

Федеральное государственное унитарное предприятие
РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

На правах рукописи

ФИЛИППОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАДИАЦИОННО НАВЕДЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТОРМОЗНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Томашук А. Л.

Саров 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОВ В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И МОЩНОСТИ ЗОНДИРУЮЩЕГО СВЕТА В ПРОЦЕССЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА РНП (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	16
1.1. Основные механизмы возникновения РНП в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и стекла легированного германием	16
1.1.1 Механизмы образования РЦО в оптических волокнах из кварцевого стекла с нелегированной сердцевиной	18
1.1.2 Механизмы образования РЦО в германосиликатных волокнах	24
1.2 Влияние температуры и мощности зондирующего света на РНП в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла	25
1.2.1 Влияние температуры	26
1.2.2 Влияние мощности света на динамику изменения РНП	28
1.3 Зависимость РНП в оптических волокнах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла от технологических параметров их изготовления	29
1.3.1 Влияние процесса изготовления преформы на РНП нелегированных оптических волокон	29
1.3.2 Влияние процесса вытяжки на РНП нелегированных оптических волокон	31
1.4 Выводы по главе	33
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЯ	34
2.1 Обоснование выбора образцов для исследования	34
2.2 Обоснование выбора длин волн и параметров зондирующего света	38

2.3 Облучательные установки, характеристики и обоснование их выбора	40
2.4 Применяемая методика дозиметрии	45
2.5 Исследование температурных зависимостей РНП в оптических волокнах. Термобокс и метод контроля температуры	47
2.6. Схема проведения измерений РНП	49
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ РНП В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С НЕЛЕГИРОВАННОЙ И ЛЕГИРОВАННОЙ ГЕРМАНИЕМ СЕРДЦЕВИНОЙ	50
3.1 Определение коэффициентов степенной зависимости поглощения от дозы в оптических волокнах с сердцевинной из чистого кварцевого стекла	50
3.2 Сравнение величин РНП оптических волокон состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ с микроструктурированными волокнами	56
3.3 Выводы по главе	57
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ СОБСТВЕННЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ АД В ВЕЛИЧИНЕ РНП И ДИНАМИКЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИИ	58
4.1 Собственные и деформационные АД – распределение вклада в суммарное РНП	58
4.2 Эффект радиационного упрочнения	65
4.3 Оптимизация технологических параметров	69
4.4 Исследование уровня потерь в зависимости от дозы	72
4.5 Выводы по главе	74
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И МОЩНОСТИ ЗОНДИРУЮЩЕГО СВЕТА НА РНП	75
5.1. Исследование при пониженных температурах и мощности зондирующего света ~5-10 мВт	75
5.2 Исследование при повышенной температуре и различной мощности зондирующего света	77
5.3 Выводы по главе	79

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
БЛАГОДАРНОСТИ	83
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	84
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	95

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ОВ – оптическое волокно;

ИИ – ионизирующее излучение;

ИК – инфракрасный;

РНП – радиационно-наведенное поглощение;

РЦО – радиационный центр окраски;

АД – автолокализованная дырка в сетке стекла

УФ – ультрафиолетовый;

LTIRA – low temperature infrared absorption, низкотемпературное инфракрасное поглощение (пер. с англ.);

MCVD – modified chemical vapor deposition, модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы (пер. с англ.);

STH – self-trapped hole, самозахваченная дырка (пер. с англ.);

ЯВ – ядерный взрыв.

ВВЕДЕНИЕ

В целом ряде современных применений ОВ подвергаются (или могут быть подвержены в определенных условиях) действию ионизирующего излучения (ИИ), которое создает точечные дефекты (радиационные центры окраски, (РЦО)) в сетке кварцевого стекла ОВ. РЦО, в свою очередь, поглощают распространяющийся по ОВ световой сигнал (эффект радиационно-наведенного поглощения, РНП), что приводит к снижению соотношения сигнал-шум вплоть до полной утраты прозрачности ОВ. Актуальной задачей является изучение свойств и механизмов возникновения РЦО с целью их подавления и создания технологий производства радиационно-стойких ОВ.

Большое количество исследований было посвящено РЦО и РНП, вызванных непрерывным действием ИИ (чаще всего излучением γ -источника ^{60}Co). Общепринятым выводом этих исследований является то, что РЦО, в первую очередь, обусловлены легирующими добавками в кварцевом стекле сердцевины ОВ (германием, фосфором, алюминием и другими, за исключением фтора). Таким образом, ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла проявляют многократно меньшее РНП при непрерывном воздействии ИИ, чем, например, стандартные ОВ для оптической связи с германосиликатной сердцевиной.

При непрерывном облучении возникают РЦО, вызванные разрывом связей (немостиковый кислород, трехкоординированный кремний и т.п.). Концентрация таких РЦО в сетке стекла растет с дозой и мало зависит от мощности дозы. Полосы их поглощения расположены в УФ и видимом диапазоне и мало влияют на РНП в ближнем ИК диапазоне и находящуюся в этом диапазоне длину волны современных систем связи и датчиков 1,55 мкм. А при малых поглощенных дозах (до 1 МГр) амплитуда этих полос поглощения и сама по себе мала.

В отличие от РЦО, работающих при воздействии непрерывного ИИ малой мощности, при импульсном облучении главенствующую роль в РНП играют

радиационно-индуцированные самозахваченные дырки (АД). Их популяция определяется уже не дозой, а мощностью дозы, которая при импульсном облучении многократно выше по сравнению с непрерывным облучением.

Актуальность изучения импульсного воздействия в следующем. Фундаментальный интерес состоит в возможности изучить свойства АД при недостижимых для непрерывного облучения условиях (мощность дозы свыше 10^6 Гр/с, возможность разделить регистрацию влияния различных РЦО в соответствии со временем их жизни в широком временном диапазоне от микросекунд до секунд. Практически важно понять, как будут вести себя ОВ в датчиках на экспериментальных термоядерных реакторах ИТЭР, JET, National Ignition Facility, в ЦЕРНе на Адронном Коллайдере, работающих в импульсно-непрерывном режиме. Важнейшее применение при смешанном, импульсно-непрерывном, воздействии зачастую не озвучивается, но является действительно самым актуальным.

Исследований РНП после импульсного воздействия ИИ, к началу данной работы, было гораздо меньше. Результаты проведенных экспериментов показали, что РНП на субсекундных временах после воздействия ИИ в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ оказалось заметно больше, чем у ОВ с легированной сердцевиной, например по сравнению со стандартным германосиликатным ОВ для оптической связи ($\text{GeO}_2:\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$). Такой факт ставил под сомнение перспективность использования ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при импульсном облучении.

К началу данной работы оставалось слабо изученным распределение влияния различных РЦО в субсекундном – секундном диапазоне в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$. Потери на временах секундного диапазона после импульсного облучения объяснялись с точки зрения влияния исключительно деформационных АД, а на субсекундных влиянием собственных АД. В данной работе проведено достаточно детальное исследование распределения влияния различных РЦО.

Не проводилось исследований влияния технологических процессов изготовления ОВ на их радиационную стойкость в условиях воздействия мощного импульсного ИИ. И соответственно не было данных как, оперируя параметрами технологического процесса, можно добиваться тех или иных характеристик радиационной стойкости ОВ. Такое исследование проведено в рамках данной работы.

Исследования динамики изменения РПН в ОВ в широком диапазоне температур и мощностей пропускаемого света имели противоречивый характер, зачастую опровергая друг друга. Причем практически все они выполнены при непрерывном воздействии ИИ, где работают совсем другие механизмы, ответственные за РНП.

Цель работы

Целью диссертационной работы было проведение исследования зависимости РНП в ОВ на основе кварцевого стекла, при воздействии импульсным тормозным излучением линейного ускорителя электронов, в широком временном диапазоне $5 \cdot 10^{-7}$ – 2 с после воздействия, в диапазоне поглощенных доз $0,1$ – 300 Гр, при мощностях дозы 10^6 – 10^{10} Гр/с и определение основных физических механизмов ответственных за РНП в ближнем ИК диапазоне и выработка исходных данных для производителей ОВ, направленных на повышение их радиационной стойкости при импульсном облучении.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Провести сравнительное исследование РНП при импульсном воздействии тормозного излучения в ближнем ИК диапазоне (длина волны $\lambda=1,55$ мкм) в ОВ составов $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ и $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$, провести сравнение с РНП в ОВ с полый сердцевинной.

2. Исследовать динамику изменения РНП на нескольких длинах волн видимого и ближнего ИК диапазонов в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при многократном облучении импульсами тормозного излучения.
3. Установить основные физические механизмы РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ после импульсного воздействия ИИ и их связь с технологическими особенностями получения таких ОВ, сделать вывод о возможности достижения низкого РНП в таких ОВ как при непрерывном, так и одновременно при импульсном воздействии ИИ.
4. Провести исследование температурной зависимости РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ и его зависимости от интенсивности зондирующего светового сигнала.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Обнаружена сильная нелинейность зависимости РНП от дозы при импульсном облучении в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ на субсекундных временах после облучения, близкая к степенному закону с показателем $\sim 0,2-0,5$ на длине волны 1550 нм. Благодаря этому, РНП в таких световодах меньше, чем в ОВ стандартного химического состава $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$, по меньшей мере, при дозах выше 2 Гр.
2. Осуществлены измерения РНП при импульсном облучении ОВ одновременно на четырех длинах волн видимого и ближнего ИК диапазонов в широком временном интервале от 10^{-6} до 2 с после окончания воздействия ИИ. Этот новый экспериментальный подход позволил предложить модель для описания радиационно-индуцированного распада деформационных АД и их превращение в АД других классов. Впервые показано, что АД с полосами РНП на 1,2 и 0,93 эВ принадлежат отдельному классу, промежуточному между собственными и деформационными АД и высказано предположение, что они возникают на фрагментах сетки стекла,

в которых длина связей Si–O больше, чем у деформационных, но меньше, чем у собственных АД.

3. Установлены физические механизмы РНП в ОБ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$: на малых временах после импульса (менее 10 мс) основной вклад в РНП обусловлен радиационно-индуцированными собственными АД в сетке стекла, при этом на больших временах (≥ 10 мс) – АД промежуточного класса, а не деформационными АД, как считалось ранее.
4. Экспериментально доказано, что РНП в ОБ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ на малых временах после окончания воздействия ИИ (≤ 10 мс) может быть существенно подавлено путем предварительного импульсного облучения малой дозой 100-200 Гр. Такое предоблучение не приводит к заметному повышению оптических потерь в ОБ и поэтому применимо на практике для улучшения стойкости ОБ к импульсному воздействию ИИ.
5. Установлено, что изменением температуры вытяжки ОБ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ на 20-30 °С можно добиться минимизации РНП либо на малых ($< 0,01$ с), либо на больших ($> 0,01$ с) временах после импульсного воздействия ИИ.
6. Исследовано влияние температуры и мощности зондирующего света на временной ход РНП после импульсного воздействия в ОБ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$.
7. Доказано, что ОБ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ с оптимизированной стойкостью к непрерывному γ -облучению проявляют высокую стойкость и к импульсному облучению.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предложен метод повышения радиационной стойкости ОБ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ путем предварительного малодозного (100-200 Гр) импульсного облучения. Важно, что такое предоблучение практически не сказывается на

величине статических потерь в ОВ и поэтому может эффективно применяться на практике.

2. Показано, что путем варьирования температуры вытяжки ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ в температурном диапазоне 20-30 °С, можно добиться существенного уменьшения РНП либо на малых временах после воздействия импульсного ИИ (<0,01 с), либо на больших (>0,01 с). Таким образом, предложен метод тонкой подстройки технологии радиационно-стойких ОВ для применений в условиях импульсного облучения на малых или больших временах после импульса.
3. Обоснована практическая возможность снижать РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ либо на малых временах после импульсного воздействия (<0,1-1 с), либо на больших путем изменения мощности светового сигнала.
4. Продемонстрированы ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ с малым РНП в ближнем ИК диапазоне на субсекундных временах после импульсного воздействия. Так как исследования НЦВО РАН ранее показали высокую радиационную стойкость таких ОВ и при непрерывном γ -облучении, они являются наиболее подходящими для применений в смешанных импульсно-непрерывных полях ИИ, в том числе при возможном ЯВ.

Положения, выносимые на защиту:

1. РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при импульсном воздействии ИИ определяется радиационно-индуцированными автолокализованными дырками (АД) в сетке стекла: на малых временах после импульса (менее 10 мс) доминируют собственные АД, на больших временах (>10 мс) – более долгоживущие АД с полосами поглощения на 0,93 и 1,2 эВ.
2. При воздействии импульсного ИИ на ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ происходит распад деформационных АД при дозе менее 500 Гр и рост концентрации собственных АД и АД с полосами вблизи 0,93 и 1,2 эВ, которые возникают

на фрагментах сетки с длиной связей Si–O, большей, чем у деформационных АД, но меньшей, чем у собственных АД.

3. ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$, оптимизированные в НЦВО РАН по стойкости к непрерывному воздействию γ -излучения, демонстрируют низкое РНП и после импульсного воздействия ИИ. Такие ОВ обладают сильно нелинейной зависимостью РНП от дозы в субсекундном диапазоне после импульсного воздействия ИИ, близкой к степенному закону с показателем $\sim 0,2-0,5$. При дозах в импульсе более 2 Гр РНП в таких ОВ меньше, чем в ОВ стандартного хим. состава $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$. Оптимизированные ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ являются наиболее подходящими для применений в смешанных импульсно-непрерывных полях ИИ, например, при ядерном взрыве.
4. Стойкость ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ к импульсному воздействию ИИ может быть дополнительно повышена тремя способами: на стадии изготовления путем оптимизации температуры вытяжки ОВ из преформы, путем предварительного импульсного облучения вытянутого ОВ дозой 100-400 Гр и путем оптимизации температурного режима использования и мощности рабочего светового сигнала, уже на стадии применения ОВ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Диссертационный материал представлен на 98 печатных страницах, включая 32 рисунка, 8 таблиц, 3 формулы и список литературы из 84 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены основные цели и задачи исследований, кратко описан круг проблем в области радиационной стойкости оптических волокон к воздействию

импульсного ИИ. Отражены научная новизна, практическая значимость и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан обзор литературных данных по радиационным центрам окраски, ограничивающим радиационную стойкость в ближнем ИК диапазоне в нелегированных и германосиликатных ОВ. Обобщены результаты исследований по влиянию различных РЦО в оптическом волокне на РНП нелегированных ОВ в ИК диапазоне. Также приведен обзор исследований по влиянию технологического процесса изготовления, дозы облучения, температуры и мощности зондирующего света в процессе облучения на динамику изменения РНП.

Во второй главе обоснован выбор образцов и источников зондирующего света для исследования, описана материально-техническая база, методики регистрации физических параметров образцов и условий проведения экспериментов.

В третьей главе представлены результаты исследований зависимости РНП нелегированных ОВ в ближнем ИК-диапазоне от поглощенной дозы тормозного излучения. Приведены результаты сравнения потерь в нелегированных ОВ и оптических волокнах легированных Ge, а так же микроструктурированных волокнах, являющихся рекордсменами по радиационной стойкости.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния различных АД на потери в ОВ во временном диапазоне 10^{-7} -1 секунда после окончания воздействия импульсного ИИ. Приведены экспериментальные данные доказывающие необходимость введения новой классификации дефектов, описывающих потери на малых (менее 10^{-3} сек) временах после воздействия ИИ и на временах более 10^{-3} секунды.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния температуры и мощности зондирующего света на величину РНП и динамику релаксации различных типов АД.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и симпозиумах:

1. 5-ая Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 7-9 октября 2015 г.).
2. 6-ая Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 3-6 октября 2017 г.).
3. XX Харитоновские тематические научные чтения «Применение Лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии», Россия, Нижегородская область, г. Саров, 2018г.
4. 7-ая Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 8-11 октября 2019 г.).
5. XXXIV Международной конференции "Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом", Россия, Кабардино-Балкария, сельское поселение Эльбрус, село Терскол, 2019г.
6. XII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости, Россия, Челябинская область, г.Снежинск, (2017, 2020г).
7. XIII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости, Россия, Нижегородская область, г.Саров, 2021г.

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, содержащихся в базах данных Web of Science и Scopus. Кроме того, опубликованы работы в других изданиях.

Личный вклад

Диссертационная работа является результатом работы автора в РФЯЦ ВНИИЭФ с 2012 года и представляет собой обобщение исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками ИЦВО РАН (Москва, Россия) и ИХВВ РАН (Нижний Новгород, Россия). Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов была обеспечена высоким уровнем экспериментальной техники, применением аттестованных методик измерения физических величин, надёжной статистикой экспериментов и применением современных теоретических представлений и методов обработки данных. Публикации по результатам работы широко цитируются в мире, а их выводы рассматриваются зарубежными коллегами как важный элемент современного состояния дел в области физики радиационно-оптических эффектов в ОВ.

Глава 1. Воздействие тормозного излучения на оптические волокна в ближнем ИК-диапазоне. Влияние технологического процесса изготовления, дозы облучения, температуры ОВ и мощности зондирующего света в процессе облучения на РНП (обзор литературы)

Данный обзор литературы включает в себя сведения об известных механизмах радиационно-наведенного поглощения (РНП) света в ОВ из кварцевого стекла с нелегированной и легированной германием сердцевиной в ближнем ИК-диапазоне. Рассмотрены результаты работ по исследованию зависимости РНП от дозы облучения, температуры и мощности зондирующего света при облучении для нелегированных и легированных германием ВС.

1.1. Основные механизмы возникновения РНП в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и стекла легированного германием

Под действием ионизирующего излучения в сетке стекла ОВ происходит образование структурных дефектов. Если эти дефекты являются оптически активными, то их называют радиационными центрами окраски (РЦО).

В зависимости от вида ионизирующего излучения процесс образования РЦО различен. В работе [1] представлены результаты возможных последствий взаимодействия различных типов ионизирующего излучения с кварцевым стеклом (рис. 1).

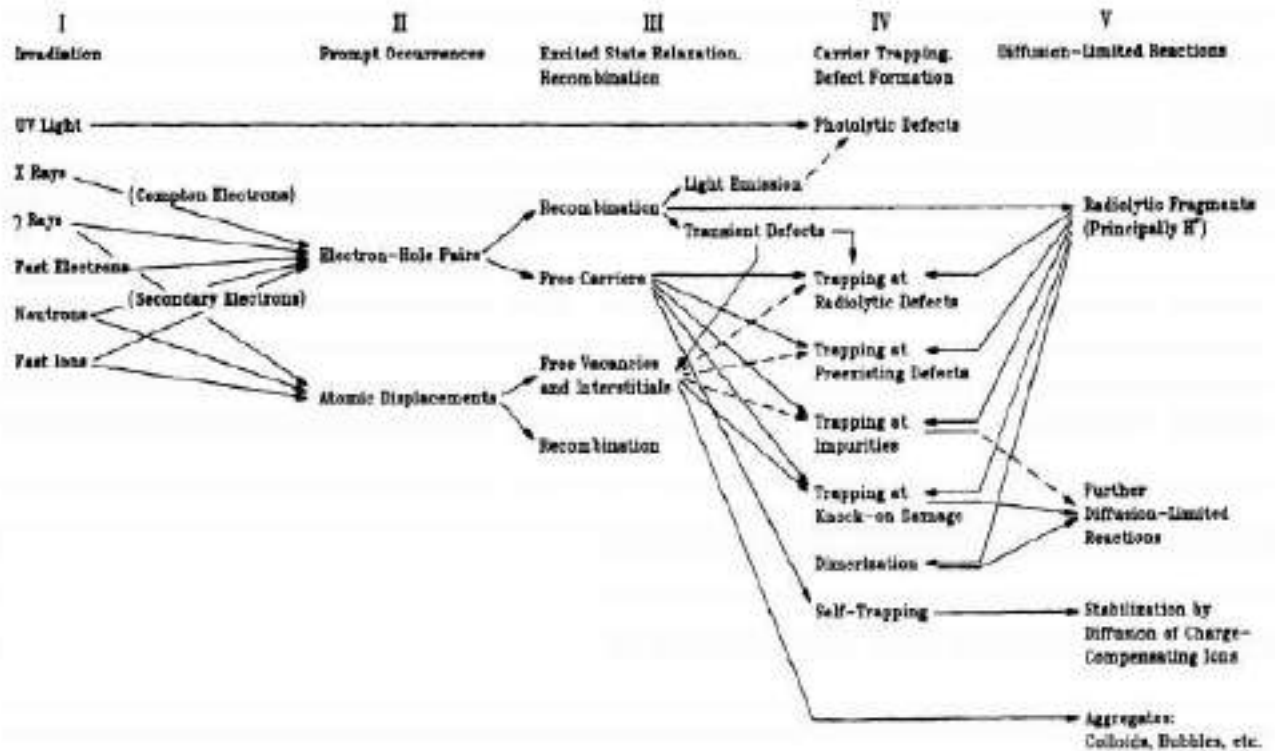


Рис. 1. Результаты воздействия ионизирующего и ядерного излучения с кварцевым стеклом. Взято из [1].

Универсальными механизмами дефектообразования являются радиолиз (разрушение химических связей под действием ионизирующего излучения) и смещение атомов при упругих столкновениях с бомбардирующими частицами [1, 2].

При воздействии тормозного рентгеновского излучения на нелегированные и легированные германием кварцевые оптические волокна основным механизмом дефектообразования является радиолиз. Первичное тормозное излучение порождает лавину электронно-дырочных пар, предвестников образования РЦО [1, 3].

1.1.1. Механизмы образования РЦО в оптических волокнах из кварцевого стекла с нелегированной сердцевиной

Существуют несколько механизмов возникновения РЦО в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при воздействии на него ИИ. Основная масса этих РЦО лежит в УФ и видимом диапазоне спектра [4], не оказывая влияния на потери в ИК области, вблизи длины волны света 1550нм. Наиболее существенный вклад в величину РНП в ИК области вносят следующие два.

Во первых это рассеяние тормозного излучения на одном из электронов, образующих связь Si–Cl, и образование E' -центра и нейтрального атома хлора в междоузлье, известного как Cl^0 -центр [5, 6]. Наличие в структуре оптического волокна, с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, хлора связано с особенностью процесса изготовления преформы для вытяжки ОВ методом MCVD. Максимум поглощения Cl-центра окраски приходится на УФ диапазон, однако полоса поглощения очень широкая и распространяется вплоть до ближнего ИК диапазона [6]. В работах [6, 7] авторы показали, что в ВС из нелегированного кварцевого стекла, хлорные дефекты могут в значительной степени определять РНП во всем видимом диапазоне, а хвост полосы поглощения заходит в ИК область.

Во вторых высокоэнергетичное тормозное излучение может рассеяться на p -электроме атома кислорода, не участвующем в химической связи (два таких электрона есть на внешней оболочке кислорода, в то время как у кремния все четыре электрона участвуют в связи), при этом ИИ «выбивает» этот электрон и образованная дырка при определенных условиях может стабилизироваться, т.е. происходит автолокализация или самозахват дырки. Это приводит к образованию автолокализованных дырочных состояний (АД или в английской аббревиатуре STH) [7, 8, 9].

На момент написания обзора автолокализованные дырочные состояния делились на два класса – деформационные и собственные АД. Предложение о введении таких двух классов автолокализованных дырочных состояний было сделано группой специалистов НЦВО РАН и в последствии широко поддержано специалистами по всему миру [10].

Деформационные АД образуются в случае наличия в сетке кварцевого стекла значительных деформаций, при которых длина связей Si-O уменьшена. При уменьшении длины связи дырка, образовавшаяся при выбивании электрона с *p*-орбитали, достаточно «надежно» экранируется электронными облаками соседних атомов, тем самым стабилизируется состояние атома с положительным зарядом. Такое состояние является достаточно стабильным и время жизни таких дефектов превышает секундный диапазон. Именно такие АД и наблюдаются при непрерывном облучении. Их популяция в сетке стекла растет с ростом дозы облучения.

Собственные АД возникают либо в случае наличия слабых деформаций сетки стекла либо вообще в условиях отсутствия деформаций. При воздействии ИИ выбивается электрон с *p*-орбитали атома кислорода не участвующий в химической связи с атомом кремния. Образовавшаяся дырка подтягивает электронные облака соседних атомов, при этом частично уменьшая длину связей, либо эти связи уже уменьшены за счет незначительных деформаций, тем самым стабилизируясь. Время жизни такой дырки лежит в субсекундном диапазоне. Отсюда следует, что в отличие от деформационных АД, популяция собственных АД зависит не столько от дозы облучения, сколько от мощности дозы. Поэтому при исследованиях РНП в ОВ в условиях мощного импульсного воздействия ИИ основную роль в оптических потерях играют именно короткоживущие собственные АД. При воздействии непрерывного, маломощного по сравнению с

импульсным, ИИ собственные АД образуются тут же релаксируют и их накопления не происходит, в отличие от деформационных АД и других долгоживущих РЦО.

Наибольшим количеством собственных АД обладает ОВ из чистого кварцевого стекла, в ОВ допированных Ge, P или N их несравнимо меньше. Именно этим можно объяснить наибольшие значения РНП при импульсном облучении на субсекундных временах после воздействия ИИ в ОВ из чистого кварцевого стекла, что отражено в работе [11].

В предыдущих работах [12, 13, 14] исходя из исследований ЭПР-спектров облученного кварцевого стекла введено разделение АД на два класса - STH_1 и STH_2 . В случае STH_1 положительный заряд («дырка») локализован на одном атоме мостикового кислорода (рис. 2а) и связан с уменьшением длины связи атома кислорода и кремния [15]. Однако, в зависимости от применения расчетных моделей, результаты других авторов указывают на то, что при samozaxвате дырки возможно и увеличение длин связей Si-O [16, 17, 18].

Таким образом, в любом случае происходит изменение длин химических связей между атомами кислорода и кремния, что приводит к деформациям и напряжениям сетки кварцевого стекла.

В случае образования РЦО типа STH_2 дырка образуется одновременно на двух соседних атомах кислорода одного тетраэдра SiO_4 (рис. 2б) [13, 19] и связана с уменьшением валентного угла между связями соседних атомов кислорода и атомом кремния [17, 18], таким образом для формирования STH_2 сетка стекла должна быть напряженной, а углы деформированы.

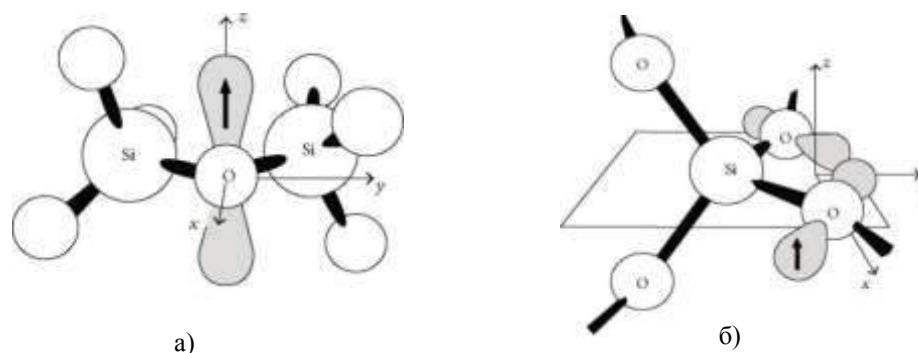


Рис. 2. Структура сетки кварцевого стекла с дыркой на p -орбитали атома кислорода а) STN_1 , б) STN_2 . Стрелкой показан остающийся электрон на p -орбитали. Взято из [15].

Первые АД были обнаружены при исследовании поглощения в длинноволновой области ИК в кварцевых световодах [16], была обнаружена полоса поглощения STN_1 с максимумом на 1700 нм. Эта полоса получила название LTIRA – low temperature infrared absorption. Полоса поглощения LTIRA имеет ассиметричную форму с крутым спадом длинноволнового края и пологим коротковолновым краем. Позже, в работе [20] были обнаружены полосы с максимумами на 660 и 760 нм. Существование этих полос подтвердилось результатами исследований [21, 22]. Было показано, что в ВС существуют STN_1 и STN_2 имеющие полосы поглощения с центрами на 660 и 760 нм соответственно, при этом эти полосы очень широкие и покрывают актуальный для применений в оптической связи и датчиках ближний ИК диапазон (~1,3-1,6 мкм). В проведенных совсем недавно исследованиях [10], обнаружена полоса поглощения с центром около 1200 нм, а позже в исследовании [23] доказано, что эта полоса состоит из двух близкорасположенных полос с максимумами на 1030 и 1330 нм.

Предположение о том, что именно АД ответственны за резкое увеличение потерь в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла при воздействии на них импульсного ионизирующего излучения было подтверждено экспериментально [23] и позже результатами работы [24].

Как было отмечено выше популяция собственных АД очень сильно зависит не столько от дозы, сколько от мощности дозы, так что, например, при космических применениях ($\sim 10^{-6}$ Гр/с) они вовсе не проявляются, в то время как при больших мощностях ($\sim 10^6$ - 10^9 Гр/с) они являются доминирующими [14] .

К классу деформационных отнесли те АД, которые связаны со значительными деформациями в сетке стекла и соответственно являющиеся более долгоживущими. К этому классу отнесли АД с максимумами полос поглощения на 660 и 760 нм, по шкале энергий данные максимумы соответствуют фотонам с энергией 1,63 и 1,88 эВ.

Собственные АД возникают в недеформированных или слабо деформированных фрагментах сетки стекла с нормальной (или даже увеличенной) длиной связи Si-O. Полосы поглощения собственных АД включают в себя достаточно широкие полосы с максимумами на 2.60, 2.16 эВ, полосу LTIRA, а так же полосы на 0,93 и 1,2 эВ, т.е. вблизи 1,55 мкм и как показано в наших работах [25, 26] именно собственные АД играют основную роль в величине РНП в субсекундном диапазоне.

Хотелось бы отметить, что практически все экспериментальные данные по спектральным исследованиям полос поглощения получены в условиях непрерывного облучения образцов ОВ. Данные по измерению полос при импульсном облучении практически нет, а имеющиеся [27] дают данные о полосах поглощения на временах секундного диапазона после окончания воздействия импульсного ИИ, где влияние короткоживущих собственных АД либо уже отсутствует, либо значительно снижено.

1.1.2. Механизмы образования РЦО в германосиликатных волокнах

В германосиликатных оптических волокнах основная часть центров окраски (кроме GeX-центра природа которого плохо изучена), связанных с германием, поглощает в УФ-диапазоне (рис. 3). В видимом и ближнем ИК диапазоне РНП монотонно уменьшается с увеличением длины волны [4, 28].

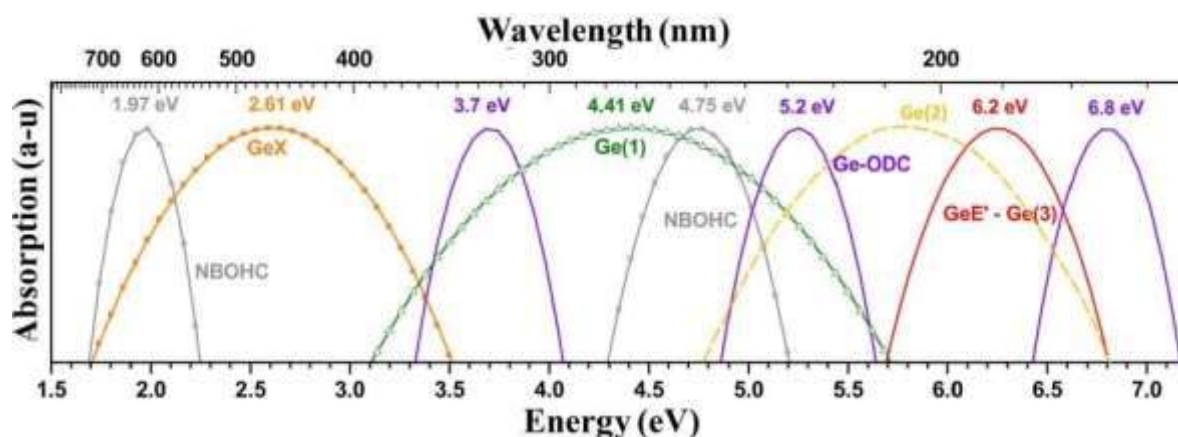


Рис.3. Спектральное положение полос РНП, связанных с германием. Взято из [4]

Возникновение РНП в УФ и видимой части спектров связано с РЦО образующимися за счет двух основных механизмов [29].

Первого это захвата электрона четырехкоординатным атомом Ge т.е. атомом имеющим заполненные все четыре валентные связи (такой механизм получил название GEC), при этом за счет деформации длин связи между атомами кислорода и германия оказывается более энергетически выгодным именно состояние с отрицательным зарядом а не нейтральное (рис. 4).

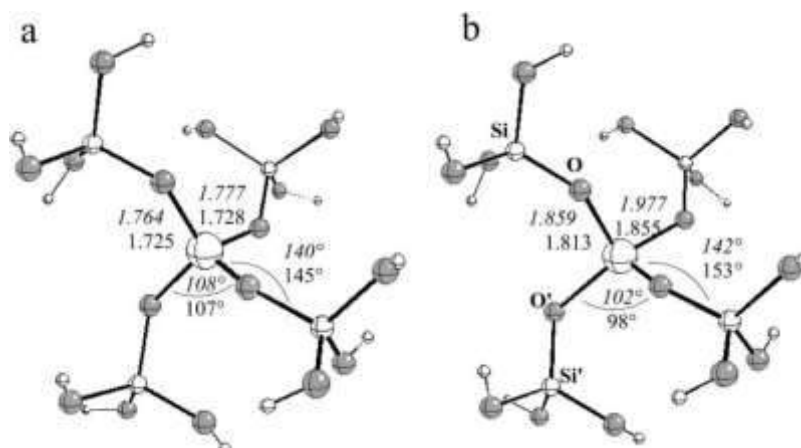


Рис. 4. Модель решетки германосиликатного стекла. а-нейтральное состояние Ge, b-состояние с захваченным электроном. Взято из [29]

Вторым механизмом является наличие трехкоординатного атома Ge (атома с одним вакантным валентным электроном), причем несвязанный электрон является ближайшим к кислородной вакансии захватившей дырку (рис. 5). Данный механизм аналогичен образованию E' центра в чистом кварце.

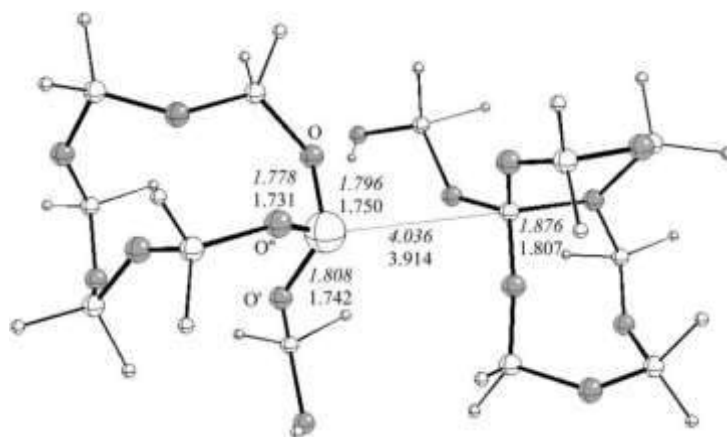


Рис. 5. Модель решетки германосиликатного стекла с трехкоординатным атомом Ge. Взято из [29].

Стоит отметить, что данные механизмы являются доминирующими в процессе возникновения РНП с максимумом поглощения в УФ области спектра, а в интересующей нас ИК области данные РЦО влияния не оказывают.

Кроме коротковолнового хвоста РНП существенную роль в уменьшении радиационной стойкости германосиликатных ВС может играть ещё длинноволновый хвост РНП неизвестной природы [28, 30]. Центр полосы поглощения данного РЦО точно не определен и находится в длинноволновом диапазоне ($\lambda > 1700$ нм).

В ближнем ИК-диапазоне длинноволновый хвост, по данным работы [31], может на 40-80 % определять общее РНП в германосиликатных световодах. Исследованное в работах [28, 30] длинноволновое РНП обладает высокой

термостабильностью при комнатной температуре и растет практически линейно до доз ~ 1 МГр без насыщения.

Еще в работе [6] авторы высказывали предположение о возможности существования еще одной полосы поглощения с центром в районе 900 нм. Из последних исследований [32, 33] следует, что для более точного представления спектрального разложения суммарного РНП авторам пришлось ввести еще одну полосу РНП с центром на длине волны ~ 900 нм с полной шириной на полувысоте 475 нм. Эта полоса принадлежит неизвестному РЦО. При этом в данной работе отмечено, что в ОВ с низким содержанием GeO_2 , к которым принадлежат в том числе стандартные телекоммуникационные световоды (типа SMF-28) данная полоса является одним из главных РЦО, ограничивающих радиационную стойкость в ближнем ИК диапазоне.

В одной из последних работ [34] по исследованию РНП в ИК области в германосиликаных световодах доказано существование сравнительно долгоживущей полосы РНП гауссовой формы с максимумом на 1.38 эВ. Показано, что данная полоса является основным механизмом, ограничивающим радиационную стойкость стандартных световодов для оптической связи.

1.2. Влияние температуры и мощности зондирующего света на РНП в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла

При исследовании РНП, возникающего под воздействием импульсного ИИ, и динамики его изменения необходимо учитывать влияние внешних физических факторов. На величину РНП в оптическом волокне оказывают воздействие следующие процессы: термообесцвечивание РЦО, т.е. термический распад возбужденных состояний под действием внешней температуры и второе, если по волокну распространяется еще и оптическое излучение, имеющее достаточную мощность, то под его воздействием происходит процесс фотообесцвечивания.

1.2.1. Влияние температуры

Стоит отметить, что основная масса исследований о влиянии температуры и мощности зондирующего света на РНП в оптических световодах проводилась в процессе непрерывного облучения, либо непосредственно после его прекращения [35, 37, 38, 39]. Данных об исследованиях в процессе импульсного облучения и на субсекундных временах после прекращения его воздействия крайне мало и ограничивается исследованиями при низких температурах [40, 41]. В то же время на столь малых временах после воздействия существенную роль играют термонестабильные РЦО, которые при исследованиях при непрерывном воздействии практически не вносят своего вклада в общее РНП.

Исследования, проведенные при непрерывном облучении, показали, что при снижении температуры процесс термообесцвечивания замедляется и как следствие увеличивается величина РНП и время жизни как собственных, так и деформационных АД [42, 43]. Как упоминалось выше, основной вклад в суммарное РНП в ИК области при воздействии непрерывного ИИ вносят деформационные АД, собственные АД проявляют себя только при низких температурах, при этом их вклад в общее РНП не является доминирующим [43].

При импульсном воздействии и субсекундных временах исследования мы имеем совсем другую картину. Вклад от собственных АД является доминирующим и температурная зависимость данных РЦО начинает оказывать максимальное влияние на общие потери. Знание поведения собственных АД на субсекундных временах при низких температурах становится критически важным, данные по поведению при низких температурах опубликованы всего в одной работе [44].

При повышении температуры выше комнатной мы в праве ожидать ускорения процесса термообесцвечивания и как следствие уменьшения

амплитуды РНП и ускорения процесса его релаксации. Однако результаты ряда авторов имеют противоречивый характер. Так, например в работе [43] показано, что при дозах $D > 100$ Гр в диапазоне от -50 до $+100$ °С на длине волны 1310 нм РНП нелегированного ВС практически не зависит от температуры. Авторы работы [45] наблюдали рост РНП при увеличении температуры в интервале от $+20$ до $+100$ °С для световодов с нелегированной сердцевиной из SiO_2 .

П. В. Чернов с соавторами в работе [16] показал, что при температуре 77 К в ближнем ИК-диапазоне наблюдается широкая полоса LTIRA с максимумом на длине волны $\lambda \sim 1700$ нм. Температурные исследования при непрерывном облучении показали, что интенсивность LTIRA монотонно уменьшается почти до нуля при повышении температуры до комнатной, однако какова будет эта интенсивность на субсекундных временах после воздействия импульсного излучения большой мощности неизвестно. В процессе термического отжига или фотообесцвечивания было обнаружено, что длина волны максимума LTIRA уменьшается одновременно с уменьшением ее амплитуды, т.е. в случае проведения исследований при комнатной температуре и тем более при нагреве мы сдвигаемся в максимуме поглощения данного РЦО к нашей рабочей длине волны (1550 нм).

Еще раз отметим, что РНП в различных спектральных диапазонах обусловлено различными механизмами. В ближнем ИК-диапазоне РНП обусловлено хвостами разных центров окраски, которые имеют различную термостабильность. Таким образом, при изменении температуры возможно значительное изменение соотношения вкладов от разных центров окраски в общее РНП. Так же стоит учитывать, что вклад различных центров окраски при импульсном и непрерывном облучении различен, что так же увеличивает неопределенность конечного влияния температуры на величину РНП.

1.2.2. Влияние мощности света на динамику изменения РНП

Сразу стоит отметить, что известные нам исследования влияния мощности зондирующего света на величину РНП в основном проводились при воздействии непрерывного ИИ. Исследований фотообесцвечивания РЦО в условиях импульсного воздействия тормозным излучением большой мощности и с применением в качестве зондирующего света лазеров нет. Есть результаты исследования влияния мощности светового потока на РНП при использовании источника непрерывного спектра [46].

Результаты проведенных исследований показали, что с ростом мощности света происходит уменьшение амплитуды РНП во время воздействия ИИ. [47, 48]. Причем величина РНП при пропускании по волокну света разной мощности в зависимости от оптического волокна может отличаться как в разы так и незначительно, на единицы процента.

По данным исследования [39] оказалось, что на временах более 5000 сек после окончания воздействия ИИ РНП меньше в оптических волокнах из чистого кварцевого стекла по которым пропускался свет меньшей мощности. Например, разница потерь в волокнах, по которым пропускали свет мощностью 1 мкВт и 100 мкВт, спустя $3 \cdot 10^4$ сек после окончания облучения составила 6-7 раз. Так же, на временах более 100 сек после окончания облучения, скорость релаксации оказалась выше при меньших значениях мощности света. Наиболее ярко данная особенность проявила себя как раз в волокнах с сердцевинной из чистого кварцевого стекла. В германосиликатных волокнах таких особенностей либо вообще не наблюдалось, либо они имели слабо выраженный характер.

Таким образом, наиболее заметным, эффект фотообесцвечивания оказался в оптических волокнах с сердцевинной из чистого кварцевого стекла. При этом мощность зондирующего света оказывает заметное положительное влияние на

релаксацию короткоживущих РЦО. Однако время жизни, либо популяция долгоживущих РЦО может наоборот увеличиваться с ростом мощности света.

1.3. Зависимость РНП в волоконных световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла от технологических параметров их изготовления

В диссертационной работе Кашайкина П.Ф. [49] очень подробно исследовано влияние технологических процессов производства ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}$ полученных методом MCVD на динамику изменения РНП при непрерывном гамма облучении. Однако данных по таким исследованиям при импульсном облучении нами не обнаружено.

1.3.1. Влияние процесса изготовления преформы на РНП нелегированных оптических волокон

С технологической точки зрения, наибольшее влияние на радиационную стойкость, как было отмечено ранее, оказывает наличие разнообразных легирующих добавок. Для одномодовых ОВ, используемых для передачи информации, наиболее распространенными легирующими элементами являются германий и фосфор.

Эффективным способом увеличения радиационной стойкости, т.е. уменьшения РНП, в процессе изготовления заготовки ОВ является отказ от легирующих добавок, имеющих свои РЦО, т.е. использование высокочистого кварцевого стекла в качестве сердцевины световода [50]. При этом оболочка должна иметь показатель преломления меньший, чем в сердцевине. Это достигается добавлением фтора либо бора в оболочку. Так, например (рис. 6), известно, что исключение легирующей добавки германия позволяет в разы

подавить РНП на длине волны $\lambda=1310$ нм за счет уменьшения вклада в суммарное РНП от германиевых центров окраски [51, 52].

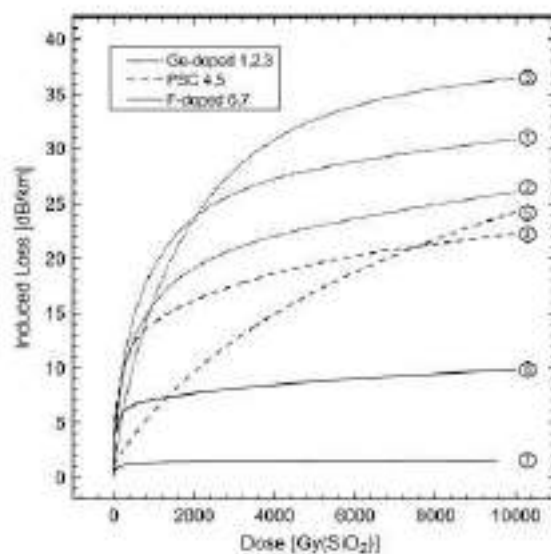


Рис. 6. Сравнение зависимости РНП от поглощенной дозы для германосиликатных, нелегированных и фторированных ОВ. Взято из [53].

Следующим шагом в увеличении радиационной стойкости в ближнем ИК диапазоне стало легирование сердцевины фтором. В условиях непрерывного γ облучения, при нормальных условиях, РНП фторированных световодов может быть на один-два порядка меньше, чем в германосиликатных световодах [43, 54].

Причиной этого является тот факт, что фтор – это единственная примесь, которая не только не образует своих центров окраски в видимом и ИК диапазонах, но и предотвращает образование других РЦО [55]. По мнению авторов работы [56], это происходит из-за того, что при вхождении фтора в состав кварцевого стекла он разрывает напряженные 3-х и 4-х-звенные кольца Si-O, которые являются предшественниками многих центров окраски. Аналогичную роль могут играть ОН-группы и атомы хлора, однако они негативно влияют на начальные оптические потери и радиационную стойкость.

Авторы работ [6, 57] показали, что у нелегированных ОВ, изготовленных с помощью MCVD технологии, одним из основных механизмов, который

ограничивает радиационную стойкость, может явиться поглощение РЦО, связанных с хлором. Однако, с другой стороны, в нелегированных ОВ с малым содержанием хлора возникают интенсивные полосы РНП типа STN, с максимумами на 660 и 760 нм [58, 59].

По результатам последних исследований [60, 61, 52] группой специалистов было установлено, что РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой сильно зависит от соотношения молярных расходов кислорода и тетрахлорида кремния в процессе синтеза сердцевины в технологии MCVD. Установлено, что для максимального подавления РНП в таких ОВ необходимо, во-первых, использовать большой избыток кислорода над тетрахлоридом кремния, это условие необходимо для подавления вхождения атомов хлора в сетку стекла. Во-вторых, необходимо, чтобы этот избыток был строго сбалансирован с количеством фтора в оболочке для выравнивания физико-химических свойств сердцевины и оболочки и предотвращения вмораживания напряжений в сердцевину световода.

Таким образом, на основании литературных данных, можно предположить, что для уменьшения РНП в нелегированных ОВ, изготовленных методом MCVD, необходимо, во-первых, подавление вхождения атомов хлора и, во-вторых, уменьшение напряжений, являющихся предшественниками АД.

1.3.2. Влияние процесса вытяжки на РНП нелегированных оптических волокон

В процессе вытяжки (изготовления) ОВ из заготовки происходит его быстрое подобное закалке остывание, что приводит к «вмораживанию» напряжений из-за разности физико-химических свойств сердцевины и оболочки (коэффициенты термического расширения, температура стеклования и т.д.). Также известно, что в зависимости от условий при вытяжке может значительно

варьироваться исходный набор центров окраски, таких как: NBOHC, E' и PeroxyRadicals(PR_s). В работах [62, 63] авторы показали, что при росте натяжения и температуры при вытяжке происходит значительное увеличение концентрации E'-центра и немостикового кислорода в световодах с нелегированной сердцевиной.

В нелегированных ОВ данные о влиянии условий вытяжки в некотором смысле противоречивы. Так, например, в работе [64] были проведены исследования зависимости РНП нелегированных ВС в диапазоне длин волн 600-1000 нм с различным содержанием ОН-групп в сердцевине от условий вытяжки. Оказалось, что в зависимости от концентрации ОН-групп радиационная стойкость может как уменьшаться (в случае концентрации ОН 1000 ppm), так и увеличиваться (0.8 ppm ОН) при уменьшении температуры вытяжки и увеличении натяжения при фиксированной скорости. Причем в ВС с малым содержанием ОН-групп основными полосами РНП, ограничивающими радиационную стойкость, являлись полосы с максимумами на длинах волн 660 и 760 нм, которые позже отнесли к STH [65], а в световодах с содержанием ОН-групп 1000 ppm РНП определялся в основном полосой на 630 нм, принадлежащей NBOHC [66].

В работе [56] при уменьшении натяжения и скорости вытяжки в 3-4 раза наблюдалось лишь малое изменение РНП нелегированных ВС. Аналогично в работе [7] изменение скорости и натяжения при вытяжке практически не приводило к изменениям РНП в нелегированных и фторированных ОВ в диапазоне длин волн 400-1600 нм.

Однако, в работе [67] было показано, что РНП световодов с нелегированной и фторированной сердцевиной на длине волны 1310 нм в значительной степени зависит от натяжения при вытяжке. Так, уменьшение натяжения в 4 раза приводило к двукратному уменьшению РНП.

Из результатов работ [68, 69] следует, что РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой, изготовленных MCVD технологией, в значительной степени зависит от условий вытяжки. Установлено, что наибольшее влияние на РНП оказывает температура в процессе вытяжки. Натяжение при вытяжке также влияет на РНП в ближнем ИК-диапазоне, но в меньшей степени по сравнению с температурой.

В результате оптимизации технологии изготовления преформы и вытяжки ОВ было более чем на порядок снижено РНП для световодов в ближнем ИК-диапазоне в спектральном интервале 1310-1550 нм [58]. В прямом сравнительном эксперименте показано, что уровень РНП световодов НЦВО-ИХВВ РАН в ~5-7 раз ниже чем в радиационно-стойких световодах фирмы «J-fiber» (94 кГр; 8.7 Гр/с). На длине волны 1550 нм полученные ОВ с нелегированной сердцевиной не уступают рекордсменам по радиационной стойкости ОВ «RRSMFB» фирмы «Fujikura».

1.3. Выводы по главе

В данной главе рассмотрены основные механизмы возникновения РНП в ОВ на основе кварцевого стекла в ИК диапазоне.

Из анализа литературных данных следует, что в ИК диапазоне РНП обусловлено в первую очередь РЦО типа АД и лишь в незначительной степени наличием примесей хлора в сетке стекла. АД определяющие потери в ОВ в ИК диапазоне подразделяются на два класса - деформационные и собственные. При этом решающую роль в величине РНП при непрерывном облучении играют деформационные, а при импульсном собственные АД. Однако литературные данные проведенных исследований не дают однозначного ответ о временном распределении вклада того или иного класса АД в суммарное РНП при импульсном облучении. Более того даже для полос поглощения, составляющих

класс собственных АД, распределение вклада в суммарное РНП неоднозначно. Популяция деформационных АД сильно зависит от дозы облучения, а собственных АД от мощности дозы и такая зависимость для импульсного воздействия ИИ исследована крайне скудно.

До начала данной работы, не было известно каким образом технологические параметры MCVD процесса, такие как соотношение расходов реагентов при синтезе заготовки и условия вытяжки из неё ВС, влияют на образование РЦО при импульсном облучении большой мощности.

Данные по влиянию температуры и мощности зондирующего света на величину РНП были крайне противоречивы. При этом основная масса исследований влияния этих факторов проводилась при воздействии непрерывным ИИ.

Таким образом, литературный обзор полностью обосновывает поставленные цели и задачи диссертационного исследования, приведенные во введении.

Глава 2. Экспериментальная база исследования

2.1. Обоснование выбора образцов для исследования

В качестве основного объекта исследования было выбрано одномодовое оптическое волокно с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и оболочкой из кварцевого стекла, легированного фтором (PSF световод) - ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$. Такой выбор был обусловлен несколькими факторами.

Специалистами из НЦВО РАН был получен оптимизированный PSF световод, показавший рекордно низкое значение РНП при непрерывном облучении [70]. Такой результат был достигнут за счет изменения технологии производства преформы и изменения условий вытяжки волокна, что привело к значительному уменьшению деформаций в сетке стекла световода. Как известно

амплитуда РНП при импульсном облучении сильно зависит от деформаций и как следствие в слабдеформированный световодах ожидалось значительно более низкое значение РНП.

Еще одним фактором в пользу выбора ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ является то, что РНП в них обусловлено возникновением в процессе воздействия ионизирующего излучения автолокализованных дырочных состояний, а данные дефекты являются довольно короткоживущими по сравнению с дефектами в германосиликатных волокнах. Следовательно время восстановления прозрачности таких ОВ после импульсного облучения должно быть меньше.

Поскольку исследований РЦО в оптимизированных ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при мощном импульсном облучении практически не было, вызывал закономерный интерес вопрос о природе РЦО вносящих заметный вклад в РНП таких волокон на субсекундных временах. Требовалась оценка вклада тех или иных РЦО в общие потери световода в процессе облучения и по его окончании.

Исследуемое ОВ предназначено для использования на длине волны передаваемого света 1550 нм. Данная длина волны является общим стандартом для основной массы приемо-передающих устройств в телекоммуникации, практике физического эксперимента, космонавтике и устройствах военного назначения [72], т.е. исследуемый световод относится к наиболее востребованному сегменту рынка.

Было изготовлено 6 образцов волокон, отличающихся разным соотношением показателей преломления оболочки и ядра, наличием примесей Cl, степенью деформированности сетки стекла в волокне таблица 1.

Видится логичным провести сравнение уровней потерь ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ с оптическими волокнами, которые наиболее широко применяются в условиях возможного присутствия ионизирующего излучения или являются, по заверениям производителя, радиационно стойкими. К таким волокнам относится

радиационно-стойкое германосиликатное волокно JFiber (MIL-PRF-4929). Очень широко распространенным, в области физического эксперимента и в линиях передачи информации, является одномодовое германосиликатное волокно SMF28, оно так же стало объектом нашего сравнительного исследования. Кроме этого в качестве объекта для сравнения по величине РНП при импульсном воздействии ионизирующего излучения выступило микроструктурированное оптическое волокно. Непосредственно в наших опытах такое волокно не подвергалось облучению, однако мы воспользовались данными полученными в работах [72, 73].

Таблица 1. Исследованные оптические волокна, их химический состав и некоторые физические параметры

ОВ	Хим. состав сердцевины	Хим. состав оболочки	Δn (10^{-4})	Примечания	Начальный уровень потерь, Дб/км
1224	SiO ₂	F:SiO ₂	9,5	Оптимизированный малонапряженный световод	0,3-0,5
1218	SiO ₂	F:SiO ₂	7,5	Небольшая добавка фтора в сердцевине (0,41 вес.%), световод напряженный	0,3-0,5
1308	SiO ₂	F:SiO ₂	5	Световод сильно напряженный	0,3-0,5
1220	SiO ₂	F:SiO ₂	9,5	Напряжения снижены за счет присутствия хлора в сердцевине (230 вес. ppm)	0,3-0,5
1509	SiO ₂	F:SiO ₂		Оптимизированный малонапряженный световод	0,3-0,5
1510	SiO ₂	F:SiO ₂		Оптимизированный малонапряженный световод	0,3-0,5
1510 ОПТ	SiO ₂	F:SiO ₂		Оптимизированный малонапряженный световод	0,3-0,5
M1	SiO ₂	F:SiO ₂	9,5	Это отрезок световода 1224, облученный до дозы 1 МГр на реакторе и затем отожженный при 100 °С	0,3-0,5
SMF-28 (Ge1)	GeO ₂ :SiO ₂	SiO ₂		Стандартный световод для оптической связи	0,17-0,22
J-fiber (Ge2)	GeO ₂ :SiO ₂	SiO ₂		Радиационно-стойкий немецкий световод,	0,2-0,23

2.2. Обоснование выбора длин волн и параметров зондирующего света

Основным аргументом в выборе длины волны зондирующего света была распространённость ее в телекоммуникационном оборудовании и в системах передачи сигнала различных электрофизических установок. Самой распространённой длиной волны в оптоволоконной технике является 1550 нм.

Еще одним аргументом в пользу выбора инфракрасной области зондирующего света является зависимость РНП от различных РЦО. Основная масса РЦО имеют максимумы своего поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра (рис. 7), следовательно их влияние в ИК области либо вообще отсутствует либо значительно ослаблено [4].

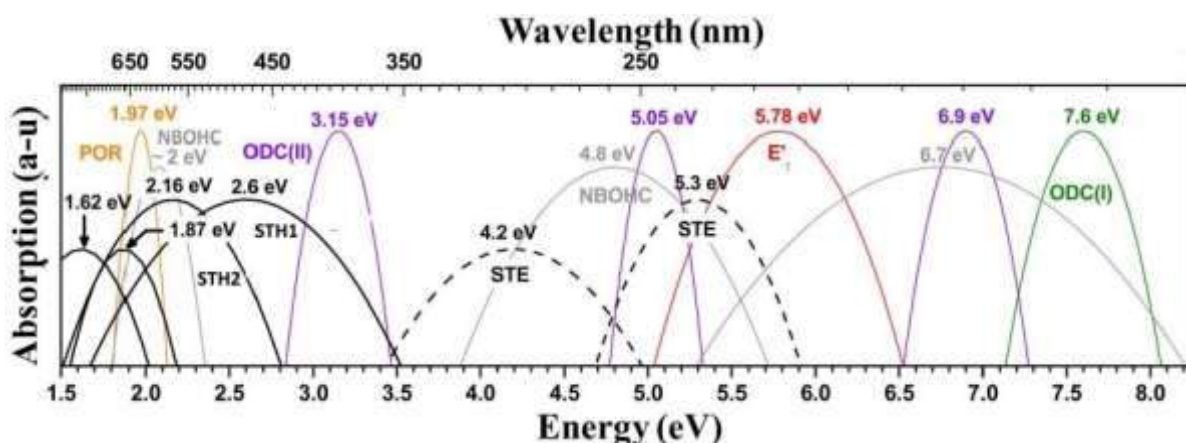


Рис. 7. Спектральное расположение полос поглощения РЦО в нелегированных ОВ. Взято из [4].

Такая зависимость РНП от длины волны света однозначно свидетельствует, что с увеличением длины волны ЗИ потери падают, соответственно стоит ожидать наименьших потерь в длинноволновой области, т.е. в диапазоне длин волн 1300-1600 нм.

Дополнительным фактором выбора длины волны зондирующего излучения 1550 нм является наличие у ОВ окон прозрачности т.е. областей длин волн света в которых потери мощности проходящего по волокну ЗИ минимальны. Центры

таких областей прозрачности приходится на длины волн 850, 1310 и как раз 1550 нм.

В качестве источников зондирующего излучения применяются источники суперконтинуума и различные лазеры. Поскольку основной длиной волны для нашего исследования была выбрана длина волны 1550 нм, то в качестве источника ЗИ идеально подходил полупроводниковый лазер с оптоволоконным выходом. Достоинства полупроводниковых лазеров, это очень широкий выбор по длинам волн в диапазоне излучения от 375 до 2000 нм, малый размер, широкий диапазон по мощности излучения от единиц микроватт до киловатт, наличие у лазеров оптоволоконного сопряжения на выходе (pigtail), возможность получения на выходе лазера излучения с различной поляризацией.

Выбор диапазона мощности лазерного излучения для проведения исследования РНП в оптических световодах делается исходя из двух требований. Первое требование связано с тем, что уровень мощности должен быть достаточным, чтобы после прохождения зондирующего излучения через весь оптический тракт уровень сигнала на фотоприемном устройстве был достаточным для уверенной регистрации. Второе требование связано с ограничением максимальной мощности ЗИ вводимого в исследуемый световод, что необходимо для уменьшения влияния эффекта фотообесцвечивания. Особенно это актуально в опытах, где исследуется исключительно процесс термораспада РЦО. В наших исследованиях применялся полупроводниковый лазер LPSC-1550-FC фирмы Thorlabs с максимальной выходной мощностью 12 мВт, лазер имеет выход на оптическое волокно.

2.3. Облучательные установки, характеристики и обоснование выбора

Поскольку основная масса исследований при непрерывном воздействии ИИ на ОВ проводилась на источниках гамма излучения было логичным выбрать в качестве импульсного источника так же источник с таким же или схожим по физическим параметрам видом излучения. На установках по генерации импульсного ИИ основанных на торможении пучка электронов получаемое гамма излучение принято называть тормозным, хотя по энергетическому спектру его смело можно отнести к гамма излучению. Одним из видов источников импульсного тормозного излучения являются линейные индукционные ускорители электронов. На начальном этапе исследований, в качестве источника тормозного излучения в нашем распоряжении был импульсный ускоритель электронов И-3000 [74]. Основные характеристики ускорителя приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные технические параметры установки И-3000

Параметр	Значение
Энергия электронов, ном.	3 МэВ
Длительность импульса тормозного излучения на полувысоте	20 нс
Средняя энергия спектра тормозного излучения	0,8 МэВ
Максимальная энергия излучения	3 МэВ
Максимальная доза на выходном фланце	3,5 Гр
Диаметр пучка	40 мм

Данный ускоритель позволял проводить до 8 импульсов излучения в сутки. Проведение экспериментов не требовало значительных материальных и трудовых затрат. К недостаткам работы на этом ускорителе стоит отнести малость диаметра пучка, что приводило к необходимости формировать оптические

волокна образцов в катушки с диаметром менее 40 мм, а это увеличивает потери на изгибах и увеличивает внутренние напряжения в волокне.

Дальнейшее развитие в исследовании РНП в оптических волокнах требовало источников тормозного излучения с дозой в импульсе более 10 Гр. Так же хотелось иметь диаметр пучка излучения не менее 100 мм. Такой установкой является линейный индукционный ускоритель электронов на основе ступенчатых формирующих линий ЛИУ-10М (рис. 8) [75, 76].



Рис.8. Внешний вид установки ЛИУ-10М. Взято из [75].

Основные характеристики ускорителя приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные технические параметры установки ЛИУ-10М

Параметр	Значение
Энергия электронов, ном.	14 МэВ
Длительность импульса излучения на полувысоте	18 нс
Средняя энергия спектра тормозного излучения	2,5 МэВ
Максимальная энергия тормозного излучения	14 МэВ
Мощность дозы на расстоянии 1 м от фланца и диаметре пучка 550 мм	$4 \cdot 10^{10}$ Р/с
Мощность дозы на фланце и диаметре пучка 80 мм	$4 \cdot 10^{12}$ Р/с
Диаметр пучка на выходном фланце	110 мм
Максимальная доза на фланце	60 кР

На этом ускорителе возможно проведение опытов по получению зависимости РНП в различных световодах в диапазоне доз от 0.01 до 50 Гр. Диаметр пучка позволяет проводить эксперименты с образцами оптических волокон, в которых радиус изгиба волокна в катушке не оказывает существенного влияния на величину потерь. Имея такой диапазон доз можно сделать выводы о влиянии дозы (мощности дозы) излучения на РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$. На основании полученных данных удалось провести дополнительную оптимизацию в технологии производства ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ для уменьшения в нем РНП.

На основании полученных данных были сформулированы направления дальнейшего исследования:

- исследования дозовой зависимости РНП в диапазоне более 50 Гр для доказательства перспективности ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$;
- изучение влияния многократного облучения оптического волокна на изменение величины РНП в нем;
- проведение исследования влияния температуры на величину РНП и скорость восстановления прозрачности ОВ;
- определение влияния мощности зондирующего излучения на величину максимальных потерь после воздействия ИИ и скорость релаксации дефектов в ОВ.

Для реализации таких исследований в качестве источника тормозного излучения был выбран мощный импульсный линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-30М (рис. 9). Данный ускоритель электронов является одним из самых мощных в мире и обеспечивает уникальные выходные параметры [74, 77, 78, 79, 80].



Рис. 9. Внешний вид установки ЛИУ-30М. Взято из [75].

Основные характеристики ускорителя приведены в таблице 4.

Таблица 4. Основные технические параметры установки ЛИУ-30М

Параметр	Значение
Энергия электронов, макс.	40 МэВ
Длительность импульса тормозного излучения на полувысоте	20 нс
Средняя энергия спектра тормозного излучения	8,5 МэВ
Максимальная энергия тормозного излучения	40 МэВ
Мощность дозы на расстоянии 1 м от фланца и диаметре пучка 600 мм	$5 \cdot 10^{11}$ Р/с
Мощность дозы на фланце и диаметре пучка 110 мм	$1,5 \cdot 10^{13}$ Р/с
Диаметр пучка на выходном фланце	110 мм
Максимальная доза на фланце	220 кР

Данный ускоритель позволил провести основную часть работ в области доз за импульс 10-300 Гр. Благодаря большой апертуре и равномерности пучка стало возможным провести исследование температурных зависимостей РНП в наиболее перспективных образцах.

Распределение дозы по сечению пучка тормозного излучения на фланце установки и на расстоянии 1м от мишени ускорителя ЛИУ-30 представлена на (рис. 10)

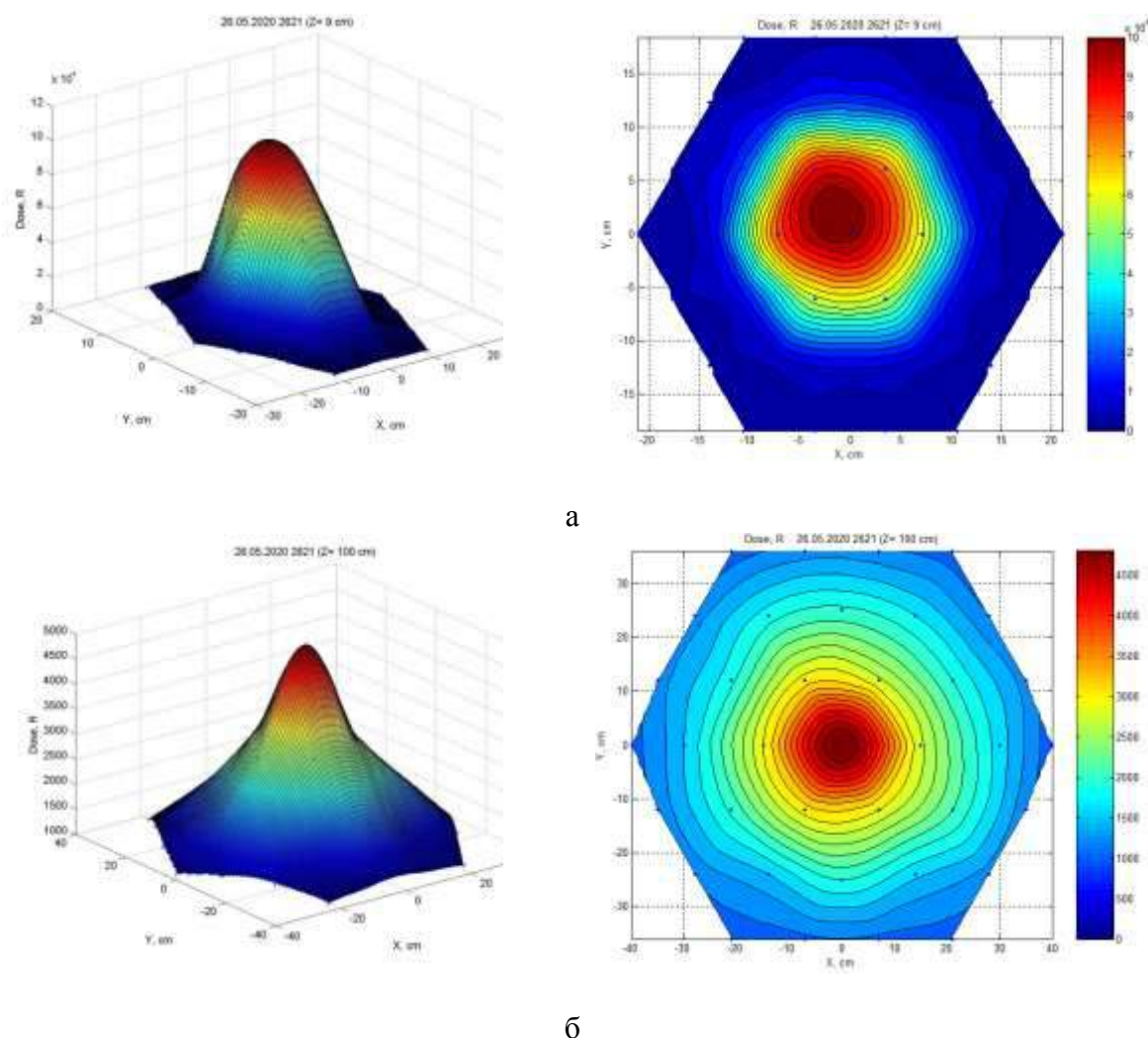


Рис.10. Распределение дозы по сечению пучка. а –на фланце выводного устройства МУ, б – на расстоянии 1 метра от мишени МУ.

Таким образом работа по исследованию РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ проводилась в три этапа. Начальный этап исследования на установке И3000 позволил определиться с основным направлением развития методики регистрации и утвердиться в перспективности выбранного направления технологии изготовления ОВ. Получить первые экспериментальные данные и наработать начальный опыт проведения подобных исследований. Работы на установке ЛИУ-10М привели к появлению экспериментальных данных по исследованию РНП в

довольно широком дозовом диапазоне с приемлемой равномерностью дозы облучения по сечению катушки ОБ. Так же удалось избавиться от недостатков малого диаметра катушки для намотки ОБ, определиться с параметрами источников зондирующего излучения. На установке ЛИУ-30М был проведен основной комплекс исследований РНП большого количества ОБ в зависимости от физических параметров эксперимента.

2.4. Применяемая методика дозиметрии

Твердотельные методы дозиметрии предоставляют большие возможности для измерения ионизирующих излучений. Этому способствует широкий спектр свойств известных в настоящее время твердотельных дозиметров, их миниатюрность при большой чувствительности, широкий диапазон измерений по дозе и мощности дозы, способность к длительному накоплению и сохранению информации и т. п. [81].

Из основных типов интегрирующих твердотельных дозиметров фотографического, радиотермолюминесцентного (РТЛ), радиофотолюминесцентного (РФЛ), с использованием термостимулированной эмиссии электронов (ТСЭЭ) наибольшую популярность имеют термолюминесцентные дозиметры.

Именно термолюминесцентная методика дозиметрии (ИКС) применялась в процессе всего исследования. Поскольку материал, применяемый в методике ИКС, это кварцевое стекло, она позволяет сразу получать значения поглощенной дозы в исследуемых образцах. Параметры дозиметрической методики ИКС А указаны в таблице 5.

Таблица 5. Параметры методики ИКС

Характеристика	ИКС А
Диапазон измерения	0,5—1000 рад
Поддиапазон	I 0.5—10 рад
	II 10—100 рад
	III 100-1000 рад
Длительность измерения показаний одного дозиметра	10 с
Работоспособность в диапазоне температур	+ 10 - +35° С
Основная погрешность в поддиапазонах	I 15%+0,2 рад
	II 15%+1 рад
	III 15%+10 рад

Дозиметр представляет из себя сборку из двух стекол, в виде таблетки, диаметром порядка 10мм и общей толщиной порядка 4 мм. В наших экспериментах в каждом опыте использовалось 4 дозиметра, расположенных на образцах как показано на (рис. 11).

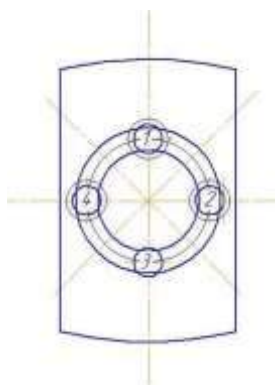


Рис 11. Схематическое изображение крепления дозиметров на катушке ОВ.

По результатам показаний 8 измерительных стекол (по два в каждом дозиметре) определялась средняя доза облучения образца.

2.5. Исследование температурных зависимостей РНП в оптических волокнах. Термобокс и метод контроля температуры

Поскольку оптические волокна могут эксплуатироваться при различных температурах было необходимо провести исследование влияния температуры на наиболее перспективные образцы ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$. Был выбран диапазон от минус 70 до плюс 90 градусов Цельсия. Для проведения подобного исследования нами были разработаны и изготовлены криостаты представляющие из себя контейнеры различного объема с двумя отсеками (рис. 12). В качестве материала криостатов использовался пенопласт ПС-1-100.

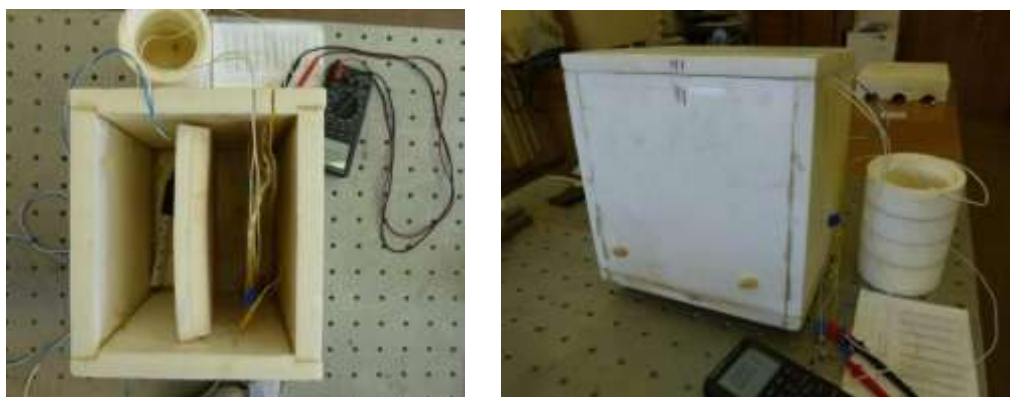


Рис. 12. Фотография внешнего вида двух, различных по внутреннему объему, термобоксов.

Первый отсек предназначен для заливки в него жидкого азота, при проведении исследований при отрицательных температурах или размещения в нем нагревательного элемента при исследованиях при повышенных температурах. Второй отсек предназначен для размещения в нем образцов.

Конструкция криостата предполагает, что пары азота или нагретый воздух попадая в объем с образцом позволяет получать достаточно равномерное воздействие температуры на него. На тестовых испытаниях и в экспериментах разброс температуры по диаметру образца при охлаждении до минус 90 °С не превысил 4°.

Для контроля температуры применялись два термоэлектрических датчика на основе спайки двух сплавов хромель-капель [82]. Конструкция датчика представлена на (рис. 13). Датчик состоит из двух спаек различных сплавов, при этом температура одной спайки поддерживается равной нулю, а вторая спайка размещается в месте измерения температуры. Измеряя величину термоЭДС, по градуировочной таблице, определяют значение температуры в данный момент времени. Согласно [69] погрешность определения температуры не превышает $\pm 1\%$.

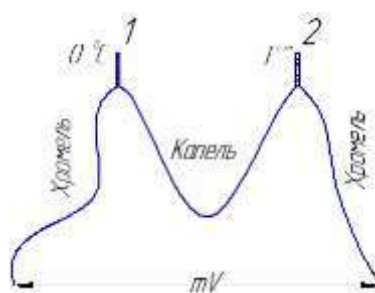


Рис. 13. Схематическое изображение датчика температуры.

Данные сплавы позволяют получать максимальное значение термоЭДС и уверенно контролировать его значение во всем диапазоне температур нашего исследования. Термодатчики (1 и 2) располагались на образце как показано на (рис. 14). Стрелкой указан градиент температуры по образцу.

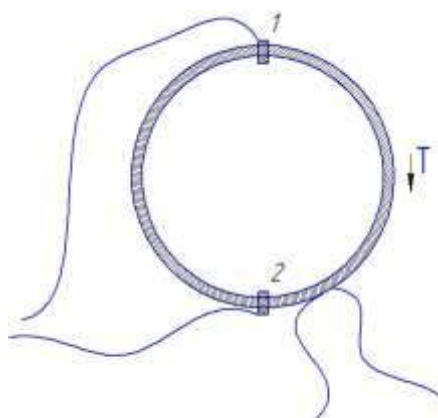


Рис.14. Схема расположения датчиков температуры на катушке ОВ.

2.6. Схема проведения измерений РНП

Общая схема измерений представлена на (рис. 15). Исследуемые образцы оптического волокна необходимой длины (типичные длины волокон были 100 м, в отдельных экспериментах 10 м), сформированные в виде свободных бухт с диаметром ~ 40 -150 мм помещались в поле тормозного излучения ускорителя и, в зависимости от требуемой дозы облучения, располагались либо непосредственно на выходном фланце ускорителя, либо на некотором удалении от него. Диаметр катушек выбирался исходя из требований по минимально допустимому радиусу изгиба для данного типа волокна (3-10 мм) и диаметру пятна равномерного облучения в пучке тормозного излучения.

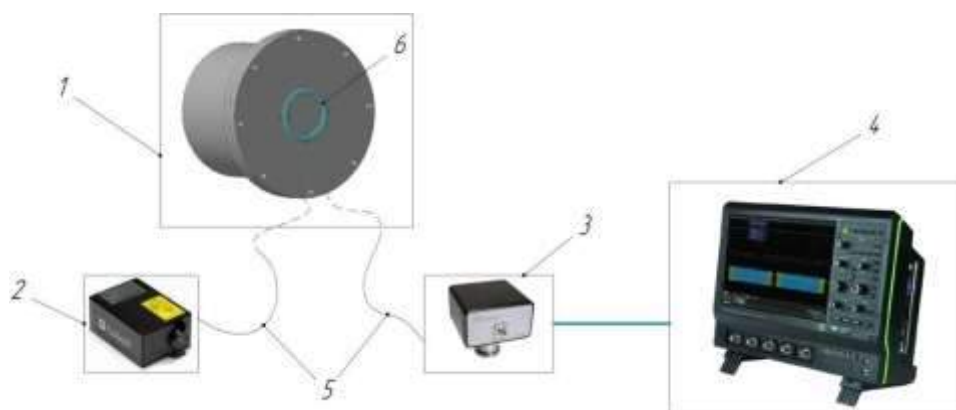


Рис. 15. Схема измерения оптических потерь в ОВ. 1-выходной фланец ускорителя, 2-лазер, 3-фотоприемник, 4-осциллограф, 5-подводящие оптические волокна, 6-образец.

В качестве регистрирующей аппаратуры применялись фотоприемники NewFocus 1811 и 1801 на основе фотодиодов InGaAs со спектральной полосой чувствительности 900-1700 и 430-900 нм соответственно и полосой пропускания 125 МГц. В качестве регистратора использовался осциллограф Lecroy 4096 HD с полосой пропускания 500 МГц и частотой дискретизации 2,5 Gs.

Глава 3. Исследования дозовой зависимости РНП в оптических волокнах из кварцевого стекла с нелегированной и легированной германием сердцевиной

3.1. Определение коэффициентов степенной зависимости поглощения от дозы в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла

В первую очередь, для того, чтобы доказать перспективность применения ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при больших дозах тормозного излучения, в субсекундном диапазоне, необходимо подтвердить низкое значение РНП в них при этих дозах по сравнению с другими оптическими волокнами. Это можно сделать, если доказать существенную нелинейность дозовой зависимости РНП в этом диапазоне доз. Данные по нелинейности зависимости РНП от дозы, при импульсном облучении, были получены еще в работе [7], однако такие данные были получены для секундного диапазона, а нас интересовал субсекундный, где основной вклад в РНП вносят другие РЦО.

Для всех оптических волокон зависимость РНП от дозы может быть определена соотношением (1).

$$\text{РНП} = C \cdot D^q \quad (1)$$

где C - коэффициент, D – доза.

Классическая линейная зависимость реализуется при значении $q=1$. Однако как уже было установлено в исследованиях [70, 71, 27] не у всех ОВ значение q близко к 1, что приводит к нелинейной зависимости РНП от дозы. Такая нелинейная закономерность приводит к тому, что как показано на рис. 5, на примере сравнения поведения РНП в оптических волокнах SMF28 и 1224, поглощение в диапазоне от 0 до 2 Гр больше в волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, однако выше некоторого уровня доз волокно 1224 демонстрирует меньшее значение РНП. Графики зависимостей РНП на (рис. 16) построены исходя из аппроксимации результатов, полученных в наших

экспериментах при последовательном увеличении дозы облучения. Поскольку в эксперименте мы получаем временную зависимость РНП, то для построения дозовой зависимости выбирается один и тот же момент времени после окончания воздействия ИИ в опытах с разным уровнем поглощенной дозы. В нашем случае рассматривается значение РНП спустя 10^{-3} сек после окончания воздействия ИИ.

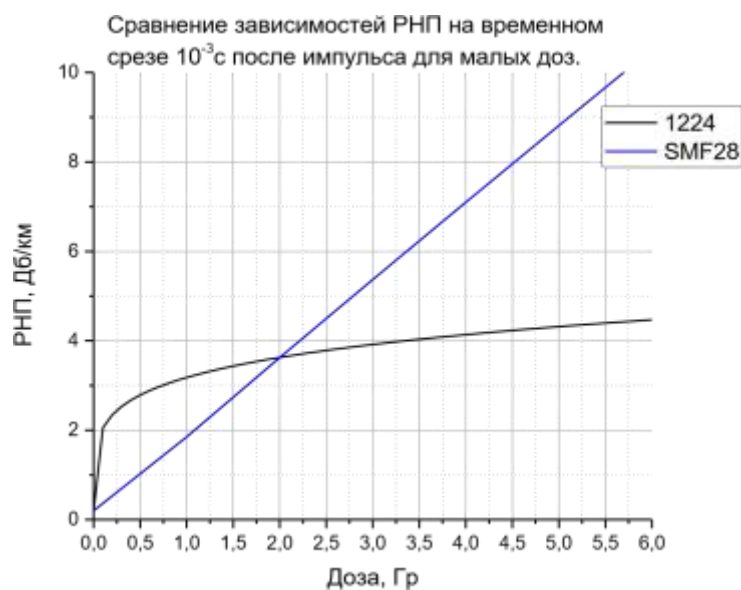
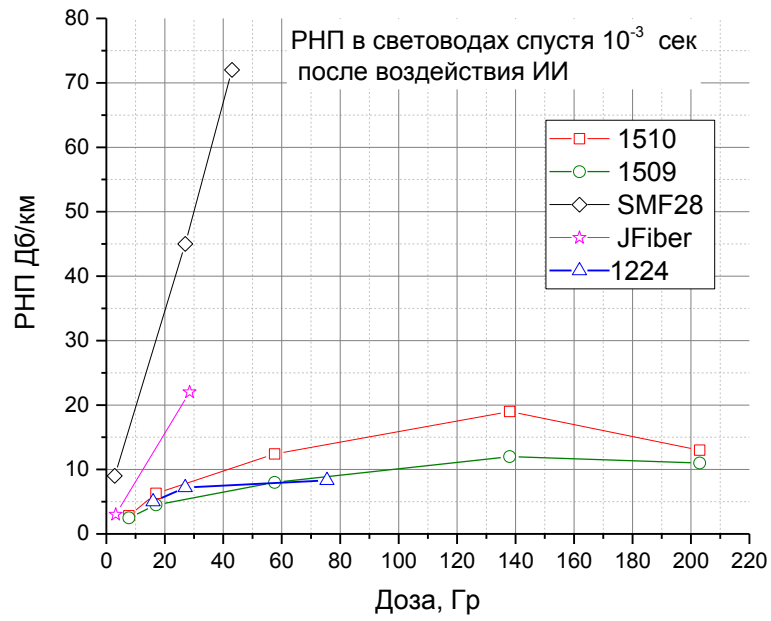
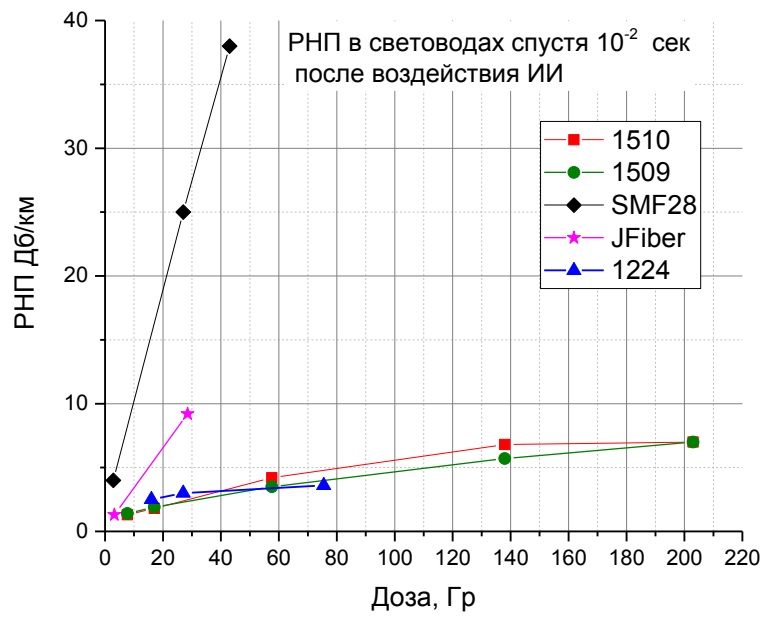


Рис. 16. Графики дозовой зависимости РНП в образцах 1224 и SMF28.

Для некоторых образцов, показавших наилучшую радиационную стойкость и образцов исследованных для сравнения, ниже приведены зависимости РНП от дозы для двух временных срезов (рис.17 а,б) и (рис. 18). Стоит отметить, что для построения точных зависимостей для образцов 1220 и 1224 недостаточно экспериментальных точек, однако приблизительная закономерность может быть построена и на имеющихся данных. На (рис.18) представлены данные по образцам 1220, 1224, 1509 и 1510 в другом дозовом разрешении для наглядности демонстрации экспериментальных данных.



а)



б)

Рис.17. Дозовая зависимость РНП для ОВ в двух временных срезах. а - момент времени 10^{-3} сек после окончания воздействия ИИ, б - момент времени 10^{-2} сек.

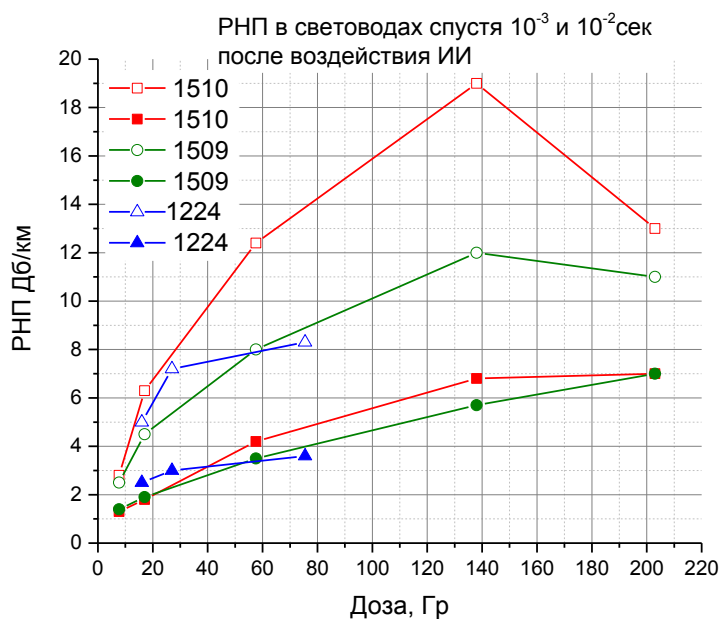


Рис. 18. Дозовая зависимость РНП для ОВ в двух временных срезах. Незакрашенные символы соответствуют моменту времени 10^{-3} сек после воздействия ИИ, закрашенные моменту времени 10^{-2} сек.

На основании этих зависимостей были рассчитаны значения коэффициента C и показателя степени q . Данные по всем оптическим волокнам приведены в таблице 6.

Таблица 6. Параметры коэффициентов степенной зависимости

Тип волокна	10^{-3} с		10^{-2} с	
	C	q	C	q
SMF-28	1.85	0.97	0,92	0.98
JFiber	0,91	0.95	0.37	0.96
1220	5,2	0.12	1,4	0.31
1224	3.18	0.19	1.56	0.19
1509	1,4	0,43	0,5	0,49
1510	2,05	0,45	0,55	0,5

Из (рис. 18) зависимостей РНП от дозы для образцов 1509 и 1510 видно, что для диапазона доз более 140 Гр, во временном срезе после импульса 10^{-3} с, экспериментальные данные начинают расходиться с полученными степенными зависимостями. Значительное уменьшение РНП свидетельствует об уменьшении поглощения, несмотря на рост дозы. Такой результат требует дополнительной проверки и может свидетельствовать как об эффекте «отжига» дефектов в структуре стекла, связанных с АД, при мощностях потока излучения более 10^{11} Р/сек и дозах более 140 Гр, чего не наблюдалось при меньших дозах и мощностях потока, так и о влиянии эффекта фотообесцвечивания, связанного с мощностью лазерного излучения пропускаемого по волокну.

Нелинейность дозовой зависимости РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ наблюдается и в интервале времени до 10^{-3} с после импульса, что наглядно видно из графиков (рис. 20). На них представлены зависимости РНП от времени, нормированные на дозу. В случае очень близкой к линейной зависимости РНП от дозы, как например у образцов SMF28 и JFiber (рис.19), нормированные графики практически совпадают, в то же время в случае отклонения от линейной зависимости РНП от дозы можно наблюдать несовпадение кривых при разных дозах облучения, что и наблюдается в случае ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ (рис.20). Расхождения кривых на временах до 10^{-4} - 10^{-6} сек для образцов SMF-28 и JFiber связаны с неудовлетворительным соотношением сигнал шум при больших дозах облучения, ведь амплитуда сигнала на фотоприемнике в максимуме величины РНП приближается к нулю и не превышает собственного шума тракта регистрации.

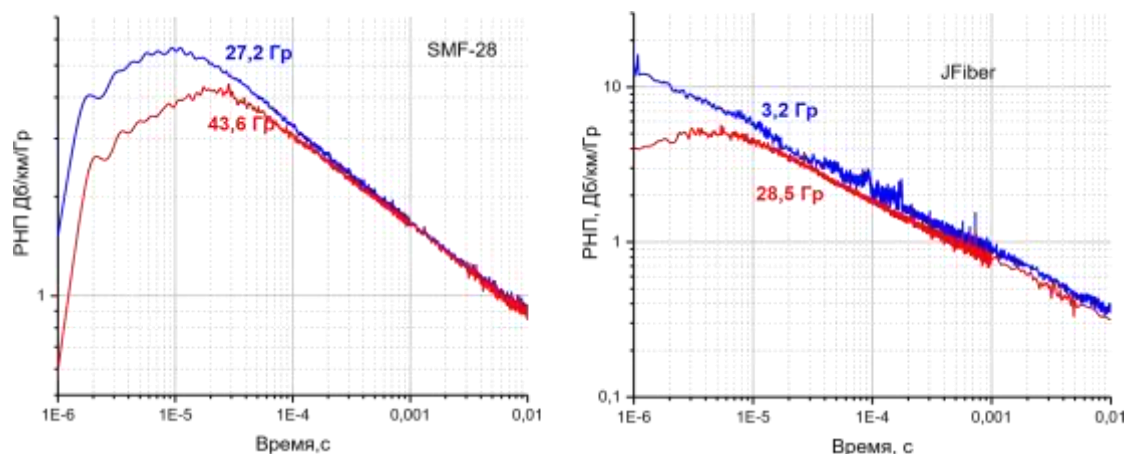


Рис. 19. График зависимости РНП нормированный на поглощенную дозу для образцов SMF-28 и JFiber.

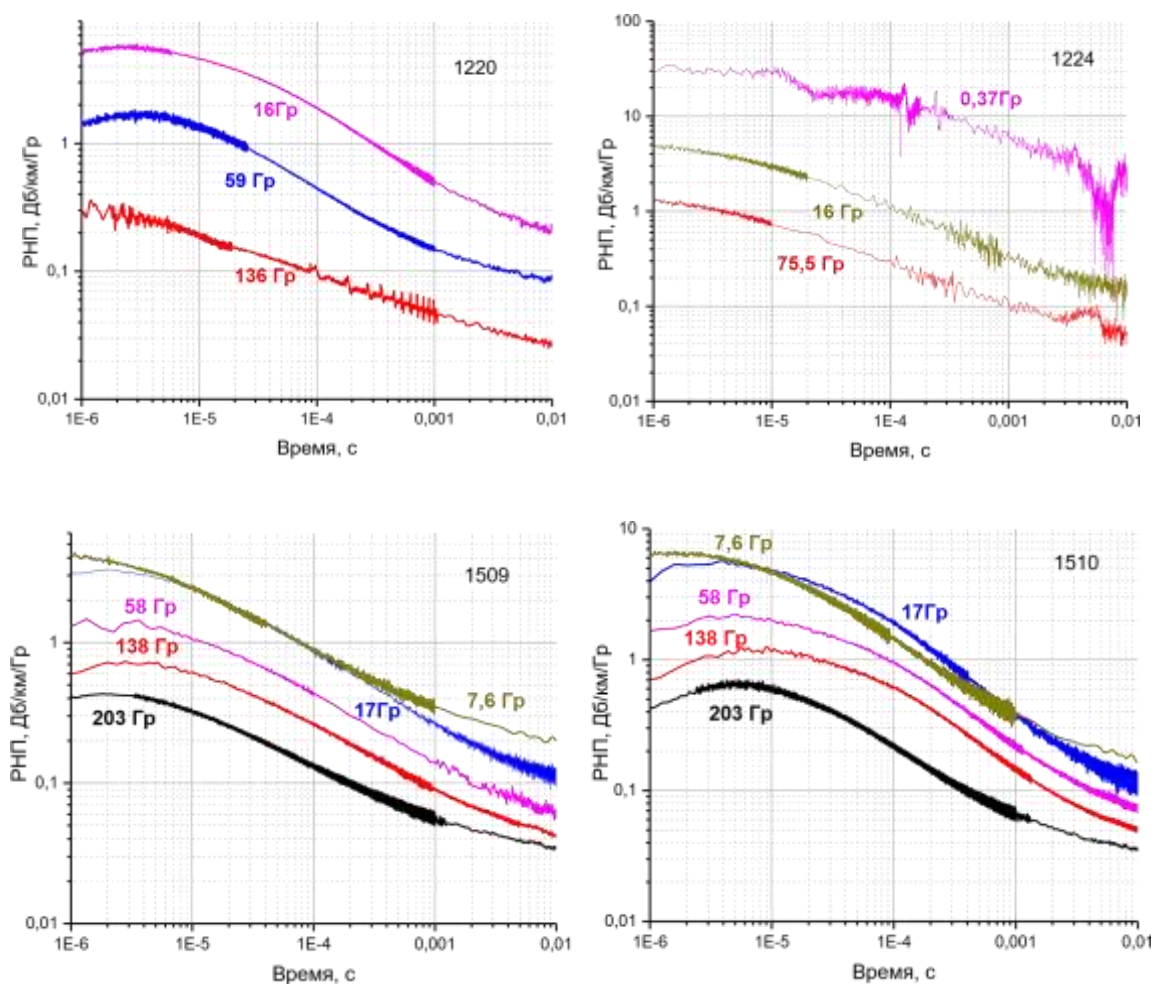


Рис. 20. График зависимости РНП нормированный на поглощенную дозу для образцов ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$.

Таким образом по результатам исследования доказана нелинейность поведения РНП в изготовленных ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ и более того обнаружено, что при дозах в диапазоне более 200 Гр значение РНП в некоторых из них уменьшается, по сравнению с РНП при 140 Гр.

Следовательно, есть возможность предположить, что перспективность применения оптических волокон с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и оболочкой допированной фтором при их облучении большими дозами только увеличивается с ростом дозы.

3.2. Сравнение величин РНП оптических волокон состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ с микроструктурированными волокнами

На основании полученных данных по РНП в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла напрашивается провести их сравнение с образцами волокон обладающих рекордно низкими значениями потерь при облучении их импульсным ИИ. В настоящее время такими волокнами, согласно [72, 73], являются микроструктурированные волокна (Air-PCF).

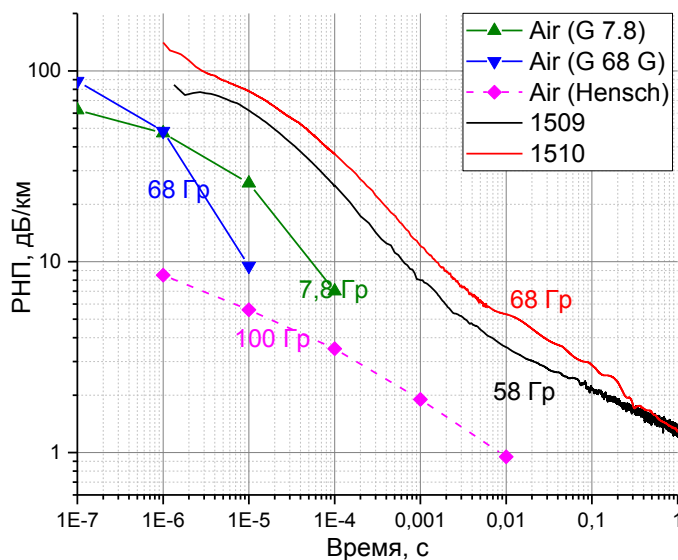


Рис.21. График зависимости РНП в образцах 1509, 1510 и микроструктурированных ОВ. Взято из [72, 73].

Микроструктурированное волокно ожидаемо демонстрирует низкие значения РНП, поскольку практически весь свет (порядка 97-99%) распространяется в них не в структуре кварцевого стекла, а по воздушным полостям. Из сравнения величин потерь в наших образцах и образцах Air-PCF (рис. 21) получаются следующие результаты: в диапазоне до 10^{-3} сек волокна 1509 и 1510 имеют потери в 2-8 раз выше, чем волокно Air (G) и в 4-12 раз выше, чем Air (Hensch) на временах более 10^{-3} сек эта разница еще меньше.

Отметим, что данные микроструктурированные волокна изготавливались без оптимизации их радиационной стойкости для воздействия ИИ, однако поскольку практически весь свет распространяется не в структуре стекла то и как таковая оптимизация не даст значительного уменьшения потерь.

Сравнивая полученные результаты можно сделать следующие выводы. Потери в нашем оптимизированном оптическом волокне не критически сильно превышают потери в ОВ Air-PCF. Стоимость Air-PCF в сотни раз превышает стоимость обычных волокон, изготовленных по технологии MCVD и в ближайшем будущем микроструктурированное волокно точно не сможет заменить стандартное оптическое волокно с цельной сердцевиной.

3.3. Выводы по главе

ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ обладают сильно нелинейной зависимостью РНП от дозы не только в секундном, но и в субсекундном диапазоне времени после воздействия импульсного ИИ. При этом показатель степенной зависимости не превышает 0,5. Данный факт позволяет утверждать, что разработанные образцы ОВ обладают значительно бóльшей радиационной стойкостью при больших дозах импульсного облучения, чем стандартные и радиационно стойкие германосиликатные волокна.

Оптимизированные ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ могут обладать радиационной стойкостью, незначительно уступающей микроструктурированным волокнам.

Глава 4. Исследование роли собственных и деформационных АД в величине РНП и динамике восстановления прозрачности оптических волокон после воздействия импульсного ИИ

4.1. Собственные и деформационные АД – распределение вклада в суммарное РНП

До недавнего времени РНП, в ближнем ИК диапазоне в оптических волокнах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла при импульсном облучении, объяснялось наличием двух полос поглощения относящихся к STN_1 с максимумами на 1,88 эВ и 2,6 эВ и полосой STN_2 с максимумом на 1,63 эВ. Данные о этих полосах поглощения были получены при облучении волокон от непрерывного источника гамма излучения при комнатной температуре [13] и в последствии их существование доказано при импульсном облучении [27]. Однако благодаря последним исследованиям при непрерывном облучении при низких температурах [10, 23] было доказано, что в спектре поглощения присутствуют полосы с энергиями ~ 1 эВ. Была пересмотрена классификация РЦО отвечающих за радиационно индуцированные потери в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$. Были выделены два класса самолокализованных дырочных состояний: деформационные и собственные. Общая картина распределения полос поглощения для ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ в видимой и ИК областях спектра представлена на (рис. 22).

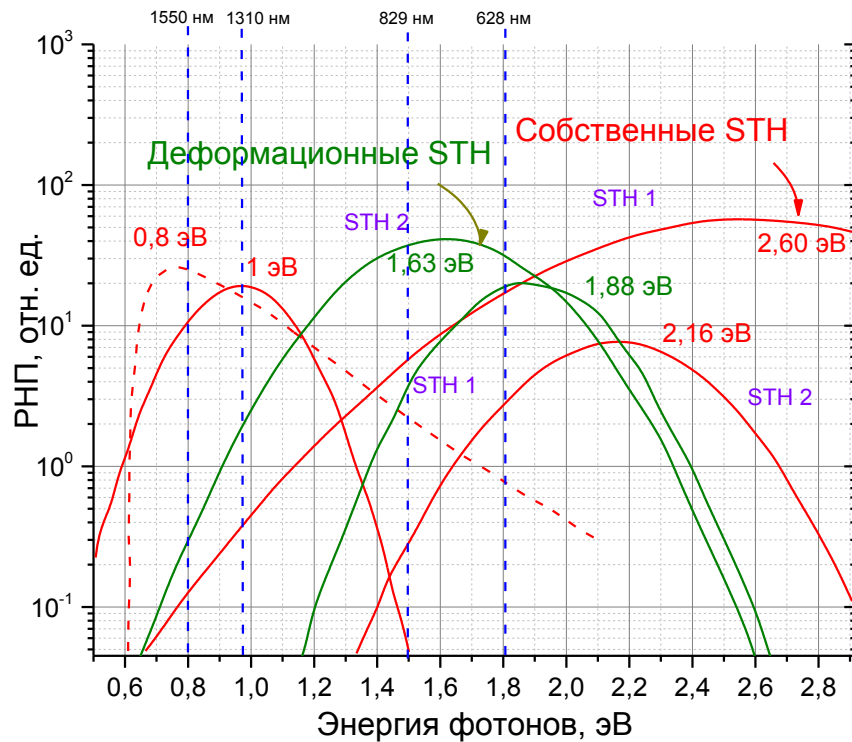


Рис. 22. Полосы поглощения автолокализованных дырочных состояний (STH).

Две полосы деформационных АД 1,63 эВ (STH₂ полоса) и 1,88 эВ (STH₁ полоса) графики зеленого цвета. Четыре полосы собственных АД имеющих графики красного цвета, которые включают STH₁ полосу с максимум на 2,60 эВ, STH₂ полоса с максимум на 2,16 эВ, и две полосы поглощения с максимума на ~0,7 and ~1 эВ, первая из которых относится к LTIRA а природа второй не определена. Параметры (положение максимума и ширина) кривых с максимума на 1,63 и 1,88 эВ взяты из работы [20], данные по полосам с максимумами на 2,60 и 2,16 эВ позаимствованы из работы [27]. Не Гауссовое распределение с максимумом на ~0,7 эВ взято из работы [16]. Параметры кривой с максимум на ~1 эВ взяты из работы [23], где эта полоса наблюдалась впервые.

Сразу стоит отметить, что если ширина линии и позиция максимума поглощения представленных на рис. полос соответствует действительности, то взаимное соотношение амплитуд этих полос взято относительным и не соответствует реальному вкладу каждого из представленных РЦО в общую картину потерь при облучении. Амплитуда полос поглощения так же является функцией времени, следовательно распределение вклада той или иной полосы в суммарное РПП в зависимости от момента времени после воздействия ИИ перемененно. Так же на амплитуду полос большое влияние оказывают параметры технологического процесса изготовления ОВ.

Одной из основных методик, позволяющих экспериментально исследовать природу потерь в веществах, является спектрометрия. Основной проблемой регистрации спектра поглощения при импульсном воздействии ИИ на временах наносекундного и микросекундного диапазонов является низкий уровень мощности зондирующего света на фотоприёмном элементе. Даже самые современные мощные источники непрерывного спектра в видимом и инфракрасном диапазонах не способны обеспечить достаточного уровня мощности светового потока. Даже если вывод светового потока из источников непрерывного спектра осуществляется с помощью оптического волокна, диаметр его сердцевины составляет 1 мм, в то время как диаметр сердцевины одномодовых ОВ 5-7 мкм. Кроме этого, в самом волокне в процессе облучения значительно вырастают потери. После прохождения через исследуемый образец световой поток раскладывается в спектр с помощью дифракционной решетки, что приводит к тому, что на единицу поверхности регистрирующего фотоэлемента либо фотокатода приходится ничтожно малая мощность светового потока. По вышеописанным причинам, регистрацию спектрального распределения полос поглощения в ОВ, при импульсном облучении, проводили на временах более 0,5 сек после окончания воздействия ИИ [27, 46].

На начальном этапе наших исследований природа РНП на временах более 10^{-1} сек объяснялась с точки зрения наличия основной составляющей обусловленной долгоживущими деформационными АД с максимумами полос поглощения на 1,63 и 1,88 эВ (спектр которых так же был измерен при непрерывном облучении) и дополнительной составляющей, значительно меньшей, обусловленной вкладом собственных АД. Так же часть потерь в ИК области (в области 1550 нм) при комнатной температуре объяснялась хвостом полосы собственных АД с максимумом на 2,6 эВ, а природа оставшейся части

потерь относилось к полосе с максимумом вблизи 1 эВ без экспериментального доказательства.

Попыткой определить действительную природу потерь на временах более 10^{-1} сек стала серия опытов с применением лазеров изучающих на 4-х длинах волн. Были выбраны следующие длины волн 659, 828, 1310 и 1550 нм. Четыре образца волокна 1510 облучались в 7 опытах при одинаковых условиях, при этом через каждое волокно пропусклась своя длина волны лазерного излучения.

Данные по параметрам облучения приведены в таблице 7.

Таблица 7. Данные по облученным образцам

Номер эксперимента	Доза в импульсе, Гр	Суммарная доза, Гр	Мощность света, мВт	Длина ОВ,	Длина ОВ,	Длина	Длина
				м 659 нм	м 828 нм	ОВ, м 1310 нм	ОВ, м 1550 нм
1	8,1	8,1	2,1	100	100	100	100
2	7,9	16	0,0354	100	100	100	100
3	21,2	37,2	2,1	100	100	100	100
4	18,8	56	2,1	10	10	100	100
5	64,9	120,9	2,1	10	10	100	100
6	309	429,9	2,1	10	10	100	100
7	9	438,9	2,1	10	10	100	100

Если предположить, что потери в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ на больших временах объясняются только деформационными АД, как следует из результатов регистрации спектра в работе [27] то величину РНП для длин волн 1310 и 1550 нм на больших временах можно выразить соотношением (2).

$$\begin{aligned} \alpha_{1310\text{nm}} &= C_{1.63\text{ev}} \cdot A_{1.63\text{ev}} + C_{1.88\text{ev}} \cdot A_{1.88\text{ev}} \\ \alpha_{1550\text{nm}} &= B_{1.63\text{ev}} \cdot A_{1.63\text{ev}} + B_{1.88\text{ev}} \cdot A_{1.88\text{ev}} \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha_{1310\text{nm}}$ и $\alpha_{1550\text{nm}}$ значения потерь на длинах волн 1310 и 1550 нм от суммарного вклада полос 1,63 и 1,88 эВ, $A_{1.63\text{эВ}}$ и $A_{1.88\text{эВ}}$ максимум амплитуды полос поглощения 1,63 и 1,88 эВ, тут их значения взяты из работы [27]. Исходя из данных статьи для момента времени 0,5 сек после окончания воздействия ИИ, с учетом разницы потерь в нашем волокне и волокне, рассматриваемом в статье, получаем $A_{1.63\text{эВ}} \approx 15$ дБ/км, а амплитудой $A_{1.88\text{эВ}}$, для момента времени 0,5 сек, можно пренебречь по причине малости. Коэффициенты $C_{1.63\text{эВ}} \sim 9,75 \times 10^{-2}$ соответствуют амплитудам полос поглощения для $\lambda = 1310$ нм, $B_{1.63\text{эВ}} \sim 8,4 \times 10^{-3}$ для $\lambda = 1550$ нм соответственно. Подставляя значения в формулу, получаем для 1550 нм значение потерь 0,126 дБ/км, в то время как измеренное в опыте значение потерь в момент времени 0,5 сек составляет 0,61 дБ/км (рис. 23).

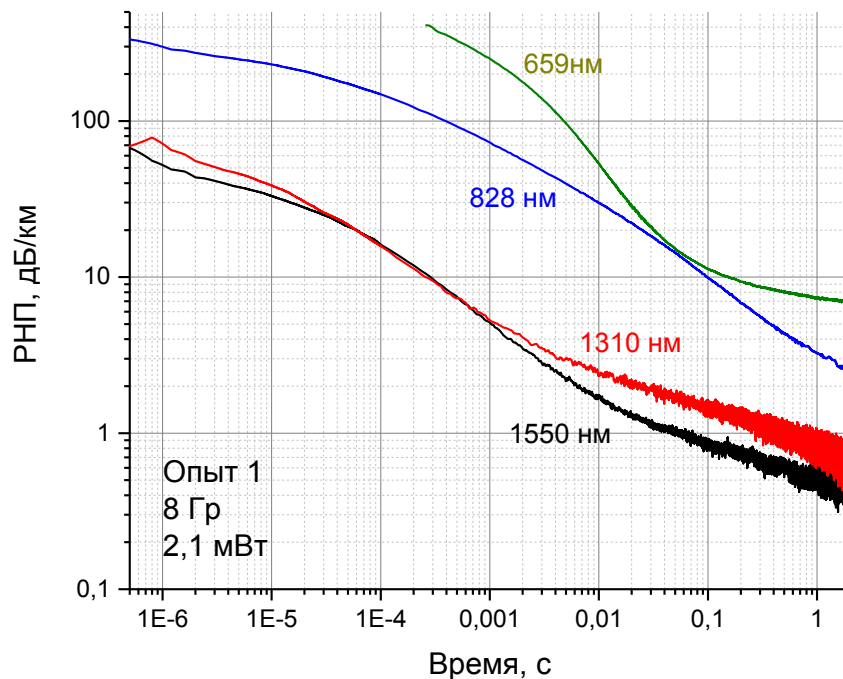


Рис. 23. РНП в оптическом волокне 1510 на четырех длинах волн.

Таким образом, не более 22% потерь на длине волны 1550 нм определяется вкладом хвоста полосы 1,63 эВ. Следовательно, предположение о том, что именно деформационные АД ответственны за потери на временах более 10^{-1} сек не

соответствует действительности. Стоит учесть, что вклад деформационных АД может быть еще существенно меньше, поскольку образцы в нашей работе и в работах, на которые мы ссылаемся, не являются идентичными хотя и имеют схожий химический состав. На амплитуду полос поглощения огромное влияние оказывают все технологические процессы его производства, а не только химический состав сердцевины и оболочки.

Из работ [46 23] следует, что на длине волны 1550 нм существенный вклад в РНП вносит полоса поглощения с максимумом в районе 1 эВ. Из результатов спектральных измерений [23] вытекает, что эта полоса состоит из двух близкорасположенных полос с максимумами на 0,94 и 1,2 эВ и шириной на полувысоте полосы 0,42 и 0,56 эВ соответственно.

Воспользовавшись экспериментальными данными опытов 1 и 7 нашей серии легко определить значения потерь для четырех длин волн в момент времени 2 секунды после воздействия ИИ (рис. 24).

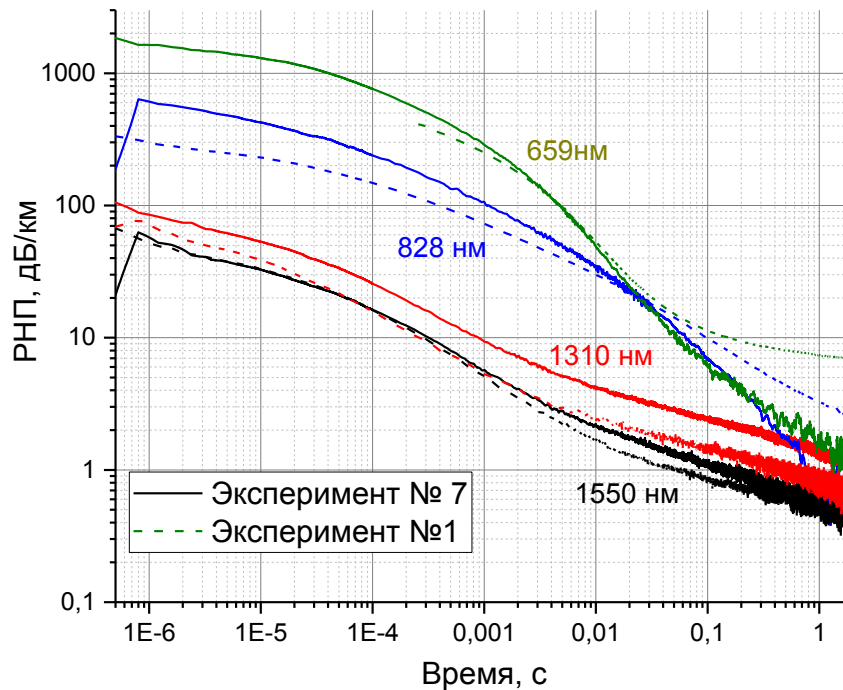


Рис. 24. Сравнение данных по величине РНП в 2 экспериментах.

Объяснение значительного расхождения амплитуд на длинах волн 1310, 828, 659 нм в первом и седьмом экспериментах будет дано ниже.

Для представления суммарных потерь на длинах волн 1550 и 1310 нм воспользуемся разложением на полосы поглощения с применением распределения описываемым Гауссианом (3)

$$\text{РНП}(E) = \sum_{i=1}^2 A_i \times e^{-\frac{(E-E_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

Где A_i , E_i и σ_i максимум амплитуды, энергия соответствующая максимуму и дисперсия i -ой полосы поглощения. Причем дисперсия связана с шириной полосы поглощения на полувысоте ($FWHM$) следующим соотношением $FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$. Результаты разложения представлены на (рис. 25). Как видно из рисунка разложение на полосы 0,94 и 1,2 эВ хорошо описывает потери в районе 1550 и 1310 нм в эксперименте №1. В эксперименте №7 РНП может быть представлено вкладом одной полосы 1,2 эВ.

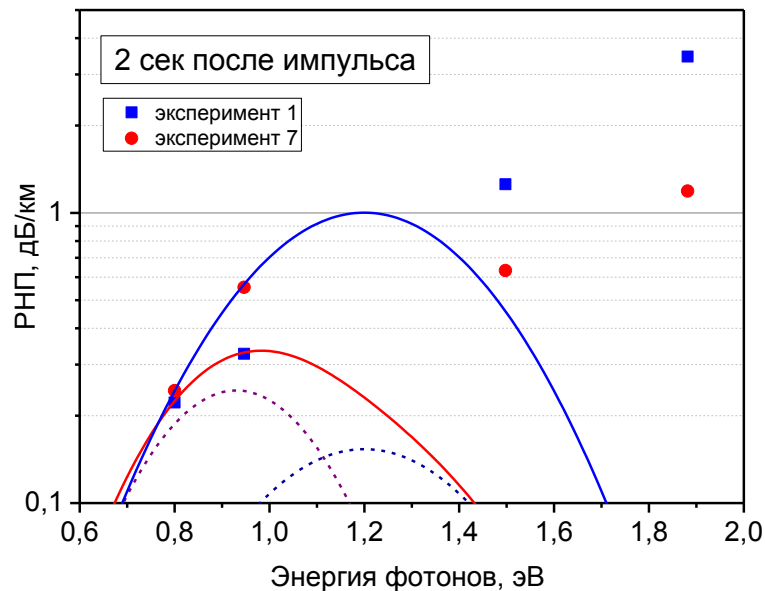


Рис. 25. График аппроксимации экспериментальных данных опытов №1 и №7.

Таким образом из результатов экспериментов можно утверждать, что на временах порядка 1 секунды в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ в ИК области доминирующее влияние имеют АД с максимумами полос поглощения на 0,94 и 1,2 эВ, а не деформационные, как считалось ранее. Причем с таким временем жизни данные полосы поглощения стоит отнести к некому промежуточному классу АД, поскольку они более долгоживущие чем собственные АД, но менее устойчивые, чем деформационные АД.

4.2. Эффект радиационного упрочнения

Впервые эффект радиационного упрочнения в оптических волокнах за счет уничтожения в них части деформационных АД наблюдал Гриском [83]. При непрерывном гамма облучении до дозы 13 МГр (мощность дозы 1 Гр/сек), в отсутствии зондирующего излучения в процессе облучения, он наблюдал 25-ти кратное уменьшение амплитуды полос поглощения относящихся к деформационным АД, при этом полное их уничтожение ожидалось при дозе порядка 100 МГр. Депарис с коллегами в своей работе [84] наблюдал полное и безвозвратное уничтожение полосы поглощения с максимумом на 1,88 эВ относящейся к деформационным АД. При этом суммарная доза гамма облучения составила 1,5 МГр (при мощности дозы 1,4 Гр/сек), а так же было отмечено, что значение суммарной дозы, необходимой для полного уничтожения полосы поглощения сильно зависит от мощности дозы. Исследования наших волокон при непрерывном гамма облучении с постоянным пропусканием по волокну белого света показали, что полное исчезновение полосы поглощения с максимумом на 1,88 эВ произошло при дозе приблизительно 1,5 МГр (мощность дозы 4,5 Гр/сек).

Однако такое радиационное разрушение полосы поглощения с максимумом на 1,88 эВ, требующее облучения до доз Мегагрейного диапазона приводит к значительному увеличению количества других долгоживущих РЦО. Как

следствие, статические потери в оптическом волокне после такого облучения составляют величину 10-40 дБ/км. Такая величина потерь сильно ограничивает практическое применение таких упрочненных световодов.

При импульсном облучении тормозным излучением большой мощности (10^7 - 10^9 Гр/сек) происходит упрочнение за счет другого механизма. Происходит разрушение дефектов связанных с собственными АД. При этом мы получаем радиационно упрочненные оптические волокна с небольшим увеличением статических потерь. Полученное в наших опытах радиационно упрочненное волокно 1224 увеличило свои статические потери на величину порядка 0,5 дБ/км.

По результатам проведенного исследования в ряде наших оптических волокон был обнаружен эффект радиационного упрочнения при условии их малодозного предоблучения [25]. В процессе облучения волокон 1220 и 1224 до значения суммарной дозы не более 100-200 Гр и последующем исследовании величины РНП при дозах на уровне 10-30 Гр было обнаружено, что оба эти волокна продемонстрировали значительное уменьшение величины РНП, по сравнению с его значением в первых опытах, при аналогичной дозе (рис. 26).

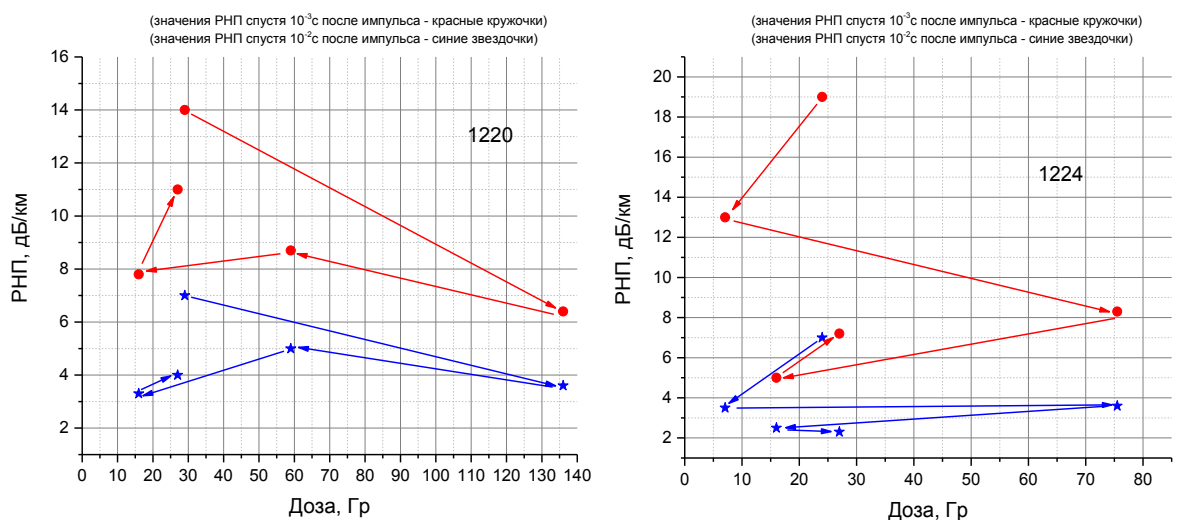


Рис. 26. Эволюция РНП в пяти (точки пронумерованы на графике) последовательных импульсах облучения в моменты время 10^{-3} и 10^{-2} с после импульса в образцах 1220 и 1224.

По результатам измерений получилось, что значение РНП в образце 1220, при дозах около 30 Гр, после радиационного упрочнения уменьшилось на 22% в момент времени 10^{-3} с и на 43% в момент времени 10^{-2} с. Для образца 1224 эффект оказался еще более сильным. Значение РНП уменьшилось на 64% в момент времени 10^{-3} с и на 67% в момент времени 10^{-2} с при дозе облучения около 25 Гр. Радиационное упрочнение в волокне 1224 более выраженное, что хорошо коррелирует с описанными выше данными, говорящими о наличии самого большого количества собственных АД, среди исследованных волокон, именно в этом образце. Мы связываем данный эффект упрочнения с процессом разрушения связи Si–O в момент облучения и перестройке структуры материала в менее напряженную. При больших мощностях ИИ происходит одномоментное разрушение большого количества химических связей, что упрощает общую перестройку связей в менее напряженную структуру. Исчезают слабо деформированные связи являющиеся предвестниками возникновения собственных АД.

Для волокон 1509 и 1510 значительного эффекта радиационного упрочнения на длине волны 1550 нм обнаружено в процессе многократных облучений не было. В первую очередь, мы связывали это с хорошей оптимизацией процесса изготовления волокон, позволившей минимизировать РЦО в сетке стекла, приводящих к возникновению собственных АД. В тоже время наши последние исследования волокна 1510 на нескольких длинах волн зондирующего света (659, 828, 1310 и 1550 нм) показали, что при суммарной дозе всего ~ 400 Гр произошло частичное подавление полос поглощения с максимумами на 1,63 и 1,88 эВ. Это привело к снижению потерь, на временном срезе 2 сек после воздействия, на величину 2-2,7 раза на длинах волн 828 и 659 нм соответственно (рис. 27). При этом часть деформационных АД

трансформировалось в собственные АД с максимумом полосы поглощения в районе 1 эВ, что привело к росту потерь на длине волны 1310 во всем временном диапазоне, а на длине волны 1550 нм на временах более 10^{-3} с.

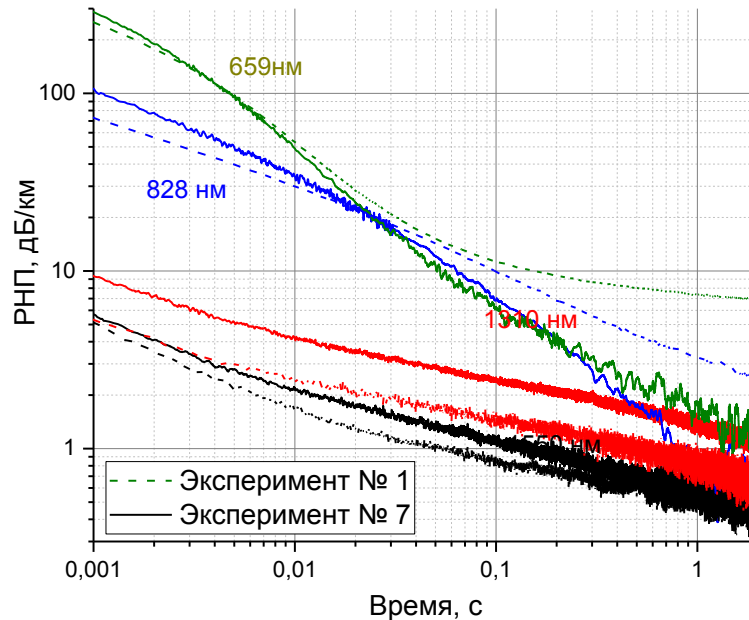


Рис. 27. РП в оптическом волокне 1510 на четырех длинах волн в двух опытах. Пунктирная линия опыт 1 (суммарная доза 8 Гр, доза в опыте 8 Гр), сплошная линия опыт 7 (суммарная доза 440 Гр, доза в опыте 9 Гр).

Отсутствие эффекта снижения потерь для длин волн 1550 и 1310 нм на временах более 10^{-1} сек связано с тем, что полоса 1,88 эВ не заходит своим хвостом в область энергий соответствующих длине волны 1550 нм (рис. 28), а для длины волны 1310 нм ее вклад крайне незначителен по сравнению с полосой с максимумом на 1 эВ. Для полосы 1,63 эВ, несмотря на уменьшение в 2 раза ее амплитуды, так же вклад меньше по сравнению с полосой 1 эВ. Данные (рис. 28) отражают действительное распределение потерь, как по энергиям так и по амплитудам и взяты из работы [20].

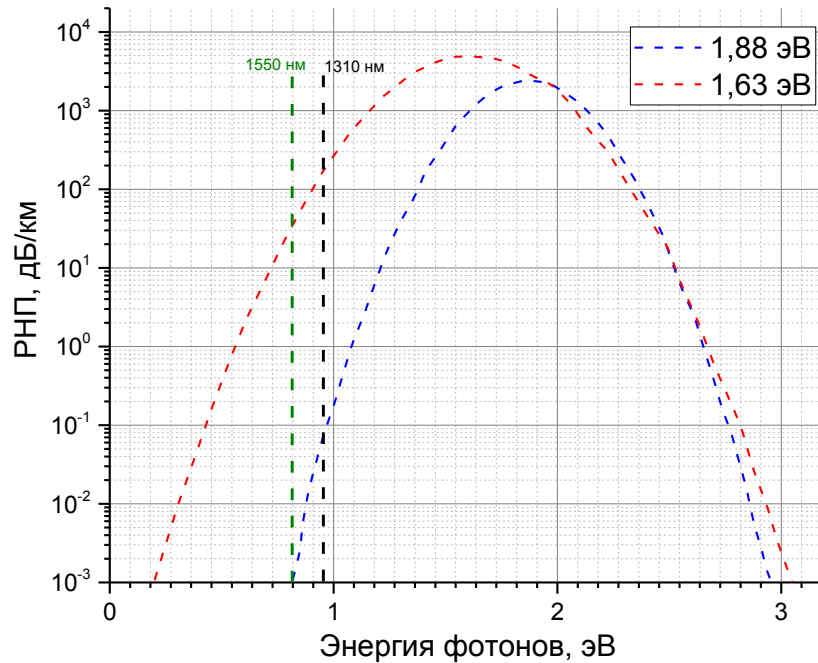


Рис. 28. Спектр поглощения деформационных АД в волокнах с сердцевинной из чистого кварцевого стекла. Взято из [20].

Как показали данные последних исследований спектров поглощения в оптическом волокне из чистого кварцевого стекла [46, 23] полоса поглощения с максимумом ~ 1 эВ состоит из двух близких полос с максимумами на 1.21 и 0.95 эВ и имеет время жизни, незначительно уступающее деформационным АД. Именно эта полоса и определяет основные потери на длинах волн 1310 и 1550 нм на временном участке вблизи 1 секунды после воздействия ИИ.

4.3. Оптимизация технологических параметров

Попытка найти оптимальный баланс множества параметров при изготовлении оптического волокна и по возможности уменьшить количество РЦО являлось одной из основных задач специалистов НЦВО РАН в рамках данной работы, а проведение исследований при импульсном облучении большой мощности позволило экспериментально наблюдать динамику возникновения и распада собственных и деформационных АД, в то время как исследования при

непрерывном облучении практически не позволяют исследовать влияние короткоживущих дефектов на динамику изменения РНП.

Первым фактором, влияющим на РЦО, является состав парогазовой смеси компонентов из которых «выращивают» преформу. Для наших образцов в технологию ее изготовления были внесены изменения. Варьировался r – коэффициент, описывающий соотношение между молярными объемами O_2 и $SiCl_4$, при синтезе сердцевины преформы и для удобства нормализованный на $r_0=29$ таблица 8.

Таблица 8. Технологические параметры изготовления ОВ состава $SiO_2/F:SiO_2$

№ образца	$\Delta n (10^{-3})$	r	$T_{\text{вытяжки}}, ^\circ C$
1224	9,5	2	1890
1220	9,5	0,4	-
1509	9,5	2	1880
1510	9,5	2	1860

Специалистами НЦВО РАН были проведены исследования влияния r – коэффициента на величину РНП при непрерывном облучении. Из большого набора оптических волокон с различным значением r наилучшие результаты продемонстрировали световоды с $r=2$. [59, 61]. Волокна именно с таким r – коэффициентом и стали основным объектом нашего исследования.

Вторым фактором является соотношение избытка кислорода в сердцевине и количества фтора в оболочке. Сильное рассогласование этих двух величин приводит к увеличению количества как собственных так и деформационных АД. Так как предшественниками АД являются напряжения и деформации, вмороженные в сетку стекла, то очевидно, что увеличение избытка кислорода

$r > 2.0$ приводит к увеличению напряженности сердцевины световода. Это, в свою очередь, может произойти, если сильно рассогласованы физико-химические свойства сердцевины и оболочки световода определяемые концентрацией фтора. Так для световодов с $\Delta n = 0.005$ избыток кислорода $r > 1.0$ является уже неоптимальным, т.е. $r = 2.0$, тем более $r = 3.6$, слишком велики, чтобы обеспечить подавление деформаций в световодах с $\Delta n = 0.005$. Увеличивая r мы все больше увеличиваем разность свойств сердцевины и оболочки, что приводит, в конечном счете, к увеличению РНП от АД. В то же время в ОВ с высоким содержанием фтора в оболочке ($\Delta n = 0.0095$), избыток кислорода $r = 2.0$ обеспечивает превосходное подавление деформаций.

Третьим фактором, оказывающим существенное влияние на количество как собственных, так и деформационных АД, является температура вытяжки из преформы оптического волокна. К сожалению, не для всех образцов был замерен этот параметр, но и из имеющихся данных можно сделать некоторые выводы. Образец 1224 вытянутый при самой высокой температуре (1890°C) показал наличие большого количества собственных АД и при этом продемонстрировал высокий уровень радиационного упрочнения, т.е за счет предоблучения удалось уничтожить в нем часть собственных АД. В образцах 1509 и 1510 не наблюдалось наличия эффекта радиационного упрочнения на длине волны 1550 нм, что как нам кажется, свидетельствует о достижении оптимального диапазона температур для их вытяжки. Однако соотношение собственных и деформационных АД в этих двух волокнах отличается и можно сказать, что волокно 1510 демонстрирует большее количество собственных АД и меньшее количество АД промежуточного класса (рис. 29).

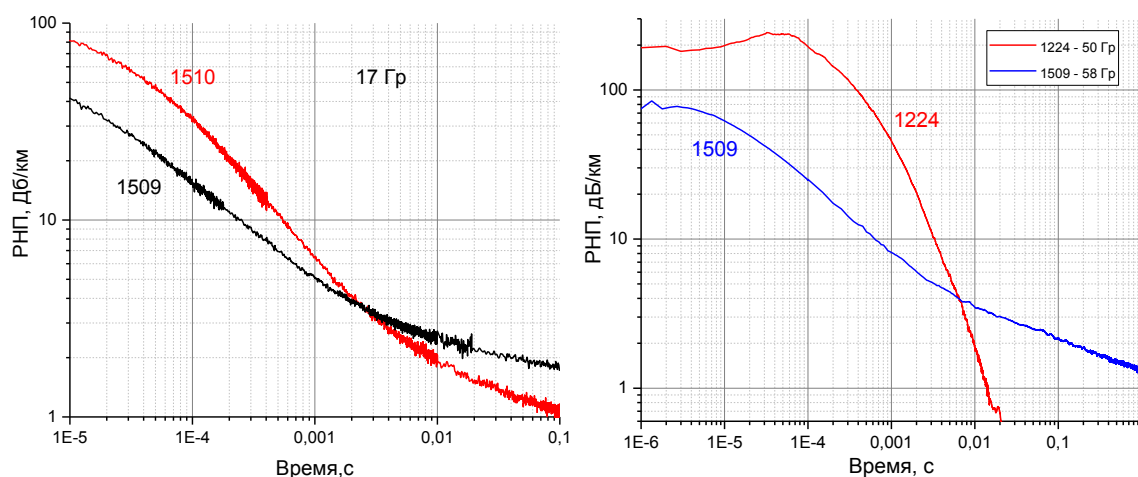


Рис. 29. Временная эволюция РНП после импульса ИИ на $\lambda=1,55$ мкм в образцах ОВ 1224, 1509 и 1510.

4.4. Исследование уровня потерь в зависимости от дозы

Для оценки перспективности использования оптического волокна в условиях внешнего воздействия ИИ необходимо численно знать уровень потерь в нем непосредственно после воздействия. Хорошим уровнем потерь для оптических волокон является уровень потерь менее 1 Дб/км. Для большинства применения в области мощных электрофизических установок этот уровень может даже незначительно превышать значения 20 Дб/км, т.к. длина применяемых оптических волокон зачастую значительно меньше 1 км. В таблице 1 приведены значения потерь в оптических волокнах перед началом их исследования. Поскольку все таки основной интерес был связан с исследованием РНП в диапазоне времен от 10^{-5} до 10^{-1} с, регистрация уровня потерь в волокне на временах более 0,5-2 с проводилась без записи осциллограмм. В ряде опытов контроль за изменением значения уровня потерь в волокне выполнялся измерением амплитуды сигнала на фотоприемнике до импульса ионизирующего излучения и спустя время порядка 1 минуты после импульса. Определенные ограничения на длительность временной развертки осциллографа накладывает желаемое временное разрешение регистрации и приемлемое количество точек в

записи (в нашем случае 5 млн. точек), ведь интересующие нас данные были как в наносекундном, так и в секундном диапазонах.

На (рис. 30) представлены графики зависимости РНП для оптических волокон 1510 и 1509 вплоть до времени 1 секунда после окончания воздействия при уровне дозы 17 Гр и 138 Гр и до момента времени 0,1 с после импульса воздействия при уровне дозы 203 Гр. Как видно из графика, для образца 1510, область потерь менее 1 дБ/км достигается уже спустя 0,1 с после импульса воздействия с дозой 17 Гр. Волокно 1509 имеет потери больше 1 дБ/км спустя 1 секунду после воздействия. Но и волокно 1509 и 1510 имеют потери ниже критических 20 дБ/км уже спустя время более 10^{-3} с даже при уровне дозы 203 Гр.

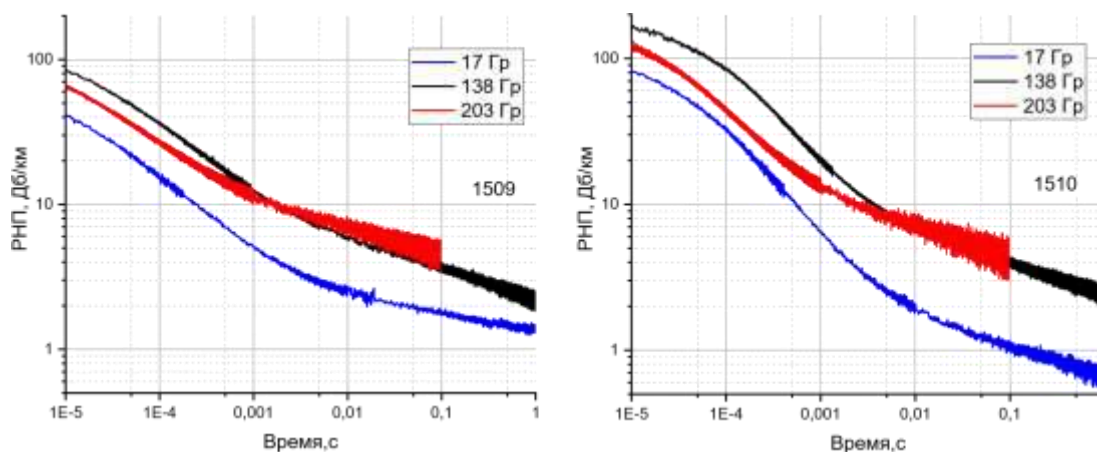


Рис. 30. Эволюция РНП в образцах 1509 и 1510 в зависимости от поглощенной в импульсе дозы.

Проведенная нами регистрация уровней сигнала до воздействия и спустя время порядка 1 минуты после воздействия, в ряде опытов, не показала сколь ни будь заметного увеличения статических потерь в волокнах, т.е при воздействии мощным импульсным тормозным излучением, в исследуемых образцах волокон, не происходит радиационной деградации.

Такие результаты говорят о том, что в процессе воздействия тормозным излучением не происходит существенного негативного изменения в структуре стекла, и не происходит генерации новых постоянных дефектов, влияющих на

уровень потерь в оптическом волокне в отсутствие воздействия внешних источников ионизирующего воздействия. Исходя же из наших данных о сильной нелинейности зависимости РНП от дозы получается, что в отличие от германосиликатных волокон или волокон с добавлением азота и фосфора, с дальнейшим ростом дозы до диапазона 10^3 Гр преимущество по минимальности потерь наших волокон будет только расти.

4.5. Выводы по главе

Исследование распределения вклада в суммарное РНП собственных и деформационных АД показало, что в отличие от ранее распространенного мнения, на временах секундного диапазона РНП определяется не деформационными АД, а промежуточным классом АД с максимумами полос поглощения вблизи 1 эВ.

Малодозное импульсное облучение неоптимизированных либо частично оптимизированных волокон может приводить к их радиационному упрочнению за счет разрушения части РЦО ответственных за возникновение собственных АД. Данный механизм приводит к снижению потерь на длине волны 1550 нм в среднем временном диапазоне. Так же такое малодозное облучение приводит к частичному разрушению полос поглощения 1,63 и 1,88 эВ и как следствие к снижению потерь на больших временах после воздействия ИИ при работе на длинах волн зондирующего излучения видимого и ближнего ИК диапазонов. При малодозном упрочнении импульсным ИИ не происходит сильного увеличения статических потерь в волокне (зарегистрированное увеличение потерь менее 1 дБ/км) в отличие от радиационного упрочнения при непрерывном облучении, где уровень потерь вырастает до величин 10-35 дБ/км и более.

Показано, что изменения температуры втяжки в достаточно узком температурном диапазоне (± 20 °С) позволяют добиться существенного

уменьшения РНП либо на малых временах после импульсного облучения ($<0,01$ с), либо на больших ($>0,01$ с). Таким образом, изобретен способ тонкой подстройки технологии радиационно-стойких ОВ в зависимости от применения ОВ в условиях импульсного облучения на малых или больших временах после воздействия. Используя избыточное количество кислорода при изготовлении преформы и найдя правильное соотношение концентрации фтора в оболочке удалось получить ОВ с рекордными параметрами радиационной стойкости.

Глава 5. Исследования влияния температуры и мощности зондирующего света на РНП.

Поскольку применение оптических волокон возможно не только при комнатной температуре, но также и при повышенных и пониженных температурах, одним из естественных направлений исследования было установление температурной зависимости РНП.

Предварительно температурные исследования как оптимизированных, так и неоптимизированных (с повышенным содержанием хлора или внутренними напряжениями) оптических волокон при непрерывном γ -облучении проводили наши коллеги из НЦВО РАН. По результатам этих исследований наилучшую радиационную стойкость при пониженных температурах показали оптимизированные слабонапряженные световоды. Именно такие образцы было решено выбрать для проведения исследований температурной зависимости РНП при импульсном облучении и исследования эффекта фотообесцвечивания.

5.1. Исследование при пониженных температурах и мощности зондирующего света $\sim 5-10$ мВт

Для исследования были выбраны образцы 1509 и 1510. Результаты измерений зависимости РНП при близких значениях дозы представлены на (рис. 31).

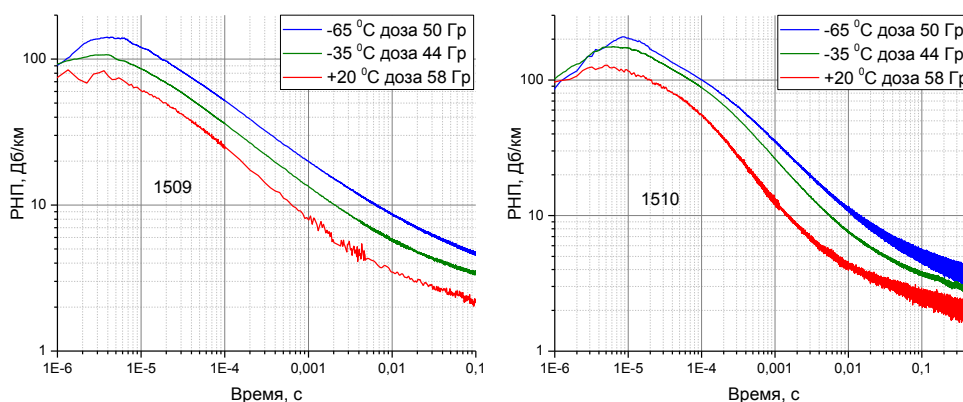


Рис. 31. Зависимости РНП при близких дозах облучения в условиях пониженных температур.

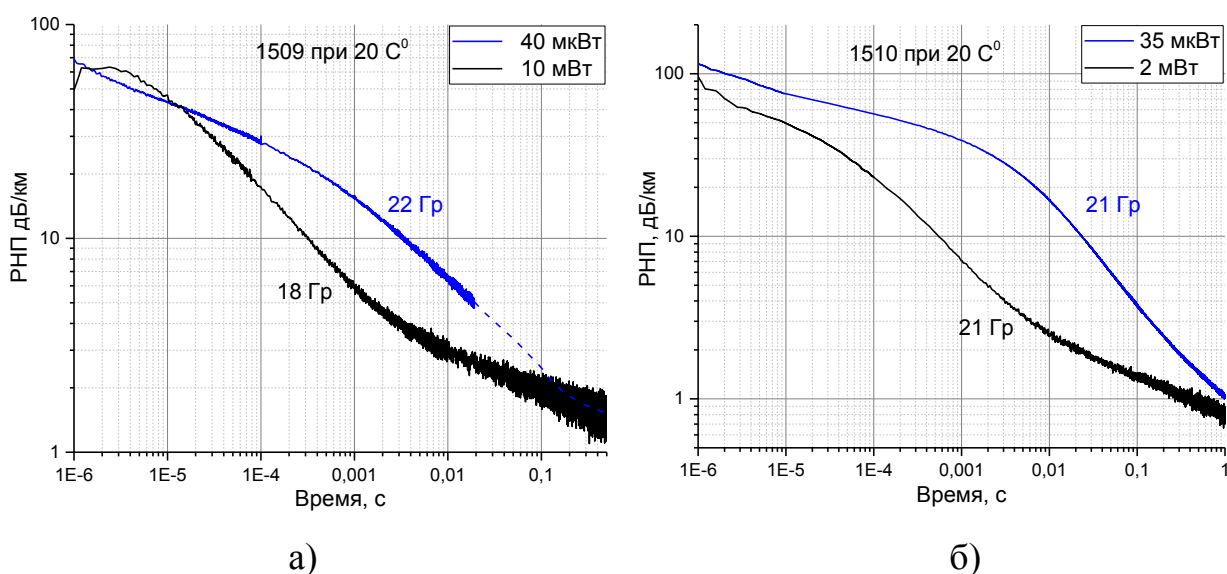
Как видно из графиков, предположения об увеличении РНП при пониженных температурах полностью оправдались: в образце 1509 РНП при -65°C увеличилось в 1,38 раза в момент времени 10^{-3}c и в 2,6 раза в момент времени 10^{-2}c , для образца 1510 РНП при -65°C увеличилось в 1,8 раза в момент времени 10^{-3}c и в 2,2 раза в момент времени 10^{-2}c . Максимум амплитуды РНП и амплитуда потерь в момент времени 1 секунда выросли с уменьшением температуры для обоих образцов, что свидетельствует об увеличении количества как собственных, так и деформационных АД. Причем, если для образца 1509 рост РНП идет практически линейно с уменьшением температуры, то для образца 1510 рост РНП не линейный, что следует из значительной разницы в ширине зазора между графиками для 3 температур. Так же заметно, что при понижении температуры от -35°C до -65°C максимум поглощения в волокне 1510 меняется незначительно. Скорее всего, это связано с тем, что уже при незначительном понижении температуры в волокне 1510 возникает основная часть микронапряжений – предвестников собственных АД. А, как известно из описанных выше свойств волокна 1510, оно более богато на собственные АД нежели волокно 1509, т.е. в нем изначально больше микродеформаций.

Так же стоит отметить, что снижение температуры до -65 C^0 не приводит к видимому увеличению времени жизни дефектов. Такой вывод следует из того, что графики эволюции РНП для обоих образцов имеют одинаковую форму кривых независимо от температуры, изменяется только амплитуда.

Как показали данные экспериментов, снижение температуры негативно сказывается на величине РНП во всем временном диапазоне.

5.2. Исследование при повышенной температуре и различной мощности зондирующего света

Как уже говорилось в литературном обзоре, результаты исследований при повышенных температурах при непрерывном γ -облучении крайне противоречивы. Следовательно, исследования зависимости РНП при повышенной температуре, в условиях импульсного облучения большой мощности, представляли особый интерес. Результаты сравнения величин РНП, в интересующем нас временном диапазоне, в экспериментах при комнатной и повышенных температурах и различных мощностях зондирующего света представлены на (рис. 32).



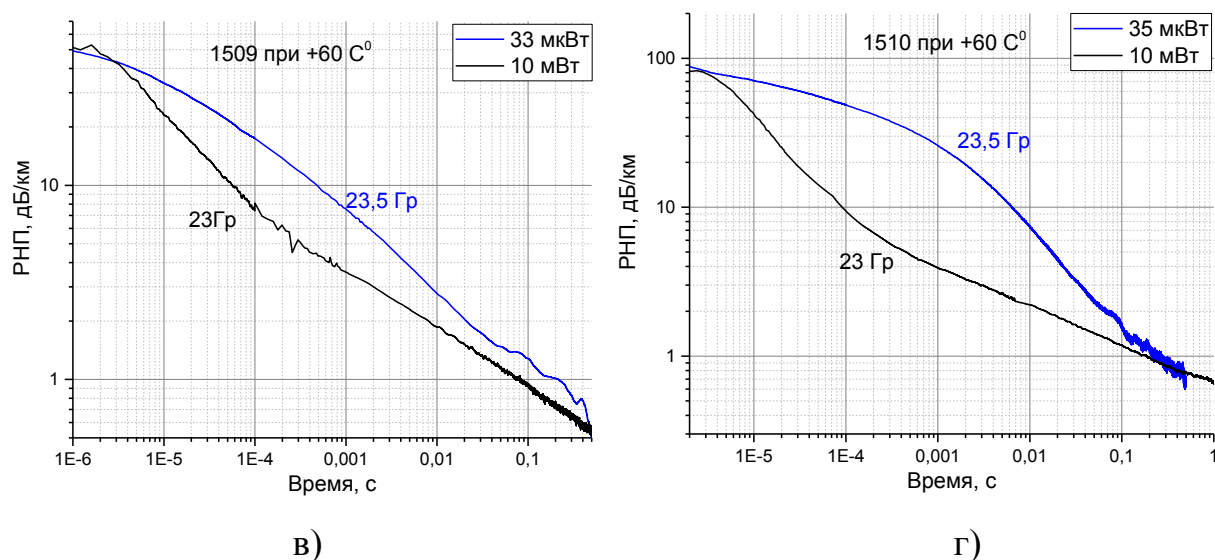


Рис. 32. Эволюция РНП при комнатной и повышенной температуре и разных мощностях зондирующего света.

Из сравнения кривых РНП при комнатной температуре и двух уровнях мощности зондирующего света (рис. 32 а, б) видно, что для обоих образцов увеличение мощности света способствует заметному ускорению релаксации короткоживущих дефектов. Т.е. мы ускоряем распад собственных АД. Для образца 1509 уменьшение величины РНП в диапазоне времен 10^{-4} - 10^{-2} секунды достигает величины ~ 2 . Поскольку мы связываем эффект фотообесцвечивания в первую очередь с собственными АД амплитуда данного эффекта в образце 1510 должна быть больше, что и видно из результатов опыта. Для образца 1510 уменьшение величины РНП в диапазоне времен 10^{-4} - 10^{-1} секунды достигает величины ~ 6 . Таким образом при комнатной температуре высокая мощность зондирующего света положительно сказывается на уменьшении потерь во всем временном диапазоне. Небольшое превышение амплитуды потерь для образца 1509 при большой мощности света над амплитудой при маленькой, во временном диапазоне 10^{-6} - 10^{-5} секунд, связано с несколькими факторами. Разным временным разрешением измерений, соотношением сигнал шум и возможно большой разницей между суммарными дозами полученными образцом к моменту проведения этих опытов.

Теперь стоит оценить результат измерения РНП при воздействии повышенных температур в условиях дозы и мощности света, аналогичных опытам при комнатной температуре (рис. 32 в, г). Анализируя данные по эволюции РНП в образцах 1509 и 1510, при повышенной температуре, в первую очередь видно, что максимум амплитуды РНП для обоих образцов уменьшился. Причем величина снижения потерь для обоих образцов очень близкая и составляет величину ~ 10 - 12 дБ, к тому же для этих образцов уменьшилась и амплитуда потерь на больших временах. Такие данные говорят о снижении влияния РЦО отвечающих за образование АД, происходит образование меньшего количества таких дефектов. Снижение максимума потерь приводит ко второму эффекту, процесс фотообесцвечивания начинается раньше, т.к. потери света в волокне уменьшились уже на временах 10^{-6} секунды. Существенного же влияния высокой температуры на увеличение скорости релаксации собственных и деформационных АД из результатов экспериментов не видно, даже для образца 1510, в котором собственных АД больше.

Повышенная температура уменьшает количество собственных АД, образующихся в процессе воздействия импульсного ИИ, при этом, не оказывая заметного влияния на скорость релаксации обоих типов АД, но косвенно, за счет уменьшения максимума РНП позволяет начаться процессу фотообесцвечивания раньше.

5.3. Выводы по главе

Облучение ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$, при пониженных температурах, приводит к увеличению популяции АД, вносящих заметный вклад в исследованном временном диапазоне.

Влияние повышенных температур и больших мощностей зондирующего света положительно влияют на динамику изменения РНП. Во всем исследованном временном диапазоне потери в ОВ уменьшились, по сравнению с данными при комнатной температуре, для всех исследованных волокон. Однако действие

температуры и мощности света на РЦО различное. Повышенная температура препятствует возникновению собственных АД состояний, что приводит к уменьшению амплитуды потерь во всем временном диапазоне. Большая мощность света влияет на увеличение скорости распада возникших АД состояний, тем самым увеличивая скорость восстановления прозрачности ОВ. Такое ускорение распада может уменьшить амплитуду потерь, в отдельные временные отрезки, в 2-6 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты исследования показали, что ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ обладают сильно нелинейной зависимостью РНП от дозы при импульсном облучении, близкой к степенному закону с показателем $\sim 0,2$. РНП в таких световодах меньше, чем в ОВ стандартного хим. состава $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$, при дозах выше 2 Гр. Данный эффект наблюдается во всем временном диапазоне, который исследовался в наших экспериментах.
2. Установлено, что РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ при импульсном воздействии тормозным ИИ в ИК области определяется: на малых временах после импульса (менее 10 мс) собственными АД с полосой на 2,6 эВ и полосами вблизи 1 эВ – LTIRA, 0,94 и 1,2 эВ, на временах (>10 мс–2 сек) – более долгоживущими АД с полосами поглощения вблизи 1 эВ и лишь незначительно деформационными АД.
3. Экспериментально доказано, что импульсное малодозное предоблучение ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ может приводить к радиационному упрочнению – снижению РНП при последующих облучениях на временах <10 мс после импульса в ИК области. Эффект связан с существенным подавлением радиационно-индуцированных собственных АД. При этом необходимая для возникновения эффекта радиационного упрочнения доза составляет величину порядка 100-200 Гр. При малодозном радиационном упрочнении увеличение уровня статических потерь в оптическом волокне составляет величину менее 0,5 дБ/км.
4. Из результатов исследования вытекает, что повышение температуры при импульсном облучении (от -65 до $+85$ °С) и повышение интенсивности зондирующего светового сигнала (от десятков мкВт до 10 мВт) по разному влияют на эволюцию РНП в ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$. Изменение температуры приводит к изменению количества АД, в то время как большая мощность

зондирующего света приводит к уменьшению времени жизни собственных АД.

5. Впервые установлено, что при воздействии тормозного ИИ большой мощности на ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ происходит распад деформационных АД (с максимумами полос поглощения на 1,63 и 1,88 эВ) уже при суммарной дозе менее 500 Гр. При этом происходит рост количества собственных АД с полосами на 0,93 и 1,2 эВ.
6. Показано, что путем варьирования температуры вытяжки ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}_2$ в температурном диапазоне 30 °С, можно добиться существенного уменьшения РНП либо на малых временах после воздействия импульсного ИИ (<0,01 с), либо на больших (>0,01 с). Таким образом, предложен метод тонкой подстройки технологии радиационно-стойких ОВ для применений в условиях импульсного облучения на малых или больших временах после импульса.
7. Выявлено, что оптимизированные ОВ состава $\text{SiO}_2/\text{F}:\text{SiO}$ демонстрируют высокую радиационную стойкость как при непрерывном (как показано в работах НЦВО РАН), так и при импульсном воздействии ИИ, что позволяет использовать их в условиях импульсно непрерывного воздействия ИИ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю и безграничную благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Александру Леонидовичу Томашуку за предоставление темы диссертации, всестороннюю помощь, переданные знания и опыт, а также за товарищескую поддержку; сотрудникам отдела О.М. Таценко, М.П. Монахову и А.Н. Моисеенко за всестороннюю помощь в организации и проведении всех экспериментов данной работы; руководителям и сотрудникам ИЯРФ Н.В. Завьялову, Грунину А.В., С.Л. Глушкову, А.А. Васюнину, А.В. Тельнову, К.В. Страбыкину, О.В. Звереву, Н.С. Кузякиной за предоставление возможности проведения всех экспериментов на облучательных установках ИЯРФ, помощь в организации опытов и измерении параметров облучения; сотруднику НЦВО РАН П.Ф. Кашайкину за предоставление всех образцов для исследований, помощь в написании диссертационной работы и переданные знания по оптическим волокнам; начальнику отдела П.Б. Репину за внимательное отношение к этому направлению исследований и стимулирование к написанию данной работы.

Также автор благодарит директора НПЦФ В.Д. Селемира за поддержку, постоянный интерес и внимание к данной работе, и всех сотрудников НПЦФ за доброжелательное отношение и отзывчивость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griscom D. L. Nature of defects and defect generation in optical glasses // Radiation Effects on Optical Materials. – International Society for Optics and Photonics, – 1985. – Т. 541. – С. 38-60.
2. Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. – Знание, 1985.
3. Келли Б. Радиационное повреждение твердых тел: Пер. с англ./Под ред. Ю.А. Осипьяна. М. Атомиздат. – 1970.
4. Girard S., Kuhnenn J., Gusarov A., Brichard B., Van Uffelen M., Ouerdane Y., Boukenter A., Marcandella C. Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Т. 60. – №. 3. – С. 2015-2036.
5. Girard S., Baggio J., Bisutti J. 14-MeV Neutron, γ -Ray and Pulsed X-Ray Radiation-Induced Effects on Multimode Silica-Based Optical Fibers // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2006. – Т. 53. – №.6. – С. 3750-3757.
6. Tomashuk A. L., Golant K. M. Radiation-resistant and radiation-sensitive silica optical fibers // Advances in Fiber Optics. – International Society for Optics and Photonics. – 2000. – Т. 4083. – С. 188-202.
7. Girard S., et al. Transient radiation responses of optical fibers: Influence of MCVD process parameters // IEEE Trans. Nucl. Sci.–2012. Т. 59. №.6. –С. 2894-2901.
8. Tomashuk A. L., Zabezhailov M. O. Formation mechanisms of precursors of radiation-induced color centers during fabrication of silica optical fiber preform // Journal of Applied Physics. – 2011. – Т. 109. – №. 8. – С. 083103.
9. Griscom D.L., Pacchioni G., Skuja L. Defects in SiO₂ and Related Dielectrics // Science and Technology, Kluwer, The Netherlands. – 2000. – С. 117.
10. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Guryanov A.N., Dianov E.M. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica

- optical fibers at different temperatures // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – T. 121. – №. 21. – C. 213104.
11. Girard S., Keurinck J., Boukenter A., Meunier J.-P., Ouerdane Y., Azais B., Charre P., Vie M. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica core optical fibers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2004. – T.215. – C. 187195.
 12. Kimmel A. V., Sushko P. V., Shluger A. L. Structure and spectroscopic properties of trapped holes in silica // *Journal of non-crystalline solids*. – 2007. – T. 353. – C. 599-604.
 13. Griscom D. L. Self-trapped holes in amorphous silicon dioxide // *Physical Review B*. – 1989. – T. 40. – №. 6. – C. 4224.
 14. Griscom D. L. Electron spin resonance characterization of self-trapped holes in amorphous silicon dioxide // *Journal of non-crystalline solids*. – 1992. – T. 149. – №. 1-2. – C. 137-160.
 15. 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 // *Journal of non-crystalline solids*. – 2006. – T. 352. – №. 23-25. – C. 2601-2617.
 16. Chernov P. V. et al. Spectroscopic manifestations of self-trapped holes in silica // *Physica Status Solidi B*. – 1989. – T. 156. – №. 2. – C. 663-675.
 17. Edwards A. H. Theory of the self-trapped hole in a-SiO₂ // *Physical review letters*. 1993. – T. 71. – №. 19. – C. 3190.
 18. Pacchioni G., Basile A. Calculated spectral properties of self-trapped holes in pure and Ge-doped SiO₂ // *Physical Review B*. – 1999. – T. 60. – №. 14. – C. 9990.
 19. Sicolo S., Palma G., Di Valentin C., Pacchioni G. Structure and ESR properties of self-trapped holes in pure silica from first-principles density functional calculations // *Physical Review B*. – 2007, 075121.

20. Nagasawa K. et al. Gamma-ray induced absorption band at 770 nm in pure silica core optical fibers // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1984. – T. 23. – №. 5R. – C. 606.
21. Griscom D.L. Growth and decay kinetics of defect centers in high-purity fused silicas irradiated at 77 K with X-Rays or 6.4-eV laser light // *Nucl. Instr. Methods*. – 1990. – T. 46 – C. 12-17.
22. Griscom D.L. γ and fission-reactor radiation effects on the visible-range transparency of aluminum-jacketed, all-silica optical fibers *J. Appl. Phys.* – 1996 – T. 80 – C. 2142.
23. Morana A., Campanella C., Jeoray Vidalot Jeoray, De Michele V., Marin E., Reghioua I., Boukenter S., Ouerdane Y., Paillet Ph., Girard S., Extreme radiation sensitivity of ultra-low loss pure-silica-core optical fibers at low dose levels and infrared wavelengths // *Sensors*. – 2020. – T.20. – C.7254.
24. Sasajima Y., Tanimura K. Optical transitions of self-trapped holes in amorphous SiO_2 // *Physical Review B*. – 2003. – T. 68. – №. 1. – C. 014204.
25. Tomashuk A.L., Filippov A.V., Kashaykin P.F., Bychkova E.A., Galanova S.V., Tatsenko O. M., Kuzyakina N.S., Zverev O.V., Salgansky M.Yu., Abramov A.N., Guryanov A. N., Dianov E.M. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica-core optical fibers // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – T.37 (3). – C.956–963.
26. Tomashuk A.L., Kashaykin P.F., Salgansky M.Yu., Glushkov S.L., Tatsenko O.M., Guryanov A.N., Semjonov S.L. 1.55- μm -light absorption induced by pulsed-X-ray radiation in pure-silica core fiber: Effects of light power and temperature // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2019. – T. 521. – C. 119504.
27. Girard S., Griscom D. L., Baggio J., Brichard B., Berghmans F. Transient optical absorption in pulsed X-ray-irradiated pure-silica-core optical fibers: Influence of

- self-trapped holes // *Journal of non-crystalline solids*. – 2006. – Т. 352. – № 23–25. – С. 2637–2642.
28. Neustruev V. B. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 1994. – Т. 6. – №. 35. – С. 6901.,
29. Pacchioni G., Mazzeo C. Paramagnetic centers in Ge-doped silica: A first-principles study // *Physical Review B*. – 2003. – Т. 62, – № 9.
30. Anoikin E. V. et al. Effects of exposure to photons of various energies on transmission of germanosilicate optical fiber in the visible to near IR spectral range // *Journal of non-crystalline solids*. – 1994. – Т. 179. – С. 243-253.
31. Anoikin E. V. et al. UV and gamma radiation damage in silica glass and fibres doped with germanium and cerium // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 1992. – Т. 65. – №. 1-4. – С. 392-396.
32. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Khopin V.F., Gur'yanov A.N., Semjonov S.L., Dianov E.M. New radiation colour centre in germanosilicate glass fibres // *Quantum Electronics*. – 2018. – Т. 48 (12). – С. 1143 – 1146.
33. Griscom D.L. A Minireview of the Natures of Radiation-Induced Point Defects in Pure and Doped Silica Glasses and Their Visible/Near-IR Absorption Bands, with Emphasis on Self-Trapped Holes and How They Can Be Controlled // *Physics Research International*. – 2013. – Т. 2013.
34. Кашайкин П. Ф., Томашук А. Л., Хопин В.Ф., Гурьянов А. Н., Дианов Е. М., Новый радиационный центр окраски в световодах из германосиликатного стекла // *Квантовая электроника*. – 2018. – Т 48. – №12. – С. 1143-1146.
35. Regnier E. et al. Low-dose radiation-induced attenuation at infrared wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres // *IEEE transactions on nuclear science*. – 2007. – Т. 54. – №. 4. – С. 1115-1119.

36. Rosiewicz A., Gray M.H., Irven J., Titchmarsh J.G., Black P.W. Effects of radiation on doped silica core optical fibers // *Electronics Letters*. – 1980 – Т. – 16. – В. 23. – С. 866–867.
37. 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.
38. Дианов Е. М. и др. Влияние температуры и уровня оптической мощности на наведенное поглощение в стеклянных волоконных световодах на основе чистого кварцевого стекла // *Квантовая электроника*. – 1981. – Т. 8. – №. 9. – С. 1935-1944.
39. Henschel H. Radiation hardness of present optical fibres // *Optical Fibre Sensing and Systems in Nuclear Environments*. – International Society for Optics and Photonics. – 1994. – Т. 2425. – С. 21-32.
40. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Azanova I. S., Vokhmyanina O. L., Dimakova T. V., Maltsev I. A., Sharonova Y. O., Pospelova E. A., Tatsenko O. M., Filippov A. V., Kuzyakina N. S., Zverev O. V., Dianov E. M. Radiation induced attenuation in pure silica polarization maintaining fibers // *Journal of non-crystalline solids*. – 2019. – Т. 508. – С. 26–32.
41. Girard S., De Michele V., Alessi A., Marcandella C., Di Francesca D., Paillet P., Morana A., Vidalot J., Campanella C., Agnello S., Cannas M., Gaillardin M., Marin E., Boukenter A., Ouerdane Y., Transient and steady-state radiation response of phosphosilicate optical fibers: Influence of H₂ loading // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2020. – Т.67(1). – С.289–295.
42. Girard S. et al. Combined high dose and temperature radiation effects on multimode silica-based optical fibers // *IEEE transactions on nuclear science*. – 2013. – Т. 60. – №. 6. – С. 4305-4313.

43. Griscom D. L., Gingerich M. E., Friebele E. J. Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1994. – Т. 41. – №. 3. – С. 523-527.
44. Friebele E. J. et al. Overview of radiation effects in fiber optics // *Radiation Effects on Optical Materials*. – International Society for Optics and Photonics. – 1985. – Т. 541. – С. 70-89.
45. 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. – Т. 349. – С. 139-147.
46. De Michele V., Marcandella C., Vidalot J., Paillet P., Morana A., Cannas M., Boukenter A., Marin E., Ouerdane Y., Girard S. Origins of radiation-induced attenuation in pure-silica-core and Ge-doped optical fibers under pulsed x-ray irradiation // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – Т.128. – С. 103101.
47. Morita Y., Kawakami W. Dose rate effect on radiation induced attenuation of pure silica core optical fibres // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1989. – Т. 36. – №. 1. – С. 584-590.
48. Evans B. D. The role of hydrogen in pure silica optical fibers exposed to Co-60 radiation at -55°C // *SPIE*. – 1988. – Т. 992. – С. 121.
49. Кашайкин П.Ф. Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07/Кашайкин Павел Федорович. – М., 2019. – 151 с.
50. Henschel H., Koehn O., Schmidt H. U. Radiation-induced loss of optical fibers at 1300-nm and 1550-nm wavelength // *Photonics for Space Environments IV*. – International Society for Optics and Photonics. – 1996. – Т. 2811. – С. 68-77.
51. Kyoto M. et al. Gamma-ray irradiation effect on loss increase of single mode optical fibers, (I) loss increase behavior and kinetic study // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1989. – Т. 26. – №. 5. – С. 507-515.

52. Wijnands T. et al. Radiation tolerant optical fibers: From sample testing to large series production // *Journal of Lightwave Technology*. – 2011. – Т. 29. – №. 22. – С. 3393-3400.
53. Risch B. G. et al. Optical fiber and cable reliability for high radiation environments // *Proceedings of the 61st International Wire and Cable Symposium*. – 2012. – Т. 61. – С. 543-551.
54. Kyoto M. et al. Characterization of fluorine-doped silica glasses // *Journal of materials science*. – 1993. – Т. 28. – №. 10. – С. 2738-2744.
55. Awazu K., Kawazoe H. Strained Si–O–Si bonds in amorphous SiO₂ materials: a family member of active centers in radio, photo, and chemical responses // *Journal of applied physics*. – 2003. – Т. 94. – №. 10. – С. 6243-6262.
56. Долгов И.И., Иванов, Г. А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной // *Фотон-экспресс*. – 2005. – №. 6. – С. 4-10.
57. Skuja L. et al. Defects in oxide glasses // *Physica status solidi (c)*. – 2005. – Т. 2. №. 1. – С. 15-24.
58. Griscom D. L. et al. γ -radiation resistance of aluminum-coated all-silica optical fibers fabricated using different types of silica in the core // *Applied physics letters*. – 1996. – Т. 69. – №. 3. – С. 322-324.
59. Tomashuk A. L., Salgansky M. Yu., Kashaykin P. F., Khopin V. F., Sultangulova A. I., Nishchev K. N., Borisovsky S. E., Guryanov A. N., and Dianov E. M., Enhanced Radiation Resistance of Silica Optical Fibers Fabricated in High O₂ Excess Conditions // *Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – Т. 32. – №. 2. – С. 213-219.
60. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Y., Abramov A.N., Nishchev K.N., A.N. Guryanov, E.M. Dianov, Radiation-Induced Attenuation in Silica Optical Fibers Fabricated in High O₂ Excess Conditions // *Journal of Lightwave Technology*. – 2015. – Т. 33. – №. 9. – С. 1788-1793.

61. Kashaykin P.F., Tomashuk A. L., Salgansky M. Yu., Abramov A. N., Iskhakova L. D., Lobanov N. S., Nishchev K. N., Guryanov A. N., Dianov E. M. Silica optical fibers with high oxygen excess in the core: a new type of radiation-resistant fiber // *Micro-structured and Specialty Optical Fibres IV.* – SPIE Proc. – 2015. – Т. 9507. – С. 950705.
62. Hibino Y., Hanafusa H. Defect structure and formation mechanism of drawing-induced absorption at 630 nm in silica optical fibers // *Journal of applied physics.* – 1986. – Т. 60. – №. 5. – С. 1797-1801.
63. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. Formation mechanism of drawing-induced E'centers in silica optical fibers // *Journal of applied physics.* – 1985. – Т. 58. – №. 3. – С. 1356-1361.
64. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. Drawing condition dependence of radiation-induced loss in optical fibres // *Electronics Letters.* – 1986. – Т. 22. – №.2. – С. 106-108.
65. Skuja L. N., Silin A. R. Optical properties and energetic structure of non-bridging oxygen centers in vitreous SiO₂ // *Physica status solidi (a).* – 1979. – Т. 56. – №1. – С. K11-K13.
66. Aikawa K. et al. Radiation resistant single-mode optical fiber and method of manufacturing thereof: пат. 7440673 США. – 2008.
67. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Salganskii M. Yu., Guryanov A. N., Dianov E. M. Influence of drawing conditions on radiation-induced attenuation of pure silica-core fibers in the near-IR range // *Micro-Structured and Specialty Optical Fibres V.* – SPIE Proc., – 2018. – Т. 10681. – С. 1068110.
68. Радиационно-стойкий волоконный световод, способ его изготовления и способ повышения радиационной стойкости волоконного световода (варианты) : патент № 2537523 Рос. Федерация. Томашук А.Л., Салганский

- М.Ю., Кашайкин П.Ф., Хопин В.Ф., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М., дата подачи (приоритета) 13.09.2013 г.
69. Alessi A. et al. Influence of drawing conditions on the properties and radiation sensitivities of pure-silica-core optical fibers // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Т. 30. – №. 11. – С. 1726-1732.
70. Кашайкин П.Ф., Томашук А.Л., Салганский М.Ю., Азанова И.С., Цибиногина М.К., Димакова Т.В., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Прогнозирование радиационно-наведенного поглощения света в волоконных световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в космических применениях // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т.89. –№. 5. – С. 752-758.
71. Rosiewicz A., Gray M.H., Irven J., Titchmarsh J.G., Black P.W. Effects of radiation on doped silica core optical fibers // *Electronics Letters*. – 1980 – Т. – 16. – В. 23. – С. 866–867.
72. Girard S., Baggio J., Leray J.-L., Radiation-induced effects in a new class of optical waveguides: The air-guiding photonic crystal fibers // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2005. – Т. 52. – № 6. – С. 2683–2688.
73. Henschel H., Kuhnenn J., Weinand U. High radiation hardness of a hollow core photonic bandgap fiber // in Proc. 8th Eur. Conf. Radiation Effects Compon. Syst., Palais des Congr`es du Cap d'Agde, France. – 2005, Paper LN-4.
74. Центры коллективного пользования. Радиационные исследования и испытания [Электронный ресурс]: <http://www.vniief.ru/partnership/ckp/Rad/696c4f004e9873debce5bf01408a5e54>.
75. Герасимов А.И., Гордеев В.С., Долотенко М.И., Дубинов Е.А., Завада Н.И., Завьялов Н.В., Куропаткин Ю.П., Макеев Н.Г., Савченко В.А., Серов В.И., Хохлов Ю.А. Электрофизические установки // *Атом*. – 2002. – №19`02 – С. 14-28.

76. Selemir Victor D., Dubinov A. E., Voronin V. V., Zhdanov V. S. Key Ideas and Main Milestones of Research and Development of Microwave Generators With Virtual Cathode in RFNC-VNIIEF // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2020. –Т. 48. – № 6. –С. 1860-1867.
77. Павловский А.И., Босамыкин В.С., Герасимов А.И. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 // ПТЭ. – 1998. – № 2. – С. 13-25.
78. Завьялов Н.В., Гордеев В.С., Савченко В.А. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // Физика и техника высоких плотностей энергии: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – 2011.- С.165-191.
79. Punin V.T., Zavyalov N.V., Basmanov V.F. et. al. Generation of bremsstrahlung fields of higher than 10^{13} rad/s intensity in the mode of LIA-30 electron beam focusing //15-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS'2004. – 2004, – С. 155-157.
80. Басманов В.Ф., Гордеев В.С., Горностай-Польский С.А. и др. Модернизация ускорительных блоков мощного линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-30//Проблемы физики высоких плотностей энергии. XII Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. – 2010. С. 67-72.
81. Бочвар И. А., Гимадова Т. И., Кеирим-Маркус И. Б., Кушнерев А. Я., Якубик В. В., Метод дозиметрии ИКС. – М. : Атомиздат, 1977. – 216 с.
82. Уайт Г.К., Экспериментальная техника в физике низких температур (справочное руководство), Государственное издательство физико-математической литературы. – 1961.
83. Griscom D. L. Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers: Reduction of induced absorption bands associated with self-trapped holes // Applied physics letters. – 1997. – Т. 71. – №. 2. – С. 175-177.

84. Deparis O., Mégret P., Decréton M., Blondel M., Evolution of the 660 nm radiation induced band in a low OH low Cl optical fiber // Electron. Lett. – 1996. – T. 32. – №. 15, – C. 1392-1393.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Tomashuk A.L., Filippov A.V., Moiseenko A.N., Tatsenko O.M., Zavalov N. V., Grunin A. V., Batova E. T., Salgansky M. Yu., Kashaykin P. F., Azanova I. S., Tsibinogina M. K., Levchenko A. E., Guryanov A. N., Dianov E. M., Pulsed-Bremsstrahlung-Radiation Effect on Undoped- and Ge-Doped-Silica-Core Optical Fibers at Wavelength of 1.55 μm // IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology. – 2017. – Т. 35. – №.11. – С. 2143-2149.
- A2. Moiseenko A.N., Markevtsev I. M., Tatsenko O. M., Platonov V. V., Filippov A. V., Bychkova E. A., Victorov I. V., Kopkin A. Yu., Optical Absorption of Quartz Fibers at Pulsed Irradiation With High-Energy γ -Quanta // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Т. 45. – №.6. – С. 990-996.
- A3. Томашук А.Л., Филиппов А.В., Моисеенко А.Н., Бычкова Е.А., Таценко О.М., Галанова С.В., Грунин А.В., Салганский М.Ю., Кашайкин П.Ф., Левченко А.Е., Селемир В.Д., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М., Рекордно высокая стойкость к импульсному воздействию ионизирующего излучения волоконного световода с сердцевиной из нелегированного SiO_2 // Труды 6^{ой} Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь, 3-6 октября 2017 г.), Фотон-Экспресс. – 2017. – №6(142). – С. 117-118.
- A4. Азанова И.С., Цибиногина М.К., Димакова Т.В., Вохмянина

- О.Л., Шаронова Ю.О., Поспелова Е.А., Кашайкин П.Ф., Филиппов А.В., Таценко О.М., Левченко А.Е., Томашук А.Л., «Радиационно-стойкие двулучепреломляющие световоды типа «ПАНДА» для применений на космических летательных аппаратах и в условиях воздействия импульсного ионизирующего излучения», Труды 6^{ой} Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь, 3-6 октября). Фотон-Экспресс. – 2017. – №6(142). – С. 119-120.
- A5. Tomashuk A.L., Kashaykin P.F., Azanova I.S., Filippov A.V., Sharonova Yu.O., Vokhmyanina O.L., Vychkova E.A., Galanova S.V., Light absorption induced in undoped-silica-core Panda-type birefringent optical fiber by pulsed action of ionizing radiation // Bulletin of the Lebedev Physical Institute. – 2018. – Т. 45. – №. 12. – С. 385-388.
- A6. Томашук А. Л., Кашайкин П.Ф., Азанова И. С., Шаронова Ю. О., Вохмянина О. Л., Филиппов А.В., Бычкова Е. А., Галанова С. В., Поглощение света, наведенное в двулучепреломляющем волоконном световоде типа "панда" с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла импульсным излучением // Краткие сообщения по физике. – 2018. – Т. 12. – С. 21-26.
- A7. Tomashuk A. L., Filippov A.V., Kashaykin P. F., Vychkova E. A., Galanova S. V., Tatsenko O. M., Kuzyakina N. S., Zverev O. V., Salgansky M. Yu., Abramov A. N., Guryanov A. N., Dianov E. M., Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-

- radiation effect on pure-silica core optical fibers // Journal Of Lightwave Technology. – 2019. – Т. 37. – №. 3. –С. 956-963.
- A8. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Azanova I.S., Vokhmyanina O.L., Dimakov T.V., Maltsev I.A., Sharonova Yu.O., Pospelova E.A., Filippov A.V., Tatsenko O.M., Kuzyakina N.S., Zverev O.V., Dianov E.M., Radiation induced attenuation in pure silica polarization maintaining fibers // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. –Т. 508. –С. 26–32.
- A9. Tomashuk A.L., Filippov A.V., Kashaykin P.F., Salgansky M.Yu, Glushkov S.L., Tatsenko O.M., Guryanov A.N., Semjonov S.L., 1.55- μm -light absorption induced by pulsed-X-ray radiation in pure-silica core fiber: Effects of light power and temperature // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. – Т. 521. – С. 119504
- A10 Томашук А.Л., Кашайкин П.Ф, Семенов С.Л., Филиппов А.В., Бычкова Е.А, Галанова С.В., Азанова И.С., Вохмянина О.Л., Пospelova Е.А., Шаронова Ю.О., Димакова Т.В., Волошин В.В., Воробьев И.Л., Колосовский А.О., Чаморовский Ю.К., Голант К.М. «Сравнительное исследование радиационной стойкости световодов типа «панда» с сердцевинами из чистого и легированного азотом кварцевых стекол», Труды 7^{ой} Всероссийской конференции по волоконной оптике (8-11 октября 2019 г.). Спецвыпуск «Фотон-Экспресс-Наука». – 2019.– № 6. – С. 184-185.
- A11. Tomashuk A. L., Kashaykin P. F., Filippov A.V., Semjonov S. L.,

- Bychkova A. V., Galanova S. V., Zavyalov N. V., Azanova I. S., Vokhmyanina O. L., Pospelova E. A., Sharonova Yu. O., Dimakova T. V., Voloshin V. V., Vorob'ev I. L., Kolosovskii A. O., Chamorovskiy Yu. K., Comparison Study of Radiation-Resistant Polarization-Maintaining PANDA Fibers with Undoped- and N-Doped-Silica Core // *Journal Of Lightwave Technology*. – 2020. –T. 38. – №. 20. –C. 5817 – 5824.
- A12. Tomashuk A. L., Kashaykin P. F., Semjonov S. L., Filippov A.V., Bychkova E. A., Galanova S. V., Azanova I. S., Vokhmyanina O. L., Pospelova E. A., Sharonova Yu. O., Dimakova T. V., Voloshin V. V., Vorob'ev I. L., Kolosovskii A. O., Chamorovskiy Yu. K., Pulsed-X-Ray-Irradiation of Radiation-Resistant Panda Fibers: Dependence on Dose, Probe Light Power, and Temperature // *Optical Materials*. – 2020. –T. 109. – C. 110384.
- A13. Tomashuk A.L., Filippov A.V., Kashaykin P.F., Salgansky M.Yu., Vasiliev S.A., Zverev O.V., Guryanov A.N., Semjonov S.L., Behavior of strain-assisted self-trapped holes in pure-silica optical fibers upon pulsed-X-ray irradiation // *Journal of Non- Crystalline Solids*. – 2021. –T. 566. – C. 120880