
ПSiO ₂ (0)	65	4,00E-04	0,75	1,4	0,12	0,31	0,99
ПSiO ₂ (1)	60	1,20E-04	0,75	1	0,12	0,31	0,99
ПSiO ₂ (2)	52	3,80E-05	0,78	0,9	0,14	0,38	1,00
ПSiO ₂ (3)	57	7,00E-06	0,81	1,3	0,12	0,35	1,00
ПSiO ₂ (4)	130	8,50E-07	0,95	2,3	8,00E-02	0,2	1,00
ПSiO ₂ (5)	70	3,80E-04	0,68	1,9	0,12	0,37	1,00
ПSiO ₂ (6)	110	1,50E-04	0,67	5	2,00E-01	0,22	1,00
ПSiO ₂ (7)	140	1,00E-03	0,8	4	8,00E-03	0,14	0,94
ПSiO ₂ (8)	67	5,00E-04	0,85	2,9	5,00E-03	0,25	0,99
ПSiO ₂ (9)	80	5,00E-05	0,75	2,9	4,00E-04	0,2	0,98
ПSiO ₂ (10)	85	7,00E-06	0,7	2,9	4,00E-04	0,22	1,00
ПSiO ₂ (БК11)	75	4,60E-03	2,7	2,8	0,0092	0,32	0,99

Таблица 4.4 – Результаты расчетов эмпирических коэффициентов по формуле кинетики n -порядка (2.15)

Тип ОВ, (номер образца)	n_1	k_1	$t_1, \text{с}$	n_2	k_2	$t_2, \text{с}$
ПSiO ₂ (1в1)	1,51	0,971	8,55E-02	0,76	11	0,216
ПSiO ₂ (1в2)	1,81	2,89	7,64E-03	0,39	10,7	0,284
ПGeO ₂ (1)	4,43	113,53	6,70E-06	0,94	4,55	0,2
ПGeO ₂ (2)	3,24	11	1,53E-05	7,08	0,0034	3,39E-02
ПGeO ₂ (3)	2,47	0,968	7,94E-04	1,55	0,685	0,165
ПGeO ₂ (БВК4)	2,62	67,9	5,47E-04	1,09	293	3,05E-03
ПGeO ₂ (BK7)	2	6,12	9,65E-03	1,45	4,3	0,208
ИSiO ₂ (1)	2,08	284	3,28E-05	0,93	142	7,92E-03
ПSiO ₂ (0)	2,75	0,897	1,86E-03	1,47	1,57	0,444
ПSiO ₂ (1)	4,83	0,0114	5,58E-05	1,54	5,37	0,117
ПSiO ₂ (2)	2,87	33,3	5,16E-05	0,6	2,35	0,351
ПSiO ₂ (3)	2,23	1090	1,30E-05	0,66	5,62	0,186
ПSiO ₂ (4)	2,23	2430	3,76E-06	0,95	26,3	0,0427
ПSiO ₂ (5)	4,79	0,003	3,61E-04	0,13	12,76	0,11
ПSiO ₂ (6)	4	0,079	8,32E-05	1,11	8,97	0,09
ПSiO ₂ (7)	2,46	3,12	5,47E-04	0,42	10,7	1,23
ПSiO ₂ (8)	2,45	2,54	1,95E-03	1,37	3,53	7,29E-02
ПSiO ₂ (9)	2,91	7,76	7,53E-05	0,32	8,44	0,192
ПSiO ₂ (10)	2,9	34,1	2,24E-05	0,89	4,36	0,227
ПSiO ₂ (BK11)	0,7	36,6	3,88E-02	0,29	14,8	0,159

Наблюдаемый порядок скорости реакции определялся дифференциальным методом путем численного дифференцирования каждой кривой РНП(t). На графике зависимости логарифма скорости изменения РНП от логарифма РНП выделяются два участка с разным наклоном, обозначенные красной и синей прямыми линиями на Рисунке 4.10. Для каждого участка вычисляли свой порядок реакции n .

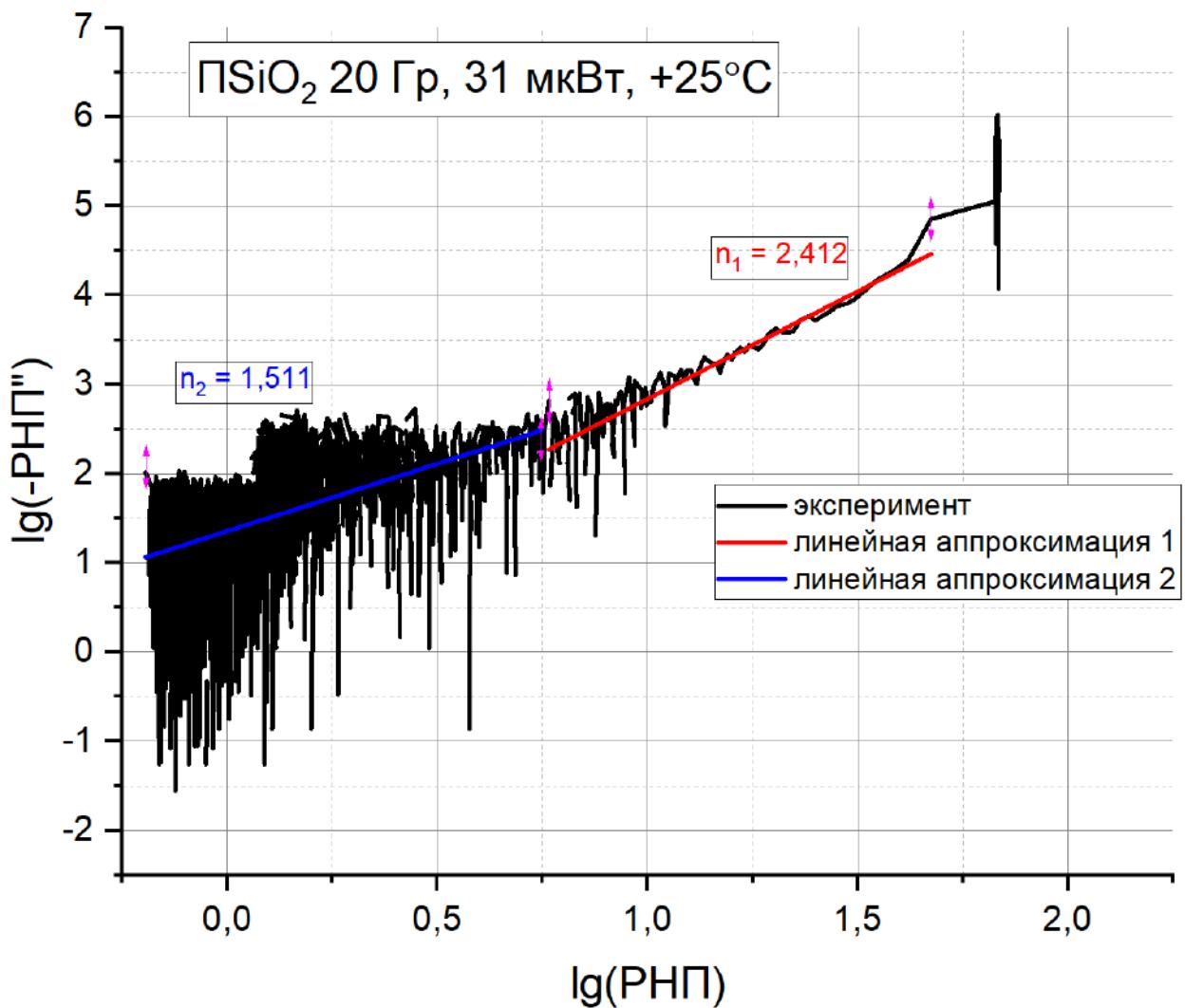


Рисунок 4.10 – График зависимости логарифма скорости изменения РНП от логарифма РНП для образца PSiO_2 (3); n_1, n_2 – тангенс угла наклона линейной аппроксимации в двух областях графика

Константа скорости реакции для каждого участка кривой РНП вычислялась по формуле (2.12) из п.2.3.31. По рассчитанным константам

скорости реакции были вычислены характерные времена процесса распада собственных дефектов – времена уменьшения концентрации дефектов в e раз ($\tau_{1/exp}$) по формуле (2.13) из п.2.3.3.1.

Поскольку наблюдаемый порядок реакции представляет собой скорее функциональную зависимость от времени, чем одно или два значения, точность аппроксимации с помощью кинетики n порядка ожидаемо составила не более 45 %.

На Рисунке 4.11 приведены экспериментальная кривая РНП(t) образца $\text{PSiO}_2(1)$ (доза в импульсе 0,5 крад, $P_0 = 31 \text{ мкВт}$) и расчетные кривые для вышеперечисленных зависимостей. Точность аппроксимации экспериментальных кривых для функциональной зависимости «растянутой экспоненты» (2.9) и для формулы кинетики 2-порядка из двух слагаемых (2.10) получилась в среднем 95 % и 98 %, соответственно, а для модели кинетики n -порядка (2.14) – всего 45 %. Несмотря на низкую точность аппроксимации для модели кинетики n -порядка, рассчитанные характерные времена релаксации быстрых и медленных процессов сопоставимы со значениями для времен, полученных другими способами. Вклад от короткоживущих РЦО заметен для времен менее 0,03 с, далее играют роль долгоживущие РЦО.

Для образцов ОВ в свободной намотке более подходящей оказалась аппроксимация с помощью кинетики второго порядка (совпадение расчетной и экспериментальной кривых достигало 98 %). Но при этом оказалось удивительным, что для образцов ОВ в виде БВК и ВК корректно аппроксимировать экспериментальные кривые РНП(t) получилось только с помощью экспоненциальной зависимости, поскольку для кинетики второго порядка показатели степени становились больше 1, что недопускается моделью.

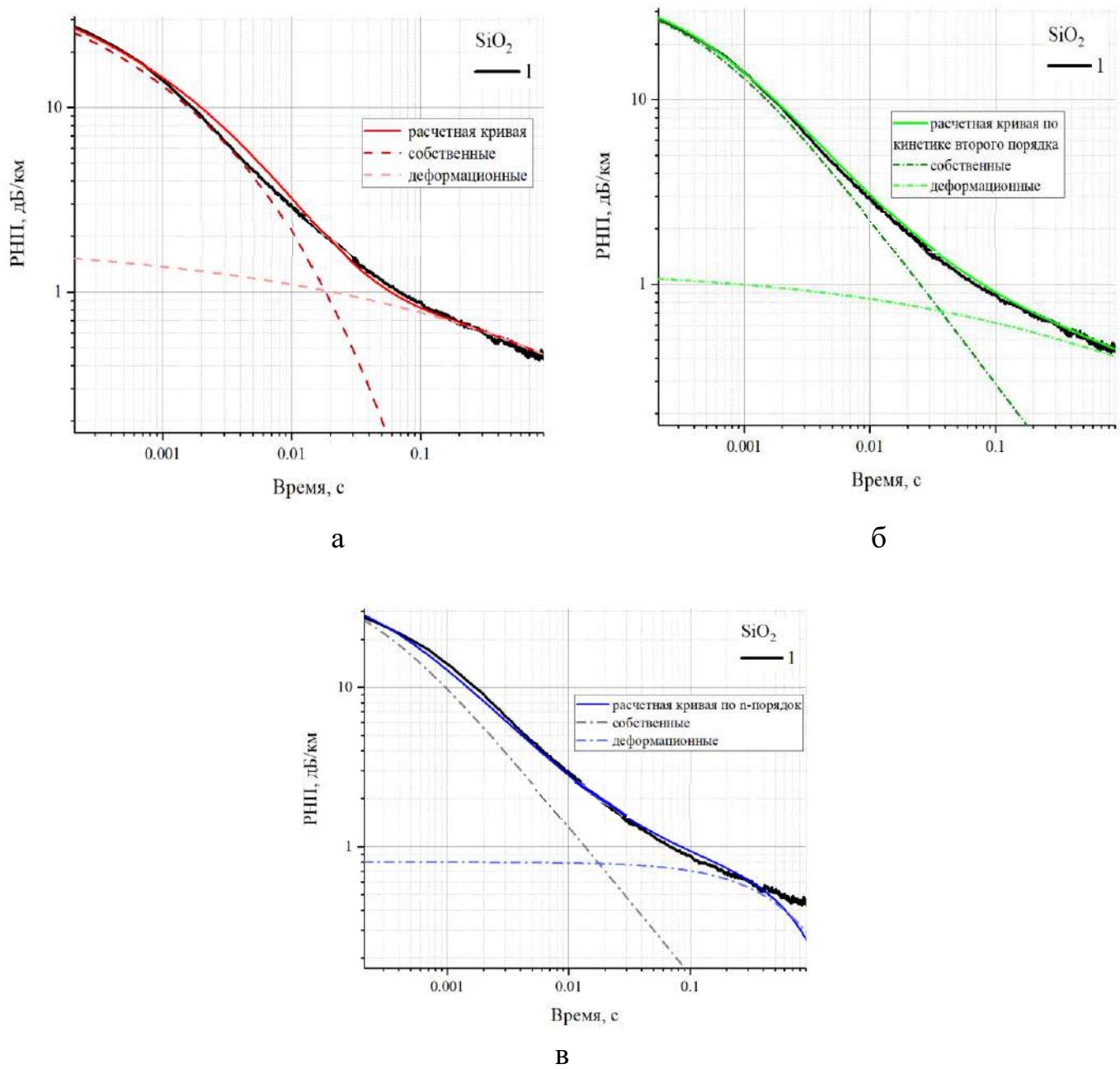


Рисунок 4.11 – Экспериментальная кривая $RNP(t)$ для образца $PSiO_2(1)$ и расчетные кривые: (а) – полученная по формуле (2.9), (б) – полученная по формуле (2.10), (в) – полученная по формуле (2.15) и вклады в релаксацию РНП собственных и деформационных дырок

Анализ полученных результатов аппроксимации показал, что для примененных зависимостей эмпирические коэффициенты получились близки, совпали по порядку величины для моделей кинетики второго порядка и

растянутой экспоненты и имеют отличие не более порядка для модели кинетики n -порядка.

Стоит отметить, что показатели степени для первого и второго варианта зависимостей являются характеристикой своего типа РЦО, и при совпадении времен релаксации у обоих типов РЦО, именно различие показателей степени не позволяло восстановить зависимость РНП одним слагаемым. Показатели степени оказались функционально зависимыми от величины относительной деформации структурной сетки стекла ОВ. Зафиксировано увеличение показателей степени при увеличении относительной деформации (Таблица 4.2, 4.3).

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 (катушек).

На Рисунке 4.12 приведен пример экспериментальной и расчетной зависимостей РНП, а также вклады в РНП от собственных и деформационных дырок для образца ВК из ОВ PSiO_2 . До времени после импульса 0,1 с основной вклад в РНП также вносят короткоживущие РЦО – собственные дырки, доля долгоживущих РЦО (деформационных дырок) невелика и их вклад заметен при времени $\geq 0,1$ с.

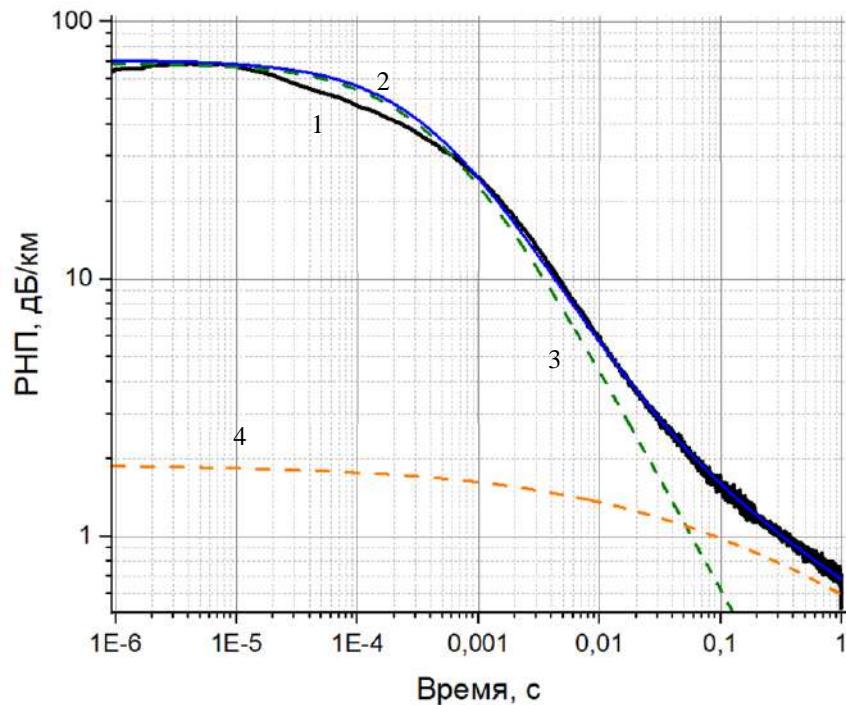


Рисунок 4.12 – Релаксация РНП для образца ВК из ОВ PSiO_2 , кривые: 1 – экспериментальная кривая, 2 – расчетная кривая, 3 – вклад собственных дырок, 4 – вклад деформационных дырок; $D=22$ Гр, $P_0 = 30$ мкВт, 22 °C

Для выявления функциональных зависимостей эмпирических коэффициентов аппроксимации от условий опыта отдельно исследовано влияние дозы в импульсе, температуры, величины входной оптической мощности и уровня напряженно-деформированного состояния структурной сетки стекла ОВ.

4.1.5. Влияние условий опыта на значения эмпирических коэффициентов РНП(t)

4.1.5.1. Доза в импульсе

В исследованиях радиационной стойкости изделий ЭКБ принято различать влияние накопленной дозы и мощности дозы. В отличие от случая непрерывного облучения, в случае импульсных воздействий существующие моделирующие установки не позволяют провести исследования с вариацией мощности дозы в импульсе и при этом фиксации одного значения накопленной дозы. Поскольку не представляется возможным разделить влияние мощности дозы и накопленной дозы, далее в оценке уровня воздействия будем использовать интегральную характеристику – значение дозы в импульсе. С учетом постоянного времени импульса примерно 20 с, вариация дозы в импульсе означает одновременное сонаправленное изменение мощности дозы и накопленной дозы.

Эксперимент по определению влияния дозы в импульсе на РНП(t) проводился для двух видов ОВ (ПGeO₂ и PSiO₂) при фиксации температуры, входной оптической мощности, уровня внешних напряжений (все образцы ОВ были в свободной намотке). Для образцов одной вытяжки ПGeO₂ ($P_0=31$ мкВт, комнатная температура) дозы в импульсе составили 6 Гр, 29 Гр и 650 Гр (Таблица 4.1, Рисунок 4.5, *a*). Для образцов одной вытяжки PSiO₂ ($P_0=31$ мкВт, комнатная температура) дозы в импульсе составили 5 Гр, 22 Гр и 450 Гр (Таблица 4.1, Рисунок 4.6, *a*).

Для удобства анализа эмпирические коэффициенты расчетных РНП(t) для ПGeO₂ и PSiO₂ приведены в Таблице 4.5. Для образцов ПGeO₂ в эту таблицу добавлены значения коэффициентов для БВК и ВК, позволяющие наглядно увидеть различие коэффициентов при близкой дозе за импульс, но изменении уровня напряжений в образце, поэтому приведены расчеты с использованием зависимости (2.9). Пример аппроксимации для ПGeO₂ (2) приведен на

Рисунок 4.13. Для образцов PSiO_2 эмпирические коэффициенты приведены для зависимости (2.10), поскольку эта зависимость точнее аппроксимирует РНП(t) образцов в свободной намотке.

Таблица 4.5. Параметры аппроксимации образцов PGeO_2 и PSiO_2 для разных доз в импульсе

Тип (номер) образца	Доза, Гр	$A_{\text{соб}}$	$\tau_{\text{соб}}, \text{с}$	$\beta_{\text{соб}}$	$A_{\text{деф}}$	$\tau_{\text{деф}}, \text{с}$	$\beta_{\text{деф}}$
$\text{PGeO}_2(1)$	6	36	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,32	1,7	$8 \cdot 10^{-4}$	0,119
$\text{PGeO}_2(2)$	29	200	$1,50 \cdot 10^{-6}$	0,27	12	$9 \cdot 10^{-4}$	0,1
$\text{PGeO}_2(3)$	650	230	$2,50 \cdot 10^{-4}$	0,4	90	0,11	0,135
БВК (4)	20	100	$1,50 \cdot 10^{-5}$	0,4	5,5	$4 \cdot 10^{-3}$	0,2
ВК (5)	20	220	$3,50 \cdot 10^{-4}$	0,35	4	$8 \cdot 10^{-4}$	0,12
Тип (номер) образца	Доза, Гр	$C_{\text{соб}}$	$\tau_{\text{соб}}, \text{с}$	$\alpha_{\text{соб}}$	$C_{\text{деф}}$	$\tau_{\text{деф}}, \text{с}$	$\alpha_{\text{деф}}$
$\text{PSiO}_2(1)$	5	40	$4,50 \cdot 10^{-4}$	0,91	1,2	0,12	0,33
$\text{PSiO}_2(5)$	22	69	$4,50 \cdot 10^{-4}$	0,87	1,9	0,12	0,37
$\text{PSiO}_2(6)$	450	70	$4,50 \cdot 10^{-4}$	0,85	6	0,12	0,28

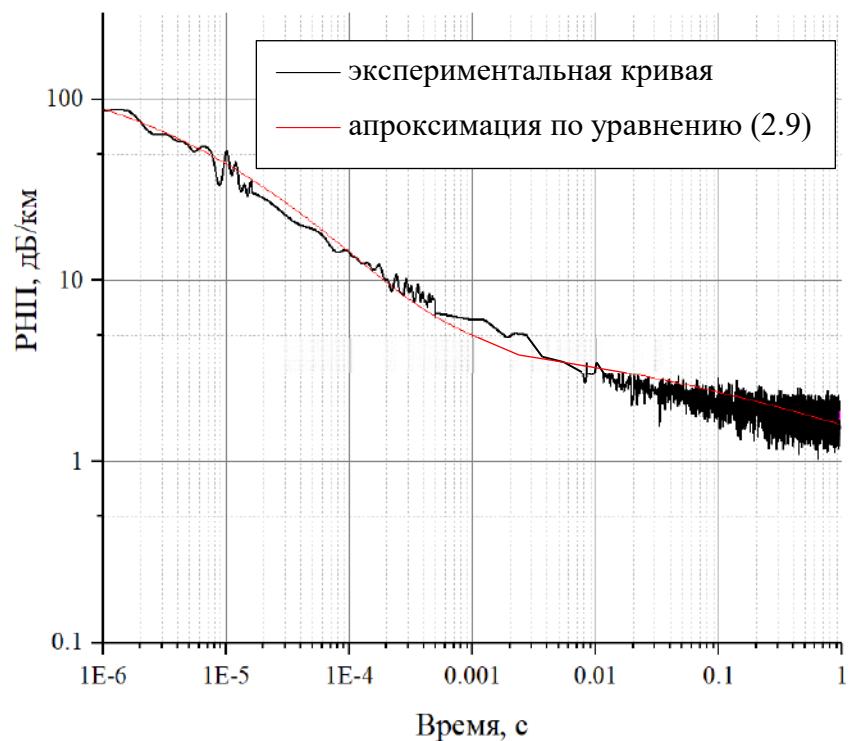


Рисунок 4.13 – Экспериментальная и расчетная кривые РНП для образца ОВ ПGeO₂(2)

Экспериментальные данные РНП ОВ как с германосиликатной, так и с нелегированной кварцевой сердцевинами позволяют считать справедливым монотонный рост максимальных РНП в зависимости от дозы в импульсе D_p (Рисунки 4.5, *a* и 4.6, *a*). До определенного уровня воздействия – 450 Гр и менее (мощность дозы от $5 \cdot 10^8$ Р/с для 5 Гр и до $2 \cdot 10^{11}$ Р/с для 450 Гр), величина дозы в импульсе влияет только на количество возникающих центров окраски, как короткоживущих, так и долгоживущих, поскольку для доз в импульсе 6 Гр и 29 Гр для PGeO_2 и 5 Гр – 450 Гр для PSiO_2 эмпирические коэффициенты существенно отличаются только значениями максимальных РНП в начальный момент времени. Поэтому при использовании приближения квазилинейного роста РНП от дозы в импульсе (для РНП при непрерывном гамма-облучении для таких доз это вполне справедливо) возможно численное прогнозирование РНП для промежуточных доз в импульсе.

При больших дозах в импульсе (650 Гр и более) дополнительно изменяются все эмпирические коэффициенты. У образца PGeO_2 при дозе в импульсе 650 Гр значения τ выросли на два порядка величины и составили $\tau_{\text{соб}} \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$ с, а $\tau_{\text{деф}} \approx 0,11$ с (Таблица 4.5). При меньших дозах в импульсе было $1-1,5 \cdot 10^{-6}$ с и $8-9 \cdot 10^{-4}$ с, соответственно (Таблица 4.5). При этом по порядку величины характерные времена релаксации сравнялись с характерными временами релаксации для образцов PSiO_2 , у которых время жизни собственных и деформационных автолокализованных дырок получилось равным – $4,5 \cdot 10^{-4}$ с и 0,12 с, соответственно (Таблица 4.5). Поскольку у чистого кварцевого стекла компактность решетки выше, чем у легированного германием, то увеличение характерного времени релаксации РЦО позволяет предположить изменение структуры стекла при воздействии ИИ – локальное увеличение компактности решетки стекла и/или создание напряжений в стекле, поскольку для БВК и ВК, в которых уровень напряжений выше по сравнению с образцами в свободной намотке, время релаксации также увеличено (Таблица 4.3) [229].

Количество возникающих короткоживущих РЦО стремится к насыщению при увеличении дозы в импульсе и может быть выражено логарифмической

зависимостью $C_{\text{соб}} = C_{\text{соб}}(\log D_p)$, а для долгоживущих – степенной зависимостью от D_p : $C_{\text{деф}} = C_{\text{деф}}(D_p^\beta)$, поскольку насыщения не наблюдается (Рисунок 4.14). Точками обозначены полученные эмпирические коэффициенты. Для коэффициентов $C_{\text{соб}}$ наблюдается тенденция к насыщению при возрастании дозы в импульсе, и можно сделать предположение о действовании почти всех возможных мест возникновения дефектов этого типа. Для коэффициентов $C_{\text{деф}}$ наблюдается монотонный рост с ростом дозы в импульсе. Также наблюдается слабая тенденция к уменьшению коэффициента $\alpha_{\text{соб}}$ от дозы в импульсе, но при этом $\alpha_{\text{деф}}$ не демонстрирует какой-либо тенденции.

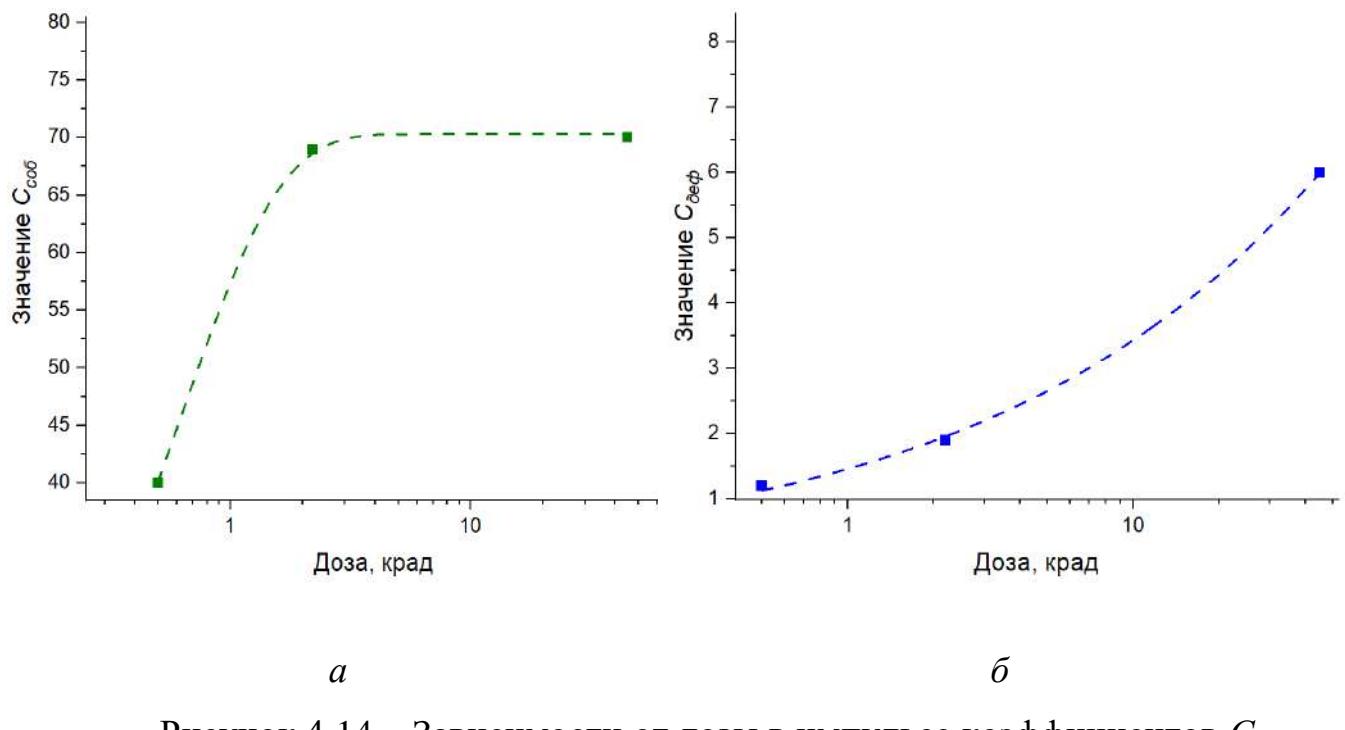


Рисунок 4.14 – Зависимости от дозы в импульсе коэффициентов $C_{\text{соб}}$ (дБ/км) собственных дырок (а) и коэффициентов $C_{\text{деф}}$ (дБ/км) деформационных дырок (б)

Выводы по влиянию величины дозы в импульсе:

- до определенного уровня величина дозы в импульсе влияет на величину максимальных РНП в начальный момент времени, т.е. на количество возникающих короткоживущих и долгоживущих РЦО, не изменяя характеристики самих РЦО;

- для больших доз в импульсе, например, 650 Гр, можно говорить не только о увеличении количества РЦО непосредственно во время и после импульсного воздействия, но и об изменении характеристик РЦО, т.е. об изменении структуры стекла ОВ – локальных изменениях (увеличении) компактности решетки стекла и/или внесении дополнительных внутренних напряжений;

- зависимость количества, возникающих короткоживущих РЦО от дозы в импульсе, является логарифмической (поскольку демонстрирует тенденцию к насыщению), а долгоживущих – степенной.

4.1.5.2. Температура эксперимента

Исследование влияния температуры проводилось при одном уровне входной оптической мощности (31 мкВт) и дозе в импульсе ~20 Гр на четырех идентичных образцах PSiO_2 (Таблица 4.1). Экспериментальные кривые РНП приведены на Рисунке 4.6, г. Температура в опыте и коэффициенты аппроксимации приведены в Таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Эмпирические коэффициенты PSiO_2 при различных температурах ($P_0=31$ мкВт, $D\sim 2$ Гр)

Образец	$T, ^\circ\text{C}$	$A_{\text{соб}}$	$A_{\text{деф}}$	$\tau_{\text{соб}}, \text{с}$	$\tau_{\text{деф}}, \text{с}$	β_1	β_2
$\text{PSiO}_2(7)$	-56	120	8	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,400	0,40	0,35
$\text{PSiO}_2(8)$	25	90	3	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,200	0,33	0,25
$\text{PSiO}_2(9)$	60	120	4	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,020	0,30	0,19
$\text{PSiO}_2(10)$	110	130	3	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,008	0,25	0,14

Полученные результаты (Таблица 4.6) указывают на то, что изменение температуры в опыте, в первую очередь, приводит к изменению времён релаксации

РЦО обоих типов, не затрагивая существенно остальные составляющие. Для обоих типов дефектов зависимость характерного времени релаксации РЦО от температуры в опыте удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией $y = 1,1 \cdot \exp^{-0,03x}$ (Рисунок 4.15).

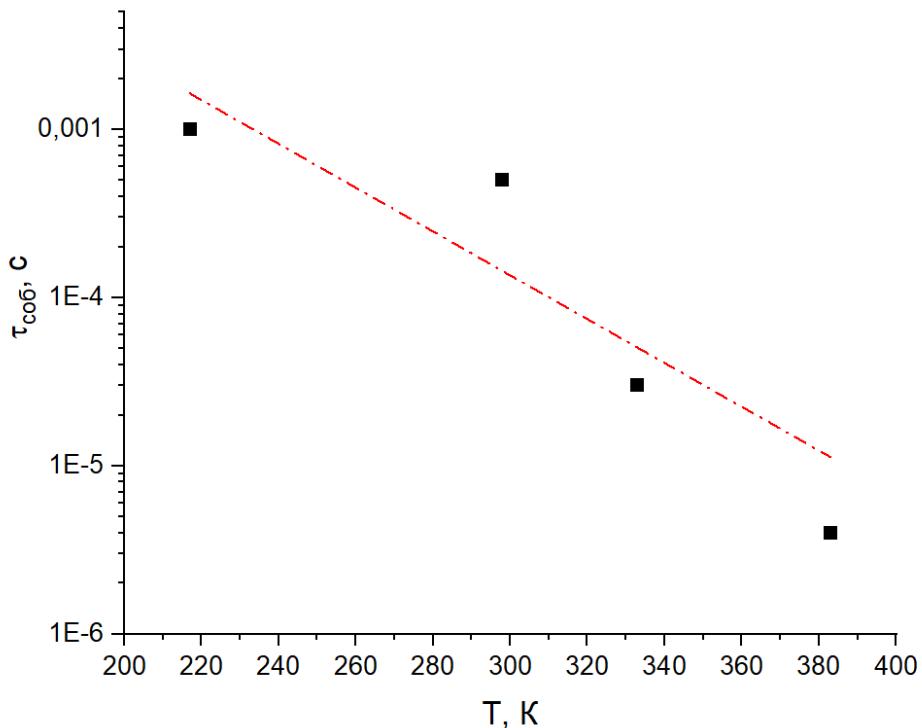


Рисунок 4.15 – Зависимость $\tau_{соб}$ для PSiO_2 от температуры, доза в импульсе 20 Гр, $P_0 = 31$ мкВт

4.1.5.3. Уровень входящей оптической мощности

Интерес к эффекту фотообесцвечивания в ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной из-за его влияния на РНП ОВ в реальных условиях эксплуатации достаточно стабилен [222, 224]. При этом до сих пор не было предложено аналитической зависимости, которая позволяет прогнозировать уровень РНП в зависимости от величины входящей оптической мощности P_0 .

Для построения зависимостей эмпирических коэффициентов расчетных $\text{РНП}(t)$ от величины P_0 в одном опыте использовали четыре образца PSiO_2 (при

этом образцы были компактно размещены в поле облучения), в которых величина P_0 ($\lambda=1550$ нм) составила 0,04 Вт, 4 мВт, 0,3 мВт и 31 мкВт при дозе в импульсе 5 Гр (Таблица 4.1).

Экспериментальные данные аппроксимировались по формуле (2.10), эмпирические коэффициенты аппроксимационных кривых РНП(t) приведены в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Эмпирические коэффициенты PSiO_2 в зависимости от величины входящей оптической мощности

Образец	P_0 , мкВт	$\tau_{\text{соб}}$, с	$\tau_{\text{деф}}$, с	$C_{\text{соб}}$, дБ/км	$C_{\text{деф}}$, дБ/км	$\alpha_{\text{соб}}$	$\alpha_{\text{деф}}$
$\text{PSiO}_2(0)$	10	$4,00 \cdot 10^{-4}$	0,12	65	1,4	0,75	0,31
$\text{PSiO}_2(1)$	31	$4,50 \cdot 10^{-4}$	0,12	40	1,2	0,91	0,33
$\text{PSiO}_2(2)$	$3 \cdot 10^2$	$6,50 \cdot 10^{-5}$	0,14	55	0,92	0,91	0,38
$\text{PSiO}_2(3)$	$4 \cdot 10^3$	$7,10 \cdot 10^{-6}$	0,12	57	1,28	0,83	0,37
$\text{PSiO}_2(4)$	$4 \cdot 10^4$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	0,08	78	1,3	0,81	0,38

Результаты опыта показали, что в первую очередь величина P_0 определяет время жизни собственных дырок – при увеличении P_0 с 31 мкВт до 0,4 Вт время жизни уменьшилось с 450 мкс до 2,2 мкс. Изменения остальных коэффициентов менее значимы по сравнению с $\tau_{\text{соб}}$.

Экспериментальная зависимость $\tau_{\text{соб}}(P_0)$ приведена на Рисунке 4.16.

Зависимость эмпирических коэффициентов $\tau_{\text{соб}}$ от величины входящей оптической мощности P_0 вполне удовлетворительно аппроксимируется функцией «растянутой» кинетики второго порядка:

$$\tau_{\text{соб}} = \frac{\tau_0}{1 + \left(\frac{P_0}{\zeta}\right)^{\alpha_{\text{соб}}}}, \quad (4.3)$$

где τ_0 – эмпирический коэффициент, время жизни РЦО при отсутствии входящего сигнала при $P_0=0$;

ζ – эмпирический коэффициент, характерная мощность входящего оптического излучения.

Аппроксимация расчетных данных $\tau_{\text{соб}}(P_0)$ с использованием зависимости (4.3) описывается формулой

$$\tau_{\text{соб}} = \frac{0,12}{1 + \left(\frac{P_0}{0,01}\right)^{0,85}} \quad (4.4)$$

и приведена на Рисунке 4.16, коэффициент детерминации 0,86.

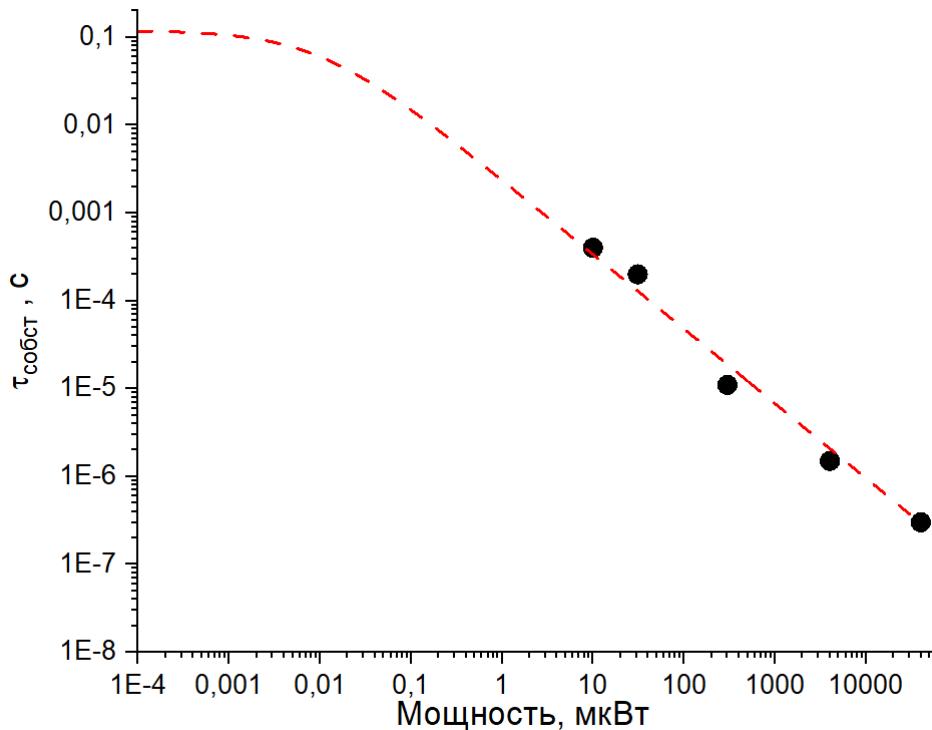


Рисунок 4.16 – Зависимость времени жизни собственных дырок PSiO_2 от величины входной оптической мощности; • – эксперимент, красная линия – аппроксимация уравнением «растянутой» кинетики 2-порядка (4.4)

Эта зависимость позволяет спрогнозировать время жизни собственных дырок в образце при пассивном облучении. Для исследуемых образцов и доз в импульсе время жизни при пассивном облучении составит $\tau_{\text{соб}} = 0,12$ с, что на пять порядков больше, чем для случая входной оптической мощности в несколько милливатт.

Ранее в работе [A12] эти же расчетные данные $\tau_{\text{соб}}(P_0)$ были аппроксимированы экспоненциальной зависимостью и была получена

заниженная оценка для $\tau_{\text{соб}}$ при пассивном облучении $\sim 2,3 \cdot 10^{-3}$ с. При этом коэффициент детерминации был ниже, чем при аппроксимации по формуле (4.3), поэтому вышеприведённая оценка более адекватна.

Поскольку для короткоживущих РЦО величина P_0 определяет время жизни, так же, как и температура эксперимента, то можно предположить, что величина P_0 в данном случае является аналогом температуры, ускоряющим скорость реакции. Тогда можно по аналогии с зависимостью Арениуса оценить мощность энергии активации. На графике (Рисунок 4.17) приведены значения $\ln(k)$ от $1/P_{\text{norm}0}$. Проведя линейную аппроксимацию, получаем что оптическая мощность энергии активации процесса распада собственных дефектов для данных образцов ОВ составляет ~ 100 мкВт (~ 77 кДж/моль).

Можно предположить, что увеличение мощности оптического излучения при постоянной величине кванта поглощенной энергии увеличивает вероятность поглощения энергии РЦО и преодоления потенциального барьера для распада РЦО. Энергия излучения с длиной волны 1,55 мкм примерно 0,8 эВ, а фоточувствительные полосы поглощения в PSiO_2 расположены в энергетическом спектре на 0,95 эВ и 1,12 эВ [A7].

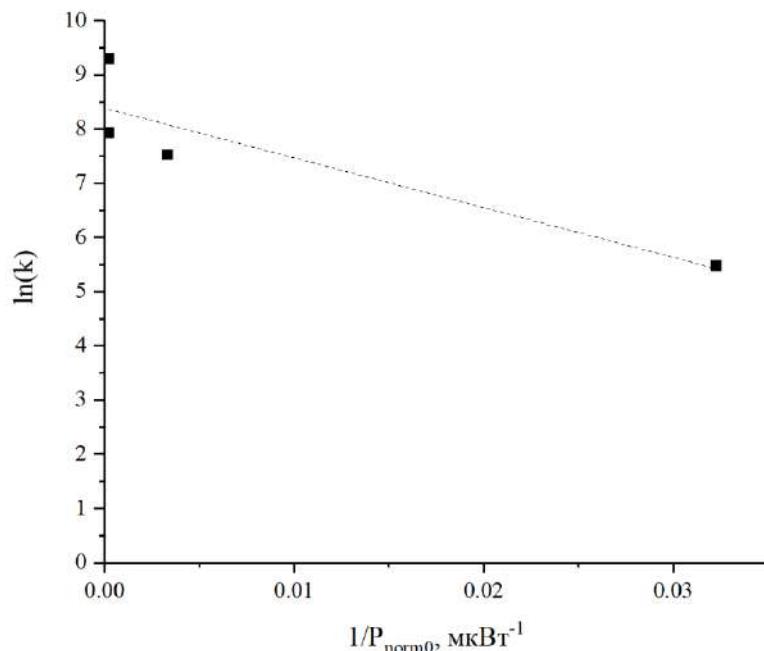


Рисунок 4.17 – Зависимость натурального логарифма константы скорости реакции от обратной оптической мощности

4.1.5.4. Уровень напряженно-деформированного состояния ОВ

В данном исследовании впервые проанализированы зависимости характерных времен релаксации $\tau_{\text{соб}}$, $\tau_{\text{деф}}$ и энергии активации E_a РЦО собственных и деформационных дырок от величины сдвига частоты Бриллюэна Δf_b , и продольной относительной деформации $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ сетки стекла сердцевины ОВ.

В результате анализа открытых источников информации не найдено данных по исследованию влияния уровня напряженно-деформированного состояния ОВ на РНП. Данные по РНП при непрерывном облучении ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной для образцов PSiO_2 [A5] показали уровень РНП выше, чем ISiO_2 , изготовленных из одной преформы, что логично увязывается с наличием напряжений в сетке стекла из-за напрягающих стержней. Поэтому и при импульсном воздействии можно было ожидать повышенного уровня РНП в образцах PSiO_2 . При этом неясно как наличие напряжений скажется на релаксации РНП в образцах ОВ.

Для определения, как наличие напрягающих стержней влияет на поведение РНП после импульсного воздействия, сравнили эмпирические коэффициенты РНП(t) образца ISiO_2 из работы [227] с образцом $\text{PSiO}_2(5)$. Образцы получили примерно равные дозы в импульсе (22 Гр для образца PSiO_2 и 20 Гр для образца ISiO_2) при одинаковой входящей оптической мощности $P_0=31$ мкВт. На Рисунке 4.18 показаны экспериментальная и расчетная зависимости РНП(t) для образца $\text{PSiO}_2(5)$, включая составляющие РНП(t) для собственных и деформационных дырок. Вопреки ожиданиям оказалось, что РНП в начальный момент времени после воздействия у ISiO_2 и PSiO_2 примерно одинаковы, так же, как и соотношение между собственными и деформационными дырками, т.е. короткоживущими и долгоживущими РЦО (Таблица 4.8).

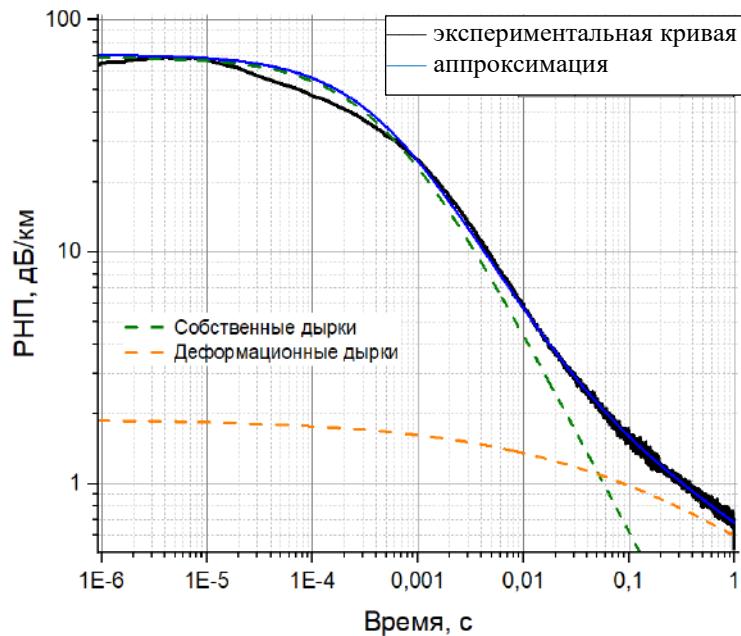


Рисунок 4.18 – Вклады в релаксацию РНП собственных и деформационных дырок для образца $\text{PSiO}_2(5)$, доза в импульсе 22 Гр

Таблица 4.8 – Эмпирические коэффициенты для функциональной зависимости (2.10) для образцов PSiO_2 и ISiO_2 , $P_0=31$ мкВт

Эмпирические коэффициенты	PSiO_2 , 22 Гр	ISiO_2 , 18 Гр [227]
$C_{\text{соб}}$, дБ/км	69	91
$\tau_{\text{соб}}$, с	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{\text{соб}}$	0,87	0,66
$C_{\text{деф}}$, дБ/км	1,90	2,26
$\tau_{\text{деф}}$, с	0,12	1,65
$\alpha_{\text{деф}}$	0,37	0,46

Отличия оказались в характерных временах релаксации РЦО (Таблица 4.8). Длительность процесса релаксации собственных дырок у образца PSiO_2 значительно больше, чем у ISiO_2 – $\tau_{\text{соб}}$ у образца PSiO_2 на два порядка больше, чем у ISiO_2 ($8,5 \cdot 10^{-6}$ с $4,5 \cdot 10^{-4}$ с, соответственно). Это согласуется с

замедленной, по сравнению с ISiO_2 , релаксацией РНП в PSiO_2 (Рисунок 4.1). Для деформационных дырок наоборот, $\tau_{\text{деф}} \text{PSiO}_2$ на порядок величины меньше, чем ISiO_2 – 0,12 с и 1,65 с соответственно. Поэтому, начиная с определенного времени, РНП(t) образцов PSiO_2 меньше, чем ISiO_2 . При заданных максимально допустимых значениях РНП в ВОИД, это позволяет получить меньшее время неработоспособности, а значит и снизить погрешность определения заданных параметров.

Изотропные и анизотропные ОВ с одним составом сердцевины при одинаковых внешних условиях различаются уровнем напряженно-деформированного состояния структурной сетки стекла сердцевины. Это различие фиксируется разницей в частоте сдвига частоты Брюллиэна (Δf_b): для ISiO_2 $\Delta f_b = 11,047$ ГГц, а для PSiO_2 $\Delta f_b = 11,075$ ГГц, соответственно. Разница в определении Δf_b значительно выше погрешности прибора (± 10 МГц), что позволяет считать разницу значимой.

С учетом экспериментально определенного коэффициента пропорциональности $C_e = 47,2$ ГГц между Δf_b и изменением относительной продольной деформации $\Delta \varepsilon_{ZZ}$, согласующегося с литературными данными [5], получаем разницу в относительной продольной деформации между ISiO_2 и PSiO_2 $\Delta \varepsilon_{ZZ} = 0,6 \cdot 10^{-3}$. Это означает, что увеличение относительной продольной деформации в PSiO_2 привело к увеличению $\tau_{\text{соб}}$ в почти 52 раза и к уменьшению $\tau_{\text{деф}}$ на 93 %.

Если предположение о том, что время жизни собственных и деформационных дырок связано с уровнем напряженно-деформированного состояния ОВ верно, то оно должно выполняться для ОВ для более широкого диапазона значений Δf_b . Поэтому провели опыты по одновременному облучению ОВ типа «Панда» с германосиликатной сердцевиной в виде свободной намотки, БВК и ВК ($\text{PGeO}_2(2)$, БВК (4), ВК(5)), у которых разница $\Delta \varepsilon_{ZZ}$ с образцом PGeO_2 составила 0,0032 для образца БВК и 0,0091 для образца ВК. Экспериментальные результаты приведены на Рисунке 4.5, б.

Результаты опыта подтвердили справедливость предположения – эмпирические коэффициенты аппроксимации РНП(t) существенно различны (Таблица 4.9). С ростом величины продольной деформации тенденцию к увеличению показали все коэффициенты, кроме $\tau_{\text{деф}}$, которые уменьшаются с ее ростом. Графически зависимости $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ от величины $\Delta\varepsilon_{ZZ}$ приведены на Рисунке 4.19.

Таблица 4.9 – Сравнение эмпирических коэффициентов для функциональной зависимости (2.9) при различных НДС ОВ с германосиликатной сердцевиной

Образец	$A_{\text{соб}}$, дБ/км	$\tau_{\text{соб}}$, с	$\beta_{\text{соб}}$	$A_{\text{деф}}$, дБ/км	$\tau_{\text{деф}}$, с	$\beta_{\text{деф}}$
ПGeO ₂ (2)	200	$1,50 \cdot 10^{-6}$	0,27	12	$9 \cdot 10^{-3}$	0,1
БВК (4)	100	$1,50 \cdot 10^{-5}$	0,4	5,5	$4 \cdot 10^{-3}$	0,2
ВК (5)	220	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,35	4	$8 \cdot 10^{-4}$	0,12

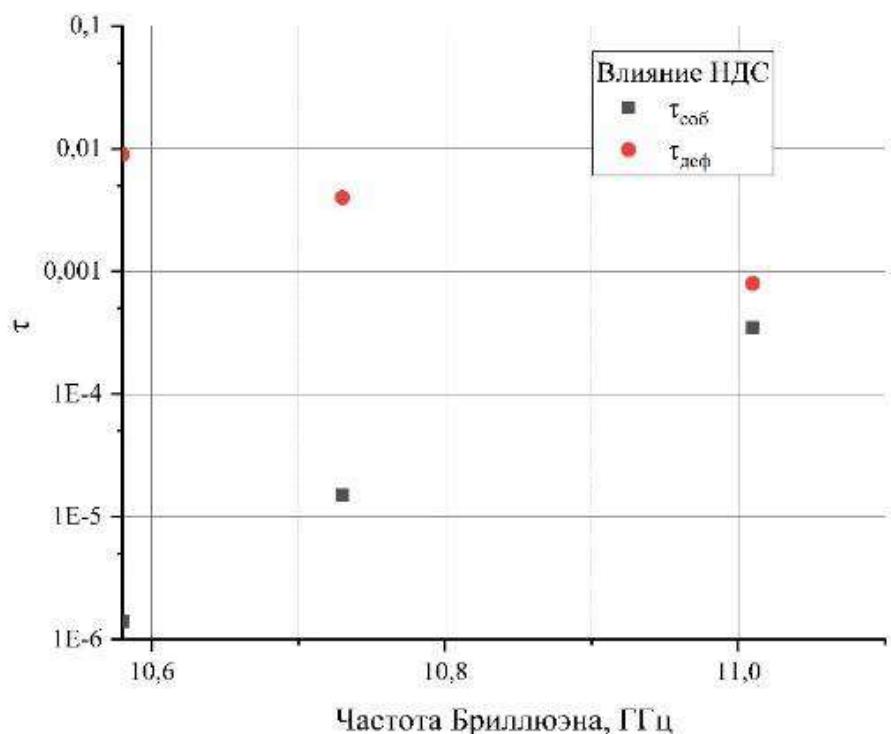


Рисунок 4.19 – Зависимость $\tau_{\text{соб}}$ (■) и $\tau_{\text{деф}}$ (●) от Δf_b для образцов ПGeO₂ в виде свободной намотки (10,58 ГГц), БВК (10,72 ГГц) и ВК (11,1 ГГц)

Повторение опыта с идентичными образцами при температуре минус 60 °С позволило дополнительно определить энергию активации E_a для собственных и деформационных дырок. Оказалось, что с увеличением Δf_b (а значит и $\Delta \varepsilon_{zz}$) значение E_a увеличивается (Рисунок 4.20). При этом с увеличением Δf_b уменьшается разница между значениями E_a для собственных и деформационных дырок.

Для обобщения полученных результатов построили зависимости $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ от относительной деформации, определенной через Δf_b , для всех исследованных образцов в условиях комнатной температуры и одинаковой величины $P_0 = 31$ мкВт (Рисунок 4.21). Возрастание относительной деформации привело к увеличению $\tau_{\text{соб}}$ и незначительному уменьшению $\tau_{\text{деф}}$ как для ОВ с германосиликатной, так и с нелегированной сердцевинами.

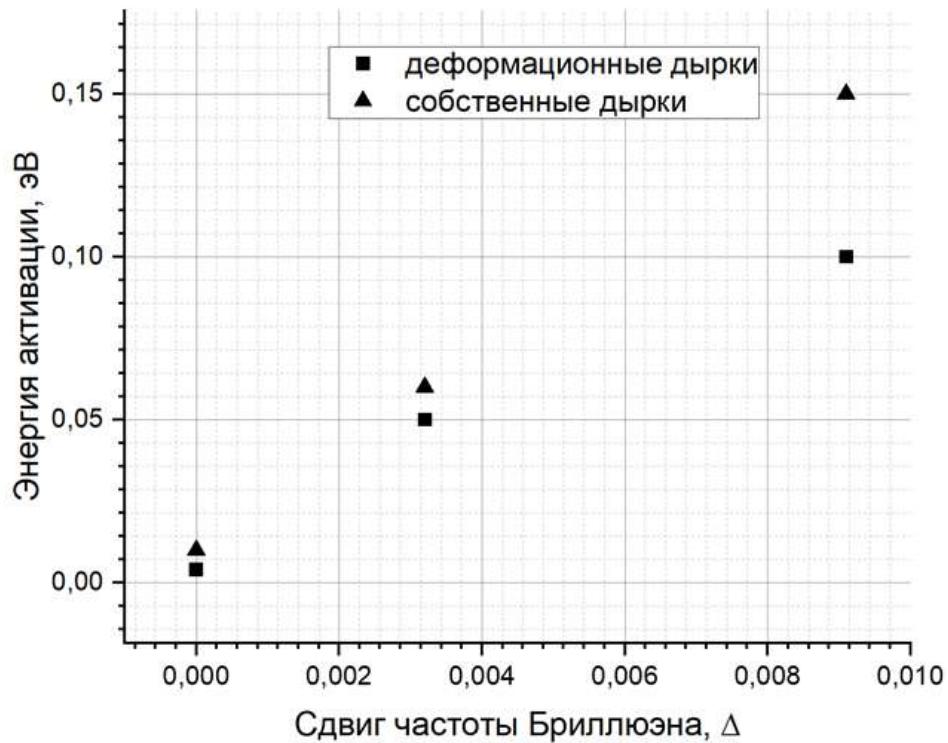


Рисунок 4.20 – Зависимость энергии активации для ОВ с германосиликатной сердцевиной от Δf_b

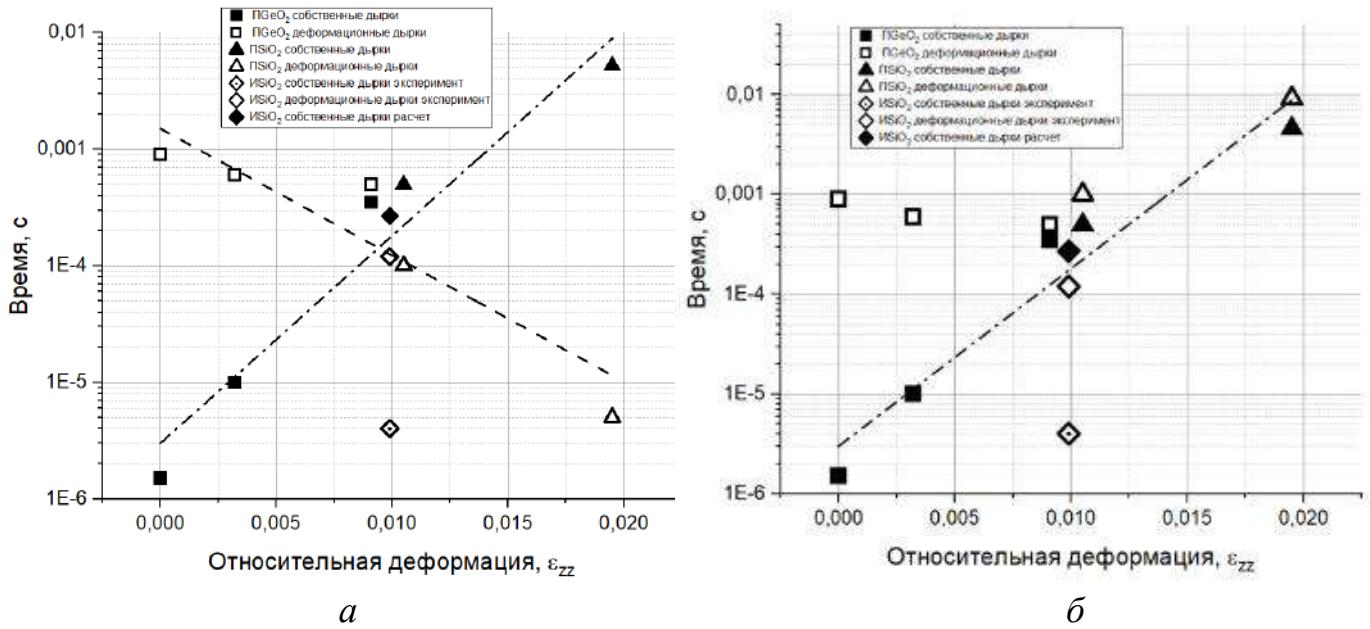


Рисунок 4.21 – Величины $\tau_{\text{соб}}$ (а) и $\tau_{\text{деф}}$ (б) для всех исследуемых образцов в зависимости от относительной продольной деформации, PGeO_2 , БВК(PGeO_2): ВК(PGeO_2) – закрашенные квадраты для собственных дырок и пустые квадраты для деформационных, ISiO_2 – ромб и точка, PSiO_2 , ВК(PSiO_2) – закрашенные и пустые треугольники, соответственно

Поскольку для части образцов ISiO_2 экспериментальные результаты РНП(t) имелись только при величине $P_0 = 5 \text{ мВт}$ – на Рисунке 4.21 отмечен ромбом с точкой, поэтому потребовался пересчет $\tau_{\text{соб}}$ времен жизни с учетом (4.7). На Рисунке 4.21 эта точка отмечена черным ромбом. С учетом этой поправки точки $\tau_{\text{соб}}$ для ISiO_2 легли в общую линию аппроксимационной зависимости (линейную в таких координатах), что свидетельствует в пользу неслучайного характера полученной зависимости.

Если для характеристики собственных дырок расчетные коэффициенты $\tau_{\text{соб}}$ однозначно укладываются в экспоненциальную зависимость $A \cdot \exp(B \cdot x)$, где $A = 3 \cdot 10^{-6}$, $B = 410$, то с деформационными дырками ситуация оказалась сложнее. При сопоставлении зависимостей РНП(t) (Рисунок 4.21) заметно ускорение релаксации при временах более 0,01 с увеличением значения ε . При этом для образцов PSiO_2 в свободной намотке и в виде ВК оказались возможны два

варианта аппроксимации, причем с практически одинаковым коэффициентом детерминации более 0,98 (в Таблице 4.2 значения второго варианта указаны в скобках). Оба варианта приведены на Рисунке 4.21, под буквой «*a*» вариант, при котором $\tau_{\text{деф}}$ уменьшаются с ростом относительной деформации, и это также укладывается в экспоненциальную зависимость, под буквой «*b*» вариант, при котором функциональная зависимость имеет экстремум при переходе от образцов с германосиликатной сердцевиной к образцам с нелегированной кварцевой сердцевиной, и значения $\tau_{\text{деф}}$ начинают возрастать и становятся несколько больше соответствующих значений $\tau_{\text{соб}}$.

Для образцов с промежуточным значением ε спрогнозировать РНП(*t*) получится с использованием любого из вариантов аппроксимации. Но для того, чтобы выяснить, какие именно РЦО и каким образом они определяют зависимость РНП(*t*), требуется проведение экспериментов с фиксацией спектра пропускания образцов в широком диапазоне длин волн от 200 нм до более 2 мкм и достаточным времененным разрешением. К сожалению, возможностей для проведения такого опыта пока не представилось, поскольку для такого диапазона длин волн требуется использование одновременно трех спектроанализаторов (со следующими диапазонами длин волн – 200-900 нм, 900-1700 нм и 1700-2200 нм) с хорошим времененным разрешением, желательно лучше, чем 0,01 мс.

К полученным зависимостям $\tau_{\text{соб}}(\Delta\varepsilon_{ZZ})$ и $\tau_{\text{деф}}(\Delta\varepsilon_{ZZ})$ следует относиться аккуратно. В нашем случае сопоставление ОВ с разным составом сердцевины было корректным, поскольку образцы ОВ изготовлены на одной технологической базе и имеют примерно одинаковый уровень посторонних примесей типа ОН-групп, хлора и других примесей. Зависимости отражают влияние компактности решетки стекла на времена жизни собственных и деформационных дырок, которые мы стали так называть по примеру других авторов, или точнее сказать групп РЦО, характеризующимися двумя разными наборами эмпирических коэффициентов – характерными временами релаксации и показателями степени. При использовании различных технологий для

изготовления ОВ, характерные времена релаксации могут иметь другие зависимости.

При этом основной вывод, который следует из этих экспериментов – величина относительной деформации является одним из важнейших факторов, определяющих зависимость РНП(t).

4.1.5.5. Построение функциональной зависимости РНП(t)

Объединяя полученные функциональные зависимости эмпирических коэффициентов РНП(t) от условий опыта, с учетом полученного результата корректности восстановления РНП(t) образцов БВК и ВК только с помощью растянутых экспонент, предложена функциональная зависимость РНП(t) образцов ОВ в зависимости от величин входной оптической мощности P_0 , уровня относительной деформации ε для конкретной температуры и дозы в импульсе до $D_p = 450$ Гр:

$$\text{РНП}(t) = A_{\text{соб}}(\log D_p, \varepsilon) \cdot e^{-(\frac{t}{\tau_{\text{соб}}})^{\beta_{\text{соб}}(\varepsilon)}} + A_{\text{деф}}(D_p^\alpha, \varepsilon) \cdot e^{-(\frac{t}{\tau_{\text{деф}}(\varepsilon)})^{\beta_{\text{деф}}(\varepsilon)}}, \quad (4.4)$$

$$\text{где } \tau_{\text{соб}} = \frac{\tau_0(\varepsilon)}{1 + (\frac{P_0}{\zeta})^{\alpha_{\text{соб}}}},$$

α – показатель степени,

P_0 входная оптическая мощность,

$\tau_0(\varepsilon)$ – характерное время жизни собственных дырок при $P_0=0$, функционально зависящее от величины ε .

Зависимость от температуры эксперимента для всех эмпирических коэффициентов предположительно может носить экспоненциальный характер.

Для более больших доз в импульсе следует учитывать зависимость всех эмпирических коэффициентов от дозы в импульсе.

4.2. Влияние импульсного гамма-нейтронного излучения

В разделе 4.2 представлены результаты исследований, которые позволили провести сравнение процессов релаксации РНП(t) образцов ОВ при воздействии импульсных фотонного и гамма-нейтронного излучений. Целью исследования являлось определение вклада нейтронного излучения в реакцию ОВ в зависимости от состава сердцевины и уровня напряженно-деформированного состояния. В экспериментах использовали образцы PGeO_2 (величина двулучепреломления $7,3 \cdot 10^{-3}$) и PSiO_2 (величина двулучепреломления $6,0 \cdot 10^{-3}$) в виде свободной намотки и ВК. Импульс фотонов формировался на установке ЛИУ-30М, импульс гамма-нейтронного излучения – на установке БР-1М. Доза в импульсе по гамма-излучению в обоих случаях была равной и составляла 20 Гр.

Образцы PSiO_2 в свободной намотке

С помощью относительно быстрого спектроанализатора со спектральным разрешением 3 нм и временным разрешением 1 мс зафиксированы спектры пропускания образцов PSiO_2 во время и после воздействия как фотонного, так и гамма-нейтронного излучений. Спектры непосредственно после воздействия, а также выборочные спектры через 1 с, 3 с, 10 с и 2 мин после воздействия приведены на Рисунках 4.2, б и 4.22).

В отличие от случая фотонного излучения, где в момент воздействия РНП на всех длинах волн диапазона 900 нм – 1600 нм максимальны в момент воздействия, а затем монотонно снижаются, для случая импульсного гамма-нейтронного воздействия впервые удалось зафиксировать перераспределение РНП по длинам волн из длинноволновой области в коротковолновую область. В течение нескольких секунд после воздействия РНП в коротковолновой области возрастают, достигают максимума, и только затем снижаются (Рисунок 4.22). Обратимое перераспределение РНП после окончания воздействия, наиболее вероятно, связано с обратимой перестройкой структуры стекла.

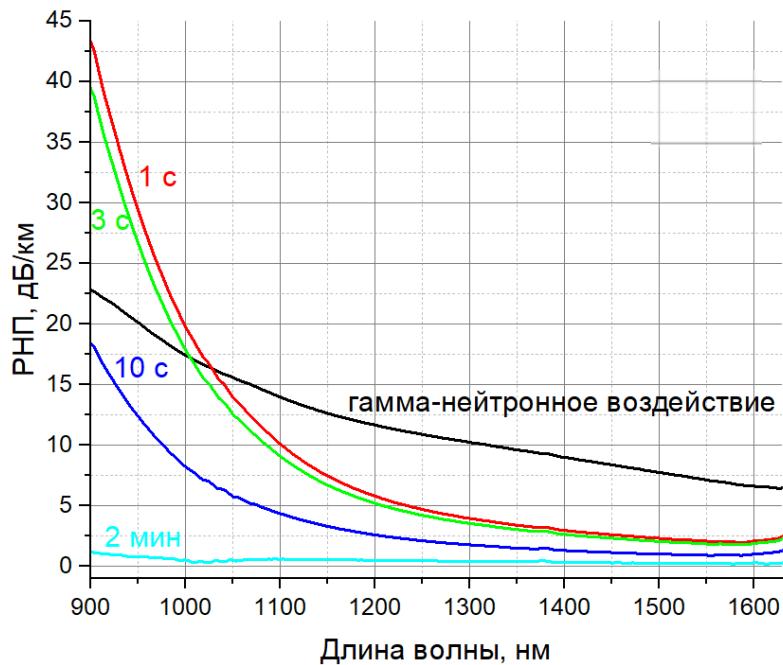


Рисунок 4.22 – РНП ПSiO₂ в спектральном диапазоне длин волн для времен непосредственно после гамма-нейтронного воздействия, а также через 1 с, 3 с, 10 с и 2 мин после воздействия

Следует обратить внимание, что уровень РНП в момент воздействия на длине волны 1550 нм в случае гамма-нейтронного излучения существенно выше, чем в случае фотонного (5,5 дБ/км и 1,7 дБ/км, соответственно). Учитывая, что в опытах исследовались соседние участки ОВ из одной вытяжки, разницу в РНП следует отнести к вкладу в РНП потока нейтронов.

Также в случае гамма-нейтронного воздействия сразу после воздействия РНП коротковолновой области ($\lambda < 900$ нм) меньше, а в области длин волн от 900 нм до 1600 нм больше, чем для случая фотонного излучения. К сожалению, корректное разложение спектра РНП на составляющие выполнить невозможно из-за отсутствия спектров в коротковолновой и длинноволновой области. Возможно, что во время воздействия мы наблюдаем возникновение полосы на 1 эВ, которая затем релаксирует.

Такой отклик можно связать с внесением дополнительных деформаций в структурную сетку стекла при воздействии потока нейтронов, поскольку РЦО в

длинноволновой области вызывается колебаниями фононной подрешетки, которая напрямую связана с деформациями структурной сетки стекла [222, 224]. На правильность этого предположения также указывает то, 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 ($\tau_{\text{соб}} = 10^{-5}$ с и $\tau_{\text{деф}} = 0,1$ с для импульса фотонов и $\tau_{\text{соб}} = 5 \cdot 10^{-3}$ с и $\tau_{\text{деф}} = 0,01$ с после гамма-нейтронного воздействия), так же, как и при внешнем внесении деформаций в ОВ. На Рисунках 4.21 и 4.23 визуально заметна схожесть радиационного отклика образцов ОВ в свободной намотке после гамма-нейтронного воздействия и образцов ОВ в виде ВК после фотонного воздействия.

Различие в опытах состоит не только в наличии или отсутствии импульсного потока нейтронов, но и во времени импульса: 70 мкс для гамма-нейтронного воздействия и 20 нс для фотонного. Как уже показано на примере непрерывного воздействия, скорость релаксации РНП зависит от мощности дозы. Поэтому, вполне возможно, что при воздействии фотонного излучения на малых временах после импульса происходят схожие процессы перестойки решетки стекла, но для их фиксации необходим еще более быстрый спектроанализатор, либо образец ОВ с высоким уровнем относительной продольной деформации.

Образцы $PSiO_2$ в виде ВК

Повышение уровня напряженно-деформированного состояния ОВ при изготовлении ВК приводит к еще более значимому замедлению релаксации короткоживущих РЦО по сравнению со свободной намоткой.

На Рисунке 4.24 приведены графики зависимости РНП(t) для двух ВК из соседних участков вытяжки. В первом случае зависимость РНП(t) после воздействия импульса фотонов, во втором случае после воздействия импульса потока гамма-излучения и нейтронов. Доза поглощенного гамма-излучения в обоих опытах сопоставима (1,9 крад и 2,2 крад, соответственно), величина потока нейтронов составила $2,2 \cdot 10^{13}$ н/см². После воздействия импульса фотонов

РНП достигает уровня 6 дБ/км через 0,02 с, а после гамма-нейтронного воздействия – через 0,2 с.

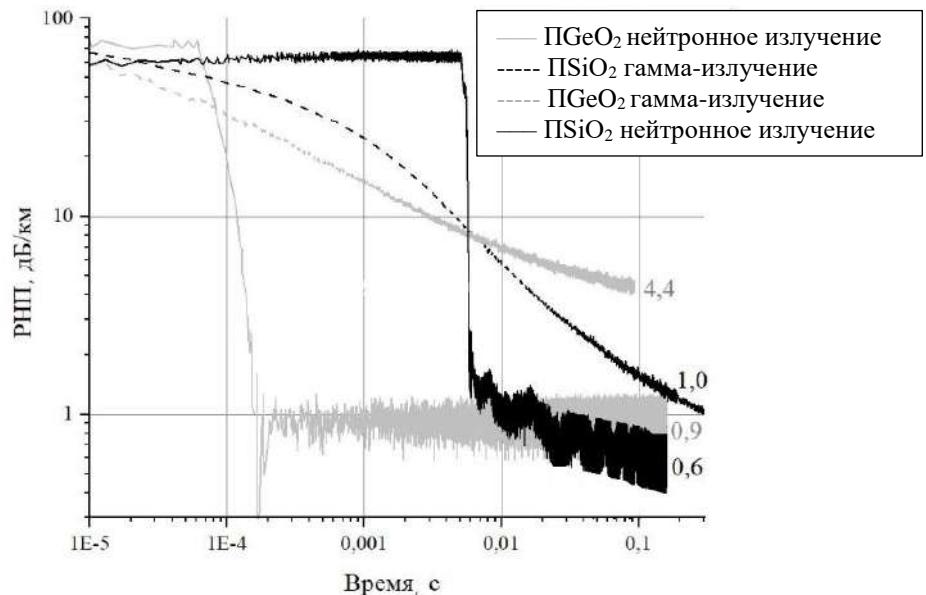


Рисунок 4.23 – Релаксация РНП ($\lambda=1550$ нм) при воздействии импульсного фотонного излучения (доза в импульсе 20 Гр) и гамма-нейтронного излучения (доза в импульсе 20 Гр, поток нейтронов $1 \cdot 10^{13}$ н/см²) для ПSiO₂ и ПGeO₂

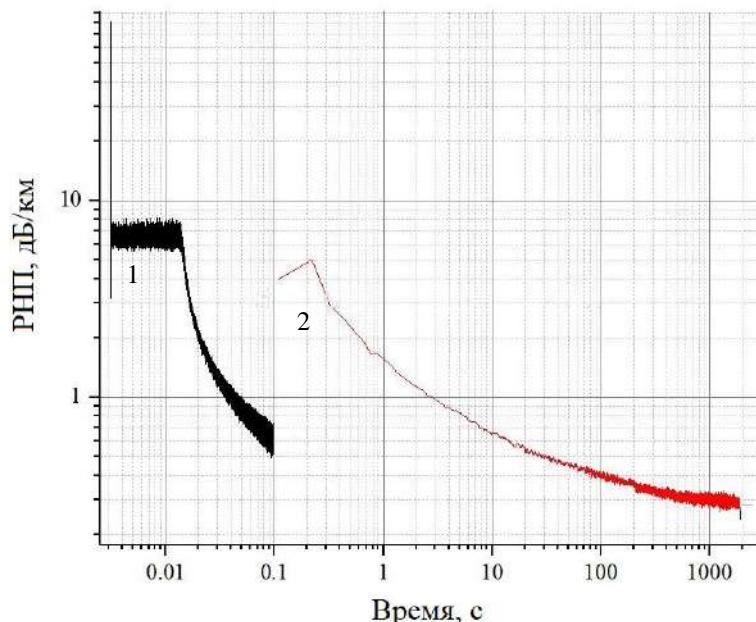


Рисунок 4.24 – Зависимость РНП для образцов ПSiO₂ в виде ВК с одинаковыми характеристиками по двулучепреломлению в ОВ и величине относительной деформации: 1 – РНП после импульса фотонов время импульса 20 нс, доза в импульсе 1,9 крад, остаточные потери 0 дБ/км; 2 – РНП после импульса нейтронов флюенс $2,2 \cdot 10^{13}$ н/см², время импульса 60 мкс (флакс 10^{19} см⁻²с⁻¹), сопутствующая доза гамма-излучения 2,2 крад

Для относительно полной релаксации РНП после воздействия импульса фотонов потребовалось примерно 100 с, а после гамма-нейтронного воздействия примерно 1 ч. Восстановление наблюдалось в режиме реального времени на осциллографе без разбора оптической схемы.

Столь длительные времена релаксации РНП требуют применения специальных алгоритмов коррекции показаний ВОГ на время пропадания сигнала. Дополнительно требуется уделить внимание конструкции и технологии изготовления волоконных контуров ВОГ с целью снижения уровня напряженно-деформированного состояния ОВ для уменьшения времени релаксации РНП.

Образцы PGeO_2 в свободной намотке

Образцы PGeO_2 после воздействия импульса фотонов несколько выигрывают по РНП на длине волны 1550 нм у образцов PSiO_2 при малых временах (до 5 мс), существенно проигрывая им в дальнейшем: $\tau_{\text{соб}}=1\cdot 10^{-6}$ с и $\tau_{\text{деф}}=0,3$ с для образцов PGeO_2 и $\tau_{\text{соб}}=1\cdot 10^{-5}$ с и $\tau_{\text{деф}}=0,1$ с для образцов PSiO_2 .

В случае импульсного гамма-нейтронного воздействия изменение РНП(т) образцов PGeO_2 сходно с образцами PSiO_2 , также увеличивается время жизни короткоживущих центров окраски до $\tau_{\text{соб}}=6\cdot 10^{-5}$ с и уменьшается у долгоживущих.

Меньшее значение характерного времени релаксации собственных дырок и более слабое изменение этого времени при воздействии нейтронов у образцов PGeO_2 по сравнению с образцами PSiO_2 коррелирует с меньшим значением сдвига частоты Брюллиэна (для PGeO_2 $\Delta f_b=10,57$ ГГц, для PSiO_2 $\Delta f_b=11,03$ ГГц) и компактностью решетки стекла [238]. В образцах PSiO_2 компактность решетки выше. Легирование германием делает стекло сердцевины ОВ более легкоплавким, а решетку менее компактной по сравнению с нелегированным кварцем в PSiO_2 , поэтому даже большее значение величины двулучепреломления в PGeO_2 не изменяет ситуацию.

Таким образом, меньшая компактность решетки стекла позволяет PGeO_2 быстрее восстанавливаться после импульсных воздействий по сравнению с PSiO_2 . При этом не следует забывать, что значения РНП в зависимости от

накопленной дозы излучения будет меньше у PSiO_2 по сравнению с PGeO_2 , начиная с дозы в несколько Грей. Поэтому при проектировании ВОГ необходимо понимание, в каких условиях эксплуатации планируется применение, и исходя из этих данных принимать решение в пользу применения того или другого типа ОВ.

Выходы по главе 4

Проведенные исследования показали, что время восстановления характеристик для одного и того же ОВ и дозы в импульсе может варьироваться в широком диапазоне от единиц миллисекунд до нескольких секунд в зависимости от наличия или отсутствия потока нейtronов, температуры эксперимента, дозы в импульсе, уровня НДС и величины входной оптической мощности.

С помощью подходов химической кинетики установлен дробный порядок реакции процессов релаксации короткоживущих РЦО для образцов ISiO_2 , PSiO_2 и PGeO_2 , что указывает на сложный многостадийный процесс, детализацию стадийности которого не удалось разрешить в проводимых опытах.

Анализ процесса релаксации РНП(t) с помощью уравнения Колмогорова-Аврами показал, что спустя несколько микросекунд после воздействия для всех исследуемых ОВ процессы релаксации РЦО находятся в диффузионной области, и поэтому могут быть аппроксимированы с помощью зависимостей кинетики второго порядка или «растянутой» экспоненты. Наилучшую точность совпадения с экспериментальными результатами для всех ОВ продемонстрировала аппроксимация с помощью суммы двух растянутых экспонент.

Впервые установлено образование короткоживущих РЦО при комнатной температуре при воздействии импульсного ИИ в PGeO_2 .

Время восстановления РНП до требуемого уровня после воздействия импульсного ИИ для всех исследуемых ОВ, в основном, зависит от времени релаксации короткоживущих РЦО, которое, в первую очередь, определяется

уровнем напряженно-деформированного состояния, а для ОВ с чистой кварцевой сердцевиной также и величиной входной оптической мощности, и только затем величиной дозы в импульсе и температурой эксперимента.

Определение функциональных зависимостей эмпирических коэффициентов от дозы в импульсе, температуры, величины входной оптической мощности и уровня напряженно-деформированного состояния образца ОВ, который можно определить по изменению сдвига частоты Бриллюэна, позволяет численно прогнозировать РНП при отличающихся условиях опыта.

Воздействие импульсного гамма-нейтронного излучения является наиболее травмирующим для ОВ, независимо от состава сердцевины, и требует значительно большего времени для восстановления.

Увеличение времени релаксации короткоживущих РЦО и уменьшение его для долгоживущих при импульсном гамма-нейтронном воздействии по сравнению с реакцией на импульс фотонов совпадает с изменением времен релаксации РЦО при повышении уровня напряженно-деформированного состояния ОВ, что дает основания связать воздействие импульса нейтронов с внесением деформаций в структурную сетку стекла.

Впервые зафиксировано обратимое перераспределение РНП(t) в образце PSiO_2 после воздействия импульса нейтронов, что может указывать на обратимую перестройку структурной сетки стекла ОВ, вызванную внесением дополнительных напряжений и деформаций при воздействии нейтронов.

Замедление релаксации РНП(t) после воздействия импульса нейтронов по сравнению с импульсом фотонов может также быть связано с большим временем импульса при гамма-нейтронном воздействии по сравнению с временем импульса фотонов, поскольку известно, что скорость релаксации РНП прямо пропорциональна мощности поглощенной дозы.

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:

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

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.

Сформулированы следующие защищаемые положения:

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

Благодарности

Автор благодарит Вохмянину О.Л., Димакову Т.В., Мальцева И.А., Цибиногину М.К. за помощь в становлении технологии изготовления ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной, Вохмянину О.Л. Шаронову Ю.О., Лунегову (Поспелову) Е.А., Филиппова А.В., Хисамова Д.В. за помощь в проведении экспериментов и обработке результатов, Томашука А.Л., Кашайкина П.Ф., Есипенко И.А., Константинова Ю.А. за полезное обсуждение экспериментальных результатов исследования, а также Силаева А.В. и Грунина А.В. за содействие в проведении экспериментов.

Глава 5. Результаты исследований образцов АОВ

В пятой главе приведены результаты по исследованию РОС радиационно-стойкого АОВ в составе однопроходной схемы СВИ со встречной накачкой при воздействии непрерывного и импульсного ИИ.

5.1. Возможность применения АОВ в СВИ для ВОГ

Все исследования характеристик АОВ проводились в однопроходной схеме СВИ со встречной накачкой (Рисунок 2.14). Такая конфигурация СВИ позволяет минимизировать влияние оптической схемы на показатели РОС АОВ, а также наблюдать изменение полного спектра люминесценции при воздействии ИИ.

Для выявления влияния легирующих добавок матрицы стекла на РОС исследовалось три группы АОВ с одинаковым содержанием ионов эрбия и церия:

- группа А легирована оксидом фосфора – $P_2O_5(Er/Ce)$,
- группа Б легирована оксидом алюминия – $Al_2O_3(Er/Ce)$,
- группа В легирована оксидами алюминия и германия Al_2O_3 – $GeO_2(Er/Ce)$ и разбита на подгруппы в зависимости от соотношения и концентрации оксидов алюминия и германия (Таблица 5.1).

До воздействия ионизирующего излучения были измерены спектры излучения СВИ и зависимость выходной мощности от мощности накачки, результаты приведены в Таблице 5.1. На Рисунке 5.1 приведен пример характеристик СВИ для образца группы В1. Максимальная дифференциальная эффективность 32,5 % и ширина спектра на полувысоте (6,9 нм) выходного излучения СВИ получены в АОВ группы Б, легированных только оксидом алюминия $Al_2O_3(Er/Ce)$. В образцах, легированных оксидами алюминия, германия и церия (группа В), форма спектра отличается несущественно, а

ширина основного максимума на 1,53 мкм составила от 6,0 нм до 6,4 нм в зависимости от состава легирующих добавок. АОВ группы А, легированное оксидом фосфора P_2O_5 (Er/Ce), уступает остальным образцам по ширине спектра выходного излучения, ширина на половине высоты составила 2,3 нм вместо требуемых не менее 5 нм, поэтому в качестве гироскопического ОВ не может использоваться и в исследовании принимало участие для сравнения.

Таблица 5.1 – Характеристики исследуемых АОВ

Группа	А	Б	В1		В2		В3
Обозначение	$P_2O_5(Er/Ce)$	$Al_2O_3-(Er/Ce)$	$Al_2O_3-GeO_2(Er/Ce)$				
Легирование Р	+	-	-	-	-	-	-
Легирование Al	-	++	++	++	+	+	+
Легирование Ge	-		++	++	++	++	+
Легирование Ce	+	+	+	+	+	+	+
Поглощение на длине волны 1530 нм, дБ/м	3,7	5,5	15	19	31	19	19
Ширина спектра СВИ на полувысоте, нм	2,3	6,9	6,3	6,5	6,0	6,0	6,0
Дифференциальная эффективность АОВ, %	17	26	22	24	19	16	16
Мощность СВИ после облучения дозой 1 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с при $T = 25^{\circ}C$, % к первоначальной	20	10	40	45	40	35	70
Мощность СВИ после облучения дозой 1 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с при $T = -60^{\circ}C$, % к первоначальной	40	10	50	55	5	5	35

Результаты измерения параметров СВИ показали, что легирование сердцевины ионами церия, требуемое для повышения стойкости эрбьевых оптических волокон к ИИ, привело к снижению дифференциальной эффективности СВИ на 25-30 % в сравнении с традиционными алюмосиликатными АОВ, легированными ионами эрбия.

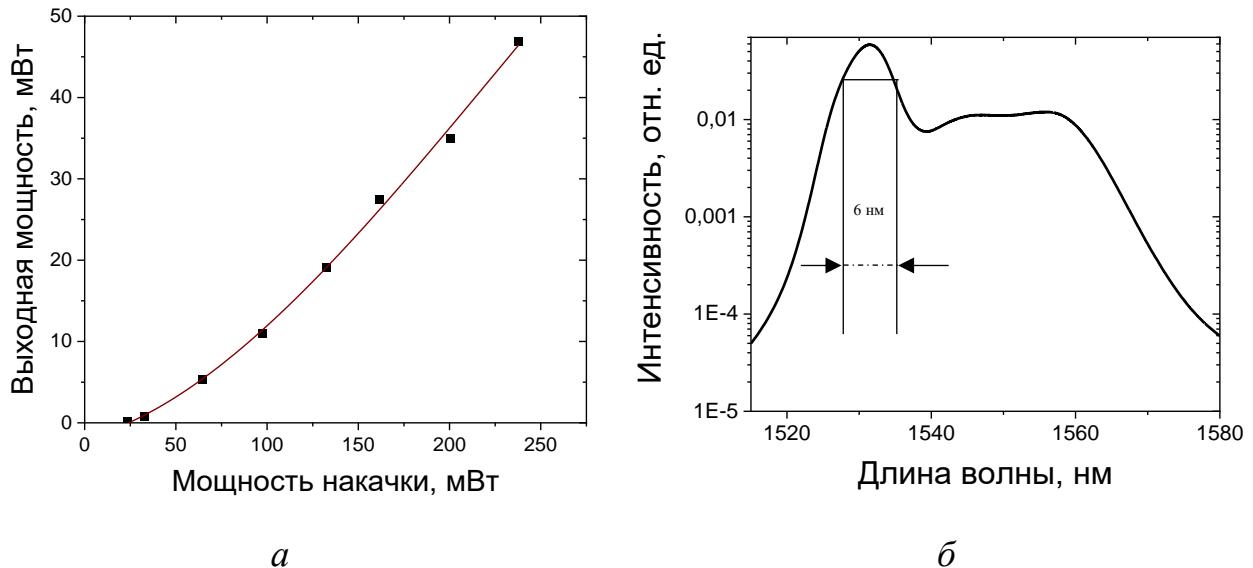


Рисунок 5.1 – Выходные параметры СВИ: *а* – зависимость выходной мощности от мощности накачки ($\lambda=980$ нм); *б* – спектр излучения при выходной мощности СВИ 35 мВт для образца АОВ В1

При этом, параметры полученных СВИ оказались близки результатам работы [64], где сообщается о параметрах СВИ с радиационно-стойким волокном, легированным эрбием компании iXFiber – мирового лидера по производству оптических волокон. За счет использования двухпроходной схемы в iXFiber получили высокую дифференциальную эффективность СВИ порядка 32 - 35 % при ширине спектра излучения на полувысоте порядка 6 нм, а максимальная выходная мощность СВИ составляла 40 мВт.

Таким образом, параметры СВИ с радиационно-стойким эрбьевым волокном групп Б и В, использованным в настоящей работе, соответствуют требованиям к источникам излучения для ВОГ и не уступают разработкам мировых лидеров.

5.2 Влияние непрерывного ИИ на параметры АОВ

Исследование параметров АОВ при воздействии непрерывного ИИ проводилось в несколько этапов. На первом этапе исследование стойкости образцов АОВ позволило сформировать представление о наиболее предпочтительных составах матрицы стекла с точки зрения стойкости к воздействию непрерывного ИИ. По результатам исследования поведения АОВ при воздействии импульсного ИИ, характеристики группы В1 были выбраны в качестве целевых для создания промышленной технологии изготовления АОВ. Технология реализована на ПАО «ПНППК». С образцами АОВ, изготовленными на ПАО «ПНППК» проведены более детальные исследования как при воздействии непрерывного, так и импульсного ИИ в составе схем СВИ. Исследования показали соответствие параметров АОВ, изготовленных на ПАО «ПНППК», целевым требованиям. Далее в работе приведены результаты исследований образцов АОВ, изготовленных как в ИХВВ РАН, так и в ПАО «ПНППК».

Предварительное исследование радиационной стойкости АОВ

Исследование стойкости к непрерывному гамма-излучению проводилось до поглощенной дозы 1 кГр с мощностью дозы 1,1 Гр/с при комнатной температуре и температуре минус 60 °С. Результаты изменения характеристик АОВ в составе схемы СВИ приведены в Таблице 5.1. Образцы групп А, Б и особенно В2 показали не лучшие результаты при непрерывном воздействии ИИ. Из полученных данных можно сделать вывод о положительном влиянии легирования матрицы стекла оксидом германия на стойкость к непрерывному ИИ. При увеличении концентрации германия зафиксировано повышение РОС. Это согласуется с результатами работ [77, 231].

Следует отметить также разную динамику поведения у разных групп АОВ. У АОВ групп А и В1 с уменьшением температуры стойкость улучшается, причем у АОВ группы А в 2 раза, у остальных групп стойкость ухудшается,

особенно для АОВ группы В2. Такое поведение может быть связано с конкуренцией двух процессов: с одной стороны, происходит ухудшение характеристик СВИ при повышении температуры, с другой стороны, РНП, как правило, увеличиваются с понижением температуры. Различный вклад этих процессов при различных температурах в изменение характеристик ОВ у разных составов стекол обуславливает итоговую разницу в поведении АОВ.

Поскольку в двухпроходной схеме СВИ с коррекцией по выходной мощности результаты АОВ могут быть намного лучше, все образцы АОВ далее исследовались на влияние импульсного ИИ.

Исследование стойкости АОВ, изготовленных на ПАО «ПНППК»

Более детальные исследования стойкости АОВ к непрерывному ИИ проведены на образцах АОВ, относящихся к группе В1, изготовленных на ПАО «ПНППК». Целью исследования являлось выявление влияния эффекта фотообесцвечивания на падение мощности СВИ, а также контроль изменения средневзвешенной длины волны.

Особенности схемы опыта

В схеме СВИ с АОВ не использовалась обратная связь, позволяющая стабилизировать параметры СВИ за счет управления током лазерного диода накачки, поэтому данные по изменению параметров СВИ дают наиболее консервативную оценку. Для исключения влияния стойкости оптических компонентов на результаты исследования, воздействию ИИ подвергался только образец АОВ, связанный с остальной схемой, находящейся в измерительном зале, через транспортное ОВ. Длина транспортного ОВ, по которому в одну сторону подается излучение накачки на длине волны 980 нм, а в обратную – выходное излучение на длине волны 1550 нм, составляла до 15 м. При этом примерно 2 м ОВ находились в зоне воздействия ИИ, с мощностью экспозиционной дозы, убывающей пропорционально квадрату расстояния. Максимальная мощность дозы приходилась на исследуемое АОВ. Применение радиационно-стойкого варианта транспортного ОВ с чистой кварцевой

сердцевиной позволило минимизировать дополнительные РНП, поскольку РНП на длине волны 980 нм существенно выше, чем на длине волны 1550 нм. Также для минимизации дополнительных РНП использовали транспортное ОВ в нескольких опытах, поскольку РНП достаточно хорошо релаксируют после опыта. Тем не менее, надо принимать во внимание возможное ухудшение полученных результатов в пределах до 10 % относительно значений оптической мощности диода накачки, поскольку часть оптической мощности теряется при прохождении транспортного ОВ.

Влияние легирования ионами церия на РОС исследуемых АОВ

Легирование АОВ ионами церия позволило значительно повысить РОС исследуемых СВИ. На Рисунке 5.2 приведены выходные оптические мощности СВИ, АОВ которых находилось под облучением. АОВ с алюмогерманосиликатной матрицей стекла отличались наличием или отсутствием ионов церия. Воздействие непрерывного ИИ с мощностью дозы 0,6 Гр/с при поглощенной дозе 450 Гр привело к уменьшению выходной мощности СВИ с АОВ без ионов церия больше чем на 4 дБ (более 60 %), а с применением легирования ионами церия – менее 1 дБ (менее 20 %).

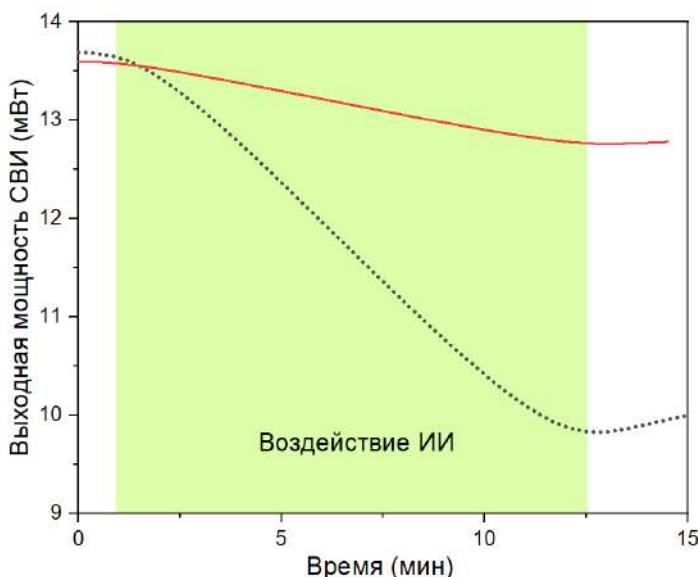


Рисунок 5.2. Изменение выходной мощности СВИ образцов активных ОВ (А) (чёрная пунктирная линия) и (Б) (красная линия) при облучении до 450 Гр поглощенной дозы

Результаты сравнения активного и пассивного режима облучения

Результаты по РНП АОВ на длине волны 1550 нм при пассивном и активном режимах облучения приведены на Рисунке 5.3. При пассивном режиме облучения диод накачки включался на несколько секунд для измерения оптической мощности СВИ в конце воздействия и в процессе релаксации. В активном режиме облучения диод накачки был включен во все время опыта.

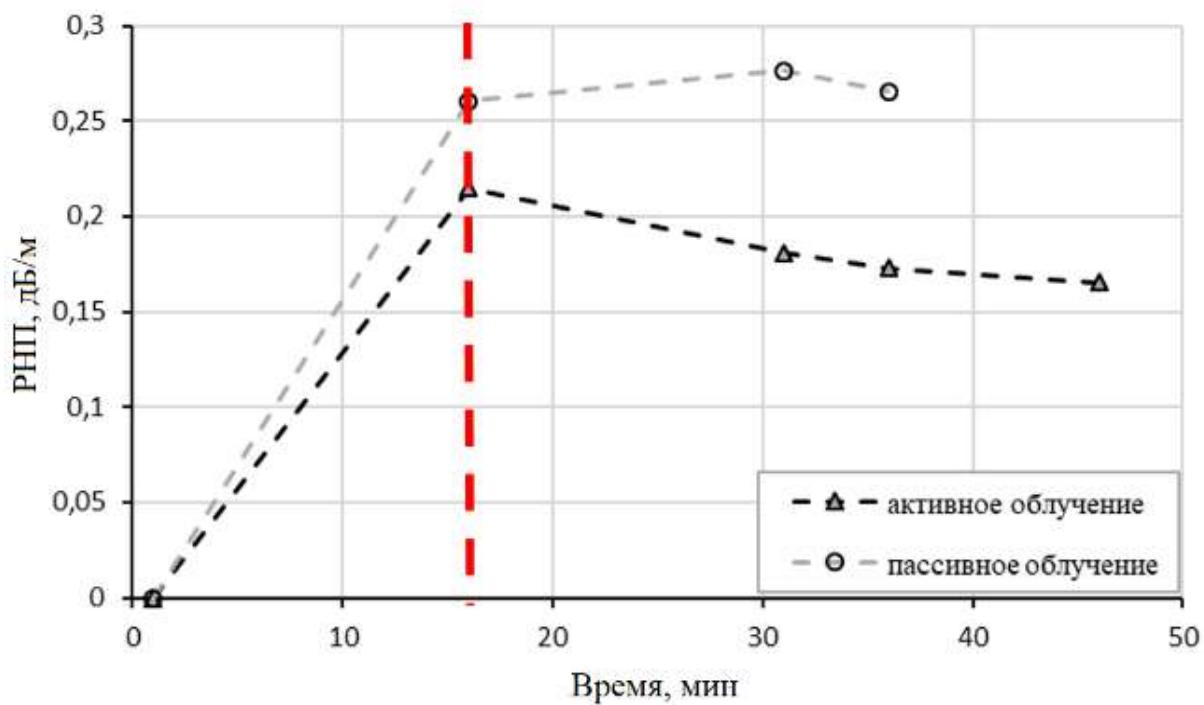


Рисунок 5.3 – РНП АОВ в активном (Δ) и пассивном (\circ) режимах облучения,
красный пунктир – окончание облучения

Выходная мощность СВИ при дозе 1,2 кГр в активном режиме облучения уменьшилась на 2,3 дБ, а в пассивном на 2,8 дБ. С учетом длины активного контура СВИ РНП на длине волны 1550 нм в активном режиме облучения 0,22 дБ/м и 0,27 дБ/м в пассивном. Разница 0,05 дБ/м показывает эффект фотообесцвечивания в данном типе АОВ. Результаты по вкладу от фотообесцвечивания сопоставимы с данными работ [41, 69 – 71, 232 - 234].

Удельные РНП АОВ составили 0,002 дБ/м/крад. Это очень хороший результат. В спецификации коммерчески доступного аналога IXF-RAD-AMP-2

(iXFiber, Франция) указаны удельные РНП 0,07 дБ/м/крад [235], что на более чем порядок величины хуже. Провести корректное сравнение стойкости ОВ возможности нет, поскольку условия опыта для французского ОВ не приведены.

Результаты по изменению средневзвешенной длины волны СВИ при облучении

На Рисунке 5.4 приведена зависимость изменения средневзвешенной длины волны СВИ $\Delta\lambda_{cp}$ во время и после облучения. Для поглощенной дозы 1 кГр значение $\Delta\lambda_{cp}$ составило 2,2 нм. Значение $\Delta\lambda_{cp}$ входит в расчет масштабного коэффициента ВОГ, и такое изменение приведет к значительной погрешности показаний ВОГ, поскольку измерять напрямую $\Delta\lambda_{cp}$ нет конструктивной возможности. При этом квазилинейный характер изменения средневзвешенной длины волны позволяет рассматривать $\Delta\lambda_{cp}$ как систематическую погрешность, поддающуюся функциональному описанию. Одновременное квазилинейное изменение выходной мощности СВИ и $\Delta\lambda_{cp}$ позволяет вводить поправочные коэффициенты в значения масштабного коэффициента ВОГ на основе измерений текущей величины выходной мощности СВИ, которую можно контролировать в процессе работы ВОГ.

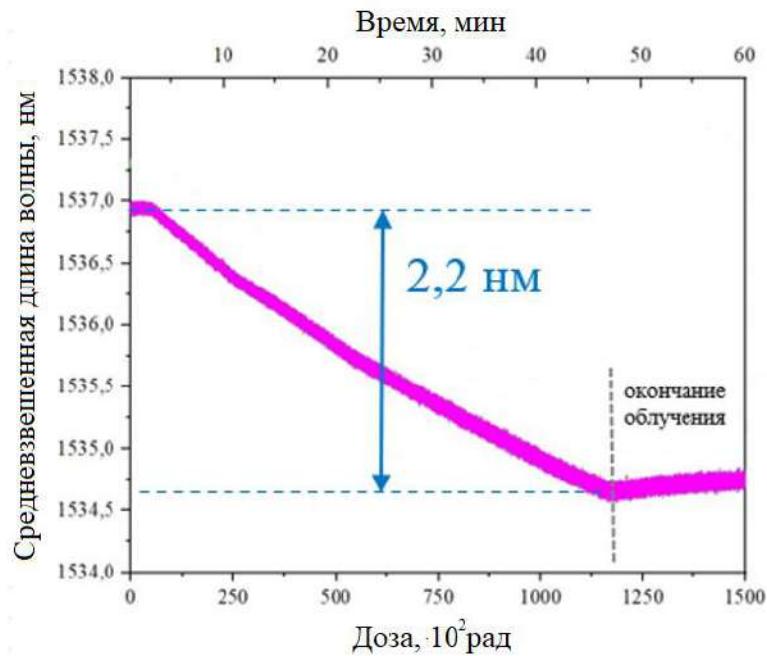


Рисунок 5.4 – Изменение средневзвешенной длины волны однопроходного СВИ с встречной накачкой, доза в опыте 1,2 кГр, мощность дозы 1,1 Гр

5.3. Влияние импульсного фотонного излучения на параметры АОВ

Исследование образцов АОВ на воздействие импульса фотонного излучения линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30М проводилось при температурах минус 60 °С и +25 °С, доза в импульсе составляла от 6 Гр до 26 Гр, длительность импульса примерно 20 нс.

Результаты для образцов АОВ группы А

Как уже наблюдалось ранее для пассивных волокон [148], наилучшую стойкость к импульсу тормозного излучения при комнатной температуре показали образцы группы А, легированные фосфором. При комнатной температуре РНП этих образцов практически нулевые (Рисунок 5.5, а), также практически не изменяется зависимость оптической мощности излучения СВИ от времени после облучения (Рисунок 5.5, б). При отрицательной температуре уже заметны изменения, максимальные падения оптической мощности

достигают до 40 % в течение 30 мс после импульса (Рисунок 5.6), особенно настораживает возросший уровень шумов в первые 40 мс после импульса. Поскольку к накопленной дозе стойкость образцов группы А относительно невысокая (падение оптической мощности до 80 % при дозе 1 кГр (Таблица 5.1)), а также учитывая недостаточную ширину спектра для использования в СВИ ВОГ, рассматривать использование АОВ группы А можно только в качестве применений, не связанных с ВОГ.

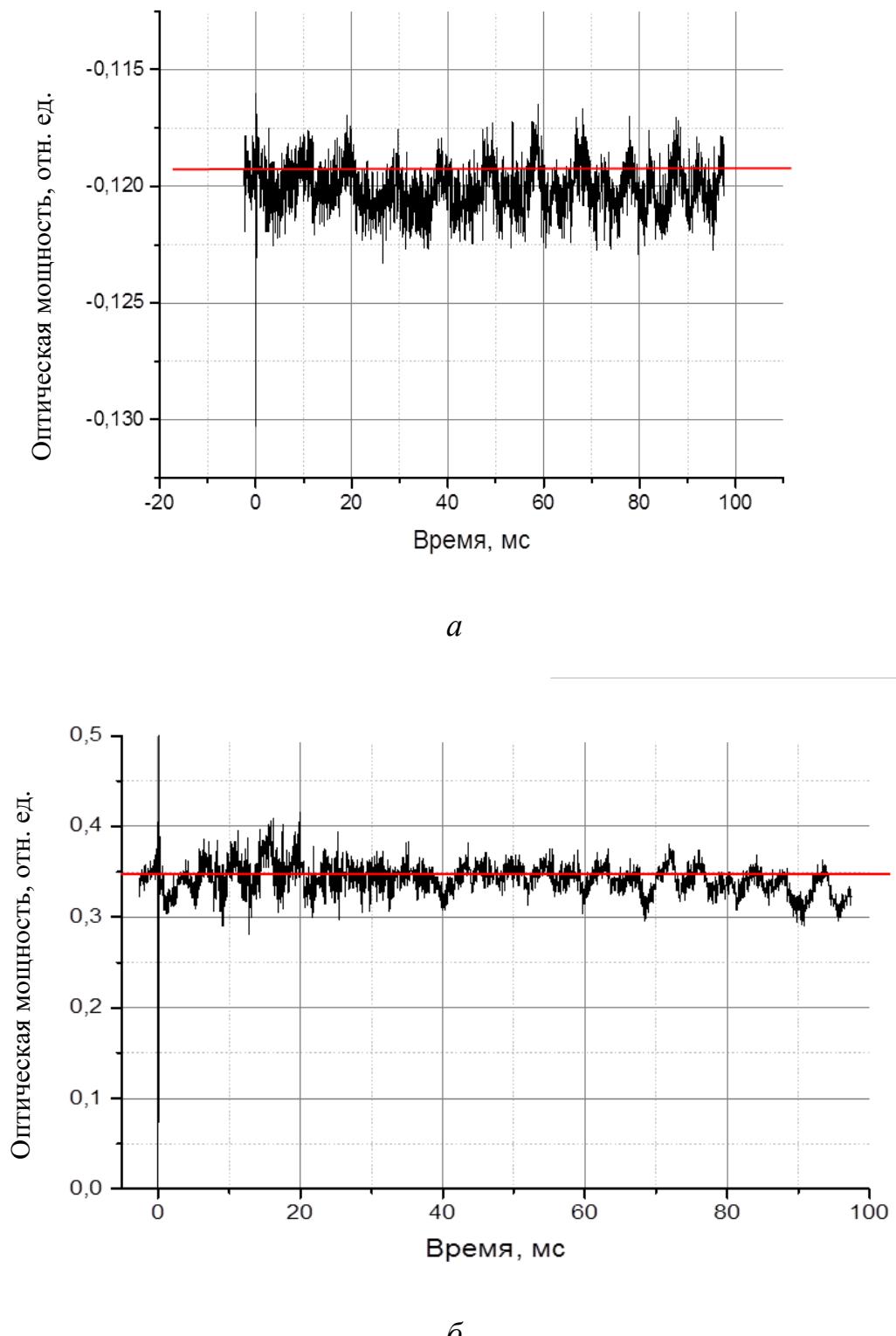


Рисунок 5.5 – Зависимость оптической мощности излучения образца АОВ группы А после импульсного воздействия, температура 25 °С, доза в импульсе 15 Гр (красная линия – начальная оптическая мощность): автономно (а) и в составе оптической части СВИ (б)

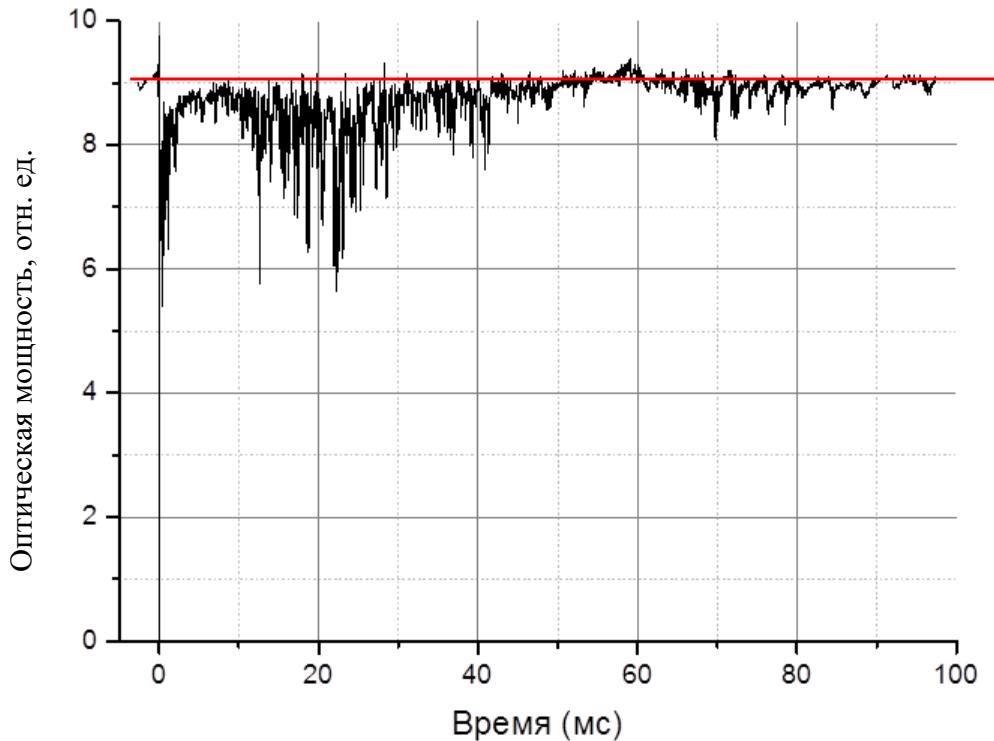


Рисунок 5.6 – Зависимость оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образца А при температуре минус 60 °С и дозе ИИ в импульсе 12 Гр (красная линия – начальная оптическая мощность)

Результаты для образцов АОВ группы Б

АОВ группы Б отличает максимальная дифференциальная эффективность и ширина спектра выходного излучения СВИ среди исследуемых АОВ, что обеспечено высоким содержанием оксида алюминия Al_2O_3 . Но отсутствие оксида германия привело к существенному ухудшению стойкости, даже при комнатной температуре оптическая мощность СВИ в течение 5 мс после импульса дозой 12 Гр оставалась менее 75 % от первоначальной и менее 85 % в течение последующих 100 мс. К накопленной дозе у АОВ этой группы также наихудшая из всех групп стойкость (Таблица 5.1): при дозе 1 кГр уменьшение оптической мощности составляет более 90 % и при комнатной, и при отрицательной температурах.

Таким образом, легирования церием оказалось недостаточно для обеспечения радиационной стойкости АОВ, легированных только алюминием.

Результаты для образцов АОВ группы В

Образцы группы В различались по степени легирования оксидом алюминия и оксидом германия (Таблица 5.1). Образцы В3 отличались наименьшей степенью легирования как оксидом алюминия, так и оксидом германия, образцы В2 имели повышенную относительно В3 концентрацию германия, а у образцов В1 концентрация германия была как у В2, но при этом повышена степень легирования оксидом алюминия.

Уже небольшое легирование оксидом германия повысило РОС. Образцы АОВ группы В3, имеющие невысокое легирование как оксидом алюминия, так и оксидом германия, показали при комнатной температуре через 1 мс после импульса дозой 12 Гр восстановление оптической мощности до 90 % и до 97 % после 2 мс. При этом для отрицательной температуры результаты заметно хуже: через 1 мс после импульса дозой 6 Гр при температуре минус 60 °С оптическая мощность восстановилась до 64 % и до 90 % через 40 мс (Рисунок 5.7). РНП образцов АОВ на длине волны 1310 нм подтверждают эти данные, значение РНП через 90 мс после импульса с одинаковой дозой в образцах группы В3 почти в три раза выше, чем в образцах В1 и В2, у которых концентрация оксида германия выше (Рисунок 5.8).

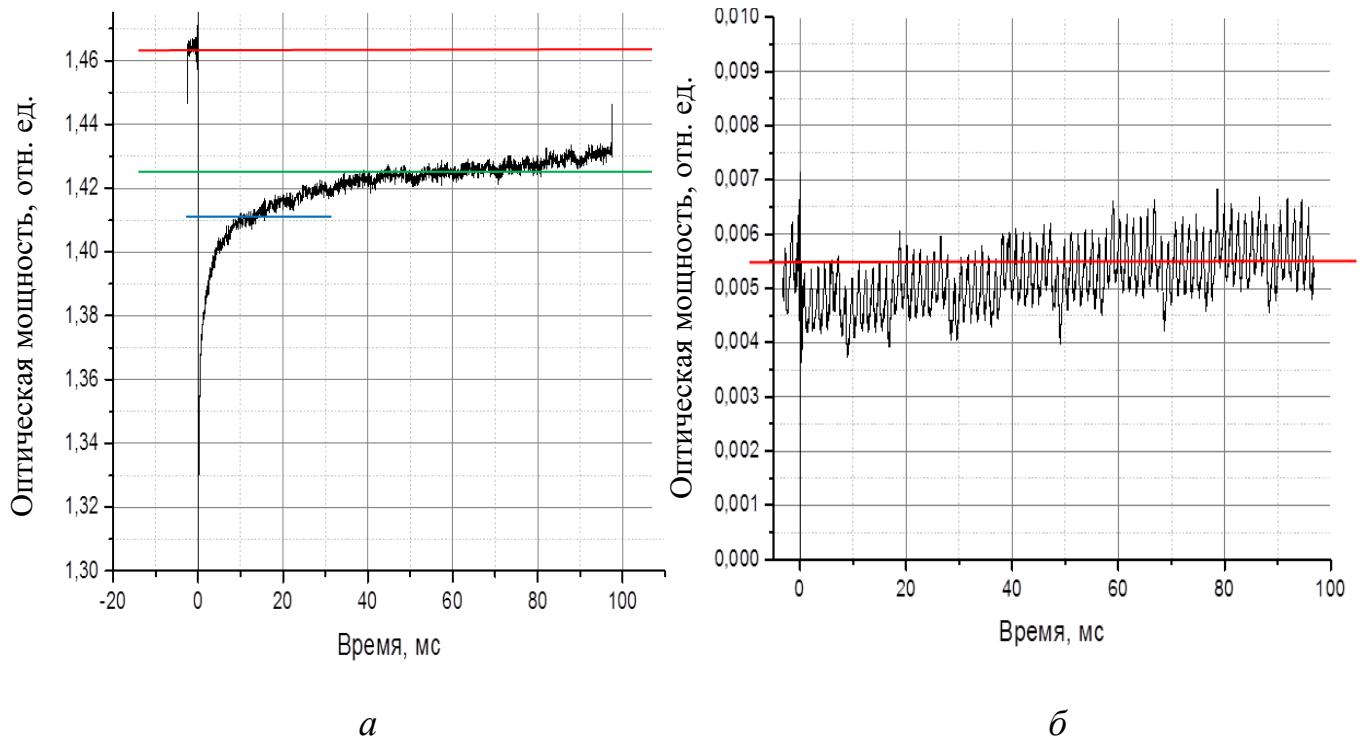


Рисунок 5.7 – Зависимость оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образца В3 при температуре 25 °С и дозе в импульсе 12 Гр (а), при температуре минус 60 °С и дозе в импульсе 6 Гр (б); красная линия – начальный уровень мощности, синяя линия – уровень мощности через 10 мс, зеленая линия – через 50 мс

Авторы [77, 231] объяснили повышение радиационной стойкости алюминатных АОВ при легировании оксидом германия тем, что в алюминатных стеклах основными дефектами, вызывающими РНП, являются дырочные состояния, связанные с образованием немостикового кислорода у ионов алюминия (Al-oxygen-hole center), а присутствие оксида германия снижает вероятность образования таких дефектов.

Образцы группы В1 представляли особый интерес из-за наибольшей ширины спектра для этой группы АОВ, а также наилучших показателей по стойкости к непрерывному ИИ.

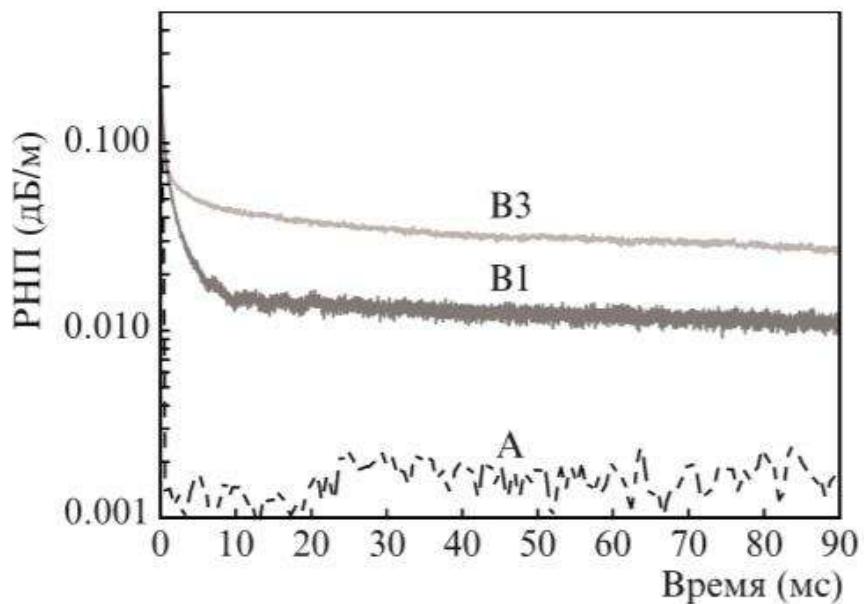


Рисунок 5.8 – РНП ($\lambda=1310$ нм) после воздействия импульса с дозой 12 Гр на образцы А, В1 и В3 при температуре 25 °С

Зависимости оптической мощности СВИ, изменение средневзвешенной длины волны и РНП после облучения при температурах 25 °С и минус 60 °С для образца группы В1 приведены на Рисунках 5.9-5.11.

Основные изменения характеристик происходили в течение 1 мс после импульса:

- оптическая мощность при 25 °С уменьшается на 10 % – 12 % и восстанавливается до 95 %;
- оптическая мощность при минус 60 °С уменьшается на 5 % и восстанавливается до 97 %;
- РНП на длине волны 1310 нм достигают 1 дБ/м и уменьшаются до 0,02 дБ/м независимо от температуры.

В промежутке от 1 мс до 90 мс процесс быстрой релаксации сменялся довольно медленным процессом:

- оптическая мощность СВИ восстановилась до 97,5 % при 25 °С и до 99 % при минус 60 °С;
- РНП на длине волны 1310 нм при 25 °С уменьшились до 0,002 дБ/м;

- РНП на длине волны 1310 нм при минус 60 °С уменьшились до 0,005 дБ/м.

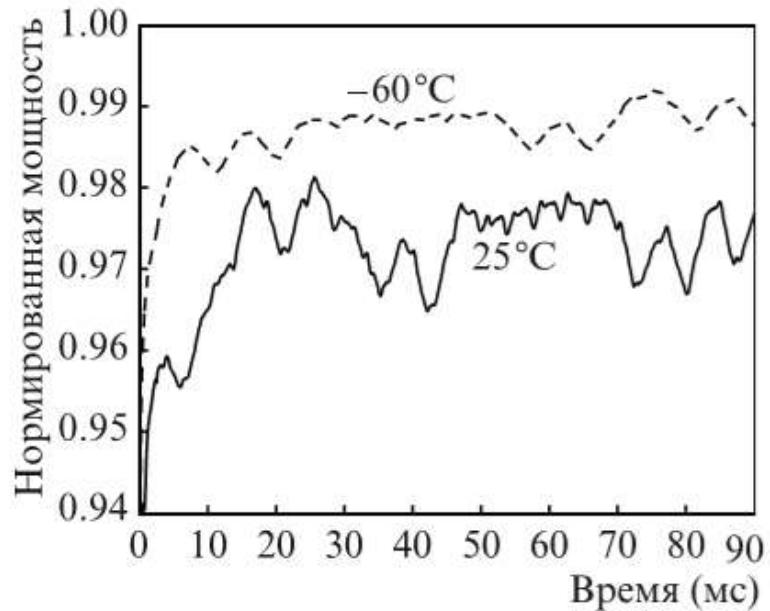


Рисунок 5.9 – Зависимость выходной оптической мощности СВИ образца В1 от времени после облучения импульсом с дозой 12 Гр при температуре 25 °C (сплошная линия) и при температуре минус 60 °C (пунктирная линия)

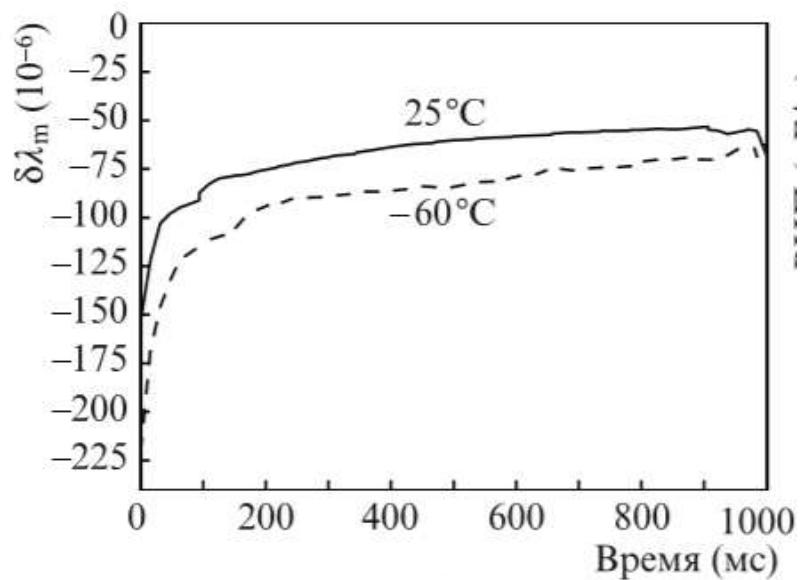


Рисунок 5.10 – Эволюция средневзвешенной длины волны СВИ для образца В1 при температуре 25 °C (сплошная линия) и при температуре минус 60 °C (пунктирная линия) после облучения импульсом с дозой 12 Гр

Следует отметить несоответствие между поведением оптической мощности СВИ и РНП на длине волны 1310 нм при минус 60 °C, несмотря на большие РНП, оптическая мощность СВИ страдает меньше, чем при комнатной температуре, где уровень РНП меньше (Рисунки 5.11 и 5.12). Вполне вероятно, что здесь, как и в пассивных ОВ, фотообесцвечивание проявляется более эффективно при отрицательных температурах как на длине волны 1550 нм, так и на 980 нм, что позволяет, с одной стороны, лазерному излучению накачки эффективнее распространяться в АОВ и значит формироваться большей выходной мощности, а с другой стороны, меньше теряется излучение на выходе АОВ с длиной волны 1550 нм из-за меньших РНП.

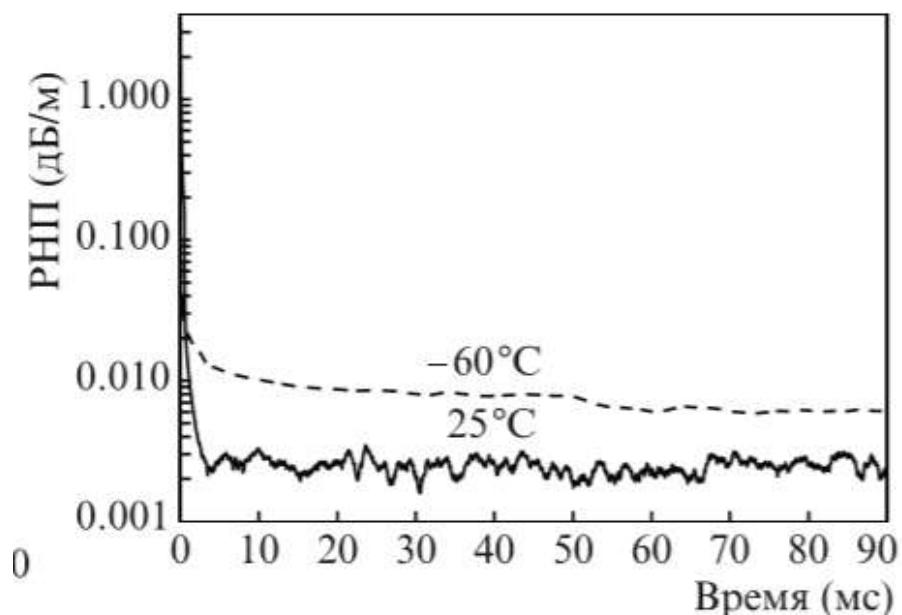


Рисунок 5.11 – Эволюция РНП на длине волны 1310 нм для образца В1 при температуре 25 °C (сплошная линия) и при температуре минус 60 °C (пунктирная линия) после облучения импульсом с дозой 12 Гр

Таким образом, изменение выходной мощности СВИ с АОВ группы В1 при воздействии импульсного фотонного излучения является незначительным и не приведет к значимому повышению погрешности показаний ВОГ из-за повышения соотношения сигнал/шум на фотоприемнике. Также это позволяет обеспечить бесперебойную работу ВОГ во время импульсного воздействия.

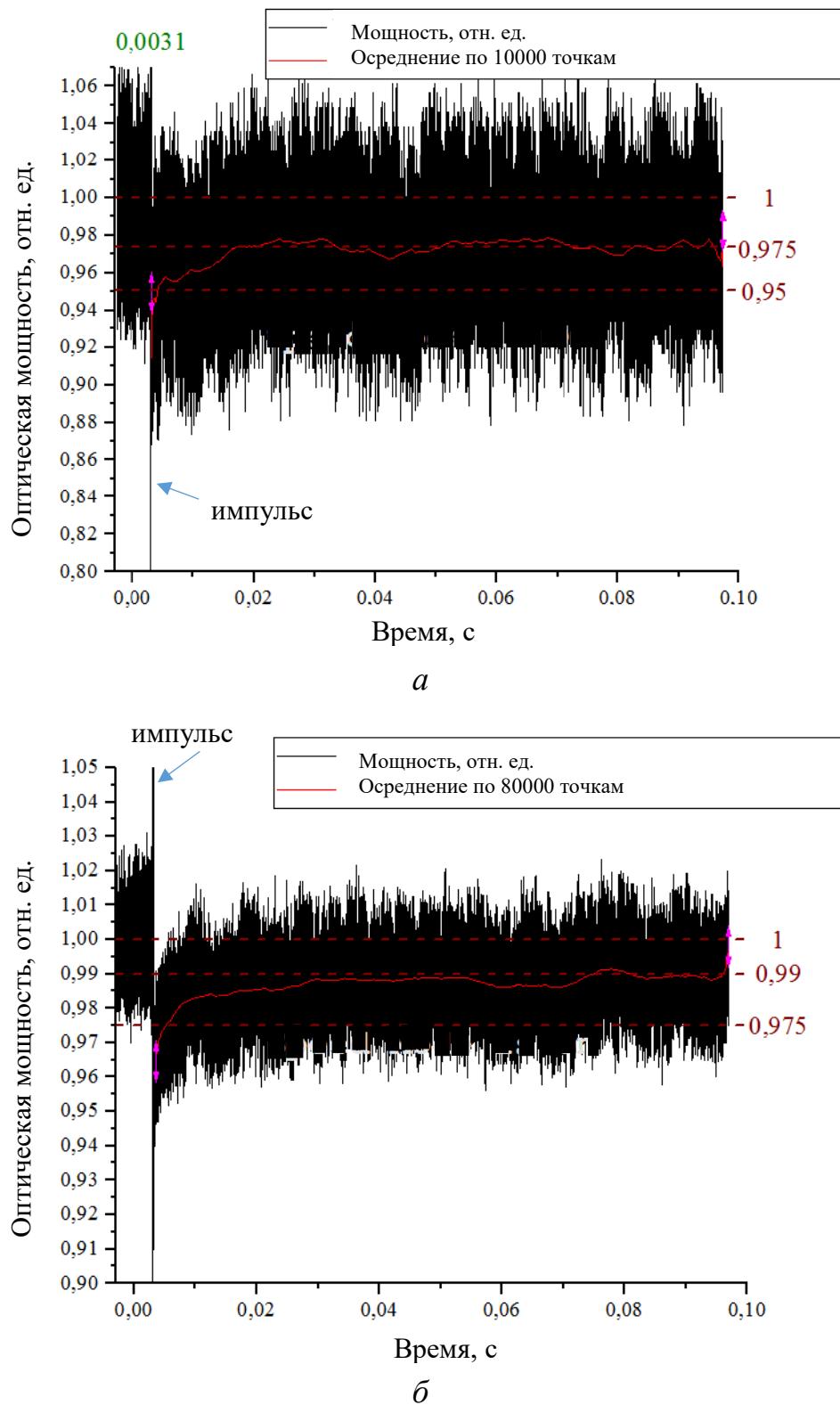


Рисунок 5.12 – Зависимость выходной оптической мощности СВИ образца В1 от времени после облучения импульсом ИИ с дозой 12 Гр при температуре 25 °C (a) и при температуре минус 60 °C (b); нормировано по начальному уровню мощности (пунктирная линия 1,00)

Изменение средневзвешенной длины волны оказывается достаточно значимым: в ответ на импульс фотонов средневзвешенная длина волны уменьшается при температуре минус 60 °С на 225 ppm, при 25 °С на 175 ppm, а затем медленно восстанавливается в течение 1 с до 60 ppm (Рисунок 5.9). При отрицательной температуре изменения средневзвешенной длины волны более выражены, чем при комнатной, хотя с оптической мощностью СВИ все, наоборот. Такие изменения $\Delta\lambda_{\text{ср}}$ могут быть за пределами допуска для точного ВОГ, поэтому необходимы механизмы коррекции, например, должна быть реализована цепь обратной связи в СВИ по стабилизации $\lambda_{\text{ср}}$.

Выбор состава стекла для серийного производства

Для определения состава матрицы стекла АОВ, обеспечивающего стойкость как к воздействию импульсного, так и непрерывного ИИ провели сопоставление полученных результатов каждой группы образцов АОВ.

На Рисунке 5.13 приведена динамика восстановления оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образцов всех трех групп. Образцы группы В, уступая группе А, показали результаты намного лучше образцов группы Б.

По результатам изучения стойкости к воздействию импульсного фотонного излучения, стойкости к непрерывному ИИ как при комнатной, так и при отрицательной температурах, а также учитывая ширину спектра и дифференциальную эффективность (Таблица 5.1), состав стекла группы В1 с высоким уровнем легирования оксидом алюминия и оксидом германия выбран целевым для постановки технологии серийного производства на ПАО «ПНППК».

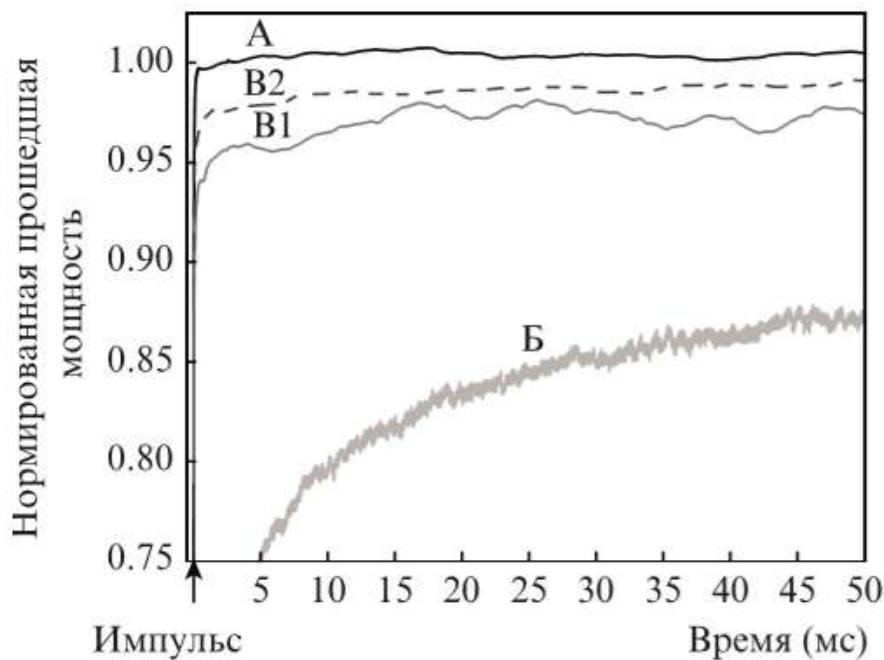


Рисунок 5.13 - Зависимость оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образцов групп А, Б, В1 и В2 при температуре 25 °С и дозе в импульсе 12 Гр

5.4. Влияние импульсного гамма-нейтронного излучения

Исследование образцов АОВ при воздействии импульсного гамма-нейтронного излучения проводилось на импульсном реакторе нейтронов БР-1М при комнатной температуре. Поток нейтронов варьировался от опыта к опыту от $1 \cdot 10^{12}$ н/см² до $2,35 \cdot 10^{13}$ н/см², доза гамма-излучения в опыте составляла от 3 Гр до 70 Гр, длительность импульса составляла примерно 70 мкс.

В отличие от импульса фотонного излучения, на импульс нейтронов с сопутствующим гамма-излучением образцы АОВ группы В1 практически не реагировали. В ответ на воздействие импульса нейтронов зафиксировано снижение оптической мощности СВИ не более 2 % в момент импульса (Рисунок 5.14), при этом не зафиксировано значимого изменения средневзвешенной длины волны.

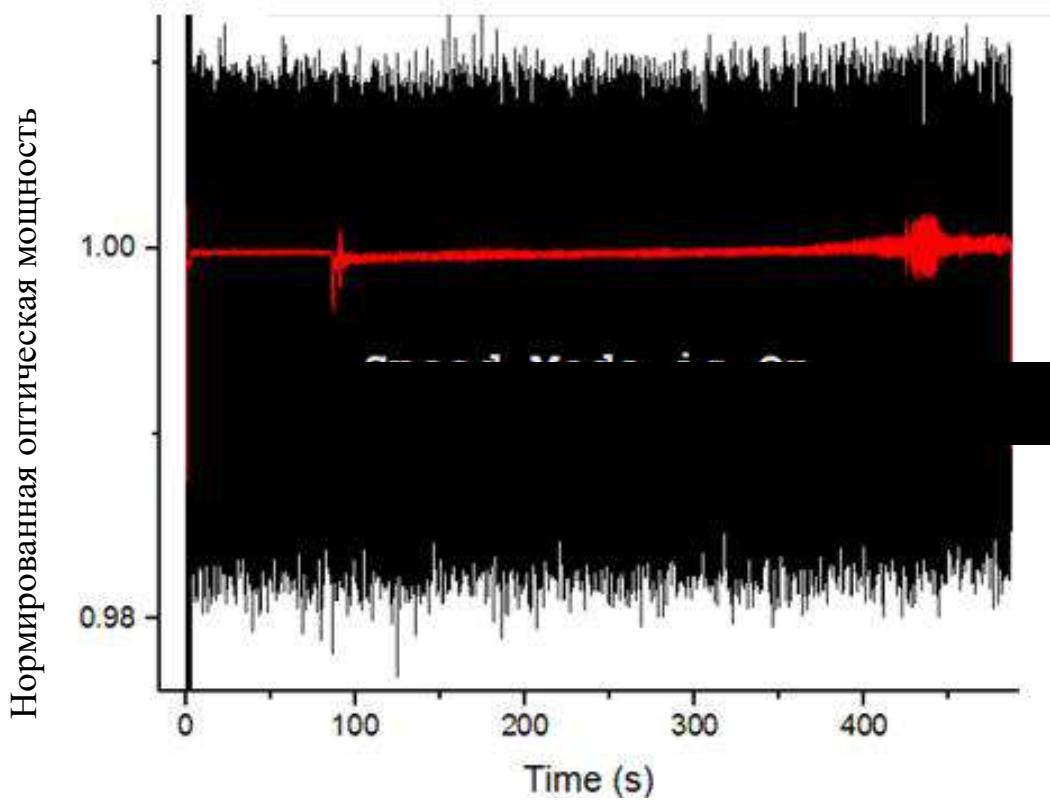


Рисунок 5.14 – Изменение нормированной оптической мощности СВИ для образца группы В1 после облучения потоком нейтронов $2,5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма-излучения 70 Гр, время импульса 60 мкс, красная линия – результат осреднения

Сравнивая результаты воздействия на образцы АОВ импульса фотонного излучения и импульса нейтронов с сопутствующим гамма-излучением, при том, что дозы гамма-излучения в импульсе для случая нейтронов были даже больше, чем для фотонного излучения, более ощутимые последствия имеет импульс фотонного излучения. Этим АОВ отличаются от пассивных ОВ, для которых, особенно для ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной, импульс нейтронов приводил к существенному замедлению релаксации РНП. Из этого следует вывод, что для высоколегированного кварцевого стекла определяющую роль в случае небольших доз играет не доза, а мощность дозы.

Интересно отметить, что в реакции АОВ для импульса нейтронов не получается выделить роль нейтронов. РНП образцов АОВ пропорциональны дозе гамма-излучения. Это подтвердил опыт, в котором поток нейтронов составил $3 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма-излучения 540 Гр, время

облучения 150 с (Рисунок 5.15). Образцы АОВ группы В1 в конце облучения продемонстрировали РНП практически такие же как при гамма-облучении на источнике ^{60}Co с такой же мощностью дозы по гамма-излучению.

Вероятно, это связано с «рыхлой» структурой стекла из-за высокого уровня легирования, и структурные изменения сетки стекла незаметны. В целом, выстраивается зависимость – чем компактнее решетка стекла, тем меньше реакция на воздействие нейтронов. АОВ с наименее компактной решеткой не демонстрируют отдельного вклада в изменение характеристик от нейтронов. ОВ с германосиликатной сердцевиной реагирует на воздействие нейтронов слабее, чем ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной, поскольку компактность решетки у германосиликатного стекла меньше, чем у чистого кварца. Самая заметная реакция у образцов PSiO_2 в виде ВК, у которых наибольший уровень напряженно-деформированного состояния, что можно видеть по наибольшему значению сдвига частоты Бриллюэна.

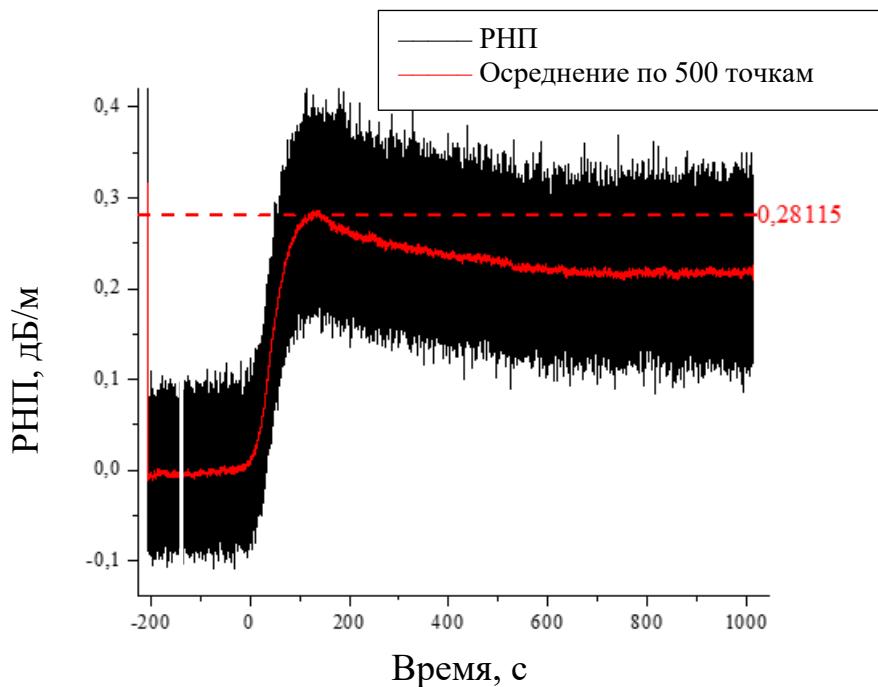


Рисунок 5.15 –РНП ($\lambda=1310$ нм) для образца группы В1 во время и после облучения потоком нейтронов $3 \cdot 10^{13}$ н/см 2 , доза сопутствующего гамма-излучения 540 Гр, время облучения 150 с (от 0 с до 150 с), пунктир – РНП в момент завершения облучения (0,28 дБ/м)

Выводы по главе 5

Алюмо-германосиликатная матрица стекла АОВ с высоким уровнем легирования алюминием и германием в сочетании с легированием церием позволяет обеспечить высокие показатели стойкости не только к непрерывному, но и импульльному излучению эрбьевых АОВ при ширине спектра излучения не менее 5 нм.

Для сохранения точностных характеристик ВОИД при воздействия ИИ требуется выбор оптической схемы СВИ, обеспечивающий минимизацию изменений средневзвешенной длины волны, а также применение дополнительных мер по компенсации этих изменений как систематической погрешности.

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

Уменьшение оптической мощности СВИ после импульсного облучения с дозой в импульсе до 20 Гр с длительностью импульса 20 нс как при комнатной температуре, так и при температуре минус 60 °С, а также импульса потока нейтронов $2,5 \cdot 10^{13}$ н/см² с дозой сопутствующего гамма излучения 70 Гр длительностью 70 мкс не превышает 15 % и восстанавливается в течение 1 мс до уровня выше 90 %. Это позволяет обеспечить бесперебойную работу ВОГ во время импульсного воздействия.

На основе полученных результатов сформулированы защищаемые положения:

- Средневзвешенная длина волны СВИ изменяется пропорционально поглощенной дозе при воздействии непрерывного ИИ.
- Наличие легирующих примесей (германий, алюминий) в сердцевине ОВ ускоряет процессы релаксации РНП после импульсного воздействия потока нейтронов, а внутренние упругие напряжения замедляют их.

Благодарности

Автор благодарит своих коллег за помощь в проведении исследований АОВ. Исследуемые образцы радиационно стойких АОВ изготовлены как в ИХВВ РАН, так и затем в ПАО «ПНППК», где помощь в становлении технологии оказал Яшков М.В. Исследования характеристик АОВ в однопроходной схеме СВИ без воздействия ИИ проведены Поносовой А.А. Измерение характеристик АОВ при воздействии непрерывного ИИ выполнены Шевцовой А.Д., Вахрушевым А.С., Степановой В.Д. под руководством автора и при его личном участии в проведении опытов. Исследования АОВ при воздействии импульсного ИИ выполнены автором при участии Вохмяниной О.Л. и Шароновой Ю.О., помощь в расчетах характеристик оказала Поносова А.А. Консультационную помощь при выборе методик измерения характеристик АОВ оказал Мелькумов М.А.

Глава 6. Результаты исследований СИОМ

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

6.1. Влияние непрерывного ИИ на образцы СИОМ

Исследования проводились с целью сопоставления характеристик серийных СИОМ производства ПАО «ПНППК» ранее опубликованным литературным данным по стойкости к непрерывному ИИ. В работе [49] приводятся данные о высокой РОС для длины волны 1550 нм как кристалла ниобата лития, так и протонообменных волноводов на этих кристаллах при медленном наборе дозы до 1 Мрад для гамма-излучения.

Отдельной задачей стояла проверка свойства сохранения поляризации излучения для протонообменных волноводов при воздействии ИИ, поскольку в литературе не найдено исследований по этой теме.

Образцы СИОМ на воздействие непрерывного гамма-излучения исследовались при температурах минус 50 °C, +25 °C, +60 °C, доза в опыте составляла от 1 кГр до 2 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с и 0,13 Гр/с, использовалась установка на основе источника $^{60}\text{Сo}$ ГУТ-200М. Для исследований использовали 7 образцов СИОМ, по 2 образца при каждой температуре и один образец при комнатной температуре с уменьшенной мощностью дозы.

По результатам исследований установлено, что реакция СИОМ на воздействие непрерывного гамма-излучения не зависела от температуры эксперимента. При мощности дозы 0,13 Гр/с не зафиксировано значимого изменения оптической мощности выходного сигнала с обоих выходов СИОМ. При мощности дозы 1,1 Гр/с зафиксировано уменьшение оптической мощности у обоих каналов СИОМ не более 0,06 дБ при дозе 1 кГр, после окончания

облучения оптическая мощность восстановилась до 100 % в течение 30 мин (Рисунок 6.1). Значимого изменения коэффициента сохранения поляризации излучения и коэффициента деления СИОМ не зафиксировано. Вариации выходной мощности менее 0,1 дБ не критичны для работы СИОМ в ВОГ.

Во время облучения образцов ИИ впервые зафиксировано увеличение коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ) для всех исследуемых образцов СИОМ (Рисунок 6.1, б). Такое же поведение характерно для СПИ в ОВ, причем независимо от химического состава сердцевины. Поскольку СПИ пропорционален отношению оптических мощностей, проходящих по главной и неглавной оптическим осям, то наиболее вероятно увеличение СПИ происходит из-за эффекта фотообесцвечивания: в неглавной оптической оси распространение света минимально, соответственно РНП будут выше, чем в главной, где распространяется основная часть излучения.

Таким образом, серийные образцы СИОМ, изготовленные по протонообменной технологии с рабочей длиной волны 1550 нм пригодны для использования в условиях космоса в части оптических характеристик.

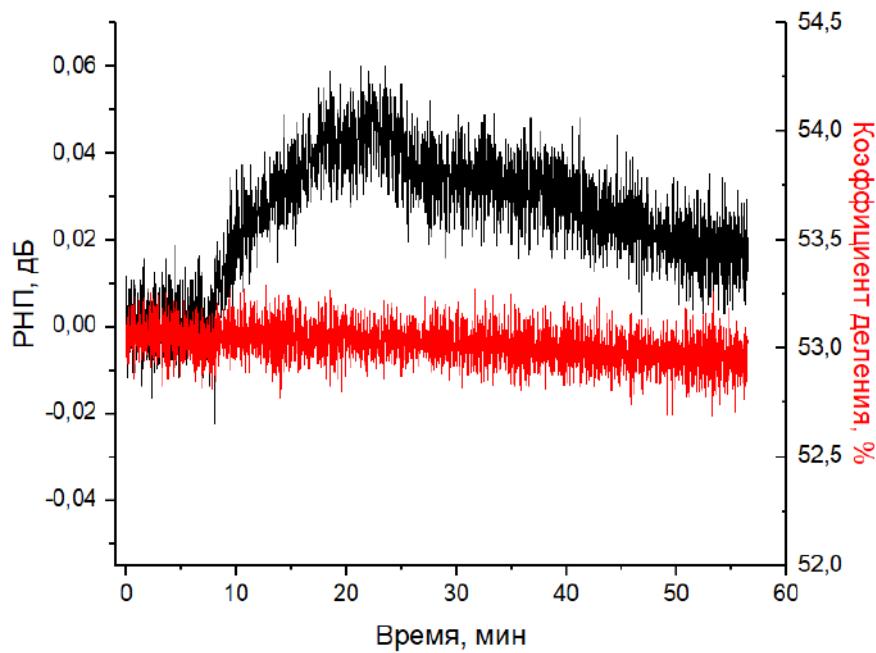
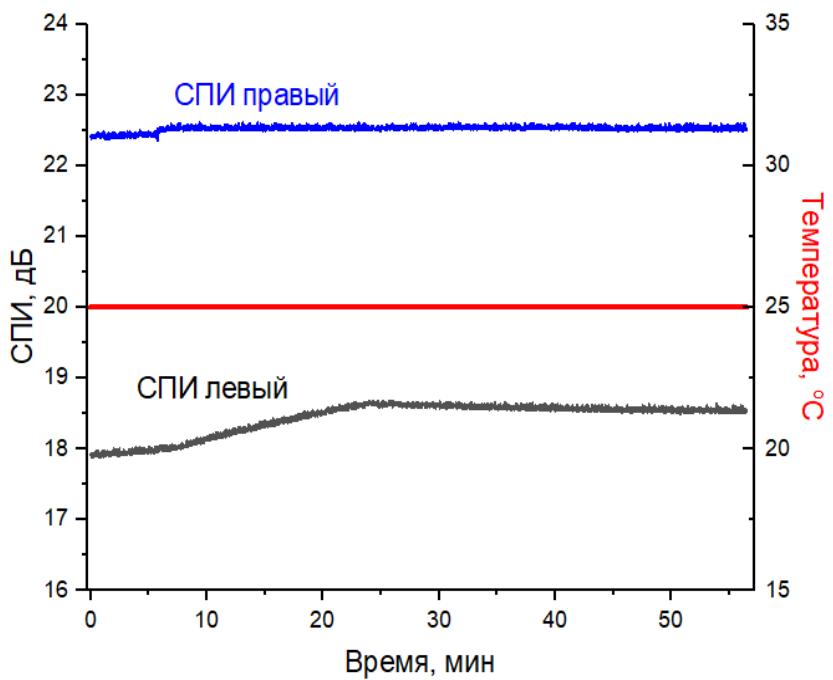
*а**б*

Рисунок 6.1 – RNP ($\lambda=1550$ нм) и коэффициент деления до, во время и после облучения (а) и СПИ (б) для образца СИОМ, облучение с 7 минуты по 25 минуту, доза облучения 1 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с, температура 25 °C

6.2. Влияние импульсного фотонного излучения на образцы СИОМ

Исследование СИОМ на воздействие импульсного тормозного излучения проводилось с помощью линейного индукционного ускорителя ЛИУ-30. Опыты проводились при комнатной температуре и температуре минус 60 °С. Уровень воздействия в разных импульсах варьировался от 6 Гр до 23 Гр в импульсе, длительность импульса примерно 20 нс.

Так же, как и для случая непрерывного ИИ, для исследуемого диапазона температур и дозы в импульсе не выявлено значимой зависимости изменения характеристик СИОМ от дозы импульса и температуры в опыте.

При температуре минус 60 °С уже через 5 мс после воздействия импульса фотонов с дозой 6 Гр оптическая мощность в СИОМ восстановилась до 97 % (Рисунок 6.2). При комнатной температуре оптическая мощность СИОМ после воздействия импульса фотонов с дозой 13 Гр через 5 мс после импульса также восстановилась до 97 % (Рисунок 6.3).

Таким образом, вне зависимости от температуры эксперимента, через 1 мс после воздействия оптическая мощность восстанавливалась более 80 %, восстановление до 100 % происходило за время менее 0,1 с (Рисунок 6.2, 6.3).

Существенного изменения коэффициента деления также не обнаружено (Рисунок 6.4).

Вывод: отклик оптических характеристик СИОМ на воздействие импульса фотонного излучения, хотя и вполне ощутимый, не вносит существенных ограничений в работу ВОГ, поскольку изменения оптической мощности до 20 % происходят в течение менее 0,02 мс.

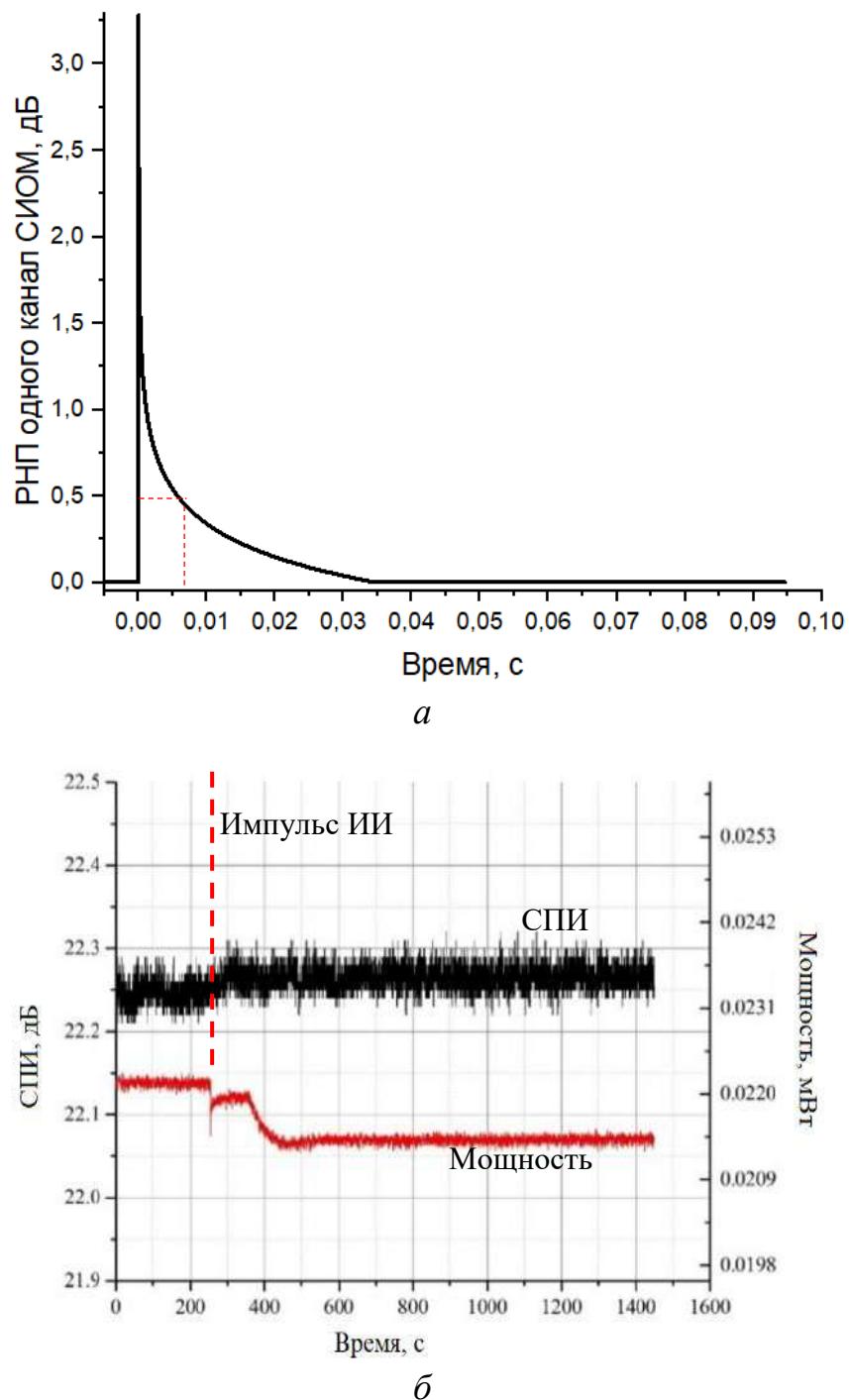


Рисунок 6.2 – Зависимость от времени РНП (а) и оптической мощности (б) одного из двух каналов СИОМ после воздействия импульсного фотонного излучения, доза в импульсе 6 Гр, температура минус 60 °С; через 0,02 мс после импульса уровень оптической мощности составил 90 %; красной линией обозначен уровень начального сигнала, синей – уровень 96,4 % (время достижения через 1,25 мс после импульса), зеленой – уровень 97,5 % (время достижения через 6,24 мс)

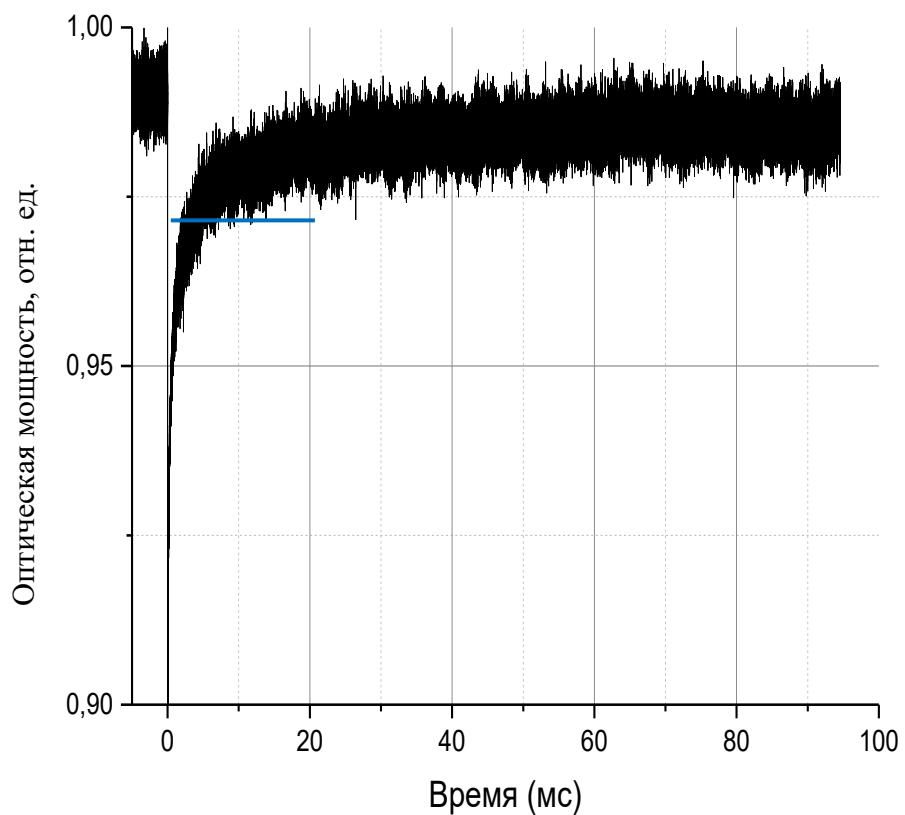


Рисунок 6.3 – Зависимость от времени оптической мощности на одном из каналов СИОМ после импульса тормозного излучения дозой 13 Гр, время импульса примерно 20 нс, 25 °C

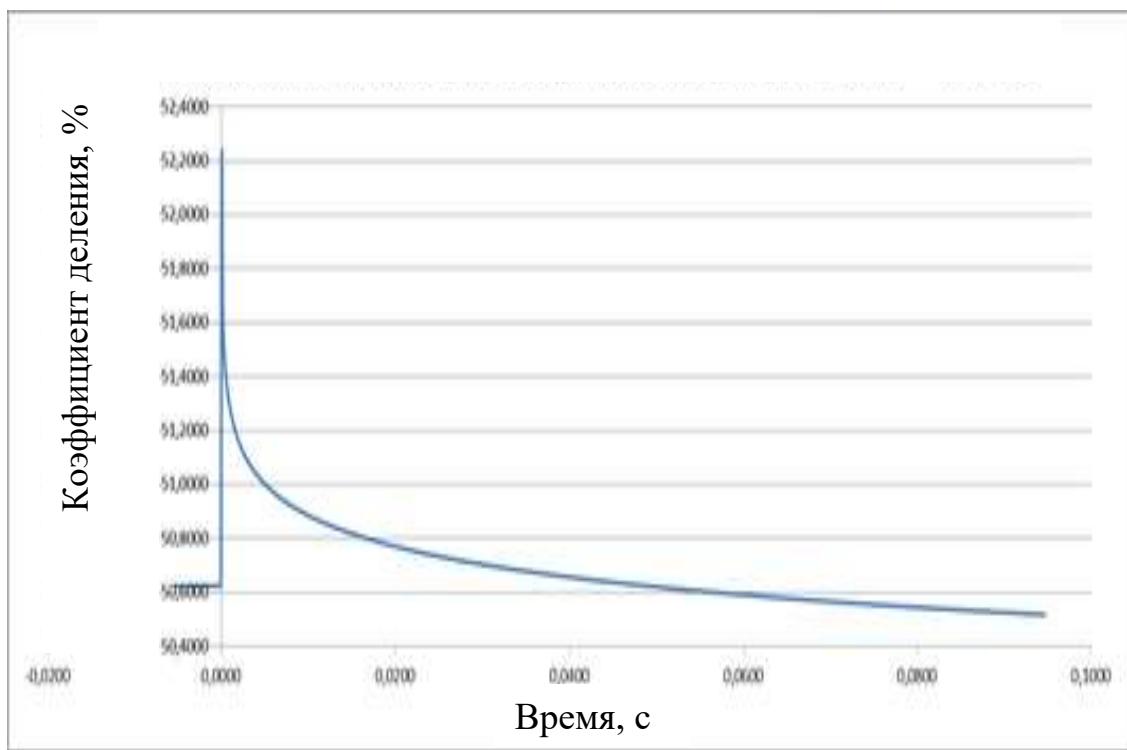


Рисунок 6.4 – Изменение коэффициента деления каналов СИОМ после импульса дозой 6 Гр, время импульса ~20 нс, температура минус 60 °С

Для выяснения того, происходят ли какие-то процессы на электродах СИОМ, провели исследования на одном образце СИОМ при температуре минус 60 °С в двух опытах. Для сравнения вместе с сигналами от электродов СИОМ также снимались параметры конденсатора емкостью 32 пФ (емкость примерно соответствует емкости электродов СИОМ), помещенного рядом с СИОМ, длины экранированных кабелей были одинаковые. В этих опытах оптический сигнал измерялся в обоих каналах СИОМ. Сигналы с электродов СИОМ (вп) и конденсатора (р) приведены на Рисунке 6.5, доза в импульсах составила 26 Гр и 22 Гр соответственно. По графикам Рисунка 6.5 видно, что в обоих опытах отклик на импульс электродов СИОМ и дублирующего конденсатора продолжается менее 1 мс, при этом, несмотря на наличие экранов у кабелей, невозможно различить наводки на кабель и изменение сигнала с электродов. Повторное воздействие не привело к изменению реакции СИОМ, результаты второго опыта приведены на Рисунке 6.6.

Вывод: из-за удаленности измерительного зала от облучательного зала и, соответственно, большой длины кабелей (25 м), а также очень сильных электромагнитных полей во время импульса, не представляется возможным удаленно в активном режиме корректно контролировать электрические характеристики СИОМ.

После возвращения на завод-изготовитель все характеристики образцов СИОМ были перепроверены по принятым на предприятии программе и методикам. Все характеристики сохранили значения до облучения с учетом погрешности измерений.

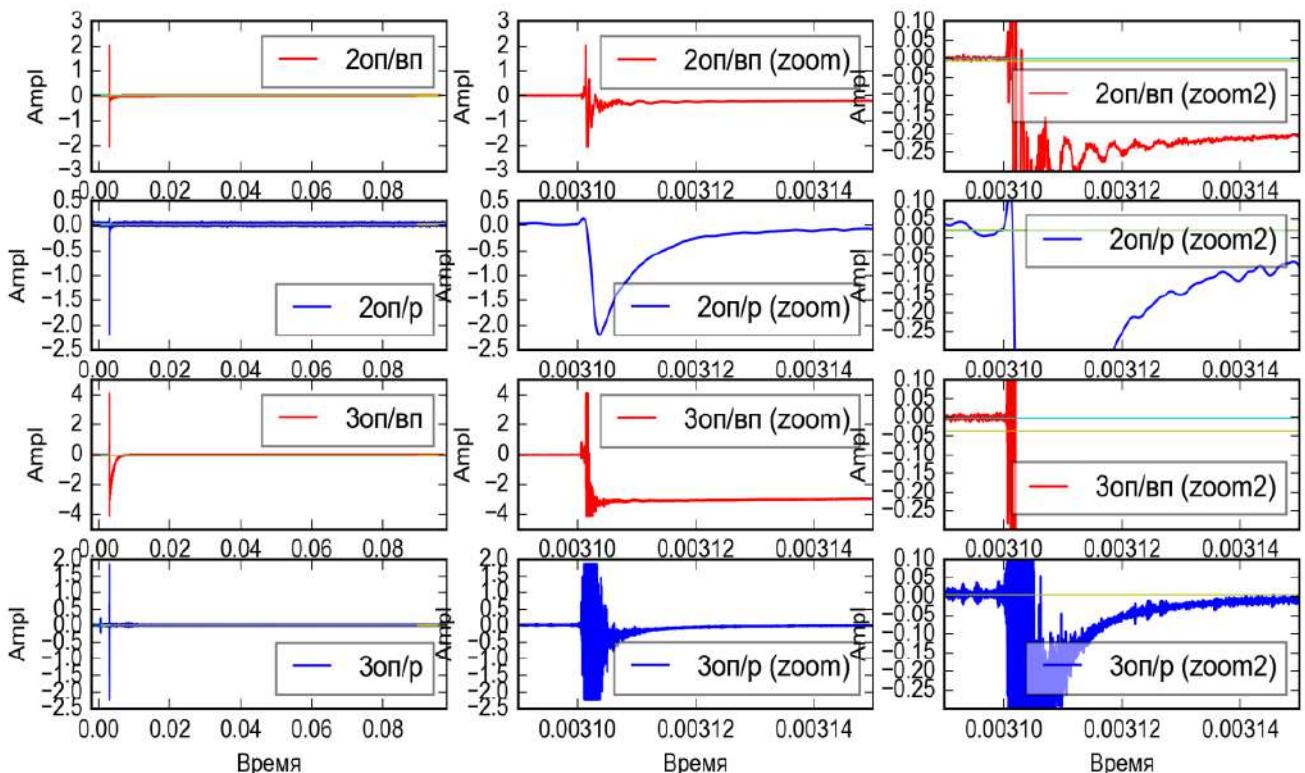


Рисунок 6.5 – Отклик на импульс в двух опытах электродов СИОМ (график обозначен «вп») и дублирующего конденсатора (обозначен «р»), температура минус 60 °С, дозы в импульсах 26 Гр и 22 Гр соответственно, средний и крайний правый столбки – более подробно начальный участок по времени после импульса

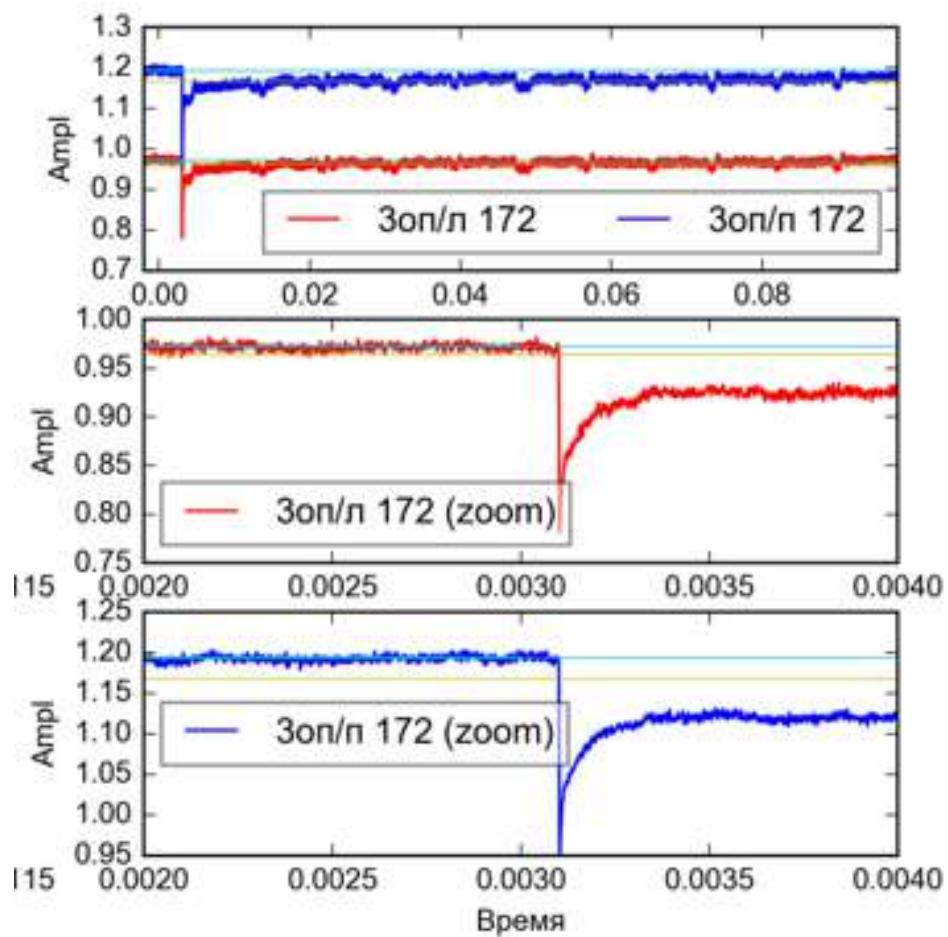


Рисунок 6.6 – Сигнал на фотоприемниках левого и правого канала СИОМ во время повторного облучения, доза в импульсе 22 Гр, температура минус 60 °С

6.3. Влияние импульсного гамма-нейтронного излучения на образцы СИОМ

Исследование воздействия импульсного гамма-нейтронного облучения на оптические характеристики СИОМ проводилось с помощью импульсного реактора БР-1М при комнатной температуре. Длительность импульса составляла 60-70 мкс, поток нейtronов в импульсе варьировался от опыта к опыту от $1,5 \cdot 10^{13}$ н/см² до $3,8 \cdot 10^{13}$ н/см², сопутствующая доза гамма-излучения от 15 Гр до 72 Гр.

После воздействия ИИ процесс восстановления оптической мощности СИОМ до значений, примерно равных первоначальной занимал до 600 с (Рисунок 6.7). После воздействия импульсного фотонного излучения восстановление занимало до 0,1 с. Замедление времени восстановления в 6000 раз по отношению к опыту с фотонным излучением частично можно отнести к разнице мощности дозы (различие в мощности дозы по гамма-излучению примерно в 3000 раз). Но в отличие от фотонного воздействия, зафиксированы два дополнительных переходных процесса отсроченной реакции на воздействие (через примерно 200 с и через 400 с), которые привели к скачкообразному уменьшению оптической мощности и далее попытке ее плавного восстановления.

Коэффициент сохранения поляризации излучения (СПИ) после выброса во время воздействия плавно уменьшился на 0,1 дБ (Рисунок 6.7).

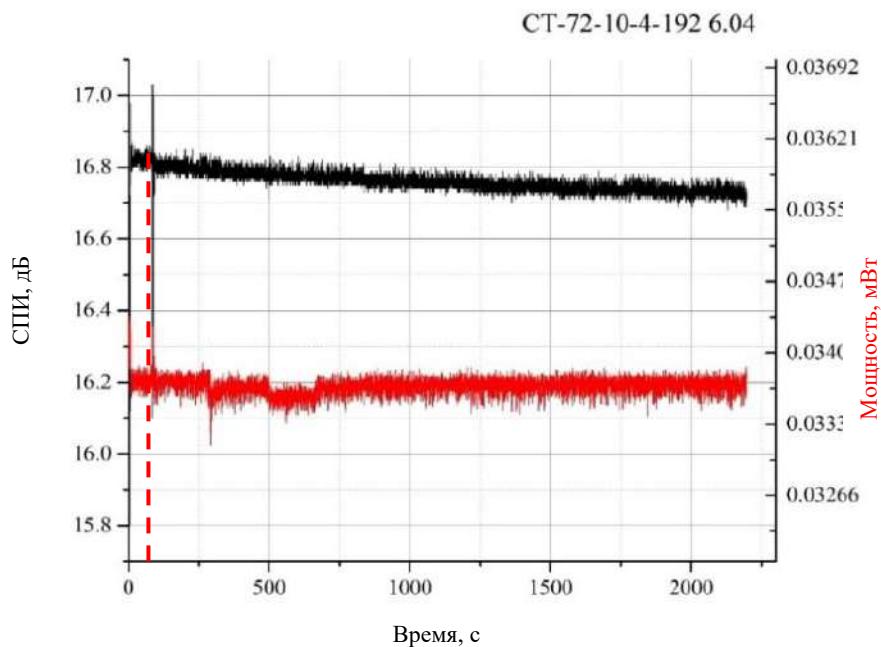


Рисунок 6.7 – Зависимость от времени коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ, дБ) и оптической мощности СИОМ (мВт) после воздействия импульсного потока нейтронов $1,5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 38 Гр, импульс примерно на 100-й секунде (показан вертикальной пунктирной линией)

Повторные облучения СИОМ также привели к отсроченной реакции на воздействие, фиксируемое по сигналу выходящей оптической мощности. На Рисунке 6.8 приведены графики изменения СПИ и оптической мощности на одном канале СИОМ во время и после третьего по счету импульсного воздействия. По сравнению с первым и вторым опытами, наблюдается, наоборот, небольшое возрастание СПИ, и при этом появились оптические потери в сигнале выходной оптической мощности, которые практически не релаксируют. Также изменился характер изменения оптической мощности во втором процессе постреакции – уменьшение оптической мощности стало плавным (в течение 100 с), близким к экспоненциальному виду, после которого волновод слабо пытается восстановиться в течение последующих еще примерно 100 с, после которых выходная оптическая мощность перестает изменяться.

Аналогичные циклы облучений проводились на нескольких образцах СИОМ и показали схожие результаты. Поскольку на соседних измерительных каналах, где были подключены образцы АОВ, ПGeO₂ и PsiO₂, ничего похожего не наблюдалось, то следует отнести эти процессы именно к изменениям в структуре материала волноводов СИОМ.

Поскольку изменения оптической мощности и СПИ незначительны, и гарантировано находятся в пределах допуска, на работе ВОГ реакция оптических характеристик СИОМ сказаться не должна.

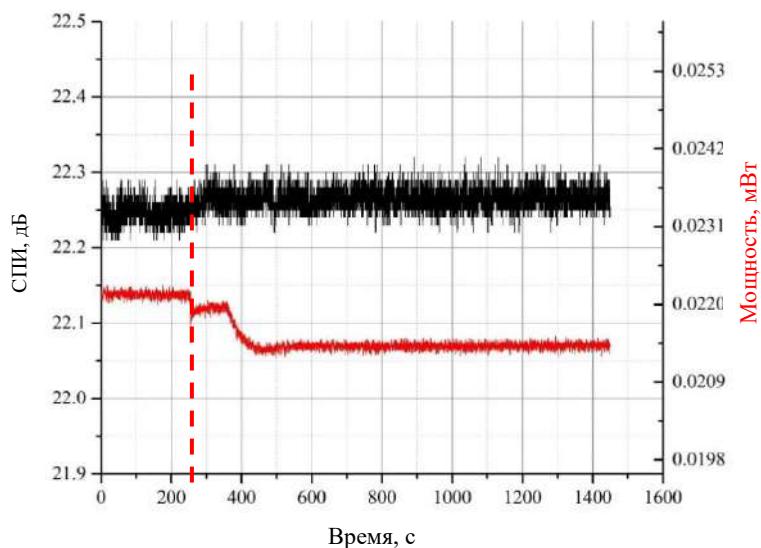


Рисунок 6.8 – Зависимость от времени коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ, дБ, черная линия) и оптической мощности СИОМ (мВт, красная линия) после воздействия третьего последовательного облучения импульсным потоком нейтронов $3,2 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 76 Гр, импульс на 250-й секунде (показан вертикальной пунктирной линией)

Влияние квазиимпульсного гамма-нейтронного излучения

Для выяснения фактора, влияющего на возникновение переходных процессов в структуре волноводов СИОМ были проведены опыты по квазиимпульсному облучению. Образец СИОМ облучался в течение 150 с потоком нейтронов $3,2 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 740 Гр.

Во время воздействия зафиксировано уменьшение оптической мощности на 5 % без существенного восстановления, значение СПИ стало незначительно увеличиваться до 0,2 % в конце записи опыта, наблюдаемые изменения параметров образца находятся гарантированно в пределах допуска (Рисунок 6.9). Никаких переходных процессов после облучения не зафиксировано. Восстановления оптической мощности за время опыта не происходит, что говорит о необратимых изменениях в материале волноводного слоя.

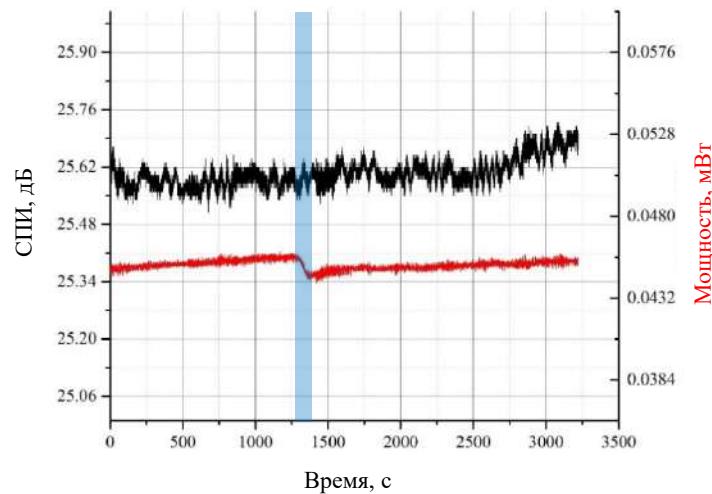


Рисунок 6.9 – Зависимость значений СПИ и оптической мощности одного канала образца СИОМ от времени после воздействия потока нейтронов $3,2 \cdot 10^{13}$ н/см² и дозы по гамма-излучению 740 Гр в течение 150 с (выделены синим прямоугольником)

Анализ результатов по влиянию ИИ на образцы СИОМ

Для исследуемых уровней воздействия ИИ и температур в опыте установлено полное восстановление характеристик СИОМ за исключением воздействия квазиимпульсного гамма-нейтронного облучения, а также импульсного гамма-нейтронного облучения, если оно повторное или последующее. Полное восстановление характеристик СИОМ возможно только при обратимых изменениях материала протонообменного волновода. Первое облучение импульсным потоком нейтронов также не вызывает необратимых изменений в волноводе, но вызывает переходные процессы в волноводе уже после облучения.

Последующие импульсные облучения нейtronами приводят к необратимым изменениям в материале волновода, причем за счет именно переходных процессов после облучения. К необратимым изменениям (или слабо релаксируемым процессам) приводит также облучение потоком нейтронов с уменьшенной мощностью, но с увеличенной дозой по гамма-излучению, причем переходных процессов не наблюдается. Таким образом, фактором, вызывающим переходные процессы в СИОМ, может быть только большая мощность потока нейтронов при импульсном облучении ($6 \cdot 10^{17}$ н/см² с⁻¹).

Протонообменный волноводный слой СИОМ является α -фазой твердого раствора $H_xLi_{1-x}NbO_3$ на X-срезе монокристалла ниобата лития. Фотография волновода на электронном микроскопе в BSE контрасте (обратнорассеянные вторичные электроны) показывает, что структура поверхности волновода более плотная, чем поверхность кристалла, также имеется переходный слой вокруг волновода (Рисунок 6.10). Протонообменный слой сформирован α -фазой $H_xLi_{1-x}NbO_3$, в которой имеется повышенное содержание протонов замещения по сравнению с исходным кристаллом. Формирование происходит в две стадии, через отжиг β -фазы, в которой большое количество межузельных протонов. Также необходимо принять во внимание наличие аморфизированного поверхностного слоя волновода из-за механической обработки пластин кристалла [236]. Переходный слой должен содержать заряженные дислокации

несоответствия [237], поскольку материал волновода когерентно связан с кристаллической решеткой окружающего кристалла (материал подложки), и кристалл находится в сегнетоэлектрической фазе.

Протоны в кристалле достаточно подвижны, поскольку для перестройки протонной подрешетки требуется относительно небольшая энергия, фазовые переходы в протонно-обменном слое происходят при температурах менее 500 °C [238, 239]. Таким образом, сам волновод и окружающее его пространство представляют собой довольно сложную структуру как с точки зрения распределения зарядов, так и относительно способности к перестройкам. Под действием ИИ вполне возможны как обратимые, так и необратимые изменения в структуре волновода с участием протонов.

Тем не менее, поскольку все изменения оптических характеристик СИОМ при воздействии ИИ гарантированно находятся в пределах допуска и изменений конструкции и технологии не требуется, было принято решение более детальных исследований причин изменений не проводить.

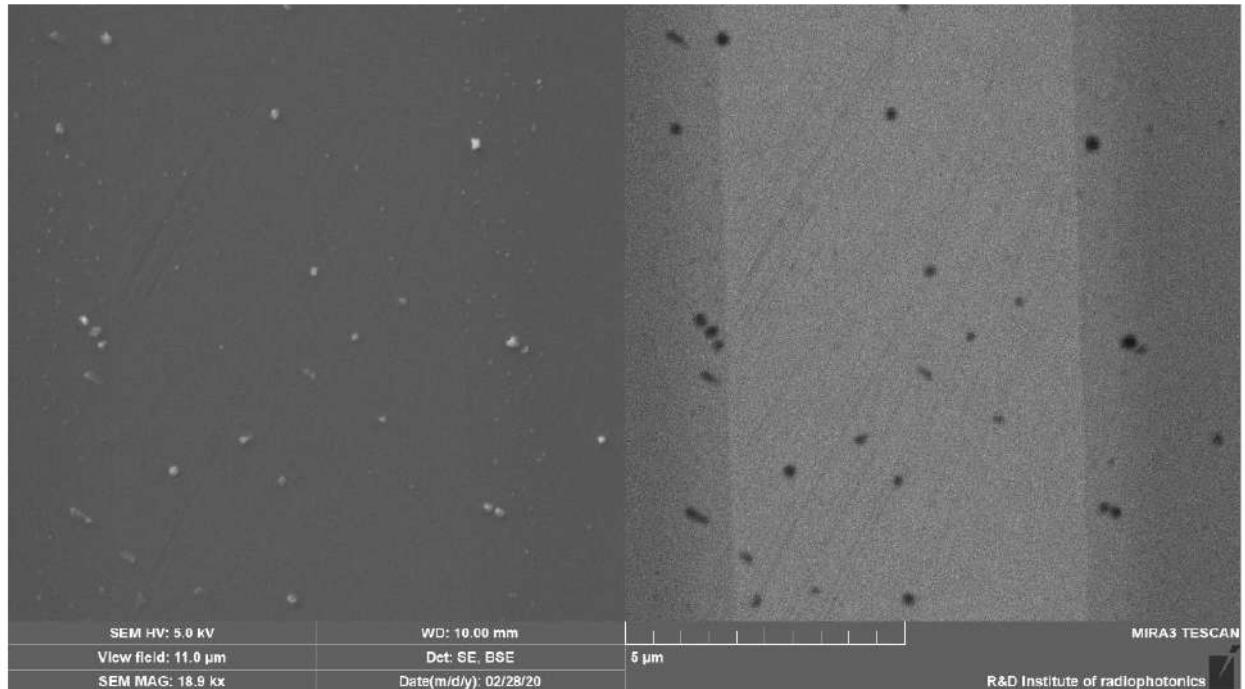


Рисунок 6.10 – Фотография протонообменного канального волновода СИОМ в BSE контрасте. Более темное поле – поверхность кристалла ниобата лития, более светлая область – протонообменный слой

Выходы по главе 6

1. СИОМ является наиболее стойким компонентом ВОГ. РНП образцов СИОМ в результате воздействия как непрерывного (при температурах минус 50 °C, +25 °C, +60 °C, дозы до 2 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с), так и импульсного ионизирующего излучения (доза тормозного излучения в импульсе до 30 Гр и длительности импульса 20 нс и гамма-нейтронного излучения длительностью импульса 70 мкс с потоком нейтронов до $3,2 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 76 Гр), не выходят за рамки допустимых изменений оптической мощности в процессе эксплуатации. Это позволяет обеспечить непрерывную работу прибора в условиях импульсного излучения для исследуемого диапазона доз в импульсе.

2. Импульсное воздействие гамма-нейтронного излучения вызывает в структуре протонно-обменного волноводного слоя переходные процессы, фиксируемые как скачкообразное или плавное (в случае повторных воздействий) уменьшение выходной оптической мощности СИОМ, после которых параметры волновода плавно релаксируют.

Глава 7. Радиационная стойкость оптических компонентов ВОИД

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

7.1. Стойкость к непрерывному облучению

Рассмотрим полученные результаты по стойкости к непрерывному облучению основных оптических компонентов ВОГ с точки зрения проектирования ВОГ или других ВОИД.

В оптический тракт ВОИД обычно входят как протяженные волоконные элементы, так и элементы, имеющие малые длины оптического пути. На Рисунке 1.1 укрупненно изображена функциональная схема ВОГ. В оптический тракт кроме исследуемых в настоящей работе элементов (ВК, СИОМ, СВИ) входят волоконно-оптические разветвители и оптический изолятор. Исследование стойкости этих и других волоконных или объемных оптических элементов не входило в задачи работы как по причине их большого разнообразия, так и по причине того, что если элемент волоконный, то обычно он содержит волокно длиной единицы метров (как СИОМ).

Оценка стойкости даст ответ о необходимости применять радиационно-стойкое ОВ в элементе или достаточности использования элемента в нерадиационно-стойком исполнении. Предположим, разветвитель изготовлен из ОВ с германосиликатной сердцевиной. Наибольший уровень РНП ОВ можно ожидать при самой низкой температуре эксплуатации и при максимальной накопленной дозе (например, минус 60 °С и 1 кГр), пусть он составит 50 дБ/км (0,05 дБ/м). Если длина разветвителя 3 м, излучение в нем распространяется в обе стороны, то необходимо учесть РНП для оптического пути 6 м. РНП разветвителя в оптическом тракте составят ~0,3 дБ. Оптические компоненты в объемном исполнении дадут еще меньший вклад из-за малого оптического пути.

Тем не менее, при использовании нескольких компонентов следует провести оценку суммарного вклада компонентов в РНП оптического тракта ВОИД.

Теперь рассмотрим результаты по стойкости СИОМ, СВИ и волоконного контура чувствительного элемента в радиационно-стойком исполнении. Полученные в работе результаты ценные в первую очередь для понимания соотношения вкладов этих компонентов в изменение характеристик оптического тракта и выявления основных влияющих факторов во время эксплуатации, которые требуют учета при проектировании ВОИД.

Для условий комнатной температуры РНП при поглощенной дозе 1 кГр с мощностью дозы 1 Гр/с распределились следующим образом: РНП СИОМ менее 0,01 дБ, РНП PSiO_2 примерно 3,5 дБ/км, РНП СВИ для однопроходной схемы со встречной накачкой и отключенной обратной связью примерно 2,6 дБ (а также дополнительно изменение средневзвешенной длины волны на 2,2 нм). Таким образом, вклад СИОМ можно не учитывать, вклады от PSiO_2 и СВИ сопоставимы между собой. Для волоконного контура длиной 1 км суммарные РНП оптического тракта получаются не более 6,5 дБ.

Для обеспечения корректной работы ВОГ или ВОИД с такими компонентами, предназначенного для работы при комнатной температуре в условиях мощности дозы 1 Гр/с необходимо уделить внимание выбору фотоприемника с динамическим диапазоном и уровнем шумов, позволяющим обеспечить соотношение сигнал/шум, требуемое техническим заданием на ВОИД, с учетом уменьшения выходной оптической мощности в оптическом тракте из-за РНП, выбору лазерного диода накачки, обеспечивающего увеличение тока накачки для уменьшения РНП СВИ. Следует также принять меры по учету систематической погрешности изменения средневзвешенной длины волны СВИ, в том числе, применять конфигурации схем СВИ, позволяющих уменьшить РНП и изменение $\Delta\lambda_{\text{ср}}$.

Корректная оценка РНП оптического тракта ВОИД может быть получена только с учетом полной модели внешних воздействующих факторов при эксплуатации: накопленной дозы, мощности дозы, температуры эксплуатации,

величины входной оптической мощности, уровня напряженно-деформированного состояния ОВ. Поскольку влияющие факторы действуют на РНП разнонаправлено и степень их влияния различна, то достоверное значение РНП могут дать только испытания при условиях максимально близких к условиям эксплуатации.

По результатам главы 3 можно построить примерный алгоритм приближенной оценки РНП ОВ на длине волны 1550 нм для условий эксплуатации, отличающихся от условий опытов, в которых получены данные по стойкости ОВ. Если в первом приближении считать влияющие факторы действующими независимо, то уточнение РНП с учетом их действия можно провести последовательно.

Величина накопленной дозы. Зависимость РНП от накопленной (или поглощенной) дозы при конкретной мощности дозы по многочисленным литературным данным носит характер степенной функции.

Мощность дозы. Например, для условий применения в космосе значение РНП равное 6,5 дБ – очень консервативная оценка, поскольку мощность дозы может быть значительно меньше, до 10^{-5} рад/с, и, соответственно, РНП могут быть значительно меньше, поскольку РНП зависят от мощности дозы как от степенной функции, показатель степени которой может быть найден экспериментально при исследовании РНП ОВ при конкретной поглощенной дозе для нескольких значений мощности дозы, желательно как можно в более широком диапазоне. При этом необходимо подходить к полученной оценке осторожно, поскольку от мощности дозы, в первую очередь, зависят РНП, обусловленные нестационарными РЦО, которые проявляются отчетливо при существенных мощностях доз.

Температура эксплуатации. Получена экспоненциальная зависимость РНП от температуры, при этом РНП возрастает с понижением температуры. Эмпирические коэффициенты этой зависимости также могут быть найдены по результатам исследований при нескольких температурах. Но и к этой зависимости также необходимо относиться только как к приближенной оценке,

поскольку у разных типов РЦО в конкретном ОВ зависимость концентрации РЦО от температуры может быть различна, поэтому в определенных диапазонах температур зависимость РНП от температуры может иметь немонотонный характер (пример такого поведения РНП приведен в диссертации П.Ф. Кашайкина [38]).

Уровень входной оптической мощности. Так же, как и в предыдущем случае, зависимость РНП от P_0 носит экспоненциальный характер, РНП возрастают при убывании P_0 .

Уровень напряженно-деформированного состояния ОВ. Зависимость РНП от этого фактора может быть оценена как степенная.

Действие различных факторов может привести как улучшению, так и ухудшению ситуации по РОС. Например, фотообесцвечивание при отрицательных температурах проявляется сильнее, поэтому требуется меньшее значение P_0 для снижения РНП. Причем в ряде случаев возможна полная компенсация повышенных РНП при отрицательных температурах до уровня РНП при комнатной температуре. При этом нет достоверных данных, насколько хорошо эти факторы будут работать при сверхмальных мощностях дозы. Проведение исследований продолжительностью от нескольких месяцев до нескольких лет, является технически сложным и экономически затратным. Поэтому при проектировании лучше опираться на худший вариант консервативной оценки.

7.2. Стойкость к импульсному облучению

Воздействие импульсного ИИ, вероятнее всего, приведет к РНП в оптическом тракте ВОИД, превышающим допуск возможных оптических потерь, что приведет к временной потере работоспособности. Результаты проведенных исследований показали, что время восстановления работоспособности оптического тракта ВОИД после воздействия импульсного ИИ, в первую очередь, будет определяться временем релаксации короткоживущих РЦО ($\tau_{соб}$) ОВ волоконного контура чувствительного элемента. Вклады в РНП СИОМ и СВИ можно не учитывать. Изменение средневзвешенной длины волны СВИ может внести погрешность в показания ВОИД, поэтому необходимо принимать меры по его учету.

На величину $\tau_{соб}$ основное влияние оказывают уровень напряженно-деформированного состояния ОВ (его повышение приводит к существенному увеличению $\tau_{соб}$) и величина входной оптической мощности (увеличение величины P_0 играет положительную роль), а также характеристики самого воздействия – наличие или отсутствие потока нейtronов. Влияние каждого из перечисленных факторов способно изменить величину $\tau_{соб}$ на несколько порядков величины, при этом степень влияния на $\tau_{соб}$ от потока нейtronов возрастает с увеличением уровня напряженно-деформированного состояния. Поэтому для сокращения $\tau_{соб}$ необходимо принимать меры по минимизации внутренних напряжений, внесенных в ОВ.

7.3. Рекомендации

Для повышения стойкости ВОИД к воздействию как непрерывного, так и импульсного ИИ можно сформулировать следующие рекомендации, которые предназначены для этапа проектирования и эксплуатации ВОИД:

1. Для СВИ выбирать лазерный диод накачки с запасом увеличения тока накачки, достаточным для компенсации потери мощности в результате РНП АОВ.
2. За счет конструкции и технологии изготовления минимизировать уровень внутренних напряжений в волоконном контуре чувствительного элемента ВОИД.
3. Увеличивать уровень входящей в ВК 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 средневзвешенной длины волны СВИ.

Выводы по главе 7

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.

Сформулированы следующие защищаемые положения:

- РОС волоконного контура и СВИ в равной степени определяют РОС ВОИД при воздействии непрерывного ИИ.
- Время восстановления характеристик ВОИД определяется временем релаксации РНП волоконного контура после воздействия импульсного ИИ.

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 ИИ РНП ВОГ в равной мере складывается из РНП СВИ и волоконного контура, РНП СИОМ являются незначительными.
9. Алюмо-германосиликатная матрица стекла эрбиевых АОВ с за счет высокого уровня легирования алюминием и германием в сочетании с легированием церием обеспечивает ширину спектра люминесценции АОВ 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 $7,3 \cdot 10^{-4}$), 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе РОС оптических компонентов исследована с учетом их назначения и требований к ним со стороны конструкции ВОИД. Выявлены основные оптические компоненты и их характеристики, изменение которых под воздействием ИИ может существенно повлиять на погрешность показаний ВОИД. В качестве показательного примера ВОИД рассмотрен оптический тракт ВОГ и его основные оптические компоненты: СИОМ, ВК, СВИ.

В результате анализа научно-технической информации сделаны выводы о несопоставимости данных РОС оптических компонентов, полученных в различных исследованиях и обоснована необходимость исследования РОС оптических компонентов при одних и тех же условиях опытов, желательно одновременно в одном опыте. Особенно это касается исследований на воздействие импульсного ИИ. С учетом этого разработаны методики исследования наиболее критичных с точки зрения влияния на погрешность показаний ВОИД характеристик ОВ, АОВ и СИОМ. Для проведения исследований выбраны наиболее подходящие установки для моделирования воздействия ИИ и сформирован комплекс контрольно-измерительного и вспомогательного оборудования и оснастки, позволяющий достоверно регистрировать изменения оптических характеристик.

Проведены исследования влияния вида, мощности дозы и величины поглощенной дозы ИИ на оптические характеристики групп практически идентичных образцов СИОМ, АОВ в однопроходной схеме СВИ с встречной накачкой, ОВ с кварцевой и германосиликатной сердцевинами в виде свободной намотки и гироскопических волоконных контуров. Поскольку в исследовании использовали группы практически идентичных образцов каждого вида, то результаты исследований позволили сопоставить данные по стойкости к непрерывному и к импульсному ионизирующему излучению. Установлено, что время восстановления работоспособности ВОГ, построенного на радиационно-стойких оптических компонентах, при воздействии импульсного

ионизирующего излучения определяется, в первую очередь, временем релаксации РНП ОВ гироскопического волоконного контура. В случае непрерывного ионизирующего воздействия, работоспособность ВОГ определяется как РНП ОВ «Панда», так и АОВ, легированного эрбием и церием. При этом возможно уменьшить РНП в оптическом тракте ВОГ увеличением мощности диода накачки, а изменение средневзвешенной длины волны излучения СВИ дополнительно целесообразно компенсировать как систематическую погрешность. Оптические параметры СИОМ практически не изменяются при воздействии ионизирующего излучения и их деградацию можно не учитывать при оценке оптических потерь и сохранения поляризации излучения в оптическом тракте ВОГ.

Анализ научно-технической информации по РОС пассивных ОВ показал преимущества ОВ с чистой кварцевой сердцевиной по сравнению с фторированием или легированием азотом. Исследования, изготовленных в ПАО «ПНППК» ОВ с сохранением поляризации излучения, впервые выявили высокую чувствительность РНП к уровню напряженно-деформированного состояния ОВ, а для ОВ с чистой кварцевой сердцевиной дополнительно к уровню входящей оптической мощности. Для ОВ с чистой кварцевой сердцевиной такое поведение обусловлено возникновением РЦО с полосой поглощения с энергией ~ 1 эВ. Применение технологических приемов, способствующих созданию дефицита кислорода в стекле чистой кварцевой сердцевины ОВ, позволило значительно уменьшить возникновение таких РЦО, что существенно повысило РОС ОВ с сохранением поляризации излучения. На основе полученных данных в ПАО «ПНППК» создана технология производства радиационно-стойкого одномодового ОВ с сохранением поляризации излучения.

Выявленная высокая чувствительность РНП ОВ к уровню напряженно-деформированного состояния, особенно при воздействии импульсного ИИ, требует учета при разработке конструкции и технологии ВК ВОГ или аналогичных ВОИД, поэтому необходимо принимать меры для снижения уровня напряженно-деформированного состояния.

Исследования РОС эрбиевых АОВ с матрицей стекла, легированной церием, показали необходимость дополнительного легирования матрицы стекла германием для повышения РОС. Состав стекла АОВ, показавший наилучшую стойкость к воздействию как непрерывного, так и импульсного ИИ, выбран в качестве целевого для создания, серийно изготавливаемого АОВ в ПАО «ПНППК».

Таким образом, на основе анализа известных разработок и полученных собственных результатов разработаны научные основы для создания технологии оптических компонентов с повышенной РОС.

Разработанная методология для изучения влияния ИИ на РОС оптических компонентов ВОИД, полученные в данной работе функциональные зависимости РНП ОВ с сохранением поляризации излучения от основных влияющих факторов, и экспериментальные результаты РОС исследуемых оптических компонентов могут быть использованы при дальнейших исследованиях РОС различных оптических компонентов, в инженерных расчетах при обосновании выбора архитектуры и компонентов, а также алгоритмов обработки сигнала ВОГ, и других ВОИД, предназначенных для условий эксплуатации при воздействии ИИ.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность генеральному директору ПАО «ПНППК» А.Г. Андрееву и заместителю генерального директора по науке – директору НТЦ – главному конструктору А.В. Субботину, выполнение данной работы стало возможным только благодаря их поддержке;

коллегам в ПАО «ПНППК»:

А.А. Полоскову и коллективу ЗОК за большой объем работ по изготовлению экспериментальных образцов, к.ф.-м.н. Д.И. Шевцову, О.Л. Вохмяниной, Ю.О. Шароновой, Е.А. Лунеговой (Поспеловой), к.ф.-м.н. А.С. Вахрушеву, А.А. Поносовой, А.Д. Шевцовой, Д.В. Хисамову за помошь в проведении исследований и обработке результатов измерений,

И.А. Есипенко, К.В. Кофферу за плодотворное обсуждение результатов работы;

НЦВО РАН: д.ф.-м.н.С.Л. Семенову, к.ф.-м.н. А.Л. Томашуку, П.Ф. к.ф.-м.н. Кашайкину, к.ф.-м.н. М.А. Мелькумову, к.ф.-м.н. А.Е. Левченко за методическую помошь в постановке экспериментов, предоставление оборудования и образцов для исследования, а также за результативное обсуждение итогов работы;

ИХВВ РАН: с.н.с. М.В. Яшкову за деятельное участие в постановке технологии радиационно-стойких активных волокон в ПАО «ПНППК»;

РФЯЦ-ВНИИЭФ: д.ф.-м.н. А.В. Грунину, А.В. Силаеву, к.ф.-м.н. А.В. Филиппову, д.ф.-м.н. О.М. Таценко и В.Ф. Таценко, к.ф.-м.н. Н.К. Миронову за ценные советы и консультации по особенностям постановки опытов, а также предоставление оборудования;

ПГНИУ: к.х.н. И.В. Петухову за консультации на всех этапах работы.

Автор искренне признательна д.т.н. М.А. Ероньяну за критические замечания и обсуждение результатов работы.

Отдельная благодарность моему научному консультанту и научному руководителю по кандидатской диссертации д.ф.-м.н., профессору, заведующему кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники ФМИ ПГНИУ А.Б. Волынцеву, его поддержка, критическое отношение к результатам и текстам работы оказали неоценимую помошь.

Список сокращений

ВОИД – волоконно-оптические интерферометрические датчики физических величин

ВОГ – волоконно-оптический гироскоп;

ИИ – ионизирующее излучение;

СИОМ – схема интегрально-оптическая многофункциональная;

ОВ – оптического волокна;

РОС – радиационно-оптической стойкости;

ПGeO₂ – оптическое волокно с сохранением поляризации излучения типа «Панда» с германосиликатной сердцевиной;

ПSiO₂ – оптическое волокно с сохранением поляризации излучения типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной;

ИSiO₂ – оптическое волокно изотропное одномодовое с нелегированной кварцевой сердцевиной;

ВК – волоконный контур (на каркасе);

БВК – бескаркасный волоконный контур;

СВИ – суперлюминесцентный волоконный источник излучения;

РЦО – радиационно-наведенные центры окраски;

РНП – радиационно-наведенные оптические потери;

БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;

ПИО – поляризатор интегрально-оптический;

Y – симметричный делитель;

ЭОМ – электрооптический модулятор;

РВО – разветвитель волоконно-оптический;

ФПМ – фотоприёмный модуль;

АОВ – активное оптическое волокно;

РВОСС – разветвитель волоконно-оптический спектрально-селективный;

ДН – диод накачки;

БУ – блок управления;

БОС – электронный блок обработки сигналов;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
МК – микроконтроллер;
ЗУП – защитно-упрочняющее полимерное покрытие;
КЛТР – коэффициент линейного температурного расширения;
ВВФ – внешних воздействующих факторов;
ПЭ – поляризационная экстинкция;
OCDP – optical coherence domain polarimetry – оптическая когерентная поляриметрия;
Н.у. – нормальные условия по температуре;
ppm – parts per million – одна миллионная часть;
СЛД – суперлюминесцентный лазерный диод;
МК – масштабный коэффициент;
ТЗЧ – тяжелые заряженные частицы;
АДС – автолокализованные дырочные состояния;
PCVD – плазменное химическое парофазное осаждение;
MCVD – модифицированное химическое парофазное осаждение;
НДС – напряженно-деформированное состояние
 P_0 – входная оптическая мощность

Список цитируемой литературы

1. Lefevre H.C. The fiber-optic Gyroscope / H.C. Lefevre. – London: Artec House, 2022. – 479 p.
2. Korkishko, Yu. Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000 / Yu. Korkishko, V. Fedorov, V. Prilutskiy, V. Ponomarev, I. Fedorov, S.M. Kostritskii, I. Morev, D. Obuhovich, S. Prilutskiy, A. Zuev, V. Varnakov // InertialSensors. – 2017. Vol. 10.1109, 8171490 P. 1-23.
3. Sagnac, G. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme / G. Sagnac // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. – 1913. – Vol. 95. – P. 708-710.
4. Schupe, D. M. Thermally Induced Nonreciprocity in the Fiber-Optic Interferometer / D. M. Schupe // Applied Optics. – 1980. – Vol. 9. – P. 654-655.
5. 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: 01.02.06 / Есипенко Иван Александрович. – Пермь, 2017. – 103 с.
6. Спецификации оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.coherent.com/resources/datasheet/components-and-accessories/nygyro-gyroscope-fibers-brochure.pdf>.
7. Спецификация оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/sites/default/files/2023-10/md05.10-pm-gyro-fiber.pdf>.
8. Спецификация оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.yoecgroup.com/Content/upload/pdf/202328488/Polarization-Maintaining-Fiber-for-FOG.pdf?rnd=231>.
9. Спецификация оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sphotonics.ru/Katalog%20produkci%20i%20tehnologij%20iXFiber.pdf>.
10. Андронова, И.А. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка / И.А. Андронова, Г.Б. Малыкин // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – № 8. – С. 849-873.
11. Филатов Ю.В. Волоконно-оптический гироскоп: учеб. пособие / Ю.В. Филатов. – СПб.: ЛЭТИ, 2003. – 52 с.
12. Чувствительная катушка для волоконно-оптического гироскопа: пат. 2465554 Рос. Федерации № 2011117434/28; заявл. 29.04.11; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30.
13. Новиков, Р. Л. Технологическое оборудование и методы повышения качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.14 / Новиков Роман Леонидович. – СПб., 2014. – 94 с.
14. Спецификация волоконной катушки для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/brochures/components-and-accessories/cohr-precision-wound-gyro-coils-brochure.pdf>.

15. Спецификация волоконной катушки для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://www.csrayzer.cn/static/upload/file/20210113/1610519201388651.pdf>.
16. Труфанов А.Н. О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах / А.Н. Труфанов, Н.А. Труфанов // Прикладная фотоника. – 2014. – Т. 1. – №1. – С. 97-111.
17. Сметанников О.Ю. Об одном способе повышения термостабильности стыковочного модуля ВОГ / О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных // Прикладная фотоника. 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 67-79.
18. Спецификация прибора PEM-330 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://tansing.com.tw/files/PEM-330-C-E-v131002.pdf>.
19. Спецификация СИОМ для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://idealphotonics.com/Integrated%20Optic%20Chip%20for%20Gyroscope.pdf>.
20. Спецификация прибора PXA-1000 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/PXA-1000-v212-8-30-19.pdf>.
21. Спецификация СИОМ для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://optolink.ru/documents/Catalog2022/Оптолинк_Каталог_2022_p4.pdf.
22. Böhm K. Low-Noise Fiber-Optic Rotation Sensing / K. Böhm, P. Russer, E. Weidel, R. Ulrich // Optics Letters. – 1981. – Vol. 6. – P. 64-66.
23. Bergh R.A. All-Single-Mode Fiber-Optic Gyroscope / R.A. Bergh, H.C. Lefèvre, H.J. Shaw // Optics Letters. – 1981. – Vol. 6. – P. 198-200.
24. Бурков В.Д. Волоконно-оптические гироскопы с эрбьевыми волоконными источниками излучения / В.Д. Бурков, В.П. Губин, А.И. Сазонов // Вестник Московского государственного университета – Лесной вестник. – 2007. – № 2. – С. 8-13.
25. Алейник А.С. Методы построения высокостабильных эрбьевых волоконных суперлюминесцентных источников оптического излучения / А.С. Алейник, Н.Е. Кикилич, В.Н. Козлов, А.А. Власов, А.Н. Никитенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16. – №4. – С. 593-607.
26. Курков А.С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – №10. – С. 881-900.
27. Шарков И.А. Влияние температурной нестабильности характеристик источника на показания волоконно-оптического гироскопа / И.А. Шарков, А.В. Рупасов, В.Е. Стригальев, С.А. Волковский // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №6 (88). – С. 31-35.
28. Park H.G. Er-doped superfluorescent Fiber Source with a 0.5-ppm long-term mean-wavelength stability / H.G. Park, M.J.F. Digonnet, G.S. Kino // Journal of Lightwave Technology. – 2003. – Vol. 21. – N 12. – P. 3427-3433.

29. Low noise fiber gyroscope system which includes excess noise subtraction: N 5331404 U.S. Patent N 983335; заявл. 20.11.1992; опубл. 19.07.1994.
30. Способ устранения зоны нечувствительности в волоконно-оптическом гироскопе: пат. 2472111 Рос. Федерация № 2011125199/284; заявл. 17.06.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
31. Способ повышения стабильности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопа: пат. 2671377 Рос. Федерация № 2017146014; заявл. 26.12.2017; опубл. 30.10.2018, Бюл. № 31.
32. Способ повышения точности волоконно-оптического гироскопа с закрытым контуром: пат. 2512599 Рос. Федерация № 2012145075/28; заявл. 24.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.
33. Способ повышения точности компенсации паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах волоконно-оптических гироскопов: пат. 2627015 Рос. Федерация № 2016134634; заявл. 25.08.2016; опубл. 02.08.2017, Бюл. № 22.
34. Способ повышения точности волоконно-оптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах: пат. 2566412 Рос. Федерация № 2014126410/28; заявл. 30.06.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30.
35. Способ повышения точности волоконно-оптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах: пат. 2566412 Рос. Федерация № 2014126410/28, заявл. 30.06.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30.
36. Fishman G. Observations of high-energy particles and radiation from thunderstorms: thunderstorms and elementary particle acceleration / G. Fishman, A. Chilingarian; Nor Amberd, Armenia, 6–11 September 2010. Eos, Transactions American Geophysical Union. 91. 10.1029/2010EO470005.
37. Barth J. The Evolution of the radiation environments / J. Barth // RADECS. – 2009 Short Course Session I. Brugge, Belgium / Document ID 20180001142.
38. Кашайкин П.Ф. Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне: дис. ... канд. ф.-м.н: 01.04.07 / Кашайкин Павел Фёдорович. – Москва, 2019. 147 с.
39. Бекман И.Н. «Ядерная Индустрия», курс лекций. «Лекция 9. Источники ионизирующего излучения». МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, 2005 г., стр. 29.
40. Гуськов Н.А. Волоконная оптика в радиационной обстановке / Н.А. Гуськов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – № 8. – С. 52-65.
41. Hill M. Radiation tolerant passive and active optical fiber products for use in space environments / M. Hill, J. Hankey, R. Gray // Proc. SPIE International Conference on Space Optics – ICSO. – 2014. – Vol. 10563. – N. 1056328.
42. Егоров Д.А. Проблемы обеспечения радиационной стойкости волоконно-оптических гироскопов и пути ее повышения / Д.А. Егоров, А.В. Рупасов, А.А. Унтилов // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26. – № 4 (103). – С. 23-42.

43. Дианов Е.М. Перспективы использования диапазона длин волн 1-1,6 мкм для осуществления волоконно-оптической связи / Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7. – № 3. – С. 458-464.
44. Friebel E. J. Survivability of optical fibers in space / E. J. Friebel, M. E. Gingerich, D. L. Griscom // Optical materials reliability and testing: Benign and adverse environments. International Society for Optics and Photonics. 1993. Vol. 1791. P. 177-189.
45. Jin J. Effect of color center absorption on temperature dependence of radiation-induced attenuation in optical fibers at near infrared wavelengths / J. Jin, J. Liu, X. Wang, J. Guo, N. Song // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31. – N. 6. – P. 839-845.
46. Valle M. J. L. Radiation-induced loss predictions for pure silica core polarization-maintaining fibers / M. Valle, E. Friebel, F. Dimarcello, G. Miller, E. Monberg, L. Wasserman, P. Wisk, M. Yan, E. Birtch // Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks III. International Society for Optics and Photonics. – 2006. – Vol. 6193. –N. 61930J.
47. ГОСТ Р МЭК 60793-1-54-2015. Волокна оптические. Часть 1-54 Методы измерений и проведение испытаний. Гамма-излучение. Дата введения 01.07.2016.
48. Glasstone S. The effects of nuclear weapons / S. Glasstone, P.J. Dolan. – United States Department of Defense, Energy Research and Development Administration. 1977. C. 653.
49. Barnes C. Radiation effects in photonic modulator structures / C. Barnes, R. Greenwell // Photonics for space environments, Proc of SPIE. 1995. Vol. 2482. P. 48–83.
50. Taylor E.W. Behavior of coupled waveguide devices in adverse environments / E.W. Taylor // Proc. SPIE, Fiber Optics'90. 1990. Vol. 1314(155). P. 13.
51. Taylor E.W. Radiation induced crosstalk in a proton exchanged LiNbO₃ directional coupler / E.W. Taylor, S.P. Chapman, A.D. Sanchez, M.A. Kelly, J. Stohs, D.M. Craig // Proc. of SPIE, Photonics for space environments III. 1995. Vol. 2482(99). P. 10.
52. Pentrack D. Effects of combined neutron and gamma radiation on a LiNbO₃ directional polarization maintaining coupler (passive) and a large core multimode 1×2 coupler / D. Pentrack, J. Hatch, R. Greenwell, M. Pama, D. Lahti, K. Krishnan // Photonics for Space environments, Proc of SPIE. 1995. Vol. 2482. P. 109–119.
53. Kanofsky A.S. Radiation effects on proton exchange waveguides / A.S. Kanofsky, W. Minford // Proc. SPIE, Integrated Optical Circuits II. 1992. Vol. 1794(62). P. 8.
54. Kanofsky A.S. Proton radiation effects on various electro-optical devices / A.S. Kanofsky // Proc. of SPIE. 1994. Vol. 2074. P. 204–213.
55. Яковлев В.Ю. Короткоживущие центры окраски и люминесценция в облученных импульсными электронными пусками кристаллах LiNbO₃ / В.Ю. Яковлев, Е.В. Кабанова, Т. Вебер, П. Пауфлер // Физика твердого тела. 2001. Том 43(8). С. 1520-1524.
56. Палатников М.Н. Исследования свойств гамма-облученных кристаллов ниобата лития различного химического состава / М.Н. Палатников, И.Н.

Ефремов, Н.В. Сидоров, О.В. Макарова, В.Т. Калинников // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение: спецвыпуск. 2015. №5 (31). С. 439-443.

57. Палатников М.Н. Радиационная стойкость нелинейнооптических кристаллов ниобата лития, легированных Y, Gd и Mg / М.Н. Палатников, И.Н. Ефремов, Н.В. Сидоров, О.В. Макарова, В.Т. Калинников // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 8. С. 880-884.
58. Ding, D. The effects of space irradiation on the performances of y-waveguide multifunction integrated optical circuit / D. Ding, L. Guojun, G. Feng, X. Yanrong // International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM). 2015. P. 111-114.
59. Taylor E.W. Radiation effects in LiNbO₃ Properties of Lithium Niobate. – E.W. Taylor / London: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers. 2002. P. 359-371.
60. Lai C.C. Study of gamma-irradiation damage in LiNbO₃ waveguides / C.C. Lai, C.Y. Chang, Y.Y. Wei, W.S. Wang // Photonics Tech. Lett. 2007. Vol. 19 (13). P. 1002-1004.
61. Dewen L. Mechanism of radiation effects on fiber optic gyros / L. Dewen, X. Wen, W. Bo // ActaOptica Sinica. 2008. Vol. 28(3). P. 419-422.
62. Zheng, D. Effects of proton radiation on LiNbO₃ multifunction integrated optical circuit / D. Zheng, H. Hu // Semiconductor optoelectronics. 2011. Vol. 32(3). P. 343-347. (2011).
63. Thomes Jr.W. Investigation of hermetically sealed commercial LiNbO₃ optical modulator for use in laser/LIDAR space-flight applications / Jr, W. Thomes, F. LaRocca, M. Ott, X. Jin, R. Chuska, S. MacMurphy, T. Jamison // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2007. Vol. 6713. P. 21.
64. Girard S. Radiation hardening of optical fibers and fiber sensors for space applications: recent advances / S. Girard, A. Ladaci, T. Robin, B. Cadier, A. Boukenter, Y. Ouerdane, E. Pinsard, A. Laurent, L. Mescia // International Conference on Space Optics. 2014. Vol. 7. P. 10.
65. Li M. Gamma radiation effects on the DPB SFS in space FOGs applications / M. Li, N. Song, J. Jin, X. Wang // Optic-International Journal for Light and Electron Optics. 2012. Vol. 123 (17). P. 1542-1545.
66. Yang Y. Active radiation hardening technology for fiber-optic source / Y. Yang, X. Suo, M. Yang // Asia Pacific Optical Sensors Conference 2013. International Society for Optics and Photonics. 2013. ID 89240W-89240W. P. 4.
67. Peng T. S. A radiation-tolerant superfluorescent fiber source in double-pass backward configuration by using reflectivity-tuning method / T. S. Peng, L. A. Wang, R. Liu // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. Vol. 23. N. 20. P. 1460-1462.
68. Liu C. Gamma radiation effects on erbium-doped fiber in superfluorescent fiber source / C. Liu, L. Zhang, X. Wu, S. Ruan // Optical Fiber Technology. 2013. Vol. 19(5). P. 456-460.

69. Yang Y. Radiation-resistance technology for broadband fiber-optic source / Y. Yang, X. Suo, M. Yang, X. Shi, W. Jin // 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. Proc. of SPIE. 2011. Vol. 7753. P. 910-913.
70. Yuan-Hong Y. Radiation-induced attenuation self-compensating effect in super-fluorescent fiber source / Y. Yuan-Hong, S. Xin-Xin, Y. Wei // Chinese Physics B. 2014. Vol. 23. N. 9. N. 094213. P. 5.
71. Jing J. et al. Effect of radiation-induced mean wavelength shift in optical fibers on the scale factor of an interferometric fiber optic gyroscope at a wavelength of 1300 nm / J. Jing, W. Xue-Qin, L. Song, S. Ning-Fang // Chinese Physics B. 2012. Vol. 21. N. 9. P. 094220.
72. Hsu Z. Gamma ray effects on double pass backward superfluorescent fiber source for gyroscope application / Z. Hsu, Z. Peng, L.A. Wang, R. Liu, F. Chou, // Proc of SPIE. 2008. Vol. 7004. P. 70044M.
73. Лихачев М.Е. Радиационно стойкие эрбьевые волоконные световоды для гироскопов и систем космической связи / М.Е. Лихачев, К.В. Зотов, А.Л. Томашук, М.М. Бубнов, С.Л. Семенов, А.Ф. Косолапов, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов // Фотон-экспресс. 2009. № 6. С. 17-18.
74. Brichard B. Gamma dose rate effect in erbium doped fibers for space gyroscopes / B. Brichard, A. Fernandez, H. Ooms, Francis Berghmans // Proc. of the 16th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS16), Nara, Japan, 2003. PP. 336-339.
75. Wang W. The influence of Er-doped fiber source under irradiation on fiber optic gyro / W. Wang, X. Wang, J. Xia // Optical Fiber Technology. 2012. Vol. 18. P. 39-43.
76. Williams G.M. Space radiation effects on erbium doped fibers / G.M. Williams, M.A. Putnam, E.J. Friebel // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2811. P. 30-37.
77. Rose T.S. Gamma and proton radiation effects in erbium-doped fiber amplifiers: active and passive measurements / T.S. Rose, D. Gunn, G.C. Valley // Journal of Lightwave Technology. 2001. Vol. 19. N. 12. P. 1918-1923.
78. Williams G.M. Space radiation effects on erbium-doped fiber devices: sources, amplifiers and passive measurements / G.M. Williams, E.J. Friebel // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45. N. 3. P. 399-404.
79. Tortech B. Gamma radiation-induced loss in erbium doped optical fibers / B. Tortech, M. Van Uffelen, A. Goussarov, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J.-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont // Journal of Non-Crystal Solids. 2007. Vol. 353. N. 5-7. P. 477-480.
80. VanUffelen M. Gamma radiation effects in Er-doped silica fibers / M. VanUffelen, S. Girard, F. Goutaland, A. Gusalov, B. Brichard, F. Berghmans // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51. N. 5. P. 2763-2769.
81. Ayoub L. Rare earth doped optical fibers and amplifiers for space applications / PhD Dissertation University of Saint-Étienne. 2017. 176 P.
82. Волоконный световод (варианты) и способ его получения: пат. № 2222032 Рос. Федерация № 2000116833/28, заявл. 29.06.2000; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 2.
83. Ladaci A. Optimized radiation-hardened erbium doped fiber amplifiers for long space missions / A. Ladaci, S. Girard, L. Mescia, T. Robin, A. Laurent, B. Cadier,

M. Boutillier, Y. Ouerdane, A. Boukenter // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121(16). P. 163104.

84. Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения. – В.И. Арбузов / Учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО. 2008. С. 284.

85. Stroud J. S. Color-center kinetics in cerium-containing glass / J. Stroud // J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 2442-2450.

86. Stroud J. S. Color centers in a cerium-containing silicate glass J. Chem. Phys. 1962. Vol. 37. PP. 836-841.

87. Спецификация оптического волокна для усилителей [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://cybel-llc.com/wp-content/uploads/2021/06/IXF-RAD-AMP-2-PM_edB-rad-hard-space-grade-doped-pm-fiber.pdf.

88. Radiation-resistant rare-earth-doped optical fiber and method of radiation-hardening a rare-earth-doped optical fiber: US Patent 20130101261, N 13/806160; заявл. 25.04.2013; опубл. 05.05.2015.

89. Francesca D. D. Roles of dopants, interstitial O₂ and temperature in the effects of irradiation on silica-based optical fibers. PhD dissertation university of Saint-Étienne, Saint-Etienne. 2015. 197 P.

90. Williams G.M. Space radiation effects on Erbium-doped fiber devices: sources, amplifiers, and passive measurements / G.M. Williams, E.J. Friebel // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45(3). PP. 1531-1536.

91. Girard S. Radiation-hard erbium optical fiber and fiber amplifier for both low- and high-dose space missions / S. Girard, A. Laurent, E. Pinsard, T. Robin, B. Cadier, M. Boutillier, C. Marcandella, A. Boukenter, Y. Ouerdane // Optics Letters. 2014. Vol. 39(9). PP. 2541-2544.

92. Pinsard E. Radiation resistant erbium doped fiber for ASE source and fiber gyroscope application / E. Pinsard, A. Laurent, T. Robin, B. Cadier, S. Ferrand, J.-J. Bonnefois, C. Moluçon, M. Boutillier // Proc. SPIE International Conference on Space Optics – ICSO 2012. V.10564.

93. Girard S. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications / S. Girard, A. Morana, A. Ladaci, T. Robin, L. Mescia, J.-J. Bonnefois, M. Boutillier, J. Mekki, A. Paveau, B. Cadier // Journal of Optics. 2018. Vol. 20. 10.1088/2040-8986/aad271.

94. Griscom D. L. Nature of defects and defect generation in optical glasses / D. L. Griscom // Radiation Effects on Optical Materials. – International Society for Optics and Photonics. 1985. Vol. 541. P. 38-60.

95. Силинь А. Р. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. А.Р. Силинь, А.Н. Трухин / Рига: Зинатне. 1985. – 244 с.

96. Келли Б. Радиационное повреждение твердых тел: Пер. с англ. / Под ред. Ю.А. Осипьяна. М. Атомиздат. 1970. – 234 с.

97. Томашук А.Л. Отечественные радиационностойкие волоконные световоды / А.Л. Томашук, Д.А. Дворецкий, В.А. Лазарев, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик, М.Ю. Салганский, П.Ф. Кашайкин, В.Ф. Хопин, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 5. С. 111-124.

98. Griscom D.L. Self-trapped holes in pure-silica glass: A history of their discovery and characterization and an example of their critical significance to industry / D.L. Griscom // *J. Non-Cryst. Solids.* 2006. Vol. 352. P. 2601-2617.
99. Girard S. Transient radiation responses of optical fibers: Influence of MCVD process parameters / S. Girard, C. Marcandella, A. Alessi, A. Boukenter, Y. Ouerdane, N. Richard, P. Paillet, M. Gaillardin, M. Raine // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 2012. Vol. 59. PP. 2894-2901.
100. Girard S. Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges / S. Girard, J. Kuhnhenn, A. Gusarov, B. Brichard, M. Uffelen, Y. Ouerdane, A. Boukenter, C. Marcandella // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 2013. Vol. 60. №. 3. P. 2015-2036.
101. Tomashuk A.L. Radiation-resistant and radiation-sensitive silica optical fibers A.L. Tomashuk, K.M. Golant // *Advances in Fiber Optics.* International Society for Optics and Photonics. 2000. Vol. 4083. P. 188-202.
102. Kajihara K. Co^{60} gamma-ray-induced intrinsic defect processes in F-doped synthetic SiO_2 glasses of different fluorine concentrations / K. Kajihara, M. Hirano, L. Skuja, H. Hosono // *Materials Science and Engineering: B.* 2009. Vol. 161. P. 96-99.
103. Skuja L. Defects in oxide glasses / L. Skuja, M. Hirano, H. Hosono, K. Kajihara // *Physica status solidi: C.* 2005. Vol. 2. №. 1. P. 15-24.
104. Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide // *Journal of NON-crystalline Solids.* 1998. Vol. 239. № 1-3. P. 16-48.
105. Skuja L. Oxygen-excess-related point defects in glassy/amorphous SiO_2 and related materials / L. Skuja, K. Kajihara, M. Hirano, H. Hosono// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2012. Vol. 286. P. 159-168.
106. Tomashuk A.L. Formation mechanisms of precursors of radiation-induced color centers during fabrication of silica optical fiber preform / A.L. Tomashuk, M.O. Zabzhailov // *Journal of Applied Physics.* 2011. Vol. 109. № 8. P. 083103.
107. Awazu K. Strained Si–O–Si bonds in amorphous SiO_2 materials: a family member of active centers in radio, photo, and chemical responses / K. Awazu, H. Kawazoe // *Journal of Applied physics.* 2003. Vol. 94. №. 10. P. 6243-6262.
108. Ismail-Beigi S. Self-trapped excitons in silicon dioxide: mechanism and properties / S. Ismail-Beigi, S.G. Louie // *Physical review letters.* 2005. Vol. 95. № 15. P. 156401.
109. Itoh N. Excitons in crystalline and amorphous SiO_2 : formation, relaxation and conversion to Frenkel pairs / N. Itoh, T. Shimizu-Iwayama, T. Fujita // *Journal of noncrystalline solids.* 1994. Vol. 179. P. 194-201.
110. El-Sayed A.M. Nature of intrinsic and extrinsic electron trapping in SiO_2 / A.M. El-Sayed, M. Watkins, V.V. Afanas'ev, A. Shluger // *Physical Review B.* 2014. Vol. 89. № 12. P. 125201.
111. El-Sayed A.M. Optical signatures of intrinsic electron localization in amorphous SiO_2 / A.M. El-Sayed, K. Tanimura, A.L. Shluger // *Journal of Physics: Condensed Matter.* 2015. Vol. 27. № 26. P. 265501.
112. Griscom D.L. Self-trapped holes in amorphous silicon dioxide / D.L. Griscom // *Physical Review B.* 1989. Vol. 40. № 6. P. 4224.

113. Griscom D.L. Electron spin resonance characterization of self-trapped holes in amorphous silicon dioxide / D.L. Griscom // Journal of non-crystalline solids. 1992. Vol. 149. № 1-2. P. 137-160.
114. Chernov P. V. Spectroscopic manifestations of self-trapped holes in silica: theory and experiment / P.V. Chernov, E.M. Dianov, V.N. Karpechev, L.S. Kornienko, I.O. Morozova, A.O. Rybaltovskii, V.O. Sokolov, V.B. Sulimov // Phys. Stat. Sol. (b). – 1989. – Vol. 155. – P. 663–675.
115. Edwards A.H. Theory of the self-trapped hole in a-SiO₂ / A.H. Edwards // Physical review letters. 1993. Vol. 71. № 19. P. 3190.
116. Pacchioni G. Calculated spectral properties of self-trapped holes in pure and Ge-doped SiO₂ / G. Pacchioni, A. Basile // Physical Review B. 1999. Vol. 60. № 14. P. 9990.
117. Sicolo S. Structure and ESR properties of self-trapped holes in pure silica from first-principles density functional calculations / S. Sicolo, G. Palma, C. Valentin, G. Pacchioni // Physical Review B. 2007. Vol. 76. № 7. P. 075121.
118. Zabzhailov M.O. Radiation-induced absorption in optical fibers in the near-infrared region: the effect of H₂-and D₂-loading / M.O. Zabzhailov, A.L. Tomashuk, I. Nikolin, K.M. Golant // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. 2001. Vol. 1. P. 192-194.
119. Anoikin E.V. UV and gamma radiation damage in silica glass and fibres doped with germanium and cerium / E. Anoikin, A. Guryanov, D. Gusovsky, E. Dianov, V. Mashinsky, S. Miroshnichenko, V. Neustroev, V. Tikhomirov, Y. Zverev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1992. Vol. 65. N. 1-4. P. 392-396.
120. Regnier E. Low-dose radiation-induced attenuation at infrared wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres / E. Regnier, I. Flammer, S. Girard, F. Gooijer, F. Achten, G. Kuyt // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007. Vol. 54. N. 4. P. 1115-1119.
121. Tomashuk A.L. Performance of special radiation-hardened optical fibers intended for use in the telecom spectral windows at a megagray level / A.L. Tomashuk, E.M. Dianov, K.M. Golant, R.R. Khrapko, D.E. Spinov // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45. № 3. P. 1566-1569.
122. Kashaykin P.F. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica optical fibers at different temperatures / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, M.Yu. Salgansky, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121(21). N. 213104.
123. Morana A. Extreme radiation sensitivity of ultra-low loss pure-silica-core optical fibers at low dose levels and infrared wavelengths / A. Morana, C. Campanella, J. Vidalot, V. De Michele, E. Marin, I. Reghioua, A. Boukenter, Y. Ouerdane, P. Paillet, S. Girard // Sensors. 2020. Vol. 20(24). P. 7254.
124. Wijnands T. Radiation tolerant optical fibers: From sample testing to large series production / T. Wijnands, K. Aikawa, J. Kuhnhenn, D. Ricci, U. Weinand // Journal of Lightwave Technology. 2011. Vol. 29. N. 22. P. 3393-3400.

125. Griscom D.L. Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers: Reduction of induced absorption bands associated with self-trapped holes / D.L. Griscom // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 71. N. 2. P. 175-177.
126. Радиационно-стойкий волоконный световод, способ его изготовления и способ повышения радиационной стойкости волоконного световода (варианты): пат. 2537523 Рос. Федерация № 2013141980/28; заявл. 13.09.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1.
127. Tomashuk, A.L. Behavior of strain-assisted self-trapped holes in pure-silica optical fibers upon pulsed-X-ray irradiation / A.L. Tomashuk, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, M.Yu. Salgansky, S.A. Vasiliev, O.V. Zverev, A.N. Guryanov, S.L. Semjonov // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 566. P. 120880.
128. Girard S. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers / S. Girard, A. Alessi, N. Richard, L. Martin-Samos, V. De Michele, L. Giacomazzi, S. Agnello, D. Di Francesca, A. Morana, B. Winkler, I. Reghioua, Ph. Paillet, M. Cannas, Th. Robin, A. Boukenter, Y. Ouerdane // *Reviews in Phys.* 2019. Vol. 4. P. 100032.
129. Kashaykin P.F. New radiation colour centre in germanosilicate glass fibres / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, S.L. Semjonov, E.M. Dianov // *Quant. Electron.* 2018. Vol. 48 (12). P. 1143-1146.
130. Kashaykin P.F. Observation of radiation-induced absorption of self-trapped holes in Ge-doped silica fiber in near infrared range at reduced temperature P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, V.F. Khopin, S. Firstov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 496. P. 24-28.
131. Michele V. De Steady-state X-ray radiation-induced attenuation in canonical optical fibers / V. De Michele, A. Morana, C. Campanella, J. Vidalot, A. Alessi, A. Boukenter, M. Cannas, P. Paillet, Y. Ouerdane, S. Girard // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2020. Vol. 67(7). P. 1650-1657.
132. Morana A. Temperature dependence of low-dose radiation-induced attenuation of germanium-doped optical fiber at infrared wavelengths / A. Morana, C. Campanella, M. Aubry, E. Marin, A. Boukenter, Y. Ouerdane, S. Girard // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2021. Vol. 69 (3). P. 512-517.
133. Girard S. Combined high dose and temperature radiation effects on multimode silica-based optical fibers / S. Girard, C. Marcandella, A. Morana, J. Perisse, D. Di Francesca, P. Paillet, Y. Ouerdane // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013. Vol. 60 (6). P. 4305-4313.
134. Michele V. De Pulsed X-ray radiation response of ultralow loss pure-silica-core optical fibers / V. De Michele, C. Marcandella, A. Morana, C. Campanella, J. Vidalot, P. Paillet, M. Gaillardin, E. Marin, Y. Ouerdane, A. Boukenter, S. Girard // *Phys. Status Solidi A*. 2022. Vol. 219 (2). P. 2100519.
135. Michele V. De Origins of radiation-induced attenuation in pure-silica-core and Ge-doped optical fibers under pulsed X-ray irradiation / V. De Michele, C. Marcandella, J. Vidalot, P. Paillet, A. Morana, M. Cannas, A. Boukenter, E. Marin, Y. Ouerdane, S. Girard // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 128 (10). P. 103101.
136. Michele V. De Pulsed X-ray radiation responses of solarization-resistant optical fibers / V. De Michele, C. Marcandella, D. Di Francesca, P. Paillet, A. Alessi, M.

Cannas, Y. Ouerdane, A. Boukenter, S. Girard // Phys. Status Solidi. 2018. Vol. 216 (3). P. 1800487.

137. Neustruev V.B. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres / V.B. Neustruev // Journal of Physics: Condensed Matter. 1994. Vol. 6. N. 35. P. 6901.

138. Tsai T.E. Radiation-induced defect centers in high-purity GeO_2 glass / T.E. Tsai, D.L. Griscom, E.J. Friebel // Journal of applied physics. 1987. Vol. 62. № 6. P. 2264-2268.

139. Friebel E. J. Defect centers in a germanium-doped silica-core optical fiber / E. J. Friebel, D. L. Griscom, Jr G. H. Sigel // Journal of applied physics. 1974. Vol. 45. N. 8. P. 3424-3428.

140. Alessi A. Formation of optically active oxygen deficient centers in Ge-doped SiO_2 by γ - and β -ray irradiation / A. Alessi, S. Agnello, D.G. Sporea, C. Oproiu, B. Brichard, F.M. Gelardi // Journal of Non-Crystalline Solids. 2010. Vol. 356. № 4-5. P. 275-280.

141. Anoikin E.V. Effects of exposure to photons of various energies on transmission of germanosilicate optical fiber in the visible to near IR spectral range / E.V. Anoikin, V.M. Mashinsky, V.B. Neustruev, Y.S. Sidorin // Journal of non-crystalline solids. 1994. Vol. 179. P. 243-253.

142. Girard S. 14-MeV Neutron, gamma X-Ray, and Pulsed X-Ray Radiation-Induced Effects on Multimode Silica-Based Optical Fibers / S. Girard, J. Baggio, J. Bisutti // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53. № 6. P. 3750-3757.

143. Girard S. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica core optical fibers / S. Girard, J. Keurinck, A. Boukenter, J.-P. Meunier, Y. Ouerdane, B. Azais, P. Charre, M. Vie // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2004. Vol. 215. P. 187-195.

144. Girard S. Comparative study of pulsed X-ray and γ -ray radiation- induced effects in pure-silica-core optical fibers / S. Girard, B. Brichard, J. Baggio, F. Berghmans, M. Decreton // 2005 8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Cap d'Agde, France, 2005, pp. A1-1-A1-8.

145. Girard S. Transient optical absorption in pulsed-X-ray-irradiated pure-silica-core optical fibers: Influence of self-trapped holes / S. Girard, D. L. Griscom, J. Baggio, B. Brichard, F. Berghmans // Journal of Non-Crystalline Solids. 2006. Vol. 352. N. 23-25. P. 2637-2642.

146. Moiseenko A.N. Optical Absorption of Quartz Fibers at Pulsed Irradiation With High-Energy γ -Quanta / A. Moiseenko, I. Markevsev, O. Tatsenko, V. Platonov, A. Filippov, E. Bychkova, I. Victorov, A. Kopkin // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45. N. 6. P. 990-996.

147. Горбунов Б.Б. Оптические материалы и волоконные световоды в экспериментах на импульсных ядерных реакторах / Б.Б. Горбунов, Л.Е. Довбыш, С.П. Мельников, А.В. Синицын // Сборник «Вопросы атомной науки и техники», серия: Физика ядерных реакторов. 2017. Вып. 4. С. 86-100.

148. Филиппов А.В. Стойкость волоконных световодов к импульсному воздействию ионизирующего излучения / А.В. Филиппов, А.Л. Томашук, А.Н. Моисеенко, Е.А. Бычкова, О.М. Таценко, Е.Т. Батова, И.В. Викторов, М.Ю. Салганский, П.Ф. Кашайкин, К.Н. Нищев, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов //

«XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2016. Т. 2. С. 301-303.

149. Sasajima Y. Optical transitions of self-trapped holes in amorphous SiO₂ / Y. Sasajima, K. Tanimura // Physical Review B. 2003. Vol. 68. P. 1 (014204).
150. Friebele E.J. Survivability of optical fibers in space / E.J. Friebele, M.E. Gingerich, D.L. Griscom // Proc. SPIE. 1992. Vol. 1791. P. 177-188.
151. Абрамов А.В. Термостимулированные переходы радиационных центров окраски в волоконных световодах на основе чистого кварцевого стекла // Физика и химия стекла. 1987. Т. 13. № 2. С. 226-230.
152. Дианов Е. М. Влияние температуры и уровня оптической мощности на наведенное поглощение в стеклянных волоконных световодах на основе чистого кварцевого стекла / Е.М. Дианов, Л.С. Корниенко, А.О. Рыбалтовский, П.В. Чернов // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 9. С. 1935-1944.
153. Henschel H. Radiation hardness of present optical fibres // Optical Fibre Sensing and Systems in Nuclear Environments. International Society for Optics and Photonics. 1994. Vol. 2425. P. 21-32.
154. Griscom D.L. Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers / D.L. Griscom, M.E. Gingerich, E.J. Friebele // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1994. Vol. 41. N. 3. P. 523-527.
155. Friebele E. J. Overview of radiation effects in fiber optics / E.J. Friebele, K.J. Long, C.G. Askina, M.E. Gingerich, M.J. Marrone, D.L. Griacom// Radiation Effects on Optical Materials. International Society for Optics and Photonics. 1985. Vol. 541. P. 70-89.
156. Griscom D. L. X-Ray-induced visible/infrared optical absorption bands in pure and F-doped silica-core fibers: Are they due to self-trapped holes? // Journal of non-crystalline solids. 2004. Vol. 349. P. 139-147.
157. Morita Y. Dose rate effect on radiation induced attenuation of pure silica core optical fibres / Y. Morita, W. Kawakami // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1989. Vol. 36. N. 1. P. 584-590.
158. Evans B.D. The role of hydrogen in pure silica optical fibers exposed to Co⁶⁰ radiation at -55 °C // SPIE Proc. 1989. Vol. 992. P. 121-130.
159. Girard S. Transient and steady-state radiation response of phosphosilicate optical fibers: Influence of H₂ loading / S. Girard, V. De Michele, A. Alessi, C. Marcandella, Di D. Francesca, P. Paillet, A. Morana, J. Vidalot, C. Campanella, S. Agnello, M. Cannas, M. Gaillardin, E. Marin, A. Boukenter, Y. Ouerdane // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol. 67(1). P. 289-295.
160. Филиппов А.В. Радиационно наведенное поглощение света в оптических волокнах на основе кварцевого стекла при воздействии мощного импульсного тормозного излучения: дис. ... к.ф.-м.н.: 1.3.2 / Филиппов Алексей Владимирович. – Саров, 2022. – 98 с.
161. Friebele E. J. Radiation-induced attenuation in polarization maintaining fibers: low dose rate response, stress, and materials effects / E.J. Friebele, L.A. Brambani, M.E. Gingerich, S.J. Hickey, J.R. Onstott // Applied Optics. 1989. Vol. 28 (23). P. 5138-5143.

162. Taylor E.W. Ionization-induced nonequivalent absorption in a birefringent silica fiber / E.W. Taylor, V.R. Wilson, M.L. Vigil, R.A. Lemire, E.E. Thompson // IEEE Photonics Technology Letters. 1989. Vol. 1 (8). P. 248-249.

163. Marrone M.J. Radiation-induced effects in a highly birefringent fiber / M.J. Marrone, S.C. Rashleigh, E.J. Friebele, K.J. Long // Electronic Letters. 1984. Vol. 20. N. 5. P. 193-194.

164. Du S. Gamma-radiation induced degradation random walk error in interferometer fiber optic gyroscope / S. Du, X. Wang, S. Lin, C. Zhang // Optica Applicata. 2011. Vol. 41. N. 4. P. 953-959.

165. Gill K. Gamma and neutron radiation damage studies of optical fibres / K. Gill, R. Grabit, M. Persello, G. Stefanini, F. Vasey // Journal of Non-Crystalline Solids. 1997. Vol. 216. P. 129-134.

166. Wijnands T. Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field / T. Wijnands, L.K. De Jonge, J. Kuhnhenn, S.K. Hoeffgen, U. Weinand // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol. 55. N. 4. P. 2216-2222.

167. Griscom D.L. Fundamental radiation-induced defect centers in synthetic fused silica: atomic chlorine, delocalized E' centers, and a triple state / D.L. Griscom, E.J. Friebele // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 34. N. 11. P. 7524-7533.

168. Friebele E.J. Radiation effects in polarization-maintaining fibers / E.J. Friebele, M.E. Gingerich, L.A. Brambani, C.C. Harrington, S.J. Hickey, J.R. Onstott // Proc. SPIE. 1990. Vol. 1314. P. 146-154.

169. Looney L.D. Transient radiation effects in polarization-maintaining fibers / L.D. Looney, P.B. Lyons // Proc. SPIE. 1993. Vol. 1791. P. 317-321.

170. Girard S. Pulsed X-ray and gamma-rays irradiation effects on polarization maintaining optical fibers / S. Girard, J. Keurinck, Y. Ouerdane, J. Meunier, A. Boukenter, J. Derep, B. Azais, P. Charre, M. Vi'e // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51 (5). P. 2740-2746.

171. Dongfa D. Radiation effects on opto-electronic devices for fiber-optic gyroscopes / D. Dongfa, L. Guojun, L. Jing, L. Jianchun, L. Peng // Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology, Harbin. 2011. P. 216-218.

172. Wang X. Radiation-induced effects in polarization-maintaining optical fibers for interferometric gyroscope / X. Wang, C. Zhang, J. Jin, N. Song // Chinese Optics Letters. 2011. Vol. 9 (6). P. 060601.

173. Спецификация оптического волокна GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fiber-optic-catalog.ofoptics.com/documents/pdf/27304-GyroSil-1550-Rad-Hard-Polarization-Maintaining-Optical-Fiber-web.pdf>.

174. Спецификация оптического волокна IXF-PMG-1550-80-019-Е [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.cybel-llc.com/wp-content/uploads/2018/12/IXF-PMG-1550-80-019-E-LS_Product-Specification.pdf.

175. Спецификация оптического волокна HB1500G-RT, HB1500G-RT-SB [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/polarization-maintaining-pm-fiber/pm-gyro-fiber/radiation-tolerant-pm-fiber/hb1500g-rt>.

176. Спецификация оптического волокна производства OFS дополнение по радиационной стойкости оптического волокна GyroSil® Rad-Hard PM [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.ofsoptics.com/wp-content/uploads/Radiation_Performance_of_GyroSil_RadHard.pdf.

177. Alam M. Passive and active optical fibers for space and terrestrial applications / M. Alam, J. Abramczyk, J. Farroni, U. Manyam, D. Guertin // Proc. SPIE. Photonics for Space Environments XI. 2006. Vol. 6308. DOI 10.1117/12.678087.

178. Спецификация оптического волокна производства Sumitomo [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/202311/download_documents/optical-fibers-and-cables.pdf.

179. Paveau A. Robustness of Astrix Fiber Optic Gyros in space radiative environment / A. Paveau, G. Cros, S. Masson, R. Mangeret, S. Marioujouls, J.-J. Bonnefois // CEAS Space Journal. 2019. Vol. 11. P. 219-227.

180. Chamorovskii Y.K. N-doped-silica-core polarization maintaining fibre for gyros and other sensors for application in space industry / Y.K. Chamorovskii, O.V. Butov, G.I. Ivanov, A.A. Kolosovskii, V.V. Voloshin, I.L. Vorob'ev, K.M. Golant // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7503. P. 75036T.

181. Долгов И.И. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной / И.И. Долгов, Г.А. Иванов, Ю.К. Чаморовский, М.Я. Яковлев // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 4-10.

182. Дукельский К.В. Радиационно-оптическая устойчивость одномодовых световодов W-типа с депрессированной фторсиликатной оболочкой / К.В. Дукельский, М.А. Ероньян, А.В. Комаров, А.Ю. Кулеш, В.Н. Ломасов, И.К. Мешковский, А.В. Хохлов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 2. С. 64-66.

183. Ероньян М.А. Радиационно-стойкие анизотропные одномодовые световоды с депрессированной оболочкой / М.А. Ероньян, С.В. Буреев, А.В. Хохлов, А.В. Комаров, А.С. Пасишник // Фотон-экспресс. 2015. № 6 (126). С. 140-141.

184. Dukel'ski K.V. Radiation-optical stability of single-mode w-type lightguides with depressed-index fluorosilicate cladding / K.V. Dukel'ski, M.A. Eron'yan, A.V. Komarov, A.V. Khokhlov, A.Yu. Kulesh, I.K. Meshkovski, V.N. Lomasov // Journal of Optical Technology. 2015. Vol. 82. № 2. P. 113-115.

185. Dianov E.M. Nitrogen doped silica core fibres: a new type of radiation-resistant fiber / E.M. Dianov, K.M. Golant, R.R. Khrapko, A.L. Tomashuk // Electronics Letters. 1995. Vol. 31. P. 1490-1491.

186. Спецификация оптического волокна производства Fibercore [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.hanamuraoptics.com/opticalfiber/fcl/fcl_specsheets2020/pure_silica_core_sm_fiber_md23.8.pdf.

187. Спецификация оптического волокна производства Draka [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.prysmian.com/sites/www.prysmian.com/files/media/documents/Data-Sheet-RadHard-SMF_MIL49291-7_2013-10_0.pdf.

188. Спецификация оптического волокна производства Draka [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://staticres.prysmiangroup.com/ds/en/>

business_markets/markets/fibre/downloads/datasheets/DrakaElite-Super-RadHard-Single-Mode-Optical-Fiber.pdf.

189. Спецификация оптического волокна производства Coherent [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://content.coherent.com/pdf/s1310_p_spec_202011122144.pdf.

190. Спецификация оптического волокна производства IXblue [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://cybel-llc.com/wp-content/uploads/2019/01/IXF-RAD-SM-1550-014-PI_edB.pdf.

191. Спецификация оптического волокна производства IXblue [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.cybel-llc.com/wp-content/uploads/2019/01/IXF-SM-1550-125-014-PI_edB.pdf.

192. Спецификация оптического волокна производства J-fiber [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.fiberlabs.co.jp/image3/LEONI/-MIL-Spec_09-125-245.pdf.

193. Спецификация оптического волокна производства YOFC [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://en.yofc.com/view/2364.html>.

194. Henschel H. Radiation-induced loss of optical fibers at 1300-nm and 1550-nm wavelength / H. Henschel, O. Koehn, H.U. Schmidt // Photonics for Space Environments IV. International Society for Optics and Photonics. 1996. Vol. 2811. P. 68-77.

195. Kyoto M. Gamma-ray irradiation effect on loss increase of single mode optical fibers, (I) loss increase behavior and kinetic study / M. Kyoto, Y. Chigusa, M. Ooe, M. Watanabe, T. Matubara, T. Yamamoto, S. Okamoto // Journal of Nuclear Science and Technology. 1989. Vol. 26. N. 5. P. 507-515.

196. Risch B. G. Optical fiber and cable reliability for high radiation environments / B. Risch, B. Overton, J. Rosko, A. Bergonzo, G. Kuyt, G. Mélin // Proceedings of the 61st International Wire and Cable Symposium. 2012. Vol. 61. P. 543-551.

197. Kyoto M. Characterization of fluorine-doped silica glasses / M. Kyoto, Y. Ohoga, S. Ishikawa, Y. Ishiguro // Journal of materials science. 1993. Vol. 28. N. 10. P. 2738-2744.

198. Griscom D. L. γ -radiation resistance of aluminum-coated all-silica optical fibers fabricated using different types of silica in the core /D.L. Griscom, K. Golant, A.L. Tomashuk, D.V. Pavlov, Yu. Tarabrin // Applied physics letters. 1996. Vol. 69. N. 3. P. 322-324.

199. Kashaykin P.F. Radiation-induced attenuation in silica optical fibers fabricated in high O₂ excess conditions / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, M.Y. Salgansky, A.N. Abramov, K.N. Nishchev, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Lightwave Technology. 2015. Vol. 33. N. 9. P. 1788-1793.

200. Kashaykin P.F. Silica optical fibers with high oxygen excess in the core: a new type of radiationresistant fiber / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, M.Yu. Salgansky, A.N. Abramov, L.D. Iskhakova, N.S. Lobanov, K.N. Nishchev, A.N. Gurynov, E.M. Dianov // Micro-structured and Specialty Optical Fibres IV. SPIE Proc. 2015. Vol. 9507. P. 950705.

201. Hibino Y. Defect structure and formation mechanism of drawinginduced absorption at 630 nm in silica optical fibers / Y. Hibino, H. Hanafusa // Journal of applied physics. 1986. Vol. 60. N. 5. P. 1797-1801.
202. Hanafusa H. Formation mechanism of drawing-induced E'centers in silica optical fibers / H. Hanafusa, Y. Hibino, F. Yamamoto // Journal of applied physics. 1985. Vol. 58. N. 3. P. 1356-1361.
203. Hanafusa H. Drawing condition dependence of radiation-induced loss in optical fibres / H. Hanafusa, Y. Hibino, F. Yamamoto // Electronics Letters. 1986. Vol. 22. N. 2. P. 106-108.
204. Skuja L.N. Optical properties and energetic structure of non-bridging oxygen centers in vitreous SiO_2 / L.N. Skuja, A.R. Silin // Physica status solidi (a). 1979. Vol. 56. N1. P. K11-K13.
205. Radiation resistant single-mode optical fiber and method of manufacturing thereof: пат. 7440673 США №11/734695; заявл. 12.04.2007; опубл. 21.10.2008.
206. Kashaykin P.F. Influence of drawing conditions on radiation-induced attenuation of pure silica-core fibers in the near-IR range / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, M.Yu. Salganskii, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Micro-Structured and Specialty Optical Fibres V. SPIE Proc. 2018. Vol. 10681. P. 1068110.
207. Alessi A. Influence of drawing conditions on the properties and radiation sensitivities of pure-silica-core optical fibers / A. Alessi, S. Girard, M. Cannas, S. Agnello, A. Boukenter, Y. Ouerdane // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30. N. 11. P. 1726-1732.
208. Радиационно стойкий волоконный световод с большим двулучепреломлением, поддерживающий линейную поляризацию (варианты): пат. 2469363 Рос. Федерация № 2009112972/28; заявл. 08.04.2009; опубл. 10.12.2012, Бюл. №34.
209. Радиационно-стойкий одномодовый световод с большим линейным двулучепреломлением для волоконно-оптического гироскопа; пат. 2627018 Рос. Федерация № 2016129256; заявл. 18.07.2016; опубл. 02.08.2017, Бюл. № 22.
210. Радиационно-стойкий световод для волоконно-оптического гироскопа: пат. 2472188 Рос. Федерация № 2010112772/28; заявл. 02.04.2010; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.
211. Волоконный одномодовый поляризующий или сохраняющий поляризацию излучения световод: пат. 2426159 Рос. Федерация № 2010109254/28; заявл. 15.03.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
212. Одномодовый радиационно-стойкий сохраняющий поляризацию излучения световод: пат. 2531757 Рос. Федерация № 2013104597/28; заявл. 05.02.2013; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30.
213. Способ изготовления одномодового волоконного световода, сохраняющего поляризацию излучения: пат. 2252197 Рос. Федерация № 2003134317/28; заявл. 27.11.2003; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14.
214. MCVD способ изготовления одномодовых световодов с сердцевиной из чистого кварцевого стекла: пат. 2639560 Рос. Федерация № 2017105171; 16.02.2017; опубл. 21.12.2017, Бюл. № 36.

215. Способ изготовления радиационно-стойких волоконных световодов: пат. 2764038 Рос. Федерации № 2021114225; заявл. 20.05.2021; опубл. 12.01.2022, Бюл. № 2.

216. Способ изготовления двулучепреломляющего микроструктурного оптического волокна: пат. 2437129 Рос. Федерации № 2010111026/28; заявл. 24.03.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35.

217. Способ изготовления одномодовых волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения: пат. 2396580 Рос. Федерации № 2009110343/28; заявл. 20.03.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.

218. Gerasimov, A.I. A Multichannel Automatized System for Measuring Current Pulses in the LIA-30 Electron Accelerator / A.I. Gerasimov, V.S. Gorkunov, V.V. Kul'gavchuk, A. Pluzhnikov // Instruments and Experimental Techniques. 2002. Vol. 45. P. 39-43.

219. Установки РФЯЦ ВНИИЭФ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vniief.ru/partnership/ckp/Rad/>

220. Бочвар И.А. Метод дозиметрии ИКС / И.А. Бочвар, Т.И. Гимадова, И.Б. Кеирим-Маркус, А.Я. Кушнерев, В. В. Якубик. – Москва, Атомиздат. 1977. 220 с.

221. Спецификация оптического волокна производства ПАО «ПНППК» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://disk.pnppk.ru/d/s/vVEovem4tqcHowPoyua2M1WMRGs64e0U/ZDvg0WDbzjdRoF1T0tTqMFmP5mOk-g2J-CLpgaTuOzQo>

222. Alasia D. Study of the radiation effects on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibers / D. Alasia, A. Fernandez, B. Brichard, L. Abrardi, L. Thévenaz // Proc. SPIE. 17th International Conference on Optical Fiber sensors. 2005. Vol. 5855, P.180-183.

223. Листвин А.В. Рефлектометрия оптических волокон / А.В. Листвин, В.Н. Листвин. – М.: ЛЕСАРарт. 2005. 208 с.

224. Tomashuk A.L. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica core optical fibers / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, A.V. Filippov // Journal of Lightwave Technology. 2019. Vol. 37, N. 3. P. 956-963.

225. Griscom D.L. Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: Application to color centers in silica-based optical fibers / D.L. Griscom // Physical Review B. 2001. Vol. 64. N. 174201.

226. Леванов А.В. Введение в химическую кинетику / А.В. Леванов, Э.Е. Антипенко. – Изд. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва. 2006. 51 с.

227. Evans B.D. Photoenhanced survivability of optical fibers at 1.30 microns for harsh aerospace environments / B.D. Evans // SPIE Vol. 1314. Fibre Optics. 1990. P. 105-111.

228. Alam M. Performance of optical fibers in space radiation environment / M. Alam, J. Abramczyk, U. Manyam, J. Farroni, D. Guertin // Proc. 6th Internat. Conf. on Space Optics. Noordwijk, Netherlands, 2006. Vol. 10567. P. 105672M-1-7.

229. Physical metallurgy / Editors: R.W. Cahn, P. Haasen // North Holland. 4th Edition. 1996. 2740 p.

230. Alam M. Small form-factor PANDA type HiBi fiber for sensing applications / M. Alam, D. Guertin, J. Farroni, J. Abramczyk, N. Jacobson, K. Tankala // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5272. DOI 10.1117/12.514751.

231. Mashinsky V.M. The mechanism of the γ -irradiation effect on the bandwidth of multimode graded-index fibres / V.M. Mashinsky, V.B. Neustruev, A.L. Tomashuk // Sov. Lightwave Commun. 1992. Vol. 2, №4. P. 311-319.

232. Liu C. Radiation-resistant Er^{3+} - doped superfluorescent fiber sources / C. Liu, X. Wu, J. Zhu, N. He, Z. Li, G. Zhang, L. Zhang, S. Ruan // Sensors. 2018. Vol. 18, N. 7, 2236.

233. Sheng H. C. Photo-annealing effect of gamma-irradiated erbium doped fiber by femtosecond pulsed laser / S. Chang, R.-Y. Liu, C.-E. Lin, F.-I. Chou, C.-Y. Tai, C.L. Chen // Journal of Physics D. 2013. Vol. 46, N. 49, 495113.

234. Mady F. Equilibrium degradation levels in irradiated and pumped erbium-doped optical fibers / F. Mady, J. Duchez, Y. Mebrouk, M. Benabdesselam // IEEE Transaction on Nuclear Science. 2015. Mol. 62, N. 6. PP. 2948-2955.

235. Спецификация на активное волокно IXF-RAD-AMP-2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ixblue.com/store/ixf-rad-amp-2/>.

236. Сосунов А.В. Стабильность интегрально-оптических схем на основе $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ – волноводов в зависимости от состояния приповерхностного слоя кристалла ниобата лития: дис. ... канд. ф.-м.н: 01.04.07 / Сосунов Алексей Владимирович. – Пермь, 2021. 111 с.

237. Пономарев Р.С. Структурная модель дрейфовых явлений в интегрально-оптических схемах на основе $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ канальных волноводов: дис. ... канд. ф.-м.н: 01.04.07 / Пономарев Роман Сергеевич. – Пермь, 2014. 148 с.

238. Korkishko Y.N. the phase diagram of $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ optical waveguides // Y.N. Korkishko, V.A. Fedorov, V.V. Nosikov, S.M. Kostritskii, M.P. De Micheli // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. "Integrated Optics Devices: Potential for Commercialization". 1997. P. 188-200.

239. Korkishko Yu.N. Structural phase diagram of $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ waveguides: the correlation between optical and structural properties / Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. 1996. Vol. 2. N. 2. PP. 187-196.

240. Tomashuk A.L. 1.55- μm -light absorption induced by pulsed-X-ray radiation in pure-silica-core fiber: effects of light power and temperature // A.L. Tomashuk, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, M.Yu. Salgansky, S.L. Glushkov, O.M. Tatsenko, A.N. Guryanov, S.L. Semjonov // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. Vol. 521. P.119504. DOI 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119504.

Примечание: все спецификации оптических волокон приведены в Приложении 1 с той же нумерацией.

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. Эрбиеевые 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.

Англоязычная версия: 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. Сеп. "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. Сеп. "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. Пospelова, 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. Пospelова, 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. Пospelова, 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 эрбьевое 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 Рос. Федерации № 2020128989; 01.09.2020; опубл. 29.03.2021, Бюл. № 10.

[A16] Одномодовое радиационно-стойкое оптическое волокно с сохранением состояния поляризации / **Азанова И.С.**, Вохмянина О.Л., Мальцев И.А. // Патент на изобретение №2829456 Рос. Федерации №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 оптический 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. / В книге: 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 // В книге: 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 суперлюминесцентного 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** // В книге: 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** // В сборнике: 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 сердцевиной 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. Колесовский, 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 эрбьевого 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 // В книге: Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. Тезисы докладов. Москва, 2019. С. 80-83.

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

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

[A35] Мелькумов М.А. Эрбиеевые 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 эрбиеевый источник ик-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.

Список иллюстраций и таблиц

Рисунок 1.1 – Укрупненная блок схема одноосного ВОГ; тонкие стрелки – электронные сигналы, толстые стрелки – оптические сигналы

Рисунок 1.2 – Поперечное сечение ОВ типа «Панда» (а) и эпюры остаточных напряжений от радиуса ОВ [16] (б)

Рисунок 1.3 – Общий вид многофункциональной интегрально-оптической схемы (металлический защитный корпус не показан)

Рисунок 1.4 – Зависимость РНП (RIA) от длины волны для доз: 0,5, 0,8, 1,6 и 3 кГр (а); зависимость коэффициента усиления от дозы (эксперимент) (б); модельная зависимость шума усилителя от дозы (с) [81]

Рисунок 1.5 – Зависимость потерь выходной мощности накачки от дозы облучения [92]

Рисунок 1.6 – Зависимости выходной мощности от мощности накачки для АОВ до и после радиации [92]

Рисунок 1.7 – Зависимости выходной мощности АОВ на термоциклах до и после радиации [92]

Рисунок 1.8 – Два соседних тетраэдра SiO_2 , светлые кружки – кремний, темные – кислород [84]

Рисунок 1.9 – Полосы поглощения в волокнах с нелегированной кварцевой сердцевиной (а) и в волокнах, легированных германием (б) [93]

Рисунок 1.10 – Модели структуры дефекта Cl^0 -центр (а), АДС-1 (б), АДС-2 (в) [98]

Рисунок 1.11 – Спектральные зависимости РНП, вызванных АДС-1 (1), АДС-2 (2) и Cl^0 -центром (3) в ОВ с сердцевиной из нелегированного и легированного фтором кварцевого стекла (соотношение амплитуд трех РНП примерно соответствует неоптимизированному ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла при дозе излучения 100 кГр и мощности дозы 5 Гр/с) [97]

Рисунок 1.12 – Изменение во времени нормированного на дозу РНП в четырех световодах после воздействия на них γ -импульса: «SiO₂» – световод с сердцевиной из нелегированного SiO₂ и фторсиликатной оболочкой, «J-fiber» – коммерческий радиационно-стойкий световод MIL-PRF-49291/7-01 фирмы «J-fiber», «GeO₂:SiO₂» – световод с высоколегированной германо-силикатной сердцевиной и оболочкой из нелегированного SiO₂ ($\Delta n = 0,01$). Символы \square и \blacksquare – нормированное на дозу РНП, измеренное через 5 часов после завершения непрерывного гамма-облучения от источника ⁶⁰Со до дозы 1 кГр [148]

Рисунок 1.13 – Показано неэквивалентное РНП для быстрой (\times) и медленной (\circ) поляризационных осей. Сплошная линия – линейная интерполяция [162]

Рисунок 1.14 – РНП трех типов сохраняющих поляризацию волокон от дозы, мощность дозы 50 рад/с (а), РНП одного типа волокна в зависимости от мощности дозы (б), процесс релаксации РНП после облучения в зависимости от времени в месяцах (в) [171].

Рисунок 1.15 – РНП на длине волны 1550 нм волокна GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining производства компании OFS для дозы 100 крад при мощностях дозы 1 рад/с и 133 рад/с, а также последующем отжиге при 35 °С в течение 500 ч [176].

Рисунок 1.16 – РНП на длине волны 1550 нм волокна GyroSil 1550 Rad-Hard PM по отношению к классическому волокну SMF28 по материалам работы [177] и изотропному одномодовому волокну Z-plus производства Sumitomo [178]; во вставке приведено РНП на длине волны 1550 нм волокна GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining при двух мощностях доз 1 рад/с и 150 рад/с до дозы 1 Мрад [176]

Рисунок 2.1 – Общий вид ускорителя ЛИУ-30 [219]

Рисунок 2.2 – Общий вид БР1М [219]

Рисунок 2.3 – Общий вид ЛУ-10-20 [219]

Рисунок 2.4 – Внешний вид видимой части установки ГУТ 200М [219]

Рисунок 2.5 – Фотография станка MCVD в ПАО «ПНППК»

Рисунок 2.6 – Фотография башни вытяжки на ПАО «ПНППК»

Рисунок 2.7 – Схема установки для определения коэффициента пропорциональности C

Рисунок 2.8 – Изменение Бриллюэновской частоты от растяжения ОВ ISiO_2
(точки – эксперимент, прямые – линейная аппроксимация)

Рисунок 2.9 – Значение частоты Бриллюэна для ОВ с разной степенью напряженно-деформированного состояния кварцевого стекла сердцевины

Рисунок 2.10 – Пример схемы проведения опыта

Рисунок 2.11 – Фотография установки ГУТ-200 М непрерывного гамма-излучения и термостата (отмечен стрелкой) с образцом ОВ в калиброванной по дозе излучения точке

Рисунок 2.12 – Схема измерений поляризационных характеристик СИОМ при исследовании на воздействие непрерывного ИИ на установке ГУТ-200М

Рисунок 2.13 – Рабочее место регистрации данных с РЕМ-330 за биологической защитой

Рисунок 2.14 – Принципиальная схема однопроходного СВИ с встречной накачкой: LD – лазерный диод накачки с длиной волны излучения 980 нм, WDM – спектрально-селективный ответвитель, ISO – оптический изолятор на 1550 нм, АОВ – активное оптическое волокно, заглушка – бессердцевинное оптическое волокно

Рисунок 2.15 – Схема опыта по исследованию образцов АОВ под воздействием импульсного ИИ

Рисунок 2.16 – Схема измерений поляризационной экстинции

Рисунок 2.17 – Схема измерений РНП в зависимости от длины волны

Рисунок – 2.18. Этапы проведения аппроксимации экспериментальных данных: *а* – выбор инструмента, *б* – создание специализированной функции, *в* – задание функциональной зависимости и начальных значений параметров

Рисунок 3.1 – Разложение спектра РНП образца $\text{GeO}_2\text{Панда}$ при комнатной температуре на составляющие при дозе 165 Гр (*а*), при дозе 1 кГр (*б*); в легенде приведены названия центров окраски и цвета соответствующих полос поглощения

Рисунок 3.2 – Спектр РНП образца PGeO_2 при комнатной температуре во время облучения (длительностью 1 мин, 6,5 мин, 10 мин, 16 мин) и после 4 мин релаксации (зеленая линия – обозначено 20 минут с начала опыта), максимальная доза 1 кГр (сиреневая линия), мощность дозы 1,1 Гр/с

Рисунок 3.3 – РНП на длинах волн 1310 нм (красная линия) и 1550 нм (зеленая линия) образца $\text{GeO}_2\text{Панда}$ во время облучения и релаксации (синий прямоугольник показывает длительность облучения 16 мин) при комнатной температуре, мощность дозы 1,1 Гр/с, облучение до дозы 1 кГр, вводимая оптическая мощность 0,1 мкВт

Рисунок 3.4 – Спектры РНП волокна SMF28 Corning во время облучения и релаксации при комнатной температуре, мощность дозы 0,9 Гр/с, максимальная доза облучения 530 Гр (*а*), 910 Гр (*б*)

Рисунок 3.5 – РНП в образцах PGeO_2 во время и после облучения; температура 25 °С, доза облучения 1 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с, синий прямоугольник показывает длительность облучения

Рисунок 3.6 – Зависимость РНП от дозы для разных образцов $\text{PGeO}_2\text{Панда}$ при различных температурах; мощность дозы 0,13 Гр/с для ПС 244-С300113-2-11-2-1, для остальных световодов – 1,1 Гр/с

Рисунок 3.7 – Пример определения модельных коэффициентов для волокна $\text{GeO}_2\text{Панда}$; эксперимент – синяя кривая, расчет – красная кривая

Рисунок 3.8 – Экспериментальная и расчетная кривые РНП для случайно взятого образца PGeO_2

Рисунок 3.9 – РНП каркасного контура PGeO_2 при облучении и релаксации (синий прямоугольник – длительность облучения), накопленная доза 1 кГр, комнатная температура

Рисунок 3.10 – Зависимость РНП на длине волны 1550 нм образца $\text{GeO}_2\text{Панда}$ от времени (синий прямоугольник – длительность облучения) при различных температурах

Рисунок 3.11 – Зависимость РНП от температуры во время облучения соседних участков образца $\text{GeO}_2\text{Панда}$ длиной 200 м каждый, вводимая оптическая мощность 0,5 мкВт; черные точки – эксперимент, красная линия – экспоненциальная аппроксимация

Рисунок 3.12 – Зависимость РНП от дозы при различной вводимой мощности для германосиликатных одномодовых оптических волокон Corning, сердцевина $\text{SiO}_2:\text{Ge}$ 6,0 мкм, $\text{SiO}_2:\text{F},\text{B}$ -оболочка (a), зависимость релаксации РНП от времени при разной вводимой мощности (б) [227]

Рисунок 3.13 – СПИ ОВ «панда» с германатной сердцевиной при воздействии ИИ

Рисунок 3.14 – Зависимость РНП от времени релаксации для разных образцов PGeO_2 при различных температурах, вводимая оптическая мощность более 0,5 мВт, доза 600 Гр для образца №5, для остальных – 1 кГр

Рисунок 3.15 – Экспериментальные кривые релаксации после гамма-облучения до дозы 1 кГр разных образцов $\text{GeO}_2\text{Панда}$ при комнатной температуре (сплошные кривые); символы – измерение полных потерь на рефлектометре через 2 недели после облучения. Штриховые линии – экстраполяция РНП на момент времени 15 лет

Рисунок 3.16 – РНП ОВ на длине волны излучения 1550 нм в процессе гамма-облучения при мощности дозы 1,0 Гр/с и 1,1 Гр/с до дозы

1,0 кГр в ходе последующей релаксации в течение ~ 30 мин, $P_0 = 0,5$ мкВт; заполненные ромбы – PSiO_2 ; открытые треугольники – ISiO_2 , вытянутый из той же преформы; круги – изотропный одномодовый образец ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной №1510, изготовленный в ИХВВ РАН и НЦВО РАН; открытые квадраты – PGeO_2 , температура $+30$ $^{\circ}\text{C}$ (a) и минус 60 $^{\circ}\text{C}$ (b)

Рисунок 3.17 – Разложение спектра РНП образца PSiO_2 первого варианта технологии на составляющие АДС в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм в процессе облучения от источника ^{60}Co с мощностью дозы 1,1 Гр/с при дозе 27 Гр (30 с облучения) при комнатной температуре: красным – собственные центры (жирным полоса 0,95 эВ), зеленым – деформационные центры, синим – неизвестная малоинтенсивная полоса с центром 1,12 эВ, голубым – «хвост» УФ поглощения; мощность зондирующего сигнала в ОВ 0,5 мкВт

Рисунок 3.18 – Зависимости РНП от времени (a) и от дозы (b) на длине волны 1550 нм в процессе облучения с мощностью дозы 0,9-1,3 Гр/с до дозы 1 кГр от источника ^{60}Co и релаксации при комнатной температуре: 1 – изотропное ISiO_2 по доработанной технологии; 2 – PSiO_2 с двулучепреломлением $5,9 \cdot 10^{-4}$ (состав стекла как для 1); 3 и 3" – PSiO_2 с двулучепреломлением $6,3 \cdot 10^{-4}$ (состав стекла как для 1); 4 и 4" – доработанная PSiO_2 с двулучепреломлением $6,4 \cdot 10^{-4}$; величина $P_0 = 0,5$ мкВт для образцов 1, 2, 3, 4 и $P_0 = 5$ мВт для образцов 3" и 4"

Рисунок 3.19 – Спектр РНП в PSiO_2 измеренный в процессе гамма-облучения при дозе 1 кГр и мощности дозы 1 Гр/с непосредственно перед прекращением облучения (a) и через 15 мин релаксации после окончания облучения (b) и его деконволюция на гауссовые составляющие [A1]

Рисунок 3.20 – РНП образца PSiO_2 в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм процессе облучения с мощностью дозы 1 Гр/с до дозы 1 кГр от источника $^{60}\text{Сo}$ и его релаксация при комнатной температуре

Рисунок 3.21 – Зависимость РНП от дозы и от времени релаксации после облучения в зависимости от входящей оптической мощности для образцов PSiO_2 с величиной двулучепреломления $6,0 \cdot 10^{-4}$ (а), входящая оптическая мощность 3,8 мкВт, 33 мкВт, 207 мкВт, 4,3 мВт, все образцы – последовательные участки световода одной вытяжки; для образцов ISiO_2 того же химического состава (б), входящая оптическая мощность 6,5 мкВт, 53 мкВт, 350 мкВт, 4,4 мВт

Рисунок 3.22 – Зависимость РНП от входящей оптической мощности для дозы 100 Гр, 300 Гр и 1000 Гр

Рисунок 3.23 – Зависимость РНП ISiO_2 ОВ от поглощенной дозы ИИ 1,10 кГр с мощностью дозы 1,40 Гр/с

Рисунок 3.24 – Зависимость РНП на длине волны 1550 нм PSiO_2 в конце облучения (доза 1,2 кГр) и через 25 мин релаксации при комнатной температуре, вводимое оптическое излучение 2 мВт

Рисунок 3.25 – Графики релаксации РНП в течение 25 мин и аппроксимация релаксации РНП на 15 лет после облучения до дозы 1,20 кГр с вводимым оптическим излучением 2 мВт

Рисунок 3.26 – Зависимость РНП PSiO_2 на длине волны 1550 нм от поглощенной дозы до 110 крад при $+25^\circ\text{C}$ при мощностях дозы 1 рад/с, 0,13 рад/с, 0,011 рад/с

Рисунок 3.27 – Зависимость РНП на длине волны 1550 нм от поглощенной дозы до 1,2 кГр, мощность дозы 1,31 Гр/с, $P_0 = 5$ мкВт при комнатной температуре:
1 – 4 ОВ разных партий PSiO_2

Рисунок 3.28 – Сравнение РНП на длине волны 1550 нм образцов PSiO_2 (тонкая синяя линия), PGeO_2 (синяя линия), ПН (красная линия) в

процессе облучения с мощностью дозы 1,27 Гр/с до дозы 79,2 кГр от источника ^{60}Co и релаксации при комнатной температуре, $P_0 = 2,3 \text{ мВт}$

Рисунок 3.29 – Спектр РНП в ПН измеренный в процессе гамма-облучения при дозе 1 кГр и мощности дозы 1 Гр/с непосредственно перед прекращением облучения (а) и через 15 мин релаксации после окончания облучения (б) и его деконволюция на гауссовые составляющие [А1]

Рисунок 3.30 – РНП на длине волн 1550 нм образцов PSiO_2 и ПН после воздействия импульсного ИИ (тормозное излучение ускорителя ЛИУ-30М) а – комнатная температура, 55 Гр в импульсе, $P_0 = 2,75 \text{ мВт}$; б – температура минус 60 °С, 30 Гр в импульсе, $P_0 = 35 \text{ мкВт}$; в – температура минус 60 °С, 40 Гр в импульсе, $P_0 = 1,77 \text{ мВт}$; г – температура 60 °С, 26 Гр в импульсе, $P_0 = 35 \text{ мкВт}$ [А1, А2]

Рисунок 3.31 – СПИ ОВ «панда» с чистокварцевой сердцевиной при воздействии ИИ

Рисунок 4.1 – Зависимость РНП на длине волн 1550 нм после воздействия импульсного излучения с дозой 20 Гр при комнатной температуре для образцов ISiO_2 (зеленый), IGeO_2 (черный) и PSiO_2 (красный)

Рисунок 4.2. РНП PSiO_2 : а – на длине волн излучения 1550 нм, образцы PSiO_2 с большой интенсивностью полосы 1 эВ (фиолетовым $B = 7,2 \cdot 10^{-4}$, $D = 28 \text{ Гр}$ $P_0 = 25 \text{ мкВт}$; зеленым $B = 6,0 \cdot 10^{-4}$, $D = 27 \text{ Гр}$, $P_0 = 25 \text{ мкВт}$) и образец PSiO_2 с малой интенсивностью полосы 1 эВ, $B = 6,1 \cdot 10^{-4}$ (красным $D = 21 \text{ Гр}$, $P_0 = 10 \text{ мкВт}$, черным $D = 450 \text{ Гр}$, $P_0 = 31 \text{ мкВт}$); б – РНП от длины волны излучения для образца PSiO_2 с малой интенсивностью полосы 1 эВ ($B = 6,1 \cdot 10^{-4}$) в диапазоне $\lambda = 900$ -1600 нм при дозе 20 Гр для времен непосредственно после фотонного воздействия, а также через 1 с, 3 с, 10 с и 2 мин после воздействия

Рисунок 4.3 – Зависимость величины РНП, отнесенных к дозе в импульсе от времени после облучения при входной оптической мощности 2 мВт: $\text{PSiO}_2(1\text{var},4)$, доза в импульсе 15 – 20 Гр (красная и черная кривые); $\text{PSiO}_2(1\text{var},3)$, доза в импульсе 15 Гр (синяя кривая), 20 Гр (розовая кривая)

Рисунок 4.4 – Зависимость величины РНП от времени после облучения, $\text{PSiO}_2(1\text{var},4)$, доза в импульсе от 15 до 20 Гр

Рисунок 4.5 – Зависимость РНП от времени при входящей оптической мощности 31 мкВт, $\lambda=1550$ нм для ОВ PGeO_2 при разных дозах в импульсе (α): 1 – 6 Гр, 2 – 29 Гр, 3 – 650 Гр; и для ОВ PGeO_2 с разным НДС (δ): в свободной намотке PGeO_2 (2), БВК (4), ВК (5) при дозе в импульсе 20 Гр

Рисунок 4.6 – Зависимость РНП от времени для ОВ PSiO_2 : α – при разных дозах в импульсе 5 Гр (1), 22 Гр (5) и 450 Гр (6) при входящей оптической мощности 31 мкВт и $\lambda=1550$ нм; δ – при дозе в импульсе 5 Гр, $\lambda=1550$ нм и разной входящей оптической мощностью 31 мкВт (1), 300 мкВт (2), 4 мВт (3), 40 мВт (4); ω – медленные процессы в период времени 0,01 с – 1 с, обозначения аналогично (δ); φ – при разной температуре при дозе в импульсе 20 Гр и при вводимой оптической мощности 31 мкВт: минус 56 °C (7), 25 °C (8), 60 °C (9), 110 °C (10)

Рисунок 4.7 – Анализ РНП для ОВ GeO_2 для дозы в импульсе 600 рад и входящей оптической мощности 31 мкВт с помощью уравнения Колмогорова-Аврами

Рисунок 4.8 – Зависимость логарифма скорости релаксации РНП от логарифма РНП для образца $\text{PGeO}_2(2)$

Рисунок 4.9 – Зависимость логарифма скорости релаксации РНП от логарифма РНП для образца PGeO_2 в свободной намотке после воздействия импульса фотонов с дозой 29 Гр при комнатной температуре

Рисунок 4.10 – График зависимости логарифма скорости изменения РНП от логарифма РНП для образца ПSiO₂ (3); n_1, n_2 – тангенс угла наклона линейной аппроксимации в двух областях графика

Рисунок 4.11 – Экспериментальная кривая РНП(t) для образца ПSiO₂(1) и расчетная кривая: (а) – полученная по формуле (2.9), вклады в релаксацию РНП собственных (красный яркий пунктир) и деформационных (бледно-красный пунктир) дырок, эксперимент (черным) и аппроксимация (красным); (б) – полученная по формуле (2.10), (в) – полученная методом аппроксимации n -ого порядка по формуле (2.15)

Рисунок 4.12 – Вклады в релаксацию РНП собственных (зеленым) и деформационных (оранжевым) дырок, эксперимент (черным) и аппроксимация (синим) для образца ВК(11) из ОВ ПSiO₂, доза в импульсе 22 Гр, $P_0 = 30$ мкВт, комнатная температура

Рисунок 4.13 – Экспериментальная и расчетная кривые РНП для образца ОВ ПGeO₂(2)

Рисунок 4.14 – Зависимости коэффициентов $C_{\text{соб}}$ собственных дырок от дозы в импульсе (а); зависимости коэффициентов $C_{\text{деф}}$ деформационных дырок от дозы в импульсе (б)

Рисунок 4.15 – Зависимость $\tau_{\text{соб}}$ для ПSiO₂ от температуры при дозе в импульсе 20 Гр, $P_0 = 31$ мкВт

Рисунок 4.16 – Зависимость времени жизни собственных дырок ПSiO₂ от величины входящей оптической мощности (красная линия – аппроксимация «растянутой» кинетикой 2-порядка)

Рисунок 4.17 – Зависимость натурального логарифма константы скорости реакции от обратной оптической мощности

Рисунок 4.18 – Вклады в релаксацию РНП собственных и деформационных дырок для образца ПSiO₂(5), доза в импульсе 22 Гр

Рисунок 4.19 – Зависимость $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ от Δf_b для образцов ПGeO₂ в виде свободной намотки, БВК и ВК

Рисунок 4.20 – Зависимость энергии активации для ОВ с германосиликатной сердцевиной от Δf_b

Рисунок 4.21 – Величины $\tau_{\text{соб}}$ и $\tau_{\text{деф}}$ для всех исследуемых образцов в зависимости от относительной продольной деформации

Рисунок 4.22 – РНП PSiO_2 в спектральном диапазоне длин волн для времен непосредственно после гамма-нейтронного воздействия, а также через 1 с, 3 с, 10 с и 2 мин после воздействия

Рисунок 4.23 – Релаксация РНП на длине волны 1550 нм при воздействии импульсного фотонного (доза в импульсе 20 Гр) и гамма-нейтронного (доза в импульсе 20 Гр, поток нейтронов $1 \cdot 10^{13}$ н/см²) для PSiO_2 и PGeO_2

Рисунок 4.24 – Зависимость РНП от времени для образцов PSiO_2 в виде ВК с одинаковыми характеристиками по двулучепреломлению в ОВ и величине относительной деформации: черная кривая – РНП после импульса фотонов время импульса 20 нс, доза в импульсе 1,9 крад, остаточные потери 0 дБ/км; красная кривая – РНП после импульса нейтронов флюенс $2,2 \cdot 10^{13}$ н/см², время импульса 60 мкс (флакс 10^{19} см⁻²с⁻¹), сопутствующая доза гамма-излучения 2,2 крад

Рисунок 5.1 – Выходные параметры СВИ: *а* – зависимость выходной мощности от мощности накачки на 980 нм; *б* – спектр излучения при выходной мощности СВИ 35 мВт для образца АОВ В1

Рисунок 5.2 – РНП АОВ в активном (черный пунктир) и пассивном (серый пунктир) режимах облучения

Рисунок 5.3 – Изменение средневзвешенной длины волны однопроходного СВИ с встречной накачкой, доза в опыте 1,2 кГр, мощность дозы 1,1 Гр

Рисунок 5.4 – Зависимость оптической мощности излучения образца группы А после импульсного воздействия, температура 25 °С, доза в импульсе 15 Гр (красная линия – уровень начальной оптической мощности): автономно (*а*) и в составе оптической части СВИ (*б*)

Рисунок 5.5 – Зависимость оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образца А при минус 60 °С и дозе ИИ в импульсе 12 Гр (красная линия – уровень начальной оптической мощности)

Рисунок 5.6 – Зависимость оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образца В3 при температуре 25 °С и дозе в импульсе 12 Гр (*а*), при температуре минус 60 °С и дозе в импульсе 6 Гр (*б*); красная

линия – начальный уровень мощности, синяя линия – уровень мощности через 10 мс, зеленая линия – через 50 мс

Рисунок 5.7 – РНП на длине волны 1310 нм после воздействия импульса с дозой 12 Гр на образцы А, В1 и В3 при температуре 25 °С

Рисунок 5.8 – Зависимость выходной оптической мощности СВИ образца В1 от времени после облучения импульсом с дозой 12 Гр при температуре 25 °С (сплошная линия) и при температуре минус 60 °С (пунктирная линия)

Рисунок 5.9 – Эволюция средневзвешенной длины волны СВИ для образца В1 при температуре 25 °С (сплошная линия) и при температуре минус 60 °С (пунктирная линия) после облучения импульсом с дозой 12 Гр

Рисунок 5.10 – Эволюция РНП на длине волны 1310 нм для образца В1 при температуре 25 °С (сплошная линия) и при температуре минус 60 °С (пунктирная линия) после облучения импульсом с дозой 12 Гр

Рисунок 5.11 – Зависимость выходной оптической мощности СВИ образца В1 от времени после облучения импульсом ИИ с дозой 12 Гр при температуре 25 °С (а) и при температуре минус 60 °С (б); нормировано по начальному уровню мощности (пунктирная линия 1,00)

Рисунок 5.12 - Зависимость оптической мощности излучения АОВ в составе оптической части СВИ от времени после облучения для образцов А, Б, В1 и В2 при температуре 25 °С и дозе в импульсе 12 Гр

Рисунок 5.13 – Изменение нормированной оптической мощности СВИ для образца группы В1 после облучения потоком нейтронов $2,5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма-излучения 70 Гр, время импульса 60 мкс, красная линия – результат осреднения

Рисунок 5.14 – Изменение РНП на длине волны 1310 нм для образца группы В1 после облучения потоком нейтронов $3 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма-излучения 540 Гр, время облучения 150 с (от 0 с до 150 с), красная линия – результат осреднения

Рисунок 6.1 – РНП на длине волны излучения 1550 нм и коэффициент деления до, во время и после облучения (а) и СПИ (б) для образца СИОМ, облучение с 7 минуты по 25 минуту, доза облучения 1 кГр, мощность дозы 1,1 Гр/с, температура 25 °С

Рисунок 6.2 – Зависимость от времени РНП (а) и оптической мощности (б) одного из двух каналов СИОМ после воздействия импульсного фотонного излучения, доза в импульсе 6 Гр, температура минус 60 °С; через 0,02 мс после импульса уровень оптической мощности составил 90 %; красной линией обозначен уровень

начального сигнала, синей – уровень 96,4 % (время достижения через 1,25 мс после импульса), зеленой – уровень 97,5 % (время достижения через 6,24 мс)

Рисунок 6.3 – Зависимость от времени оптической мощности на одном из каналов СИОМ после импульса тормозного излучения дозой 13 Гр, время импульса примерно 20 нс, температура в опыте 25 °C

Рисунок 6.4 – Изменение коэффициента деления каналов СИОМ после импульса дозой 6 Гр, примерное время импульса 20 нс, температура минус 60 °C

Рисунок 6.5 – Отклик на импульс в двух опытах электродов СИОМ (график обозначен «вп») и дублирующего конденсатора (обозначен «р»), температура минус 60 °C, дозы в импульсах 26 Гр и 22 Гр соответственно, средний и крайний правый столбики – более подробно начальный участок по времени после импульса

Рисунок 6.6 – Сигнал на фотоприемниках левого и правого канала СИОМ во время повторного облучения, доза в импульсе 22 Гр, температура минус 60 °C

Рисунок 6.7 – Зависимость от времени коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ, дБ) и оптической мощности СИОМ (мВт) после воздействия импульсного потока нейтронов $1,5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 38 Гр, импульс примерно на 100-й секунде (показан вертикальной пунктирной линией)

Рисунок 6.8 – Зависимость от времени коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ, дБ) и оптической мощности СИОМ (мВт) после воздействия третьего последовательного облучения импульсного потока нейтронов $3,2 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 76 Гр, импульс на 250-й секунде (показан вертикальной пунктирной линией)

Рисунок 6.9 – Значения СПИ и оптической мощности одного канала образца СИОМ от времени после воздействия потока нейтронов $3,2 \cdot 10^{13}$ н/см² и дозы по гамма-излучения 740 Гр в течение 150 с (выделены синим прямоугольником)

Рисунок 6.10 – Фотография протонообменного канального волновода СИОМ в ВSE контрасте. Более темное поле – поверхность кристалла ниобата лития, более светлая область – протонообменный слой

Таблица 1.1 – Характеристики и требования к СВИ

Таблица 1.2 – Характеристики коммерчески доступных ОВ с сохранением поляризации излучения с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла или с пониженным содержанием германия

Таблица 1.3 – Характеристики изотропных одномодовых волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной

Таблица 1.4 – Сравнение парофазных методов

Таблица 2.1 – Моделирующие установки, применённые в исследовании

Таблица 2.2 – Характеристики образцов СИОМ

Таблица 2.3 – Характеристики АОВ [221, с. 12]

Таблица 2.4 – Характеристики гироскопического германосиликатного сохраняющего поляризацию волокна типа «Панда» [221, с. 19]

Таблица 2.5 – Основные характеристики радиационно-стойкого оптического волокна типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной ПАО «ПНППК» [221, с. 20]

Таблица 2.6 – Контролируемые параметры исследуемых образцов до, во время и после воздействия ИИ

Таблица 2.7 – Используемое оборудование и его основные характеристики

Таблица 3.1 – Сводные результаты образцов GeO_2 Панда для облучения с вводимой оптической мощностью от 1 мВт до 2 мВт.

Таблица 3.2 – Сравнение параметров ОВ «панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной производства ПАО «ПНППК» и компании OFS

Таблица 3.3 – Коэффициенты экстраполяции образцов ПН и PSiO_2

Таблица 3.4 – РЦО в спектрах РНП образцов PSiO_2 и ПН [A1]

Таблица 4.1 – Параметры образцов и условия опыта

Таблица 4.2 – Результаты расчетов эмпирических коэффициентов по формуле «Растянутая» экспонента (2.9)

Таблица 4.3 – Результаты расчетов эмпирических коэффициентов по формуле кинетики второго порядка (2.10)

Таблица 4.4 – Результаты расчетов эмпирических коэффициентов по формуле кинетики n -порядка (2.15)

Таблица 4.5. Параметры аппроксимации образцов PGeO_2 и PSiO_2 для разных доз в импульсе

Таблица 4.6 – Эмпирические коэффициенты PSiO_2 при различных температурах ($P_0=31$ мкВт, $D\sim 2$ Гр)

Таблица 4.7 – Эмпирические коэффициенты PSiO_2 в зависимости от величины входящей оптической мощности

Таблица 4.8 – Эмпирические коэффициенты для функциональной зависимости (2.10) для образцов PSiO_2 и ISiO_2 , входящая оптическая мощность 31 мкВт

Таблица 4.9 – Сравнение эмпирических коэффициентов для функциональной зависимости (2.9) при различных НДС ОВ с германосиликатной сердцевиной

Таблица 5.1 – Характеристики исследуемых АОВ

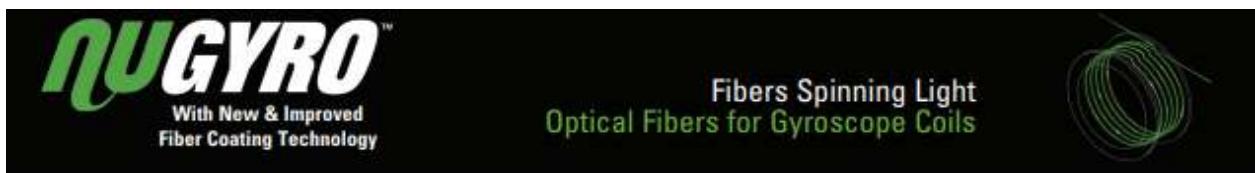
Приложение 1

(справочное)

Спецификации оптического волокна

(нумерация сохранена как в списке цитируемой литературы)

6. Спецификации оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.coherent.com/resources/datasheet/components-and-accessories/nygyro-gyroscope-fibers-brochure.pdf>.



Optimized Fiber Coating Technology

Nufem has developed its own proprietary fiber coating optimized for gyroscope applications. This new proprietary NuCOAT-LTg coating offers improved crosstalk performance and is optimized for Nufem's world class fiber draw process.

Optical Features & Benefits

- Low bend loss - Lowest power consumption and longest coil lengths
- Low mode field perturbation along length - Minimizes crosstalk
- Hi birefringence - Minimizes crosstalk
- Available in high performance (HP) versions optimized for improved repeatability, coil winding accuracy, and ultra-low splice loss

Mechanical Features & Benefits

- Very high fatigue failure resistance $n_r = 23$ - Ensures long life in tough conditions
- COST218 model based life expectancy of > 130 years with 25 mm bend radius and 5 km fiber
- Standard glass/polymer diameters as small as 40/90 μm - For max fiber length on a small coil diameter

Product Number	Core Diameter	Cladding Diameter	Coating Diameter	Coating Tolerance	NA	Beat Length @ 633 nm	Cross Talk for 100 nm	H-Parameter (X10 ³)	Special Features
Wavelength 1550 nm									
S1550-80	7.8 μm	80 μm	125 μm	$\pm 5 \mu\text{m}$	0.160	N/A	N/A	N/A	SM Radiation Hard
S1550-80-HTA		125 μm	245 μm	$\pm 15 \mu\text{m}$					
PM1550G-40/90-5	4.0 μm	80 μm	90 μm	$\pm 5 \mu\text{m}$	0.220	$\leq 1.5 \text{ mm}$	$\leq -20.0 \text{ dB}$	$\leq 10.0 \text{ m}^{-2}$	Small Clad & Coating
PM1550G-80/135-2HP	5.9 μm		135 μm	$\pm 2 \mu\text{m}$	0.190	$\leq 1.2 \text{ mm}$	$\leq -25.0 \text{ dB}$	$\leq 3.0 \text{ m}^{-2}$	High Performance, Thin Coating
PM1550G-80/170-5	5.5 μm		170 μm	$\pm 5 \mu\text{m}$	0.200				Standard
PM1550G-80/170-2HP	5.9 μm		170 μm	$\pm 2 \mu\text{m}$	0.190				High Performance
Wavelength 1300 nm									
PM1300G-80/135-2HP	5.2 μm	80 μm	135 μm	$\pm 2 \mu\text{m}$	0.180	$\leq 1.2 \text{ mm}$	$\leq -25.0 \text{ dB}$	$\leq 3.0 \text{ m}^{-2}$	High Performance, Thin Coating
PM1300G-80/170-5	5.0 μm			$\pm 5 \mu\text{m}$					Standard
PM1300G-80/170-2HP	5.2 μm		170 μm	$\pm 2 \mu\text{m}$					High Performance
PM1300G-80/170-5	6.0 μm			$\pm 5 \mu\text{m}$					Elliptical-Clad
Wavelength 850 nm									
PM850G-80/135-2HP	3.1 μm	80 μm	135 μm	$\pm 2 \mu\text{m}$	0.155	$\leq 1.2 \text{ mm}$	$\leq -25.0 \text{ dB}$	$\leq 3.0 \text{ m}^{-2}$	High Performance, Thin Coating
PM850G-80/170-5	3.5 μm			$\pm 5 \mu\text{m}$	0.160				Standard
PM850G-80/170-2HP	3.1 μm		170 μm	$\pm 2 \mu\text{m}$	0.155				High Performance
PM850G-40/100-5	3.5 μm	40 μm	100 μm	$\pm 5 \mu\text{m}$	0.180	$\leq 2.0 \text{ mm}$ @ 850nm	$\leq -25.0 \text{ dB}$ @ 633nm	$\leq 5.0 \text{ m}^{-2}$	Elliptical-Clad

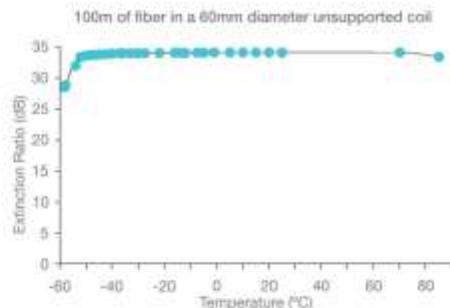
7. Спецификация оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/sites/default/files/2023-10/md05.10-pm-gyro-fiber.pdf>.

PM GYRO FIBER



Fibercore are the World's leading supplier of Polarization Maintaining (PM) fibers for Fiber Optic Gyroscopes (FOGs).

By using 'Bow Tie' Stress Applying Parts (SAPs), stress can be efficiently focused across the core of the fiber, offering industry leading levels of birefringence to maintain high levels of Polarization Extinction Ratio (PER). By combining the high birefringence with Fibercore's optimized gyro fiber coating package, the World's highest performance levels can be achieved.



The PM gyro range of fibers offers Short Beat-Length (SB) variants for the highest PER levels, high Numerical Aperture (NA) fibers (HI) for reduced macro and micro bend losses in small coil diameters and Radiation Tolerant (RT) variants for space missions.

High Polarization Extinction from -55°C to +85°C

Performance is maintained over a wide temperature range. Under test conditions designed to simulate those encountered in a typical FOG coil. Extinction ratios of better than 30dB (h-parameter of $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$) have been maintained down to -55°C, with extinction of over 28dB demonstrated right down to -60°C.

FEATURES

Advantages

- 'Bow-Tie' design engineered to give superior birefringence
- The World's best selling Gyro fiber
- Optimized coating package for best PER performance over temperature
- Radiation tolerant designs for space applications
- High NA designs for reduced bend loss in small coil diameters

Product Variants

- HB800G-SB
- HB1500G-SB(6.5/80/135)
- HB1500G-SB(6.5/80/155)
- HB800G
- HB1250G
- HB1500G
- HB1500G-HI
- HB1500G-RT
- HB1500G-RT-SB
- HB1500G-SB(6/60/100)

Typical Applications

- FOGs
- Current sensors
- Delay lines

To find out more visit fibercore.com

05October2023_MD05/10

 FIBERCORE
A HUMANETICS COMPANY

продолжение

SPECIFICATIONS

Short beat-length fiber

	HB800G-SB	HB1500G-SB (6.5/80/135)	HB1500G-SB (6.5/80/155)
Operating Wavelength (nm)	810 - 1000		1520 - 1650
Cut-Off Wavelength (nm)	660 - 800		1360 - 1520
Numerical Aperture	0.14 - 0.18		0.19 - 0.21
Mode Field Diameter (μm)	3.7 - 5.0 @830nm		6.0 - 6.85 @1550nm
Attenuation (dB/km)	≤ 5 @830nm		≤ 1.5 @1550nm
Beat-Length (mm)			≤ 1.0 @633nm
Proof Test (%)		1 or 2 (100 kpsi or 200 kpsi). Greater upon request	
Cladding Diameter (μm)			80 \pm 1
Core Cladding Concentricity (μm)			≤ 1.0
Coating Diameter (μm)	165 \pm 5	135 \pm 2	155 \pm 5
Coating Type		Dual Layer Acrylate	
Operating Temperature ($^{\circ}\text{C}$)			-55 to +85

SB - Short Beat-Length

Standard gyro fiber

	HB800G	HB1250G	HB1500G	HB1500G-HI
Operating Wavelength (nm)	810 - 1000	1280 - 1520		1520 - 1650
Cut-Off Wavelength (nm)	660 - 800	1030 - 1270	1230 - 1520	1360 - 1520
Numerical Aperture		0.14 - 0.18		0.19 - 0.21
Mode Field Diameter (μm)	3.7 - 4.9 @830nm	5.8 - 7.8 @1310nm	6.9 - 9.3 @1550nm	6.0 - 6.9 @1550nm
Attenuation (dB/km)	≤ 5 @830nm	≤ 2 @1310nm	≤ 2 @1550nm	≤ 3 @1550nm
Beat-Length (mm)			≤ 1.5 @633nm	
Proof Test (%)		1 or 2 (100 kpsi or 200 kpsi). Greater upon request		
Cladding Diameter (μm)			80 \pm 1	
Core Cladding Concentricity (μm)			≤ 1.0	
Coating Diameter (μm)	165 \pm 5		170 \pm 5	155 \pm 5
Coating Type		Dual Layer Acrylate		
Operating Temperature ($^{\circ}\text{C}$)			-55 to +85	

HI - High Index

Specifications continued on next page.

To find out more visit fibercore.com

Copyright © Fibercore 2022. This information is indicative only, contact Fibercore directly for details.



продолжение

SPECIFICATIONS CONTINUED

Radiation tolerant fiber

	HBI500G-RT	HBI500G-RT-SB	HBI500G-SB(6/60/100)
Operating Wavelength (nm)	1520 - 1650		
Cut-Off Wavelength (nm)	1230 - 1520	1360 - 1520	1260 - 1520
Numerical Aperture	0.14 - 0.18	0.19 - 0.21	0.20 - 0.22
Mode Field Diameter (μm)	6.9 - 9.3 @1550nm	6.0 - 7.0 @1550nm	5.6 - 6.3 @1550nm
Attenuation (dB/km)	≤2 @1550nm		
Beat-Length (mm)	≤1.5 @633nm	≤1.15 @633nm	≤1.0 @633nm
Proof Test (kpsi)	1 or 2 (100 kpsi or 200 kpsi). Greater upon request		
Cladding Diameter (μm)	80 ± 1		60 ± 2.5
Core Cladding Concentricity (μm)	≤1.0		
Coating Diameter (μm)	170 ± 5	165 ± 5	100 ± 5
Coating Type	Dual Layer Acrylate		
Operating Temperature (°C)	-55 to +85		

SB - Short Beat-Length **RT** - Radiation Tolerant

RELATED PRODUCTS

- PM Coupler Fiber
- Standard PM Fiber
- Telecoms PM Fiber
- Polyimide Coated PM Fiber
- Erbium Doped Fiber IsoGain™

Fibercore House | Southampton Science Park
United Kingdom | SO16 7QQ
T +44 (0)23 8076 9893 | E info@fibercore.com

fibercore.com

Copyright © Fibercore 2022. This information is indicative only, contact Fibercore directly for details.

8. Спецификация оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.yoecgroup.com/Content/upload/pdf/202328488/Polarization-Maintaining-Fiber-for-FOG.pdf?rnd=231>.



SPECIAL OPTICAL FIBER

Panda Polarization-Maintaining Fiber Series

Product Description

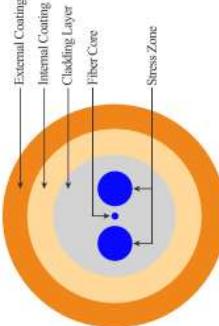
YOEC Panda polarization-maintaining fiber series can be used in fiber optic gyroscope and other polarization related devices. This optical fiber product has excellent attenuation characteristics, birefringence, temperature stability, lot-to-lot geometric consistency, long-term reliability and anti-radiation performance, and can meet a variety of application requirements.

Panda Polarization-Maintaining Fiber for Fiber Optic Gyroscope Coil Winding

Product Description

Panda polarization-maintaining optical fiber for YOEC fiber optic gyro winding is mainly used in fiber optic gyro sensitive coil. According to its application environment, the mechanical reliability, temperature stability, environmental adaptability and radiation resistance of optical fiber are improved. The axial uniformity and lot-to-lot consistency of optical fiber are optimized, and the internal and external coating of optical fiber uses self-developed coating material, which has good full temperature stability, environmental adaptability and mechanical reliability. It can be used in the temperature range of -50°C to +105°C. According to the application and development trend of fiber optic gyroscope, 60 micron fine diameter polarization-maintaining fiber is provided, which can wind small size optical fiber coil, low temperature sensitivity, and the performance of optical fiber is more stable at full temperature, which can meet the requirements of various environments.

Optical Fiber Structure



Product Application

- Fiber optic gyroscope
- Delay coil polarization-maintaining cable
- Polarization sensitive device
- Optical fiber polarization sensor

Product Features

- High lot-to-lot geometry consistency of batches and
- Excellent radiation resistance
- Excellent bending properties
- Wide operating temperature range and good full temperature stability
- Excellent long-term reliability
- Excellent birefringence effect

Product Specification

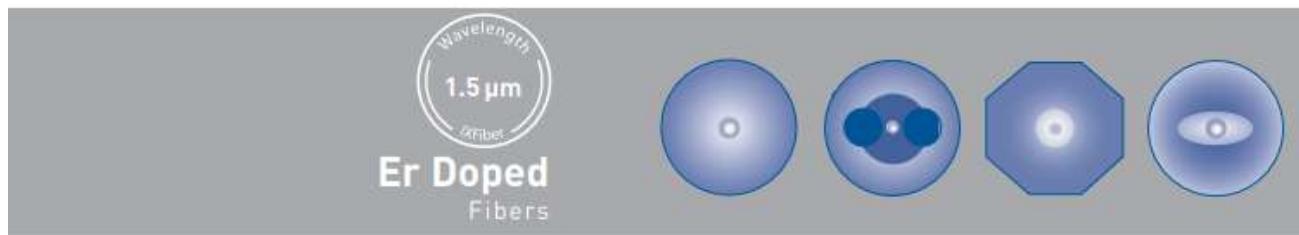
Properties		Unit	Product Specification					
Product Type	/		PM130G-60-U10	PM130G-80-U13	PM130G-125-U25	PM15G-60-U10	PM15G-80-U13	PM15G-125-U25
Working Wavelength	nm	1310	1310	1310	1310	1350	1350	1350
Cutoff Wavelength	nm	1100~1290	1100~1290	1100~1290	1100~1290	1290~1520	1290~1520	1290~1520
Mode Field Diameter	μm	6.0 ± 0.5	6.0 ± 0.5	6.0 ± 0.5	6.0 ± 0.5	6.5 ± 0.5	6.5 ± 0.5	6.5 ± 0.5
Attenuation	dB/km	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
Beat Length	mm	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0
Typical Crosstalk	dB/km	≤ -23	≤ -20	≤ -20	≤ -20	≤ -23	≤ -30	≤ -30
Geometric Properties								
Cladding Diameter	μm	60.0 ± 1.0	60.0 ± 1.0	125.0 ± 1.0	60.0 ± 1.0	80.0 ± 1.0	125.0 ± 1.0	125.0 ± 1.0
Coating Type	/	Double Layer of Curing acrylic resin						
Coating Diameter	μm	105.0 ± 2.0	130.0 ± 1.0	245.0 ± 2.0	105.0 ± 2.0	168.0 ± 1.0	245.0 ± 2.0	245.0 ± 2.0
Core Concentricity	μm	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
Cladding Out-Of-Circularity	/	≤ 1.0%	≤ 1.0%	≤ 1.0%	≤ 1.0%	≤ 1.0%	≤ 1.0%	≤ 1.0%
Environmental and Mechanical Properties								
Operating Temperature Range	°C	-40~+105	-40~+105	-40~+105	-40~+105	-40~+105	-40~+105	-40~+105
Screening Tension	kpsi	100	100	100	100	100	100	100

Customized Information

- The diameter of optical fiber coating can be customized according to customer requirements, and the accuracy can be controlled within the central value of $\pm 1 \mu\text{m}$.
- According to customer requirements to provide other specifications of polarization-maintaining fiber products or other types of polarization-maintaining fiber products.

9. Спецификация оптического волокна для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://sphotonics.ru/Katalog%20produkci%20i%20tehnologij%20iXFiber.pdf>, с7



Standard erbium doped fibers

Fiber Type	Fiber Name	Absorption @1480 nm (dB/m)	Absorption @ 1530 nm (dB/m)	MFD @1550 nm (μm)	Background losses (dB/km)	Cutoff wavelength (nm)	Splice loss (dB)	PMD factor (fs/dB)
C band	IXF-EDF-FGC-980	2 - 3	4.5 - 6.5	6.5 +/- 1	< 8	< 970	< 0.15 [to HI980]	< 0.25
C band	IXF-EDF-FGC-1480	2.5 - 4.5	6 - 10	5.5 +/- 1	< 8	1150 +/- 100	< 0.15 [to HI1060]	< 0.25
L band	IXF-EDF-FGL	9 - 16	20 - 35	5 +/- 1	< 10	< 1300	< 0.15 [SMF28]	< 0.25
ASE source	IXF-EDF-SHD	4 - 6	12 - 16	5.5 +/- 1	< 15	< 1150	< 0.15 [SMF28]	< 0.3
PM Panda C.band	IXF-EDF-FGC-PM	2 - 5	5 - 9	6.5 +/- 1	< 20	< 1250	< 0.2	-
PM Panda L.band	IXF-EDF-FGL-PM	7 - 14	15 - 30	5 +/- 1	< 20	< 1300	< 0.2	-

Radiation resistant erbium doped fibers

Fiber Type	Fiber Name	Absorption @ 980 nm (dB/m)	Absorption @ 1530 nm (dB/m)	MFD @1550 nm (μm)	Background losses (dB/km)	Cutoff wavelength (nm)	Splice loss (dB)	Radiation Induced Attenuation (RIA)
Medium doping	IXF-RAD-AMP-1	7 - 9	12 - 16	5.5 +/- 1	< 15	< 1150	< 0.2 (SMF28)	< 0.07dB/krad
High doping	IXF-RAD-AMP-2	12 - 15	22 - 28	5.5 +/- 1	< 20	< 1150	< 0.2 (SMF28)	< 0.05dB/krad

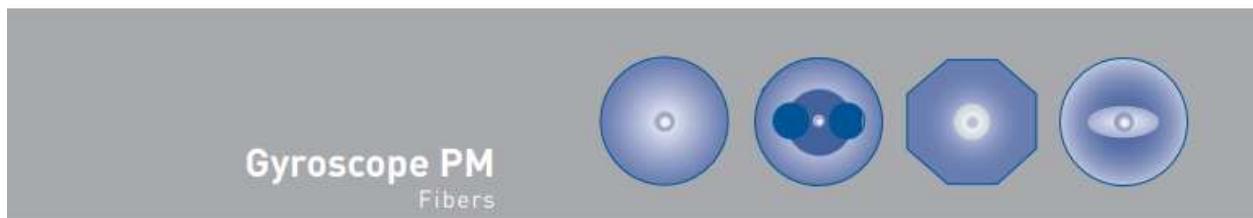
KEY FEATURES

- Low noise figure & flat gain shape
- High efficiency
- Low splice loss
- Highly consistent spectroscopy
- Birefringence: $> 2.10^{-4}$ / Panda type
- Cladding diameter (μm) : 125+/-2
- Coating diameter (μm) : 245+/-15
- 80 microns cladding diameter available
- Proof test level (kpsi) : 100

RELATED PRODUCTS

- Double clad Er/Yb fiber
- PM double clad fiber
- Gain flattening filters
- Other diameters or custom design on request
- Space grade version

Продолжение, с.12.

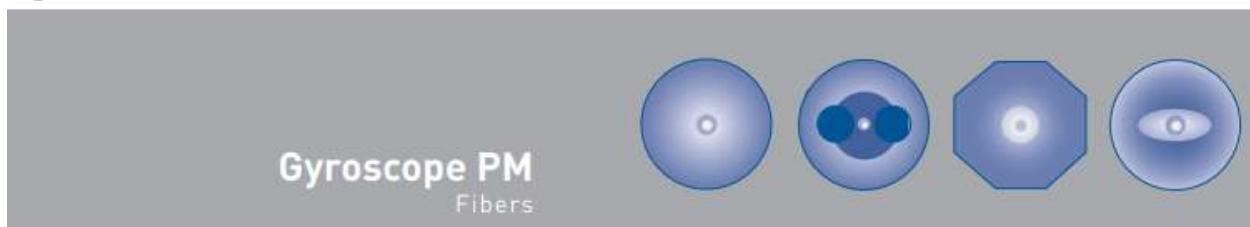


Application	Reference	Operating wavelength ($\pm 25\text{nm}$)	Optical losses @ operating W.L (dB/km)	Cutoff wavelength (nm)	Core NA (± 0.02) [*]	Mode field diameter (μm)
Terrestrial	IXF-PMG-820-40	820	< 15	< 770	0.18	4 \pm 0.5
Terrestrial	IXF-PMG-820-80	820	< 5	< 770	0.16	4.5 \pm 0.5
Terrestrial	IXF-PMG-820-80-P	820	< 5	< 770	0.16	4.5 \pm 0.5
Terrestrial	IXF-PMG-1310-80	1310	< 2	< 1270	0.16	6 \pm 0.5
Terrestrial	IXF-PMG-1310-80-LS	1310	< 2	< 1270	0.16	6 \pm 0.5
Terrestrial	IXF-PMG-1310-80-P	1310	< 2	< 1270	0.16	6 \pm 0.5
Terrestrial	IXF-PMG-1550-40	1550	< 5	< 1450	0.18	7 \pm 1
Terrestrial	IXF-PMG-1550-80	1550	< 2	< 1450	0.16	8 \pm 1
Space Grade	IXF-PMG-1550-80-E	1550	< 2	< 1450	0.16	8 \pm 1
Terrestrial	IXF-PMG-1550-80-LS	1550	< 2	< 1450	0.16	8 \pm 1
Terrestrial	IXF-PMG-1550-80-P	1550	< 2	< 1450	0.16	8 \pm 1

* @ 633 nm

The **IXF-PMG** fibers are advanced performances Polarization Maintaining Fiber specially designed for Fiber Optic Gyroscopes for Terrestrial and Space environment. The Host composition and the raw materials guarantee an extremely low sensitivity to high temperature variation and to high energy radiation.

Продолжение, с.13.



Beat length ^a (mm)	Cross talk (dB)	H parameter (m ⁻¹)	Quartz clad diameter (µm)	Coating diameter (µm)	PM structure
< 2.3	< -20 [100 m]	< 1.10 ⁻³	40 +/- 1	105 +/- 5	Tiger
< 1.8	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Tiger
< 1.8	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Panda
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Tiger
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	125 +/- 2	Tiger
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Panda
< 2.3	< -20 [100 m]	< 1.10 ⁻⁴	40 +/- 1	105 +/- 5	Tiger
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Tiger
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Tiger
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	125 +/- 2	Tiger
< 1.6	< -25 [100 m]	< 3.10 ⁻³	80 +/- 1	170 +/- 2	Panda

KEY FEATURES

- Panda & Tiger design available
- Design for space environment
- Qualified by international inertial sensing manufacturers
- Proof test level (kpsi): 100
- Core/clad concentricity (µm): < 1
- Axial twisting of fiber: < 3 (turns/m)
- Core ellipticity (%) : < 15

RELATED PRODUCTS

- Fiber Optic Gyroscopes (FOG's)
- PM couplers
- PM Fiber Bragg Gratings
- Erbium Doped Fibers
- Gain Flattening Filters

14. Спецификация волоконной катушки для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/brochures/components-and-accessories/cohr-precision-wound-gyro-coils-brochure.pdf>.

Precision Wound Fiber Gyro Coils

Quadrupole Wet, Dry, Flanged, Hubbed or Freestanding

Coil Types

Depending on requirements a great number of stock or custom coil structures can be supplied. Designs from epoxy-potted, fully freestanding to totally constrained coils using pure or composite materials ensure environmental stability and ruggedness.

Flanged – Wet or Dry

Hubbed – Wet Only

Freestanding – Wet Only

Typical Quadrupole Patterns

**Original Quadrupole
(Fully Symmetric)**

Modified Quadrupole

**TDF
(*Pair Transition)**

Quadrupole Wound Coil Attributes

Fiber Length	120 m → 6 km
Base Layer Turns	Up to 250
Layers	4 Layers → 100 Layers
Outer Diameter (D)	< 15 cm
Inner Diameter (d)	> 1.5 cm
Height (H)	< 5 cm

- Symmetrical coils for high degree of reciprocity
- Quadrupole pattern for minimal thermal gradient effects
- Low winding tension for minimal coil stress
- Error-free, technician-controlled winding for superior density and gap avoidance
- Non-circular shapes possible
- Testing and integration available on request

15. Спецификация волоконной катушки для ВОГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.csrayzer.cn/static/upload/file/20210113/1610519201388651.pdf>.



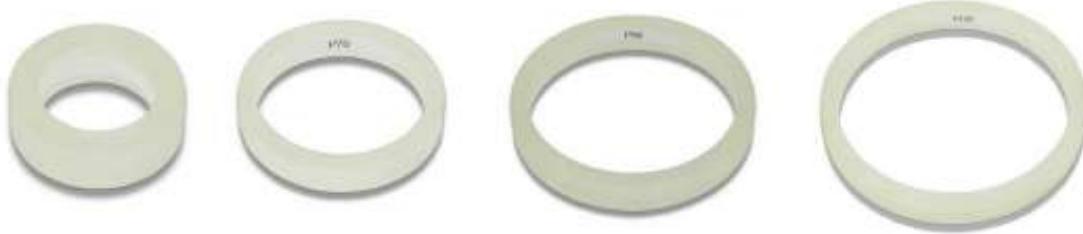
FreeStanding Fiber Coil

Specialist in Special Optic Devices

Introduction

CSRAYZER's **FOG Fiber Coil** is the core sensitive component of Fiber Optic Gyroscope (FOG). The quality of winding process directly determines the accuracy of FOG. With strong R&D capability and our own designed high performance **Fiber Coil Winding Machine ZKRZ-RHJ4.0**, we provide the design of the winding frame, Customized Fiber Coil, and also the fiber coil winding process service, according to customer's specific requirements.

Our FOG Fiber Coil has the characteristics of low Shupe error, low thermal stress and high anti-vibration ability. The precision of the Fiber Coil made into the FOG has reached accuracy less than 0.005°/h. They have been widely used in the fields of Fiber Optic Gyroscope, fiber Optic Hydrophone, radar and fiber optic currency transformer, with an annual production capability of 5000pcs.



Specification

Parameters	Unit	Values
Inner Diameter	mm	15mm-150mm
Fiber Coil Height	mm	5mm-55mm
Winding length	m	50m-5000m
Outer Diameter of Fiber	μm	100μm,135μm,165μm,250μm
Operating Wavelength	nm	1310nm\1550nm
Polarization Crosstalk@Room Temperature	dB/km	≤22dB/km
Insertion Loss	dB/km	≤0.8dB/km
Polarization Crosstalk Variation@Full Temperature	dB	≤2.5dB
Insertion Loss Variation@Full Temperature	dB/km	≤0.15dB/km
Operating Temperature	°C	-45-75
Storage Temperature	°C	-55-85
Winding Procedure		Singlepole / Quadrupole / Octupole Symmetrical
Customization is available!		

If you have any specific requirement, please do not hesitate!

[CONTACT US](#)

87. Спецификация оптического волокна для усилителей [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://cybel-llc.com/wp-content/uploads/2021/06/IXF-RAD-AMP-2-PM_edB-rad-hard-space-grade-doped-pm-fiber.pdf.



Industrial confidentiality

PRODUCT SPECIFICATION

Product code:

IXF-RAD-AMP-2-PM

Parameter	Specification	Units
1 Absorption @ 1530 nm	25 ±3	dB/m
2 Absorption @ 980 nm	15.5 ±1.5	dB/m
3 MFD @ 1550 nm	5.5 ±1	µm
4 Background losses	< 20	dB/km
5 Cutoff Wavelength	< 1200	nm
6 Cladding Diameter	125 ±2	µm
7 Coating Diameter	245 ±10	µm
8 Proof test level	100	kpsi
9 Splice Loss (to SMF28)	< 0.20	dB
10 RIA @1545nm	< 0.015	dB/m/kRad
11 RIA @980nm	< 0.025	dB/m/kRad
12 RIGV @1545nm	< 0.03	dB/kRad
13 Birefringence	>2.10 ⁻⁴	

Comments

RIA: Radiation Induced Attenuation

RIGV: Radiation Induced Gain Variation

RIGV has been measured in amplifier configuration with -20dBm 1545nm input signal and 100mW 976nm constant forward pumping (fiber length = 6m)

Effective date of this document: 19/02/2018

Edition: B

Document reference: IXF-RAD-AMP-2-PM_edB.pdf

Specifications are subject to change without notice

PSD-L-O-E-086-I

173. Спецификация оптического волокна GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/documents/pdf/27304-GyroSil-1550-Rad-Hard-Polarization-Maintaining-Optical-Fiber-web.pdf>.



GyroSil® 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining Optical Fiber

P/N: 27304

Product Specifications	
Product Description	GyroSil 1550 Rad-Hard Polarization-Maintaining Optical Fiber
Physical Characteristics	
Cladding Diameter	80 ± 1 µm
Coating Diameter	145 ± 7 µm
Core Concentricity Error	< 0.5 µm
Optical Characteristics	
Type	Polarization-Maintaining
Center Operating Wavelength	1550 nm
Cutoff Wavelength	< 1550 nm
Mode Field Diameter @ 1550 nm	8.9 ± 0.5 µm
Attenuation @ 1550 nm	< 1.0 dB/km
PM Properties	
Beat Length @ 1550 nm	< 4 mm
Mechanical and Environmental	
Proof Test Level	100 kpsi
Order by Part Number	27304

For additional information please contact your sales representative.

You can also visit our website at www.ofsoptics.com or call 1-888-fiberhelp (1-888-342-3743) USA or 1-770-798-5555 outside the USA.



Copyright © 2019 OFS Fitel, LLC.
All rights reserved, printed in USA.

OFS Marketing Communications
Date: 11/19



TruePhase is a registered trademark of OFS Fitel, LLC. OFS reserves the right to make changes to the prices and product(s) described in this document at any time without notice. This document is for informational purposes only and is not intended to modify or supplement any OFS warranties or specifications relating to any of its products or services.

174. 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.



PRODUCT SPECIFICATION

Product code: IXF-PMG-1550-80-019-E-LS

Parameter	Specification	Units
1 Cutoff Wavelength	< 1480	nm
2 Attenuation @1550nm	< 1.4	dB/km
3 Beat Length @633nm	< 1.5	mm
4 Mode Field Diameter @1550nm	6.7 ± 0.5	μm
5 Numerical Aperture	0.19 ± 0.02	
6 Core/Clad Concentricity	< 1	μm
7 Cladding Diameter	80 ± 1	μm
8 Coating Diameter	128 ± 2	μm
9 Proof Test Level	100	kpsi

Design Parameter	Specification	Units
10 Operating Wavelength	1500 – 1600	nm
11 Design	Tiger	
12 Core Shape	Round	
13 Holding Parameter @1550 nm	$< 1.10^{-5}$	m ⁻¹
14 Coating Material	Dual Acrylate	
15 Operating Temperature Range	-40 to +85	°C

Comments

Written by: Thomas Villedieu

Effective date of this document: 11/10/2017
Edition: A

Document reference: IXF-PMG-1550-80-019-E-LS_Product Specification.pdf



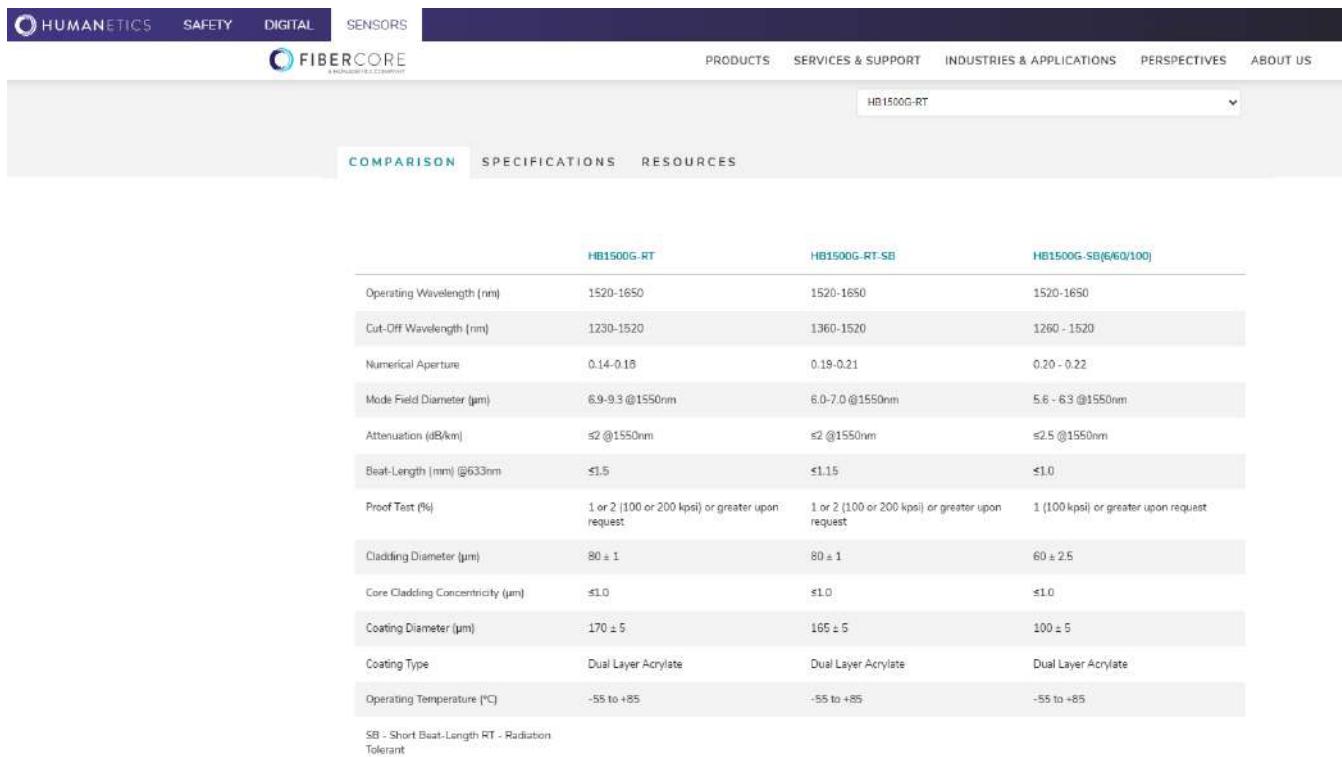
iXblue S.A.S.
iXblue Photonics
Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

T. : +33 1 30 08 94 50
contact.photonics@ixblue.com
www.photonics.ixblue.com

Société par Actions Simplifiée au capital de 11 442 897 €
R.C.S. Versailles 433 185 121 - SIRET 433 185 121 00081
Code APE 2051B - N° TVA intrac. FR 09 433 185 121



175. Спецификация оптического волокна HB1500G-RT, HB1500G-RT-SB
 [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/polarization-maintaining-pm-fiber/pm-gyro-fiber/radiation-tolerant-pm-fiber/hb1500g-rt>



The screenshot shows a website for FiberCore, a division of Humanetics. The top navigation bar includes links for HUMANETICS, SAFETY, DIGITAL, SENSORS, PRODUCTS, SERVICES & SUPPORT, INDUSTRIES & APPLICATIONS, PERSPECTIVES, and ABOUT US. A search bar at the top right contains the text "HB1500G-RT". Below the navigation is a secondary menu with tabs for COMPARISON, SPECIFICATIONS, and RESOURCES. The main content is a table comparing three fiber types: HB1500G-RT, HB1500G-RT-SB, and HB1500G-SB(6/60/100). The table includes the following data:

	HB1500G-RT	HB1500G-RT-SB	HB1500G-SB(6/60/100)
Operating Wavelength (nm)	1520-1650	1520-1650	1520-1650
Cut-Off Wavelength (nm)	1230-1520	1360-1520	1260 - 1520
Numerical Aperture	0.14-0.18	0.19-0.21	0.20 - 0.22
Mode Field Diameter (μm)	6.9-9.3 @1550nm	6.0-7.0 @1550nm	5.6 - 6.3 @1550nm
Attenuation (dB/km)	≤2 @1550nm	≤2 @1550nm	≤2.5 @1550nm
Beat-Length (mm) @633nm	≤1.5	≤1.15	≤1.0
Proof Test (%)	1 or 2 (100 or 200 kpsi) or greater upon request	1 or 2 (100 or 200 kpsi) or greater upon request	1 (100 kpsi) or greater upon request
Cladding Diameter (μm)	80 ± 1	80 ± 1	60 ± 2.5
Core Cladding Concentricity (μm)	≤1.0	≤1.0	≤1.0
Coating Diameter (μm)	170 ± 5	165 ± 5	100 ± 5
Coating Type	Dual Layer Acrylate	Dual Layer Acrylate	Dual Layer Acrylate
Operating Temperature (°C)	-55 to +85	-55 to +85	-55 to +85

Below the table, a note states: "SB - Short Beat-Length RT - Radiation Tolerant".

176. Спецификация оптического волокна производства OFS дополнение по радиационной стойкости оптического волокна GyroSil® Rad-Hard PM [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.ofsoptics.com/wp-content/uploads/Radiation_Performance_of_GyroSil_RadHard.pdf.



Radiation Performance of GyroSil® Rad-Hard PM Optical Fiber

The GyroSil Rad-Hard PM Optical Fiber has been radiation tested by gamma radiation from a ^{60}Co gamma source, at two different dose rates 1 rad/s and 133 rad/s (100 rad/s = 1 Gy/s), and total dose values are 100 krad and 1 Mrad [1]. Radiation induced attenuation (RIA) at 1550 nm for the two dose rates up to a 100 krad total dose followed by 500 hour annealing at 35°C is depicted in figure 1.

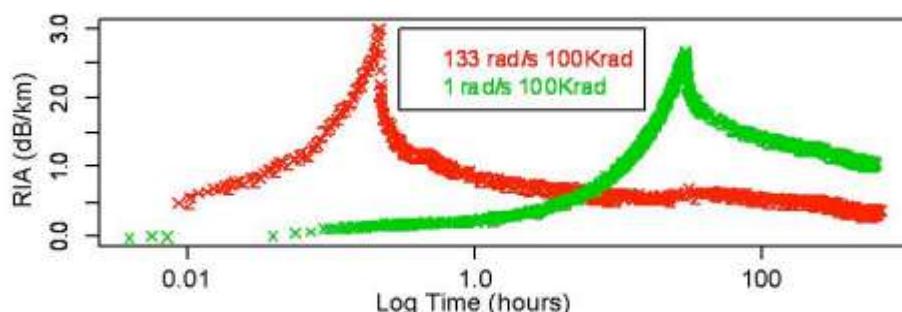


Figure 1. Radiation induced attenuation at 1550 nm for 1 rad/s (green) and 133 rad/s (red) dose rates up to a total dose of 100 krad followed by 500 hour annealing at 35°C.

The data allows for analyzing the radiation induced damage in optical fibers [1,2]. For the GyroSil fiber the RIA is plotted against total accumulated dose at a dose rate of 1 rad/s in figure 2. Comparison is made with SMF28- [3] and the pure silica core Z-fiber- [4]. The later being considered a very radiation hard fiber. This clearly evidence that the GyroSil is a Rad-Hard fiber.

[1] T. Geisler et al, "Radiation Performance of Low Bend-Loss Optical Fiber for Gyroscope Applications" IEEE/ION PLANS Conference, Monterey, California (2014)

[2] M. LuValle et al., "Radiation Induced Loss Predictions for Pure Silica Core Polarization Maintaining Fibers", SPIE 6193-50 (2006).

[3] M. Alam et al, "Passive and active optical fibers for space and terrestrial applications", Proc. SPIE, Vol. 6308 (2006)

[4] Data from EPFL Space Center

[5] M. Poizat, "Space Environment and effects", (2009).

Продолжение .

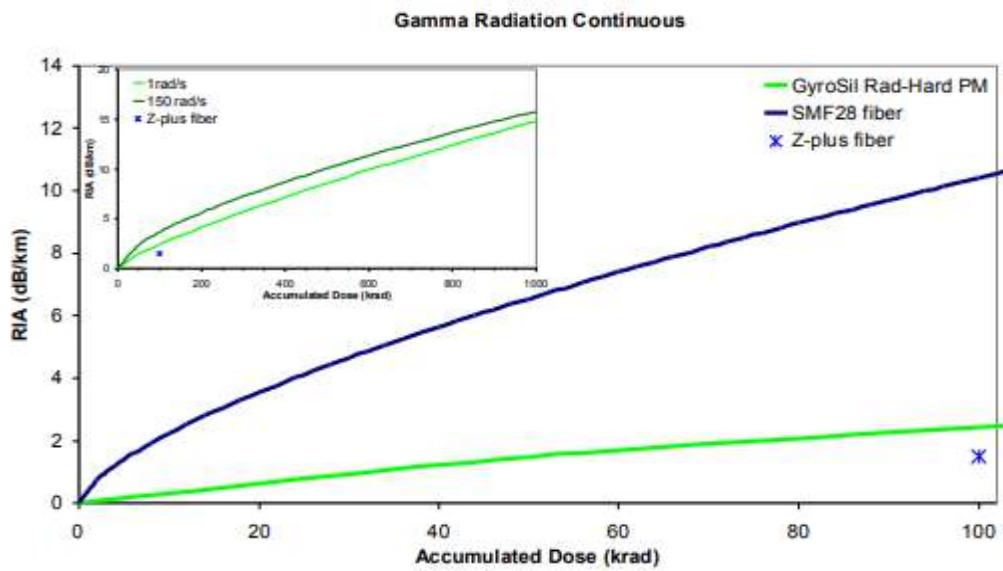


Figure 2. Radiation induced attenuation at 1550 nm versus accumulated dose of gamma radiation at a dose rate of 1 rad/s. The GyroSil Rad-Hard is compared with SMF28- [3] and the pure silica core Z-fiber- [4]. Inset shows the RIA at 1 rad/s and 150 rad/s dose rates up to an accumulated dose of 1 Mrad.

The simulated RIA over a 15 year geosynchronous orbit is shown in figure 3.

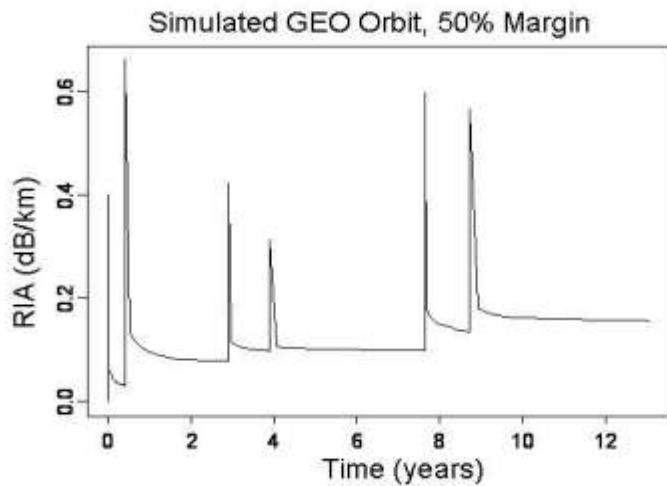
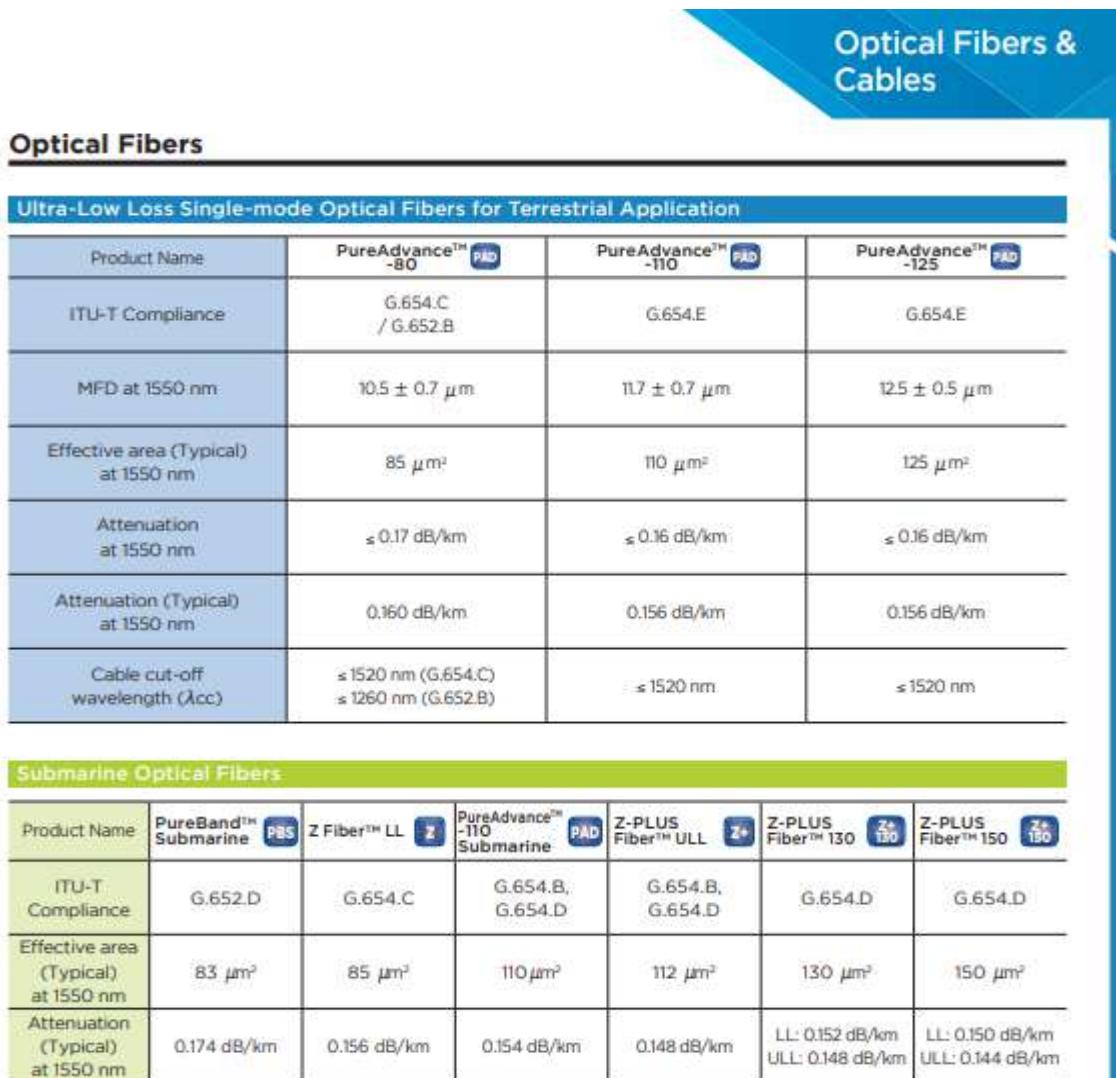


Figure 3. Radiation induced attenuation at 1550 nm versus time in a geosynchronous orbit. Flares were simulated assuming 4 major flares per decade with a total exposure of 60 krad (50% more than assumed from standard exposure with 20 mm Al shielding in a GEO [5]).

178. Спецификация оптического волокна производства Sumitomo [Электронный ресурс] – Режим доступа:
https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/202311/download_documents/optical-fibers-and-cables.pdf.



Optical Fibers

Ultra-Low Loss Single-mode Optical Fibers for Terrestrial Application

Product Name	PureAdvance™ -80 	PureAdvance™ -110 	PureAdvance™ -125 
ITU-T Compliance	G.654.C / G.652.B	G.654.E	G.654.E
MFD at 1550 nm	10.5 ± 0.7 μm	11.7 ± 0.7 μm	12.5 ± 0.5 μm
Effective area (Typical) at 1550 nm	85 μm²	110 μm²	125 μm²
Attenuation at 1550 nm	≤ 0.17 dB/km	≤ 0.16 dB/km	≤ 0.16 dB/km
Attenuation (Typical) at 1550 nm	0.160 dB/km	0.156 dB/km	0.156 dB/km
Cable cut-off wavelength (λcc)	≤ 1520 nm (G.654.C) ≤ 1260 nm (G.652.B)	≤ 1520 nm	≤ 1520 nm

Submarine Optical Fibers

Product Name	PureBand™ Submarine 	Z Fiber™ LL 	PureAdvance™ -110 Submarine 	Z-PLUS Fiber™ ULL 	Z-PLUS Fiber™ 130 	Z-PLUS Fiber™ 150 
ITU-T Compliance	G.652.D	G.654.C	G.654.B, G.654.D	G.654.B, G.654.D	G.654.D	G.654.D
Effective area (Typical) at 1550 nm	83 μm²	85 μm²	110 μm²	112 μm²	130 μm²	150 μm²
Attenuation (Typical) at 1550 nm	0.174 dB/km	0.156 dB/km	0.154 dB/km	0.148 dB/km	LL: 0.152 dB/km ULL: 0.148 dB/km	LL: 0.150 dB/km ULL: 0.144 dB/km

186. Спецификация оптического волокна производства Fibercore [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://www.hanamuraoptics.com/opticalfiber/fcl/fcl_specsheets2020/pure_silica_core_sm_fiber_md23.8.pdf.

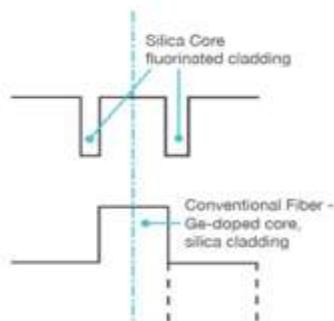
PURE SILICA CORE SM FIBER



Fibercore's Pure Silica Core SM fibers (SM-SC) are designed for high performance in demanding applications.

The SM1250SC(9/125) and SM1500SC variants are designed for use in hydrogen-rich environments where the pure silica core resists the effects of hydrogen darkening. The SM300-SC and SM400-SC are designed for Ultra-Violet (UV) and visible wavelength transmission. The silica core prevents photodarkening effects, which are normally associated with germanium doped fibers.

Fluorinated, depressed cladding design (see the image to the right) allows the core to be made from pure silica without the need for germanium doping.



FEATURES

Advantages

- Reduced hydrogen darkening
- Reduced UV induced photodarkening
- Polyimide variant
- Radiation tolerant core design
- Low attenuation 1550nm variants for long length sensors and communication

Typical Applications:

- Oil & Gas distributed sensors
- Biomedical illumination
- Microscopy
- Sensing in radiation and hydrogen environments
- Low attenuation telecoms transmission

Product Variants

- SM300-SC
Pure silica core fiber for transmitting long UV (UV-A) wavelengths without photodarkening
- SM400-SC
Non-photodarkening fiber for transmission of violet, blue and green wavelengths
- SM1250SC(9/125)
Very low attenuation, pure silica core fiber for 1550nm transmission
- SM1500SC(7/80)
Pure silica core, bend insensitive fiber
- SM1500SC(7/125)
Pure silica core, bend insensitive fiber

To find out more visit fibercore.com

22July2020_MD238

 FIBERCORE
A HUMANETICS COMPANY

Продолжение.

SPECIFICATIONS

	SM300-SC	SM400-SC	SM1250SC (9/125)*	SM1500SC (7/80)	SSM1500SC (7/125)
Operating Wavelength (nm)	320 - 430	405 - 532	1260 - 1650	1520 - 1650	
Cut-Off Wavelength (nm)					
Dual Layer Acrylate (DLA)	≤310	≤400	1190 - 1290	1400 - 1500	
Polyimide (P)	-	-	1190 - 1290	1350 - 1520	
Numerical Aperture		0.12 - 0.14	0.13 - 0.15	0.17 - 0.19	
Mode Field Diameter (μm)	2.0 - 2.4 @350nm	2.7 - 3.3 @480nm	8.3 - 9.6 @1550nm	6.7 - 7.6 @1550nm	
Attenuation (dB/km)					
Dual Layer Acrylate (DLA)	≤70 @350nm	≤50 @430nm ≤30 @532nm	≤0.6 @1310nm ≤0.4 @1550nm	≤0.4 @1550nm	≤0.7 @1550nm
Carbon High Temperature (CHT)	-	-	≤0.6 @1310nm ≤0.4 @1550nm	-	≤0.7 @1550nm
Polyimide (P)	-	-	≤0.8 @1310nm ≤0.8 @1550nm	≤0.75 @1550nm	≤0.7 @1550nm
Carbon Polyimide (CP)	-	-	≤0.8 @1310nm ≤0.8 @1550nm	-	≤0.7 @1550nm
Proof Test (%)			1 or 2 (100 or 200 kpsi)		
Cladding Diameter (μm)	125 ± 1	125 ± 2	80 ± 1	125 ± 2	
Core Cladding Concentricity (μm)			≤0.75		
Coating Diameter (μm)					
Dual Layer Acrylate (DLA)	245 ± 7	245 ± 15	170 ± 5	245 ± 7	
Carbon High Temperature (CHT)	-	245 ± 15	-	245 ± 15	
Polyimide (P)	-	155 ± 5	105 ± 5	155 ± 5	
Carbon Polyimide (CP)	-	155 ± 5	-	155 ± 5	
Coating Type	DLA	DLA, CHT, P* & CP	DLA & P	Polyimide	DLA, CHT, P & CP
Operating Temperature (°C)					
Dual Layer Acrylate (DLA)			-55 to +85		
Carbon High Temperature (CHT)	-	-	-55 to +150	-	-55 to +150
Polyimide (P)	-	-		-55 to +300	
Carbon Polyimide (CP)	-	-	-55 to +300	-	-55 to +300

* Special polyimide, for strip and recoat FBGs, available.

187. Спецификация оптического волокна производства Draka [Электронный ресурс] – Режим доступа:

https://www.prysmian.com/sites/www.prysmian.com/files/media/documents/Data-Sheet-RadHard-SMF_MIL49291-7_2013-10_0.pdf.



DrakaElite Specialty Fibre

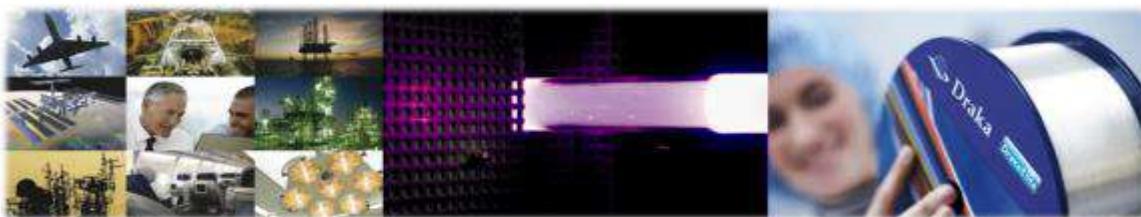


RadHard Single-Mode Fibre (MIL-PRF-49291/7)

Legacy radiation hardened SMF for irradiative environments

Product Type: Legacy RadHard Single-Mode Fibre (MIL-PRF-49291/7)
Coating Type: Dual Layer Primary Coating (DLPC9)

Issue date: 10-2013
Supersedes: 04-2013



This DrakaElite™ RadHard single-mode fibre (SMF) can be used for high irradiative environments (e.g. gamma rays, X-flash, neutrons protons) up to a dose of about 10 kGy. For extreme irradiative environments (some MGy dose) DrakaElite™ Super RadHard SMF is recommended. Note: 1 Gy = 100 Rad.

This Germanium-doped RadHard SMF has been qualified and approved by the U.S. Defense Supply Center, Columbus (DSCC) in accordance with the U.S. Military **MIL-PRF-49291/7** specification. (Note: 500 µm coating is not qualified).

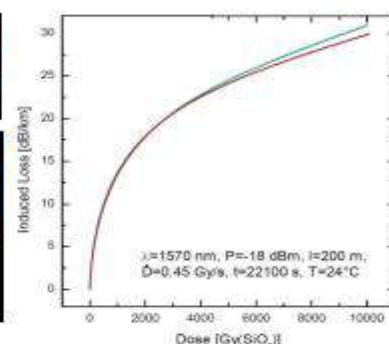
Because Radiation Induced Attenuation (RIA) is a strong function of time after dose, dose rate, temperature, system operational wavelength, and system operational power, assessing the RIA performance of fibres should be conducted as close to conditions in the final application as possible.

The DrakaElite™ Germanium-doped RadHard SMF can be used in all cable constructions, including loose tube, tight buffered, ribbon and central tube designs. This fibre complies with or exceeds ITU-T Recommendation G.652.D, IEC 60793-2-50 category B1.3 Optical Fibre Specification and Telcordia GR-20-Core.

Prysmian Group' fibre plant Draka Comteq Fibre B.V. in Eindhoven, Netherlands, is **MIL-STD-790** certified.

Features	Advantages
RadHard behaviour	<ul style="list-style-type: none"> Suitable for medium irradiative environments
Coated with the dual layer UV Acrylate	<ul style="list-style-type: none"> Optimized performance in tight-buffer cable applications

Steady state gamma irradiation test conditions – MIL 49291-7		
Temperature	Dose rate	Total dose
- 28°C / 25°C / 85°C	0.50 Gy/s (SiO ₂)	Classified
Irradiation test requirements – MIL 49291-7		
Max. induced attenuation @1310nm	Attenuation at specified recovery time	Specified recovery time
< 50 dB/km (Total dose classified)	< 15 @ -28°C < 5 @ 25 °C < 5 @ 85 °C	1000 s



RIA reproducibility for Draka RH-SMFs
(5 years difference in production date
at 1570 nm; dose rate 0.45 Gy/s)



RadHard Single-Mode Fibre

Prysmian Group
fibresales@prysmiangroup.com
<http://fibre.prysmiangroup.com>

Netherlands: Tel: +31 (0)402958700
France: Tel: +33 (0)321794900
USA: Tel: +1 828-495-8611

Продолжение.



DrakaElite Specialty Fibre



RadHard Single-Mode Fibre (MIL-PRF-49291/7)

Legacy radiation hardened SMF for irradiative environments

Product Type: Legacy RadHard Single-Mode Fibre (MIL-PRF-49291/7)
 Coating Type: Dual Layer Primary Coating (DLPC9)

Issue date: 10-2013
 Supersedes: 04-2013

Characteristics	Conditions	Specified Values		Units
OPTICAL SPECIFICATIONS (Uncabled fibre)				
Attenuation Coefficient	1310 nm 1385 nm 1550 nm	≤ 0.4 ≤ 0.4 ≤ 0.3		dB/km
Point Discontinuity	1310 nm / 1550 nm	≤ 0.05		dB
Bending Loss	100 turns, R=38mm; 1310nm 100 turns, R=38mm; 1550nm	≤ 0.1 ≤ 1.0		dB
Cabled Cutoff Wavelength		≤ 1260		nm
Mode Field Diameter	1310 nm 1550 nm	9.0 ± 0.4 10.1 ± 0.5		μm
Chromatic Dispersion	1310 nm 1550 nm	< 3.2 < 22		ps/nm/km
Group Index of Refraction (Typ.)	1310 nm 1550 nm	1.467 1.468		
GEOMETRICAL SPECIFICATIONS				
Cladding Diameter		125.0 ± 1.0		μm
Core/Cladding Concentricity Error		≤ 0.6		μm
Cladding Non-Circularity		≤ 1.0		%
Coating Diameter	M49291/7-01	M49291/7-02	242 ± 10	500 ± 15
Coating Non-Circularity	M49291/7-01	M49291/7-02	≤ 5	≤ 5
Coating/Cladding Concentricity Error	M49291/7-01	M49291/7-02	≤ 10	≤ 20
Length	Standard lengths	2.2 - 8.8	1.1 - 6.6	km
MECHANICAL SPECIFICATIONS				
Coating Strip Force	Average strip force, unaged and aged ¹ Peak strip force, unaged and aged ²	1 to 3 1.8 to 13.2	Not. Spec. 1.8 to 20	N N
Proof Test	Off line	> 0.7 (100)		GPa (kpsi)
Dynamic Tensile Strength (median value)	0.5 meter gauge length, unaged and aged ²	> 3.8 (550)		GPa (kpsi)
Fatigue Parameter (Typical)	Dynamic fatigue, unaged and aged ²	n ₂ > 18		
ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS				
Temperature Cycling	850 nm, 1310 nm; -60°C to +85°C	≤ 0.05		dB/km
Temperature-Humidity Cycling	850 nm, 1310 nm; -10°C to +85°C, 4-98% RH	≤ 0.05		dB/km
Water Immersion	850 nm, 1310 nm; 23°C, 30 days	≤ 0.05		dB/km
Dry Heat	850 nm, 1310 nm; 85°C, 30 days	≤ 0.05		dB/km
Damp Heat	850 nm, 1310 nm; 85°C; 85% RH, 30 days	≤ 0.05		dB/km
Operating Temperature Range		-46 to +85		°C
Non-Operating + Storage Temperature Range		-55 to +85		°C
TYPICAL RADIATION INDUCED ATTENUATION (RIA)				
Radiation Induced Attenuation	Dose: 10 KGy; Dose rate: 0.45 Gy/s; T=24°C; 1570 nm	~3		dB/100m

1). Aging at 23°C, 0°C and 45°C; 30 days at 85°C and 85% RH; 14 days water immersion at 23°C.
 2). Aging at 85°C, 85% RH, 30 days.



RadHard Single-Mode Fibre

Prysmian Group
 fibresales@prysmiangroup.com
 http://fibre.prysmiagroup.com

Netherlands: Tel: +31 (0)402958700
 France: Tel: +33 (0)321794900
 USA: Tel: +1 828-495-8611

188. Спецификация оптического волокна производства Draka [Электронный ресурс] – Режим доступа:

http://staticres.prysmiangroup.com/ds/en/business_markets/markets/fibre/downloads/datasheets/DrakaElite-Super-RadHard-Single-Mode-Optical-Fiber.pdf.

Prysmian Group **DrakaElite Specialty Fibre** **PRYSMIAN** **Draka**

Super RadHard Single-Mode Optical Fibre

Extremely low sensitivity for radiation effects in irradiative environments

Product Type: Super RadHard Single-Mode Fibre
Coating Type: Dual Layer Primary Coating (DLPC9)

Issue date: 04-2013
Supersedes: 05-2012



Prysmian Group has developed a revolutionary new product as part of its **DrakaElite™** specialty radiation hardened (RadHard) fibres portfolio. This Draka **Super RadHard single-mode fibre** (SMF) shows extremely low sensitivity for radiation effects in irradiative environments (e.g. gamma rays, X-flash, neutrons, protons) while simultaneously offering high bandwidth.

By combining the excellent performance of the proprietary deposition process (PCVD) with a full Fluorine-doped design, the Radiation Induced Attenuation (RIA) response of this **DrakaElite™ Super RadHard SMF** is significantly improved. It allows much more tolerance than standard MIL-PRF-49291 approved Germanium-doped SMF particularly for dose levels exposure above 10 kGy. In addition, this **Super RadHard SMF** exhibits a faster recovery time as compared to standard RadHard SMFs. The benefit of this Fluorine-doped **Super RadHard SMF** compared to the standard Germanium-doped RadHard SMF increases with the total dose from a factor 8 at 20 kGy to a factor 22 at 2 MGy for an operating wavelength of 1310nm. (Note: 1 Gy = 100 Rad).

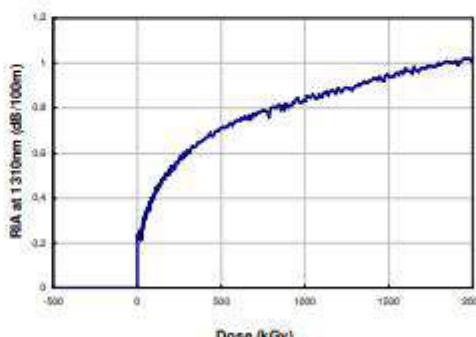
Because Radiation Induced Attenuation (RIA) is a strong function of time after dose, dose rate, temperature, system operational wavelength, and system operational power, assessing the RIA performance of different fibres should be conducted as close to conditions in the final application as possible.

The **DrakaElite™** Fluorine-doped **Super RadHard SMF** can be used in all cable constructions, including loose tube, tight buffered, ribbon and central tube designs. This fibre complies with or exceeds ITU-T Recommendation G.652.B, IEC 60793-2-50 type B1.1 Optical Fibre Specification and Telcordia GR-20-Core.

Features	Advantages
Super RadHard behaviour	<ul style="list-style-type: none"> Optimized for use in highly irradiative environments Strongly improved performance compared to regular Germanium-doped fibres
Coated with the dual layer UV Acrylate	<ul style="list-style-type: none"> Optimized performance in tight-buffer cable applications High resistance to micro-bending

Example of RIA for Draka SRH-SMF at 1310nm under dose rate of 1.25 Gy/s up to 2 MGy at 45°C

Draka Elite



Dose (kGy)	RIA at 1310nm (dB/100m)
0	0.2
100	0.4
200	0.6
300	0.75
400	0.85
500	0.9
600	0.95
700	0.98
800	1.0
900	1.02
1000	1.04
1200	1.08
1400	1.12
1600	1.15
1800	1.18
2000	1.2

Super RadHard Single-Mode Fibre

Prysmian Group
 fibresales@prysmiangroup.com
<http://fibre.prysmiangroup.com>

Netherlands: Tel: +31 (0)402958700
 France: Tel: +33 (0)321794900
 USA: Tel: +1 828-495-8611

Продолжение.



DrakaElite Specialty Fibre



Super RadHard Single-Mode Optical Fibre

Extremely low sensitivity for radiation effects in irradiative environments

Product Type: Super RadHard Single-Mode Fibre
 Coating Type: Dual Layer Primary Coating (DLPC9)

Issue date: 04-2013
 Supersedes: 05-2012

Characteristics	Conditions	Specified Values	Units
OPTICAL SPECIFICATIONS (Uncabled fibre)			
Attenuation Coefficient	1310 nm 1550 nm	≤ 0.4 ≤ 0.3	dB/km
Point Discontinuity	1310 nm / 1550 nm	≤ 0.05	dB
Bending Loss	100 turns, R=25 mm; 1310 nm 100 turns, R=25 mm; 1550 nm 100 turns, R=30 mm; 1625 nm	≤ 0.05 ≤ 0.05 ≤ 0.05	dB
Cabled Cutoff Wavelength		≥ 1260	nm
Mode Field Diameter	1310 nm 1550 nm	9.0 ± 0.4 10.1 ± 0.5	μm
Chromatic Dispersion	Zero Dispersion Wavelength Slope at Zero Dispersion Wavelength	1300 - 1324 ≤ 0.092	nm ps/(nm².km)
Group Index of Refraction (Typ.)	1310 nm 1550 nm	1.457 1.458	
GEOMETRICAL SPECIFICATIONS			
Cladding Diameter		125.0 ± 1.0	μm
Core/Cladding Concentricity Error		≤ 0.6	μm
Cladding Non-Circularity		≤ 1.0	%
Coating Diameter		242 ± 10	μm
Coating Non-Circularity		≤ 5	%
Coating/Cladding Concentricity Error		≤ 12	μm
Length	Standard lengths	1.1, 2.2, 3.3, 4.4	km
MECHANICAL SPECIFICATIONS			
Coating Strip Force	Average strip force, unaged and aged ¹	1 to 3	N
	Peak strip force, unaged and aged ¹	1.2 to 8.9	N
Proof Test	Off line	> 0.7 (100)	GPa (kpsi)
Dynamic Tensile Strength (median value)	0.5 meter gauge length, unaged and aged ²	> 3.8 (550)	GPa (kpsi)
Fatigue Parameter (Typical)	Dynamic fatigue, unaged and aged ²	n _d > 18	
ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS			
Temperature Cycling	850 nm, 1310 nm; -60°C to +85°C	≤ 0.05	dB/km
Temperature-Humidity Cycling	850 nm, 1310 nm; -10°C to +85°C, 4-98% RH	≤ 0.05	dB/km
Water Immersion	850 nm, 1310 nm; 23°C, 30 days	≤ 0.05	dB/km
Dry Heat	850 nm, 1310 nm; 85°C, 30 days	≤ 0.05	dB/km
Damp Heat	850 nm, 1310 nm; 85°C; 85% RH, 30 days	≤ 0.05	dB/km
TYPICAL RADIATION INDUCED ATTENUATION (RIA)			
Radiation Induced Attenuation	Dose: 10 kGy; Dose rate: 0.2 Gy/s; T=24°C; 1310 nm Dose: 100 kGy; Dose rate: 1.6 Gy/s; T=24°C; 1310 nm Dose: 2 MGy; Dose rate: 1.25 Gy/s; T=45°C; 1310 nm	~0.25 ~0.5 ~1	dB/100m

1). Aging at 23°C, 0°C and 45°C; 30 days at 85°C and 85% RH; 14 days water immersion at 23°C.

2). Aging at 85°C, 85% RH, 30 days.

Super RadHard Single-Mode Fibre

Prysmian Group
 fibresales@prysmiangroup.com
 http://fibre.prysmiagroup.com

Netherlands: Tel: +31 (0)402958700
 France: Tel: +33 (0)321794900
 USA: Tel: +1 828-495-8611

189. Спецификация оптического волокна производства Coherent [Электронный ресурс] – Режим доступа:

https://content.coherent.com/pdf/s1310_p_spec_202011122144.pdf.

NuSENSOR 1310/1550 nm Pure Silica Core Single-Mode Fibers



Coherent's NuSENSOR pure silica core single-mode fiber are immune to the damaging effects of hydrogen ingress, enabling Brillouin, Rayleigh and FBG based distributed temperature and strain sensing in harsh environments. These 0.12 NA fibers are optimized for operation at both 1310 nm and 1550 nm. NuSENSOR single-mode fibers provide tight tolerance optical and geometrical specifications measured at the application critical wavelengths. The fibers come with either a polyimide or mid-temperature acrylate coating and are also available with a hermetic carbon layer. For high H₂ partial pressure and elevated temperature up to 300°C, you will find no measurable induced loss for typical sensing applications.

Typical Applications

- Enhanced oil recovery processes
- Hydrothermal well temperature measurements
- Oil reservoir optimization
- Brillouin distributed temperature & strain sensing

Features & Benefits

- Resistant to H₂ ingress — Low cost, long life deployment
- Exceptional uniformity — Consistent and repeatable performance
- Long unattended deployments or short cycle in-out applications
- Low loss over the wavelengths range critical to DTSS
- Available with hermetic carbon coating

Optical Specifications

	S1310-P	S1310-CP	S1310-MTA	S1310-CMTA
Operating Wavelength	1310 – 1600 nm			
Core NA	0.120	0.120	0.120	0.120
Mode Field Diameter	9.2 ± 0.6 µm @ 1310 nm 10.4 ± 0.8 µm @ 1550 nm	9.2 ± 0.6 µm @ 1310 nm 10.4 ± 0.8 µm @ 1550 nm	9.2 ± 0.6 µm @ 1310 nm 10.4 ± 0.8 µm @ 1550 nm	9.2 ± 0.6 µm @ 1310 nm 10.4 ± 0.8 µm @ 1550 nm
Cutoff	1250 ± 50 nm			
Core Attenuation	≤ 0.80 dB/km @ 1310 nm ≤ 0.80 dB/km @ 1550 nm	≤ 0.80 dB/km @ 1310 nm ≤ 0.80 dB/km @ 1550 nm	≤ 0.80 dB/km @ 1310 nm ≤ 0.80 dB/km @ 1550 nm	≤ 0.80 dB/km @ 1310 nm ≤ 0.80 dB/km @ 1550 nm

Geometrical & Mechanical Specifications

Cladding Diameter	125.0 ± 1.0 µm			
Core Diameter	8.0 µm	8.0 µm	8.0 µm	8.0 µm
Coating Diameter	150.0 ± 5.0 µm	150.0 ± 5.0 µm	245.0 ± 5.0 µm	245.0 ± 5.0 µm
Coating Concentricity	< 1.5 µm	< 1.5 µm	< 5.0 µm	< 5.0 µm
Core/Clad Offset	≤ 0.50 µm	≤ 0.50 µm	≤ 0.50 µm	≤ 0.50 µm
Coating Material	Polyimide	Polyimide	Mid Temperature Acrylate	Mid Temperature Acrylate
Operating Temperature Range	-65 to 300 °C	-65 to 300 °C	-40 to 150 °C	-40 to 150 °C
Prooftest Level	≥ 100 kpsi (0.7 GN/m ²)			



190. Спецификация оптического волокна производства IXblue [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://cybel-llc.com/wp-content/uploads/2019/01/IXF-RAD-SM-1550-014-PI_edB.pdf.



Industrial confidentiality

PRODUCT SPECIFICATION

Product code:

IXF-RAD-SM-1550-014-PI

Parameter	Specification	Units
1 Core NA	0.14 ± 0.01	
2 Attenuation @ 1550 nm	< 0.6	dB/km
3 Cutoff Wavelength	< 1350	nm
4 MFD @ 1550 nm	9 ± 1	µm
5 Core/clad offset	< 1	µm
6 Outside Cladding diameter	125 ± 2	µm
7 Coating diameter	155 ± 5	µm
8 Radiation Induced Attenuation @ 1550nm for 1 MGy (γ ray)	<30	dB/km

Design Parameter	Specification	Units
9 Core Material	Pure silica	
10 Coating Material	Polyimide	
11 Operating temperature range	-60 / +300	°C
12 Proof test level	100	kpsi

Product description :
 Fiber designed for sensor applications.
 Pure silica core radiation resistant fiber
 Polyimide coated for High temperature resistance and harsh environment
 Typical RIA @ 1550 nm for 1 MGy (γ ray) ~ 25 dB/km

Written by: T.ROBIN

Effective date of this document: 09/10/2018
 Edition: B

Document reference: IXF-RAD-SM-1550-014-PI_edB.pdf



IXblue S.A.S.
 IXblue Photonics
 Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

T. : +33 1 30 06 94 50
 contact.photonics@ixblue.com
 www.photonics.ixblue.com

Société par Actions Simplifiée au capital de 11 442 597 €
 R.C.S. Versailles 433 185 121 - SIRET 433 185 121
 00061
 Code APE 2691B - N° TVA Intra: FR 09 433 185 121



191. Спецификация оптического волокна производства IXblue [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.cybel-llc.com/wp-content/uploads/2019/01/IXF-SM-1550-125-014-PI_edB.pdf.



Industrial confidentiality

PRODUCT SPECIFICATION

Product code:

IXF-RAD-SM-1550-014-HT

	Parameter	Specification	Units
1	Core NA	0.14 ± 0.01	
2	Attenuation @ 1550 nm	< 0.6	dB/km
3	Cutoff Wavelength	< 1350	nm
4	MFD @ 1550 nm	9 ± 1	μm
5	Core/clad offset	< 1	μm
6	Outside Cladding diameter	125 ± 2	μm
7	Coating diameter	245 ± 15	μm
8	Radiation Induced Attenuation @ 1550nm for 1 MGy (γ ray)	<30	dB/km

	Design Parameter	Specification	Units
9	Core Material	Pure silica	
10	Coating Material	Acrylate	
11	Operating temperature range	-60 / +200	°C
12	Proof test level	100	kpsi

Product description :
 Fiber designed for sensor applications.
 Pure silica core radiation resistant fiber
 High temperature acrylate coated for High temperature resistance
 Typical RIA @ 1550 nm for 1 MGy (γ ray) ~ 25 dB/km

Written by: T.ROBIN

Effective date of this document: 09/10/2018

Edition: B

Document reference: IXF-RAD-SM-1550-014-HT_edB.pdf



IXblue S.A.S.
 IXblue Photonics
 Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

T. : +33 1 30 08 94 50
 contact.photonics@ixblue.com
 www.photonics.ixblue.com

Société par Actions Simplifiée au capital de 11 442 897 €
 R.C.S. Versailles 433 185 121 - BIRET 433 185 121
 00061
 Code APE 2651B - N° TVA Intra: FR 09 433 185 121



192. Спецификация оптического волокна производства J-fiber [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.fiberlabs.co.jp/image3/LEONI/-MIL-Spec_09-125-245.pdf.



Member of LEONI Group

MIL-Spec Radiation Hard Fibers

MIL-PRF-49291/7C SMF 09/125/250

MMF 09/125/245 μ m MIL-Spec Radiation Hard Singlemode Fiber (PIN MIL-PRF-49291/7-01) is part of j-fiber's series of radiation hard singlemode fibers which have been qualified and approved by the U.S. Defense Supply Center, Columbia (DSCC) in accordance with the U.S. Military MIL-PRF-49291 standard. These fibers have been specifically designed to withstand the hazards of radiation threatened and harsh environments in military and aerospace applications.

Features and Benefits

- Lowest attenuation changes under radiation exposure
- Fastest recovery time compared to other commercial singlemode fiber
- Specified for use in 1310nm and 1550nm applications
- Easy handling and splicing

MIL-Specification

In compliance with MIL-PRF-49291/7-01 (SMF 09/125/250)

Performance Characteristics

	MIL-PRF-49291/7-01	Explanation
Type	II	Singlemode
Class	5	Dispersion unshifted
Size	II	09/125 μ m
Composition	A	Glass & Glass Silica
Wavelength	D	1300 & 1550

Optical Characteristics

Parameter	Specified Values	Typical values	Unit
Attenuation @ 1310/1550nm	0.4/0.3	0.4/0.3	dB/km
Attenuation uniformity @ 1310nm	≤ 0.1	≤ 0.05	dB
Mode Field Diameter	$8.5 \leq MFD \leq 10.0$	9.2 ± 4	μ m
Chromatic Dispersion @ 1310/1550nm	$\leq 3.2/22$	$\leq 3.2/18.0$	ps/nm/km
Macrobending Attenuation @ 1310nm ¹	≤ 0.5	≤ 0.05	dB

¹Radius 3.8 \pm 0.05 cm, 100 turns

For further information about our Singlemode Fiber and other j-fiber products and services, please contact us:

j-fiber GmbH

Im Semmrich 1
D-07751 Jena, Germany
Tel.: +49-3641-352 100
Fax: +49-3641-352 101
Email: info@j-fiber.com
Internet: www.j-fiber.com

Продолжение.

Geometrical Characteristics

Parameter	Specified Values	Typical values	Unit
Core/Clad Concentricity Error	≤ 1.0	≤ 1.0	μm
Clad Diameter	125 ± 1	125 ± 1	μm
Cladding Non-Circularity	≤ 2.0	≤ 1.0	%
Coating Diameter	250 ± 15	245 ± 10	μm
Coating /Clad Concentricity Error	≤ 10.5	≤ 10.0	μm
Overall Coating Concentricity Ratio (OCCR)	≥ 0.70	≥ 0.75	

Environmental Characteristics

Parameter	Specified Values	Typical Values	Unit
Change in optical transmittance @	1310	1310	nm
Change of Temperature Attenuation increase, -46°C to +85°C	≤ 0.3	≤ 0.05	dB/km
Dry Heat Attenuation increase, 30 days at 85°C	≤ 0.3	≤ 0.05	dB/km
Damp Heat Attenuation increase, 30 days at 85°C/85% R.H.	≤ 0.3	≤ 0.05	dB/km
Water Immersion Attenuation increase, 30 days in 23°C water	≤ 0.3	≤ 0.05	dB/km

Mechanical Characteristics

Parameter	Specified Values	Typical Values	Unit
Length	≥ 1.1	1.1-50.4	km
Fiber mass/unit length	≤ 0.1	≤ 0.1	kg/km
Tensile Proof	≥ 690	≥ 690	MPa
Dynamic Tensile Strength			
Initial	≥ 3.2	≥ 3.8	GPa
Aged	≥ 1.75	≥ 3.03	GPa
Operating Temperature Range	-46 to +85	-60 to +85	°C
Nonoperating Temperature Range	-55 to +85	-60 to +85	°C
Storage Temperature Range	-55 to +85	-60 to +85	°C
Coating Strip Force	$1.8 \leq F \leq 13.2$	2.0	N

Performance under Irradiation

Steady state gamma radiation test conditions		
Test temperature [°C]	Dose rate	Total dose (rad (Si))
-28 \pm 2		
25 \pm 2	(50 \pm 0, -20) rad (Si)/sec	Classified
85 \pm 2		

Radiation test requirements		
Max. induced attenuation (dB/km)	Attenuation @ specified recovery time (dB/km)	Specified recovery time (sec)
$\leq 50^1$	≤ 15 @ -28°C	1,000
	≤ 5 @ 25°C	
	≤ 5 @ 85°C	

¹ The irradiation loss for a given threat. The total dose associated with the threat is classified and not necessarily equal to the test total dose.

Fiber Qualification

All j-fiber MIL-Spec Radiation Hard fibers comply with or exceed the MIL-PRF-49291 U.S. Military Specification, the ITU recommendation G.652, or the IEC 60793-2-50 Optical Fiber Specifications. Each fiber is 100% quality measured according to IEC 60793. The irradiation performance of the fiber has been tested according to TIA/EIA 455-64, Procedure for Measuring Radiation-Induced Attenuation in Optical Fibers.

Ordering Information

To order j-fiber MIL-Spec Radiation Hard Singlemode optical fiber please call, fax or email us and specify the following parameters:

Fiber Type:	j-fiber MIL-Spec Radiation Hard Singlemode Fiber 09/125/250 μm
MIL-Spec:	PRF-49291/7-01
Desired Attenuation	
Fiber Quantity:	kms
Other:	desired ship date, reel length, special requests

All fibers and preforms are subject to j-fiber's ongoing process and quality improvement programs ensuring excellent performance and high reliability. We reserve the right to make changes to the above specification when required from the Qualification Authority (DSCC).

DB-FTQ-101-00-0608

Issued June 2008

Copyright 2008 © j-fiber GmbH



Officially registered facility according to EWG No. 761/2001

j-fiber GmbH is a MIL-STD 790 certified facility.

193. Спецификация оптического волокна производства YOFC [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://en.yofc.com/view/2364.html>.



Radiation Resistant Fibre

Radiation Resistant Single-mode Fibre (RRF)

YOFC radiation resistant single-mode fibres are developed by adjusting the composition of optical fibre and improving the process technology to meet the special application requirements of the fibre in the radiation environment. The optical properties of RRF are optimized at 1310nm and 1550nm operating wavelength. Low attenuation and low dispersion can be achieved.

Process

- YOFC fibre are manufactured with PCVD process. The fibres have excellent radiation resistant properties at 1310nm and 1550nm operating wavelength by special glass components and manufacturing process. Due to the accurate control of refractive index profile by PCVD process, YOFC radiation resistant single-mode fibres have excellent geometrical, attenuation and dispersion properties.

Characteristics

- Low dispersion and low attenuation
- Superior mechanical protection and excellent stripping performance
- Outstanding uniformity and geometry control
- Low radiation loss

Applications

- Aerospace
- Atomic energy
- Medical
- Oil/gas
- Scientific research

Продолжение.

Specifications

Fibre Type	Wavelength(nm)	Condition	RD 1310-G2 (HT)	RD SM-G3	RD SM-G3(YH)
Part No.	-	-	RD1311-D	RD1012-A	RD1012-B
Optical Properties					
Attenuation (dB/km)	1270	-	-	≤1.0	≤1.0
	1310	-	≤0.5	≤0.4	≤0.4
	1330	-	-	≤0.5	≤0.5
	1550	-	-	≤0.3	≤0.3
Zero Dispersion Wavelength (nm)	-	-	1287 - 1337	1300 - 1324	1300 - 1324
Zero Dispersion Slope (ps/(nm ² · km))	-	-	≤0.1	≤0.091	≤0.091
The Maximum Value of a Single Fibre (ps/√km)	-	-	≤0.2	≤0.2	≤0.2
Fibre Chain Value (M=20, Q=0.01%) (ps/√km)	-	-	≤0.2	≤0.2	≤0.2
Cable Cut-off Wavelength (λ_c)(nm)	-	-	≤1290	≤1260	≤1260
MFD (μm)	1310	-	7.5 - 9.5	8.6 - 9.6	8.6 - 9.5
	1550	-	8.0 - 10.0	9.6 - 10.9	9.9 - 10.9
Geometry Properties					
Cladding Diameter (μm)	-	-	125.0 ± 1.0	125.0 ± 1.0	124.5 ± 0.4
Cladding Non-Circularity (%)	-	-	≤0.7	≤1.0	≤1.0
Coating Diameter (μm)	-	-	245.0 ± 10.0	245.0 ± 10.0	250.0 ± 5.0
Coating/Cladding Concentricity (μm)	-	-	≤12.0	≤12.0	≤8.0
Coating Non-Circularity (%)	-	-	≤6.0	≤6.0	≤6.0
Core /Cladding Concentricity (μm)	-	-	≤0.6	≤1.0	≤0.6
Twist Radius (m)	-	-	≥2.0	≥2.0	≥2.0
Environmental Properties					
Temperature-humidity Cycling Induced Attenuation (dB/km)	1310, 1550	-10°C to 85°C, Relative Humidity of 90%	≤0.1	≤0.1	≤0.1
Temperature Induced Attenuation (dB/km)		-65°C to +85°C	≤0.2	≤0.2	≤0.2
Water induced Attenuation (dB/km)		23°C, 30 Days	≤0.3	≤0.3	≤0.3
Wet Heat (dB/km)		85°C, Relative Humidity of 85%, 30 Days	≤0.2	≤0.2	≤0.2
Dry Heat (dB/km)		85°C, 30 Days	≤0.2	≤0.2	≤0.2
Temperature shock test (dB/km)		-70°C to +125°C, ≥40°C/min, 5cycles	-	-	≤0.3
Store temperature test (dB/km)		-70°C, 120h; 125°C 120h	-	-	≤0.3
Temperature Cycling(dB/km)		-70°C to +125°C, 2-5°C/min, 5cycles	-	-	≤0.3
Macrobend Properties					
Radius(mm)	-	Turns	-	-	-
	1310	-	-	≤0.1	≤0.1
30	1550	100	-	≤0.5	≤0.5
Mechanical Properties					
Proof Test (kpsi)	-	Off-line	≥100	≥100	≥100
Strip Force (N)	-	Average Value	1.0 - 5.0	1.0 - 5.0	1.0 - 5.0
	-	Peak Value	1.3 - 8.9	1.3 - 8.9	1.3 - 8.9
n_c	-	-	≥20	≥20	≥20
Radiation-resistance Characteristics					
According to Standard TIA/EIA-455-64 (dB/10km)	1310	Total dose 50Krad, dose rate 0.1rad/s(25°C) induced attenuation	-	≤0.3	≤0.3
	1310, 1550	Total dose 2000Gy, dose rate 0.5Gy/s(25°C) induced attenuation	≤0.9	≤0.8	≤0.8
	1310, 1550	Total dose 200000Gy, dose rate 0.5Gy/s(25°C) induced attenuation	≤2.5	≤2.0	≤2.0

221. Спецификация оптического волокна производства ПАО «ПНППК» [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://disk.pnppk.ru/d/s/vVEovem4tqcHowPoyua2M1WMRGs64e0U/ZDvg0WDbzjdRoF1T0tTqMFmP5mOk-g2J-CLpgaTuOzQo>, с. 19.

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Волокно оптическое одномодовое с сохранением поляризации типа "Панда"

Технические характеристики

Параметр	Показатель
Наименование оптического волокна	Панда Стабильность
Тип защитно-упрочняющего покрытия	Двойной акрилат
Рабочая длина волны, нм	1550
Длина волны отсечки, нм	1425 ± 75
Коэффициент затухания в волокне при 1550 нм, дБ/км, не более	1,5
Числовая апертура (расчетная)	0,18 ± 0,02
Диаметр модового поля на длине волны 1550 нм (по формуле Гаусса), мкм	7,4 ± 0,9
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	80 ± 2
Диаметр защитно-упрочняющего покрытия, мкм	166 ± 3
Двухлучепреломление, не менее	6,5 · 10 ⁻⁴
h-параметр на транспортировочной катушке, 1/м, не более	0,5 · 10 ⁻⁵
Неконцентричность кварцевой оболочки и з ащитно-упрочняющего покрытия, мкм, не более	5
Неконцентричность сердцевины и кварцевой оболочки, мкм, не более	0,5
Относительное удлинение при перемотке, %	0,6
Рабочий диапазон температур, °С	от - 50 до + 60

По запросу заказчика параметры оптического волокна могут быть изменены.



ПАО «Пермская научно-производственная
приборостроительная компания»
Россия, 614007, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
Тел.: +7 (342) 240-05-12, e-mail: root@pnppk.ru

Продолжение, с. 20.

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Волокно оптическое одномодовое радиационно-стойкое с сохранением поляризации типа "Панда"

Технические характеристики

Параметр	Показатель
Наименование оптического волокна	РС-Панда
Тип защитно-упрочняющего покрытия	Двойной акрилат
Рабочая длина волны, нм	1550
Длина волны отсечки, нм не более	1425 ± 75
Коэффициент затухания ¹ на транспортной катушке диаметром 170 мм на длине волны 1550 нм, дБ/км, не более	1,5
Числовая апертура (расчётная)	0,17 ± 0,02
Диаметр модового поля на длине волны 1550 нм (по формуле Гаусса), мкм	8,6 ± 0,6
Диаметр кварцевой оболочки, мкм	80 ± 2
Диаметр защитно-упрочняющего покрытия, мкм	166 ± 3
Материал сердцевины	Нелегированное кварцевое стекло
Двухчепреломление ¹ , не менее	5,0 · 10 ⁻⁴
h-параметр для 1550 нм на транспортной катушке ¹ диаметром 170 мм, 1/м, не более	0,5 · 10 ⁻⁵
Неконцентричность кварцевой оболочки/защитно-упрочняющего покрытия, мкм, не более	5
Неконцентричность сердцевины/кварцевой оболочки, мкм, не более	0,7
Относительное удлинение при перемотке, %, не менее	0,6
Рабочий диапазон температур, °С	от - 50 до + 60
Радиационно-наведенное затухание ² на длине волны 1550 нм, (при оптической мощности не менее 0,5 мВт, при дозе 100 крад, при скорости набора дозы 100 рад/с, при температуре + 25 °С), дБ/км, не более	5
Радиационно-наведенное затухание (через 10 минут после воздействия дозы 100 крад, при температуре + 25 °С), дБ/км, не более	2,5

Примечания:

¹ – при нормальных климатических условиях;² – по запросу заказчика предоставляются протоколы испытаний.

По запросу заказчика параметры оптического волокна могут быть изменены.



ПАО «Пермская научно-производственная
приборостроительная компания»
Россия, 614007, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
Тел.: +7 (342) 240-05-12, e-mail: root@pnppk.ru
pnppk.ru

235. Спецификация на активное волокно IXF-RAD-AMP-2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ixblue.com/store/ixf-rad-amp-2/>.



Industrial confidentiality

PRODUCT SPECIFICATION

Product code:

IXF-RAD-AMP-2-PM

Parameter	Specification	Units
1 Absorption @ 1530 nm	25 ±3	dB/m
2 Absorption @ 980 nm	15.5 ±1.5	dB/m
3 MFD @ 1550 nm	5.5 ±1	μm
4 Background losses	< 20	dB/km
5 Cutoff Wavelength	< 1200	nm
6 Cladding Diameter	125 ±2	μm
7 Coating Diameter	245 ±10	μm
8 Proof test level	100	kpsi
9 Splice Loss (to SMF28)	< 0.20	dB
10 RIA @1545nm	< 0.015	dB/m/kRad
11 RIA @980nm	< 0.025	dB/m/kRad
12 RIGV @1545nm	< 0.03	dB/kRad
13 Birefringence	>2.10 ⁻⁴	

Comments

RIA: Radiation Induced Attenuation

RIGV: Radiation Induced Gain Variation

RIGV has been measured in amplifier configuration with -20dBm 1545nm input signal and 100mW 976nm constant forward pumping (fiber length = 6m)

Effective date of this document: 19/02/2018

Edition: B

Document reference: IXF-RAD-AMP-2-PM_edB.pdf

Specifications are subject to change without notice

PSD-L-Q-E-066-1



iXblue S.A.S.
iXblue Photonics – Specialty Fibers Division
Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

T. : +33 1 30 08 94 50
www.photonics.ixblue.com

Société par Actions Simplifiée au capital de 11 442 897 €
R.C.S. Versailles 433 185 121 - SIRET 433 185 121 00061
Code APE 2651B - N° TVA Intra. FR 09 433 185 121