

На правах рукописи

Кашайкин Павел Федорович

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ С
СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОГО И ЛЕГИРОВАННОГО
ГЕРМАНИЕМ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ**

01.04.07 - Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научном центре волоконной оптики Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Томашук Александр Леонидович

Защита состоится « » _____ 2019 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу 119991, Москва, ул. Вавилова, 38, корп. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.gpi.ru/> Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Макаров Вячеслав Петрович
тел. 8 (499) 503-87-77, доб. 394

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Для ряда перспективных применений волоконных световодов (ВС) их важнейшей характеристикой является радиационная стойкость. Это относится к использованию ВС в атомной энергетике, космическом пространстве, к военным применениям.

В условиях воздействия на ВС ионизирующего излучения (в данной работе изучается случай γ -излучения) в сетке стекла возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски, РЦО), поглощающие световой сигнал, в том числе, в спектральном окне для оптической связи в ближнем ИК диапазоне (~1310–1550 нм). Данное явление известно, как радиационно-наведенное поглощение (РНП) света. Обеспечение радиационной стойкости ВС означает подавление РНП до приемлемого уровня.

Ранее утверждалось, что, рекордно высокой радиационной стойкостью обладают ВС с сердцевиной и оболочкой из кварцевого стекла, легированного фтором [1]. Заготовки (преформы) таких ВС изготавливаются по технологии PCVD [2] (фирма «Draka», Нидерланды) или при последовательном применении двух технологий: технологии VAD для синтеза сердцевины, и технологии OVD для синтеза оболочки (фирма «Fujikura», Япония) [3]. ВС со фторсиликатной сердцевиной «RRSMFB» фирмы «Fujikura» в некоторых работах рассматриваются как мировые лидеры по радиационной стойкости.

В России наиболее распространённой технологией изготовления преформ и единственной освоенной на промышленном уровне является MCVD («modified chemical vapor deposition» – химическое осаждение из газовой фазы) [4]. Однако, введение фтора в сердцевину в MCVD-процессе приводит к возникновению дополнительных оптических потерь в ВС из-за «вытекания» света. Поэтому актуальной задачей данной работы являлось достижение высокой радиационной стойкости ВС с нелегированной сердцевиной из кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой («нелегированные» ВС) в технологии MCVD.

Известно, что стандартные ВС с легированной германием сердцевиной и нелегированной оболочкой («германосиликатные» ВС) уступают по радиационной стойкости нелегированным ВС. Тем не менее, в фирме «j-fiber» (Германия) промышленно производятся номинально радиационно стойкие германосиликатные ВС. Они известны как «j-fiber-MIL-PRF-49291/7c» и даже были аттестованы в армии США как пригодные для военных применений [5]. Эти световоды не отличаются рекордной радиационной стойкостью, но имеют малую стоимость, что и делает их привлекательными для применений в малоинтенсивных радиационных полях.

Таким образом, в данной работе представляло интерес исследование радиационной стойкости обоих вышеуказанных типов ВС (нелегированных и германосиликатных), при этом акцент делался на наиболее перспективные нелегированные ВС.

Предыдущие «классические» работы по исследованию механизмов РНП в нелегированных ВС были проведены, в основном, в видимом и УФ-диапазонах, так как именно там располагаются максимумы полос поглощения основных РЦО [6, 7]. До настоящей работы детального исследования механизмов РНП в терминах конкретных РЦО, ограничивающих радиационную стойкость нелегированных ВС в ближнем ИК-диапазоне, проведено не было. Ранее не изучалось и влияние на радиационную стойкость таких технологических факторов как соотношение расходов реагентов в MCVD-процессе. Это не позволяло целенаправленно оптимизировать радиационную стойкость ВС.

На радиационную стойкость могут влиять и условия вытяжки ВС из преформы. Закалочные условия в процессе вытяжки приводят к «вмораживанию» различного рода структурных дефектов, деформаций и напряжений, которые могут стать предшественниками РЦО. Однако, к началу данной работы не было понимания механизмов влияния условий вытяжки на образование РЦО в нелегированных ВС, а существующие исследования носили феноменологический характер и в значительной степени противоречили друг другу [3, 8, 9].

Отечественные нелегированные MCVD-световоды с относительно высокой радиационной стойкостью в ближнем ИК-диапазоне были ранее разработаны в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН) [10]. Однако использованные технологические пути достижения радиационной стойкости описаны не были. Было неясно, является ли радиационная стойкость этих ВС предельной для MCVD-технологии, либо можно добиться ее повышения за счет изучения закономерностей возникновения РЦО и соответствующей оптимизации режимов MCVD-процесса и вытяжки ВС.

Несмотря на то, что германосиликатные ВС являются наиболее распространенными, РЦО, проявляющие себя в таких ВС в ближнем ИК-диапазоне, были также исследованы крайне недостаточно. В частности, не был установлен основной РЦО, определяющий РНП в спектральном диапазоне для оптической связи и ответственный за недостаточную радиационную стойкость таких ВС. Это сделано в данной работе.

Для ряда важных применений необходима работа ВС в широком температурном диапазоне [11], однако влияние температуры в процессе облучения на РНП к началу данной работы было изучено недостаточно. Было известно, что для стандартных германосиликатных ВС РНП в ближнем ИК-диапазоне монотонно возрастает с уменьшением температуры, однако, для нелегированных ВС имелись достаточно противоречивые данные, из которых нельзя было сделать однозначные выводы о характере зависимости РНП от температуры в процессе облучения.

Цели работы

Таким образом, целями данной работы было определение зависимости РНП в ближнем ИК-диапазоне в нелегированных ВС от условий MCVD-процесса синтеза стекла преформы, условий вытяжки ВС и от температуры последующего γ -облучения, а также поиск возможностей снижения РНП в таких ВС путем

оптимизации технологических режимов. Также целью работы был поиск и исследование новых РЦО в нелегированных и германосиликатных ВС.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи. Первые четыре задачи относятся к нелегированным ВС, пятая задача – к германосиликатным ВС:

1. Определение механизмов РНП в ближнем ИК-диапазоне.
2. Исследование зависимости РНП от технологических режимов MCVD-процесса и их оптимизация.
3. Исследование зависимости РНП от условий вытяжки (температура, скорость, натяжение) и их оптимизация.
4. Исследование зависимости РНП от температуры в процессе γ -облучения.
5. Исследование зависимости спектров РНП в германосиликатных ВС от концентрации германия в сердцевине и температуры в процессе γ -облучения.

Научная новизна

● В световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла впервые обнаружены полосы РНП с максимумами на длинах волн 477 и 574 нм (2,6 и 2,16 эВ), принадлежащие двум различным типам самозахваченных дырок на немостиковых *p*-орбиталях атомах кислорода сетки стекла («self-trapped holes», STH), которые ранее наблюдались только в объемных образцах кварцевого стекла. Предложена и обоснована классификация STH на «собственные» и «деформационные». Первые отличаются крайне малым временем жизни; они присутствуют как в объемных образцах кварцевого стекла, так и в световодах. «Деформационные» STH, присутствуют только в световодах, т.е. образцах с более напряженной сеткой стекла из-за деформаций, «вмороженных» при вытяжке.

- Впервые выявлено и дано объяснение аномальному увеличению РНП в световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла при температуре $T \sim 0$ °С, которое обусловлено ростом полос РНП «деформационных» СТН с максимумами на длинах волн 660 и 760 нм (188 и 163 эВ) из-за аномального сжатия кварцевого стекла при этой температуре. В этих же световодах обнаружена и исследована ранее неизвестная полоса РНП с центром на $\lambda \sim 1250$ нм ($E \sim 1$ эВ), которая более интенсивна при низких температурах ($T < -30$ °С) и может в значительной степени ограничивать радиационную стойкость в ближнем ИК-диапазоне.

- Впервые в ВС с высоколегированной германосиликатной сердцевинной (50 мол. % GeO_2) обнаружена полоса РНП с центром на $E \leq 0,8$ эВ негауссовой формы, обусловленная поглощением «собственных» СТН. В световодах со слаболегированной германосиликатной сердцевинной (3,5 мол.% GeO_2) обнаружена сравнительно долгоживущая полоса РНП гауссовой формы с максимумом на 1,38 эВ, с шириной на полувысоте 0,71 эВ и энергией активации 0,15 эВ. Установлено, что данная полоса является основным механизмом, ограничивающим радиационную стойкость стандартных германосиликатных ВС для оптической связи в ближнем ИК-диапазоне.

- Впервые установлено, что РНП световодов с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой зависит от соотношения расходов молярного кислорода и тетрахлорида кремния в процессе синтеза сердцевинной преформы в MCVD-процессе. Выявлено, что для максимального подавления РНП в таких световодах необходимо, во-первых, использовать большой избыток кислорода над тетрахлоридом кремния. Это требуется для подавления вхождения хлора в сетку стекла. Во-вторых, необходимо, чтобы этот избыток был строго сбалансирован с количеством фтора в оболочке для выравнивания физико-химических свойств сердцевинной и оболочки и, как следствие, предотвращения «вмораживания» деформаций в сетку стекла световода при вытяжке.

- Впервые установлено, как РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой, преформы которых изготовлены по технологии MCVD, зависит от условий вытяжки. РНП в ближнем ИК-диапазоне существенно возрастает с увеличением температуры вытяжки. С натяжением и скоростью РНП также увеличивается, но в гораздо меньшей степени, чем с увеличением температуры.

Практическая значимость работы

1. Оптимизация процессов изготовления заготовки и вытяжки световода позволила более чем на порядок снизить РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в лабораторной технологии НЦВО-ИХВВ РАН (при дозе до 1 кГр и мощности дозы в интервале и 1,1-1,6 Гр/с) на длине волны 1550 нм. При этих условиях достигнутое в работе РНП совпало со средним значением в серии радиационно стойких световодов «RRSMFB» фирмы «Fujikura», считающихся мировыми лидерами по радиационной стойкости.
2. Сделаны оценки величины РНП в разработанных радиационно стойких световодах, ожидаемые в космических условиях.
3. Созданные экспериментальные методики измерения РНП в процессе γ -облучения при различных температурах, мощностях дозы и интенсивностях зондирующего светового сигнала были использованы при разработке радиационно стойких изотропных и анизотропных световодов в Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПНППК).

Защищаемые положения

1. В спектрах РНП световодов с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла присутствуют полосы с максимумами на 2,6, 2,16 и ~1 эВ.
2. Существуют два касса STH – «собственные» и «деформационные», отличающиеся термостабильностью.
3. Существует аномалия зависимости РНП от температуры в световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла при температуре около 0° С, вызванная экстремальным сжатием кварцевого стекла и соответствующим ростом РНП «деформационных» STH.
4. В световоде с высоколегированной германосиликатной сердцевинной (50 мол.% GeO₂) присутствуют «собственные» STH с РНП в длинноволновой области ($E \leq 0,8$ эВ).
5. В световодах с германосиликатной сердцевинной существует полоса РНП с максимумом на 1,38 эВ, с шириной на полувысоте 0,71 эВ и с интенсивностью, растущей с уменьшением концентрации германия. Эта полоса является основным механизмом, ограничивающим радиационную стойкость стандартных световодов для оптической связи.
6. РНП в световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой достигает минимума при обеспечении большого избытка O₂ над SiCl₄ в парогазовой смеси при синтезе стекла сердцевинной, при этом степень избытка O₂ должна быть согласована с концентрацией фтора в оболочке.
7. При вытяжке световодов с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой увеличение РНП происходит, в основном, из-за высокой температуры печи.
8. РНП в ВС с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла за счет оптимизации процессов изготовления преформы и вытяжки световодов может быть снижено до мирового рекордного уровня.

Личный вклад

Диссертационная работа является результатом работы автора в Научном центре волоконной оптики РАН с 2012 года и представляет собой обобщение исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками НЦВО РАН (Москва, Россия) и ИХВВ РАН (Н.-Новгород, Россия). Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Достоверность полученных результатов обеспечивается высоким уровнем экспериментальной техники, надёжной статистикой экспериментов и применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных.

Апробация работы

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

- Международная научная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (МНКШ, Россия, г. Саранск, 2013, 2014, 2015 г);
- Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО, Россия, г. Пермь, 2013, 2015 и 2017 г);
- II симпозиум VII школа молодых учёных «Новые высокочистые материалы» (Россия, г. Нижний Новгород, 2013 г);
- VIII Всероссийская конференция с международным участием молодых ученых по химии «Менделеев-2014» (Россия, г. Санкт-Петербург, 2014 г);
- «International Symposium on Optics and Optoelectronics» Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE, Чехия, г. Прага, 2015 г);

- Всероссийская конференция «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ применения» (Россия, г. Нижний Новгород, 2015, 2018 г);
- IV Международная конференция по химии и химической технологии, (Армения, г. Ереван, 2015 г);
- «Photonics Europe» Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE, Франция, г. Страсбург, 2018 г);
- «Advanced Photonics Congress» The Optical Society of America (Швейцария, г. Цюрих, 2018 г).

Также основные результаты работы неоднократно докладывались на семинарах и конкурсах молодых сотрудников ИЦВО РАН.

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 23 научных работах, 9 из которых – в изданиях, содержащихся в базах данных Web of Science или Scopus, 1 работа – в журнале из списка ВАК, 1 – патент РФ на изобретение. Кроме того, опубликованы 12 работ в других изданиях. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Диссертационный материал представлен на 147 печатных страницах, включая 59 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность и проблематика диссертационной работы, определены цели и соответствующие им задачи, обоснована научная новизна, практическая значимость и сформулированы основные положения,

выносимые на защиту.

В первой главе сделан обзор литературный данных по радиационным центрам окраски (РЦО) в нелегированных и легированных германием волоконных световодах из кварцевого стекла. Проанализированы спектральные характеристики РЦО, известных на начало диссертационной работы, и их влияние на РНП в ближнем ИК-диапазоне.

Обобщены работы по зависимости РНП в ближнем ИК-диапазоне от условий процесса изготовления заготовки и вытяжки из неё ВС. Также проведен обзор исследований по влиянию температуры окружающей среды на радиационную стойкость.

Из огромного числа РЦО, имеющих полосы поглощения в видимом и УФ-диапазонах, только некоторые могут ограничивать радиационную стойкость световода и в ближнем ИК диапазоне.

РНП световодов с нелегированной и легированной германием сердцевиной на длинах волн 1310-1550 нм состоит из коротковолнового и длинноволнового «хвостов», обусловленных РЦО с максимумами полос поглощения, лежащими вне самого этого диапазона. Однако, до начала настоящей работы не были достоверно установлено, какие именно РЦО определяют эти хвосты, а также их вклад в суммарное РНП в ближнем ИК диапазоне. Также не было достоверно известно, каким образом технологические параметры MCVD-процесса, такие как соотношение расходов реагентов при синтезе заготовки, и условия вытяжки влияют на радиационную стойкость нелегированных ВС. Кроме того, так как РНП в ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне определяется несколькими РЦО, которые обладают различной термостойкостью, достоверно не было известно, каким будет их соотношение при температуре, отличающейся от нормальной (комнатной).

Во второй главе описаны особенности технологии изготовления заготовок одномодовых волоконных световодов с нелегированной сердцевиной и фторсиликатной светоотражающей оболочкой. Представлены методики γ -облучения и исследования спектров РНП. Описана разработанная в рамках

данной работы методика исследования зависимости РНП от температуры в процессе облучения.

Синтез заготовок ВС осуществлялся методом MCVD в ИХВВ РАН (г. Н. Новгород). Для исследования зависимости РНП от концентрации фтора в сердцевине и оболочке были изготовлены ВС с различной его концентрацией с разностью показателей преломления сердцевины и оболочки от 0,005 до 0,01. С целью исследования зависимости РНП от соотношения реагентов в процессе синтеза нелегированной сердцевины менялось соотношение молярных расходов O_2 и $SiCl_4$ в парогазовой смеси.

Из полученных заготовок в ИЦВО РАН вытягивались световоды, с заранее заданными параметрами вытяжки (температура, натяжение, скорость).

Спектры начальных оптических потерь регистрировались с помощью установки на базе монохроматора МДР-12 и/или спектроанализатора ANRITSU MS297100A методом «обрыва» и методом обратного рассеяния на рефлектометре EXFO FTB 400

Исследование спектров РНП происходило в процессе гамма-облучения от источника ^{60}Co (установка ГУТ-200М в Курчатовском ядерно-технологическом комплексе НИЦ «Курчатовский Институт») и/или после завершения облучения. В последнем случае измерения проводились по тем же вышеописанным методикам, что и измерения начальных оптических потерь. Мощность дозы облучения могла варьироваться от 0,75 до 7,6 Гр/с в зависимости от расстояния до облучателя и активности изотопа ^{60}Co в стержнях облучателя на момент эксперимента.

В процессе облучения с заранее заданным временным шагом происходила регистрация спектров в ближнем ИК-диапазоне с помощью спектрометров на линейке диодов InGaAs Avantes NIR-128 (1100-1700 нм) и NIRQuest 512 Ocean Optics (900-1750 нм). Источником света во всех экспериментах служила галогеновая лампа HL-2000, для минимизации фотообесцвечивания видимая часть спектра обрезалась с помощью фильтра ИКС-3 ($\lambda < 900$ нм). Мощность оставшегося света от лампы в этом случае в ближнем ИК-диапазоне не

превышала 0,5 мкВт. Для исследований РНП в видимом диапазоне использовался CCD спектрометр USB-2000 Ocean Optics (200-870 нм).

Для измерений температурной зависимости РНП в процессе облучения была разработана оригинальная методика и сконструирована экспериментальная установка на основе термостата с системой поддержания температуры, позволяющая проводить облучение ВС в температурном диапазоне от -196 до 200 °С с одновременной регистрацией спектров РНП.

В третьей главе представлены результаты исследований зависимости РНП нелегированных ВС в ближнем ИК-диапазоне от соотношения расходов реагентов при синтезе сердцевин в MСVD-процессе.

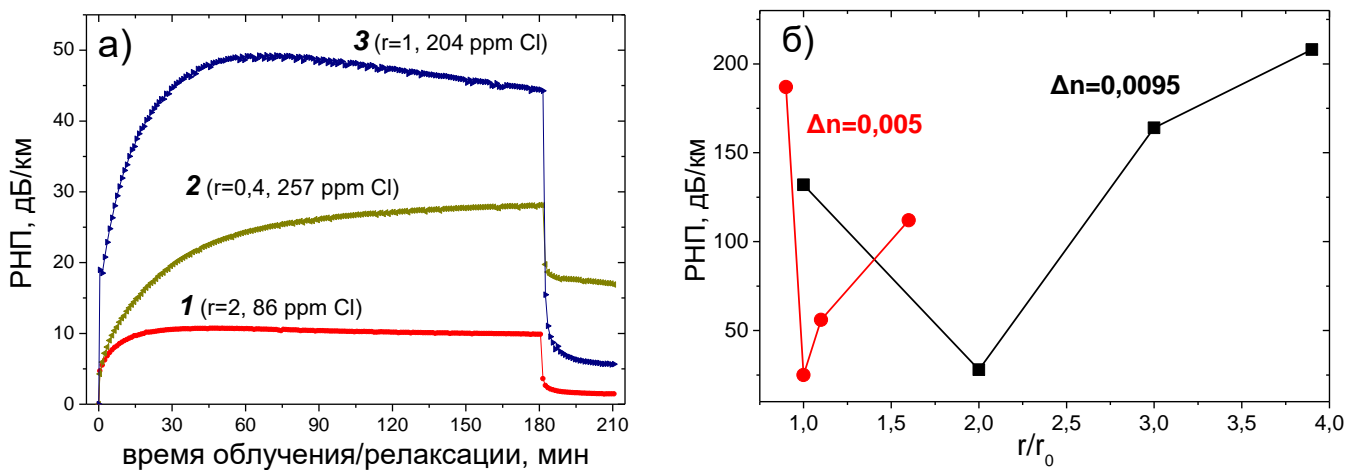


Рис. 1. (а) Зависимость РНП от времени в процессе γ -облучения (0-180 мин.) и после завершения облучения (180-210 мин.) на длине волны $\lambda=1310$ нм. Мощность дозы 0,75 Гр/с, доза в точке 180 мин. – 8,1 кГр. В скобках указано соотношения молярных расходов O_2 и $SiCl_4$ при синтезе сердцевин r , нормированное на $r_0=29$, и концентрация хлора в сердцевине.

(б) Зависимость РНП на длине волны $\lambda=1550$ нм от соотношения молярных расходов O_2 и $SiCl_4$ при синтезе сердцевин r , нормированного на $r_0=29$, при поглощенной дозе 7,1 кГр для ВС с различным Δn , мощность дозы 7,6 Гр/с.

Из анализа спектров и временных зависимостей РНП были определены основные механизмы, ограничивающие радиационную стойкость в ближнем ИК-диапазоне. Монотонный рост РНП с поглощённой дозой и слабая релаксация после облучения обусловлены поглощением Cl^0 -центра (ВС-2, рис. 1 а) [12], а переходный характер РНП (ВС-3, рис. 1 а) связан со специфическим поведением

СТН, имеющих полосы поглощения на длинах волн 660 и 760 нм (1,88 и 1,63 эВ) [13].

В работе установлено, что использование большого избытка O_2 над $SiCl_4$ в парогазовой смеси в процессе MCVD при синтезе сердцевины (отношение молярных расходов O_2 и $SiCl_4$ не менее ~60) приводит к значительному подавлению вхождения атомарного хлора в сетку стекла и соответствующему подавлению РЦО, связанных с хлором (BC-1 рис. 1 а). Установлено также, что такой же большой избыток O_2 над $SiCl_4$ приводит к подавлению длинноволнового «хвоста» РНП. Однако, для уменьшения напряжений и деформацией, замороженных в сетку стекла в процессе вытяжки ВС и являющихся предшественниками СТН, оказалось необходимо, чтобы величина избытка O_2 была точно сбалансирована с концентрацией фтора во фторсиликатной оболочке ВС. В этом случае происходит выравнивание физико-химических свойств сердцевины и оболочки световода (таких как КТР, температура стеклования и вязкость), что и приводит к снижению напряжений и деформаций сетки стекла при вытяжке.

Установлено, что оптимальное (или близкое к оптимальному) значение r (r – соотношение молярных расходов O_2 и SiO_2 при MCVD-синтезе сердцевины, нормированное на $r_0=29$) для ВС с $\Delta n=0,0095$ равно 2,0, а для световодов с $\Delta n=0,005$ близким к оптимальному является $r=1,0$. При данных соотношениях достигается минимум РНП на длине волны $\lambda=1550$ нм, при этом РНП как функция r имеет резонансный характер (рис.1 б).

Вторая часть третьей главы посвящена исследованию влияния условий вытяжки на радиационную стойкость ВС в ближнем ИК-диапазоне. Для этого были изготовлены ВС при вариации температуры, натяжения и скорости при вытяжке (Табл.1).

Таблица.1. Параметры вытяжки исследуемых ВС

Название заготовки	Номер режима	Температура, °С	Натяжение, г	Скорость, м/мин
F1	M1	1880	38	35
	M2	1900	26	33
	M3	1920	21	33
F2	M1	1840	43	36
	M2	1860	38	38
	M3	1890	28	38
F3	M1	1815	30	13
	M2		50	26
	M3		70	42
F4	M1	1805	19	10
	M2		27	14
	M3		50	30
F5	M1	1780	85	35
	M2	1800	30	20
F6	M1	1790	60	40
F7	M1	1790	51	37
F8	M1	1700	100	12

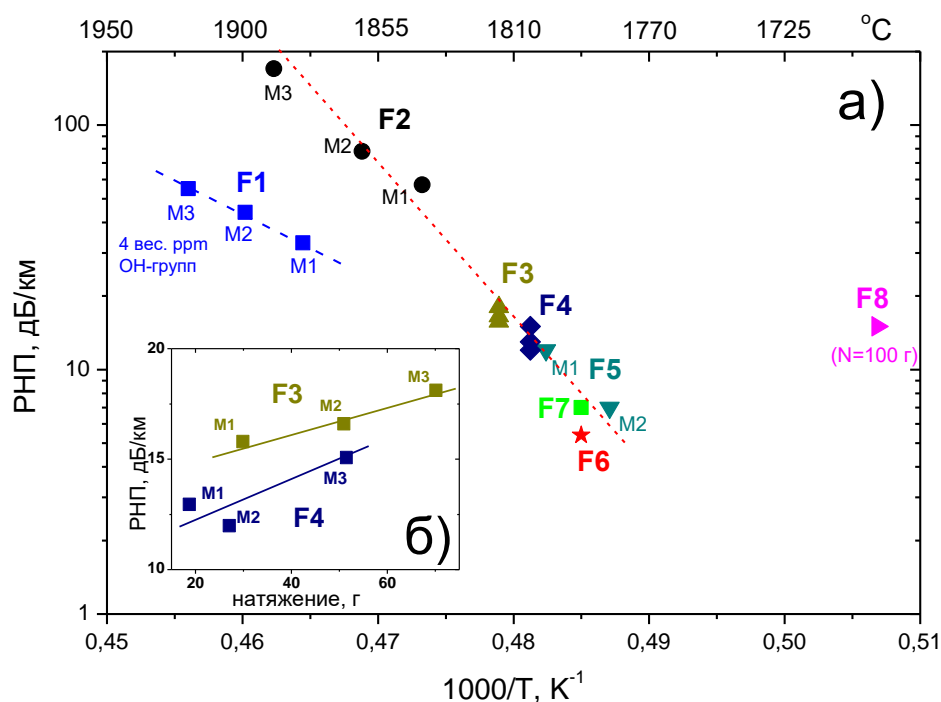


Рис. 2. Зависимость РНП в процессе γ -облучения на длине волны $\lambda=1550$ нм от обратной температуры при вытяжке (а) и от натяжения при вытяжке (б) при поглощенной дозе 2,5 кГр и мощность дозы 7,4-7,6 Гр/с.

Было установлено, что РНП в ближнем ИК-диапазоне в нелегированных ВС в процессе их γ -облучения в значительной мере зависит также и от условий их вытяжки. При этом, наибольшее влияние оказывает температура печи (рис. 2 а), а не натяжение, как это утверждалось в фирме «Fujikura» [3] для случая световодов со фторсиликатной сердцевиной, полученной по технологии VAD, и

фторсиликатной оболочкой, полученной по технологии OVD.

В наших экспериментах установлено, что уменьшение температуры на $T \sim 100$ °С приводит к уменьшению РНП более чем на порядок величины. Однако, значительное её понижение ($T < 1790$ °С) ведет уже к увеличению РНП, что в нашем случае, по-видимому, связано с ростом натяжения вытяжки (BC-F8, рис. 2 а), которое также влияет на РНП в ближнем ИК-диапазоне, но в гораздо меньшей степени (рис. 2 б). Также установлено, что повышенное содержание ОН-групп приводит кроме уменьшения общего уровня РНП ещё и к ослаблению самой зависимости РНП от температуры вытяжки (BC-F1 рис. 2 а).

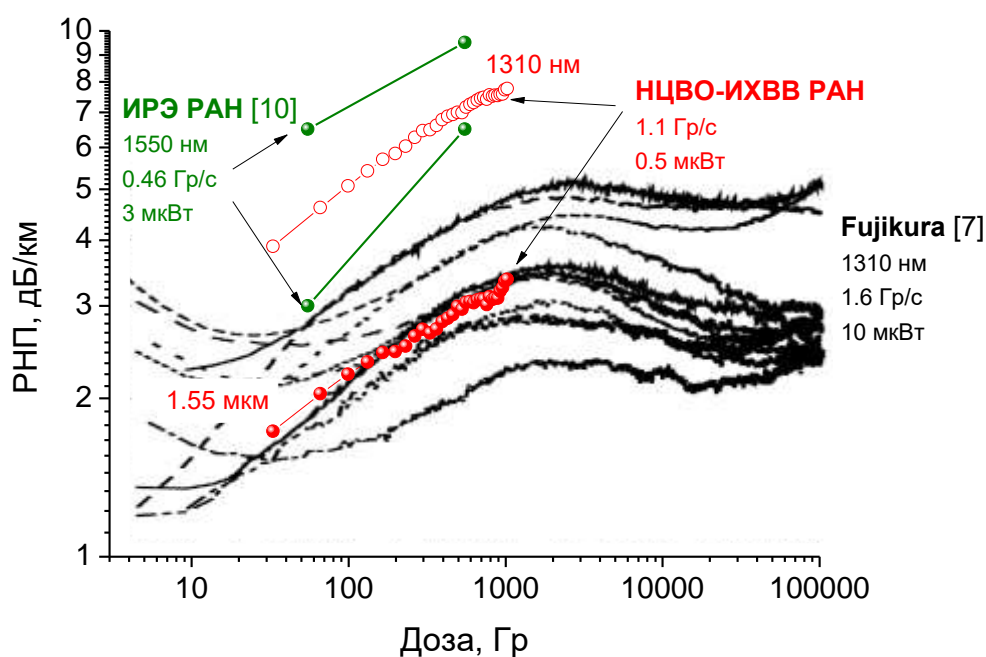


Рис. 3 Сравнение зависимостей РНП от дозы для оптимизированного световода НЦВО-ИХВВ РАН, радиационно-стойких световодов ИРЭ РАН [10] и световодов фирмы «Fujikura» [1]. ВС «НЦВО-ИХВВ РАН» (красные открытые круги – $\lambda=1310$ нм, сплошные – $\lambda=1550$ нм) облучался при мощности дозы 1,1 Гр/с при вводимой световой мощности не более 0,5 мкВт. ВС «ИРЭ РАН» (зеленые круги) облучались при мощности дозы 0,46 Гр/с при вводимой световой мощности не более 3 мкВт, $\lambda=1550$ нм (две зависимости, указанные зеленым, принадлежат двум ВС, изготовленным с различными технологическими параметрами [10]). Номинально одинаковые ВС «RRSMFB» «Fujikura» (черные линии) облучались при мощности дозы 1,6 Гр/с при вводимой световой мощности не более 10 мкВт, множественные зависимости РНП от дозы соответствуют неконтролируемому разбросу РНП серийной коммерческой продукции [1]. Немаловажно, что в ВС «RRSMFB» фирмы «Fujikura» РНП на $\lambda=1550$ и 1310 нм одинаково в рассматриваемом диапазоне доз [1].

На основе полученных зависимостей РНП от технологических параметров изготовления преформы и ВС, была проведена оптимизация режимов МСVD процесса и параметров вытяжки. В результате удалось более чем на порядок снизить уровень РНП для ВС, изготовленных в лабораторной технологии НЦВО-ИХВВ РАН, и более чем в два раза повысить радиационную стойкость отечественных ВС с нелегированной сердцевиной, разработанных в ИРЭ РАН (рис. 3). Из рис. 3 видно, что на длине волны $\lambda=1550$ нм оптимизированные нелегированные ВС НЦВО-ИХВВ РАН попадают в разброс РНП в серии радиационно стойких световодов «RRSMFB» фирмы «Fujikura», считающихся мировыми лидерами по радиационной стойкости.

В четвертой главе представлены результаты исследования зависимости РНП в видимом и ближнем ИК-диапазоне от температуры, поддерживаемой при γ -облучении, для ВС с нелегированной и легированной германием сердцевиной.

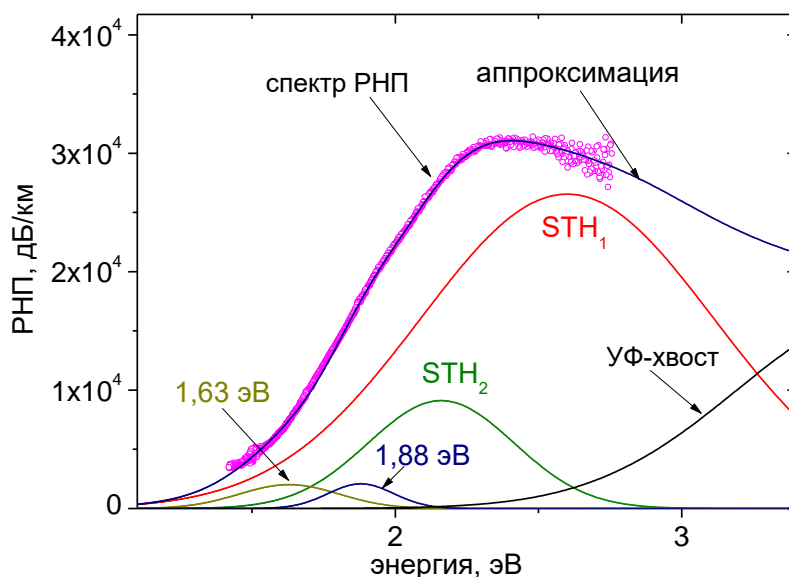


Рис. 4. Спектр РНП в нелегированном ВС, измеренное в процессе γ при $T=77$ К (-196 °С) и поглощенной дозе 1 кГр, и его гауссово разложение. УФ-хвост соответствует поглощению самозахваченных электронов; параметры полос поглощения взяты из [11,14].

Из спектров РНП при температуре $T=77$ К (-196 °С) в диапазоне 450-870 нм для нелегированных ВС, изготовленных при различных технологических режимах МСVD-процесса, впервые были выявлены полосы РНП с максимумами

на длинах волн 477 и 574 нм (2,6 и 2,16 эВ соответственно) принадлежащие STH (рис. 4). Ранее данные полосы наблюдались только в объемных образцах кварцевого стекла [14], и считалось, что в ВС вместо них возникают полосы РНП на 660 и 760 нм [13] (1,88 и 1,63 эВ соответственно). Эти полосы также были найдены нами в спектрах РНП исследуемых ВС, однако при $T=77$ К они обладали гораздо меньшей интенсивностью, чем полосы на 2,6 и 2,16 эВ (рис. 4).

На основе анализа поведения вышеперечисленных полос РНП была предложена концепция двух классов STH – «собственных» и «деформационных». К первому классу относятся полосы с максимумами на 2,16, 2,6 и 0,8 эВ. Эти полосы характеризуется малым временем жизни: они наблюдаются при непрерывном гамма-облучении только при пониженных температурах. К деформационным STH относятся полосы РНП с максимумами на 1,63 и 1,88 эВ. Данные полосы могут наблюдаться и при комнатной температуре в процессе облучения и возникают из-за напряжений (деформаций), замороженных в сетку кварцевого стекла в процессе вытяжки ВС.

Из зависимости спектров РНП от температуры в интервале $T=\pm 60$ °С было выявлено аномальное увеличение РНП при $T\sim 0$ °С, обусловленное экстремальным ростом полос РНП деформационных STH (рис. 5). Сделан вывод, что данное явление обусловлено минимумом линейного расширения кварцевого стекла при данной температуре, наблюдавшегося в [15]. Так как явление аномального РНП при $T=0$ °С обусловлено деформационными STH , то оно в меньшей степени выражено в оптимизированных, наименее напряженных ВС (рис. 5 а).

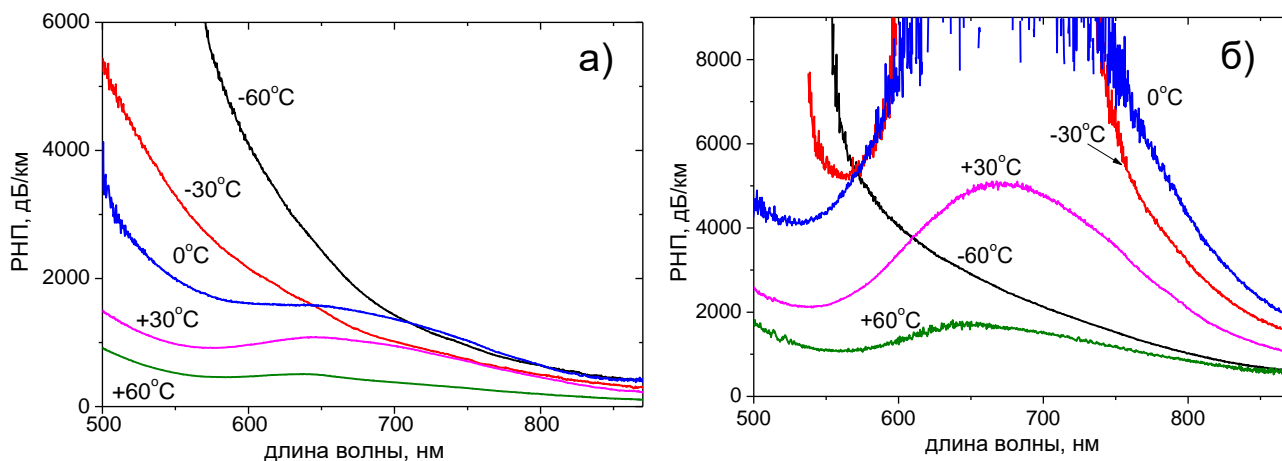


Рис.5. Спектры РНП в процессе γ -облучения при поглощенной дозе 1 кГр в температурном диапазоне $T=\pm 60$ °С для оптимизированного (а) и неоптимизированного (б) ВС.

Из спектров РНП в ближнем ИК-диапазоне, зарегистрированных в интервале температур $T=\pm 60$ °С в нелегированных ВС, обнаружена ранее неизвестная полоса РНП с максимумом на длине волны $\lambda \sim 1250$ нм ($E \sim 1$ эВ) (рис. б). Данная полоса проявляется особенно при низких температурах $T < 30$ °С в виде переходного поглощения, резко возрастающая в самом начале облучения до поглощенной дозы ~ 30 Гр и распадаясь при дальнейшем увеличении дозы. Подобное поведение свойственно для «деформационных» СТН [12], однако, так как полоса РНП 1250 нм имеет малое время жизни и малую термостабильность, то, по-видимому, она принадлежит к классу «собственных» СТН. Установлено, что в исследуемом температурном диапазоне данное РНП характерно только для напряженных, неоптимизированных ВС, однако, при более низкой температуре или большей мощности дозы, эта полоса РНП может проявиться и в оптимизированных ВС.

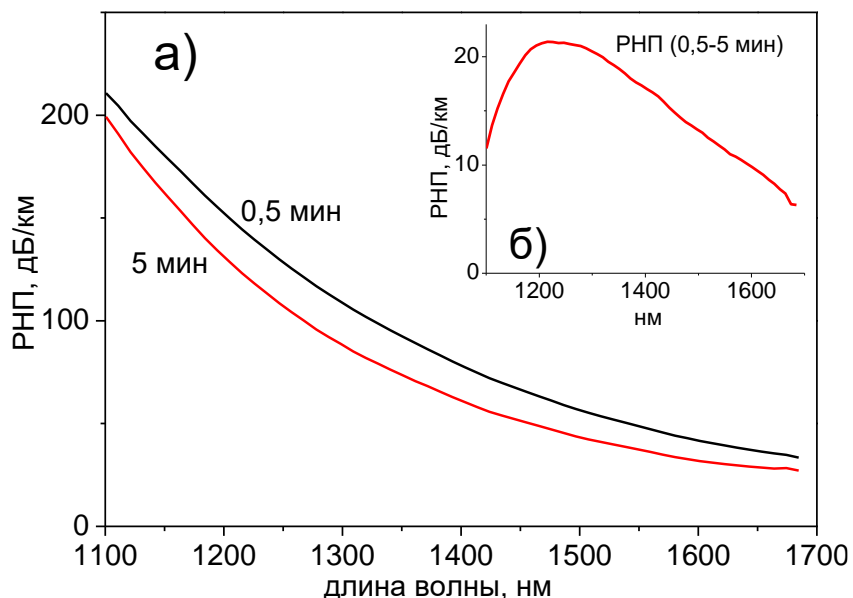


Рис. 6. Спектры РНП, измеренные в нелегированном ВС в процессе γ -облучения в моменты времени 0,5 и 5 мин. при $T=-60$ °С и мощности дозы 1,1 Гр/с (а) и их разность (б).

Во второй части четвертой главы приведены результаты исследования влияния температуры и содержания GeO_2 в сердцевине на РНП световодов с германосиликатной сердцевиной. Обнаружено, что температурная зависимость РНП для ВС с содержанием GeO_2 от 3,5 до 50 мол. % имеет различный характер: если для слаболегированных ВС (<7 мол. % GeO_2) РНП зависит от температуры «классическим» образом, т.е. монотонно возрастает с уменьшением температуры, то для высоколегированных ВС РНП увеличивается с повышением температуры, что, как известно, обусловлено ростом полосы поглощения GeX -центра, за счет термического распада $\text{Ge}(1)$ -центра [6].

С помощью гауссова разложения спектров РНП германосиликатных ВС была обнаружена ранее неизвестная полоса РНП, названная нами GeY -центром (рис. 7), по аналогии с известным GeX -центром. Максимумом полосы РНП GeY -центра находится на длине волны $\lambda \sim 900$ нм, её полная ширина на полувысоте – 495 нм (более точно в единицах энергии, $1,38 \pm 0,02$ и $0,71 \pm 0,01$ эВ соответственно). Установлено, что амплитуда данной полосы увеличивается с понижением температуры согласно закону Аррениуса с энергией активации 0,15 эВ.

Установлено, что концентрации GeX - и GeY -центров противоположным

образом зависят от температуры в процессе облучения и от содержания германия в сердцевине: концентрация GeX-центров растет, а GeY-центров, наоборот уменьшается с ростом температуры и концентрации GeO₂ в сердцевине.

Поскольку интенсивность полосы РНП GeY-центра растет с уменьшением концентрации германия в сердцевине, поэтому она особенно интенсивна в стандартных ВС для оптической связи, имеющих, как известно, малое содержание германия в сердцевине (~3,5 мол. % GeO₂). Таким образом, полоса GeY-центра является основным РЦО, ограничивающим радиационную стойкость стандартных германосиликатных ВС для оптической связи.

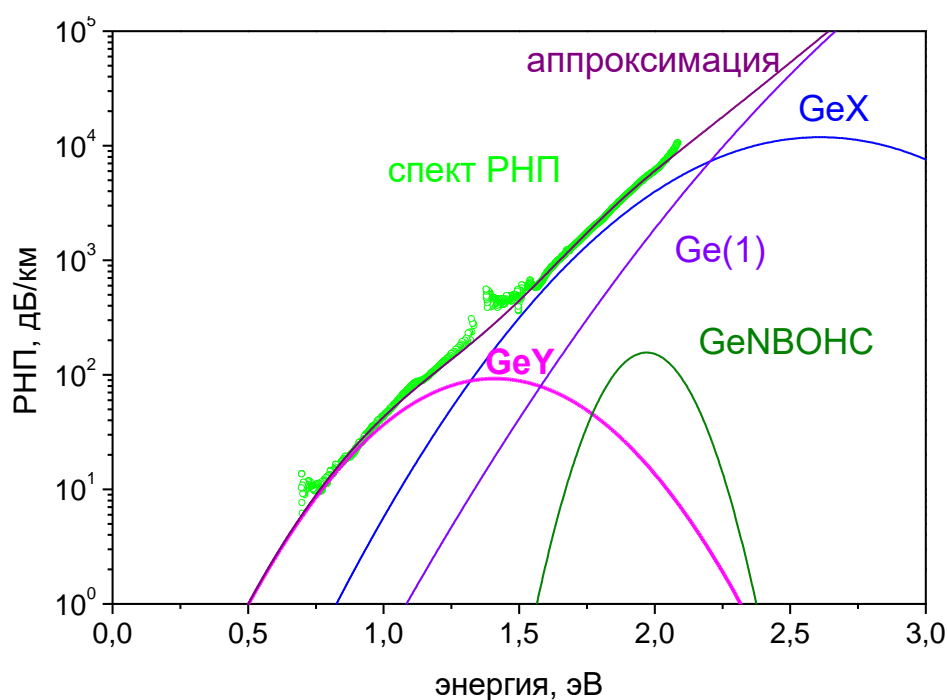


Рис. 7 Спектр РНП германосиликатного ВС (3,5 мол. % GeO₂), измеренный в процессе γ -облучения при $T=+30$ °С и поглощенной дозе 1 кГр, и его гауссово разложение. Параметры известных полос поглощения РЦО взяты из [6]. Видно, что GeY-центр вносит наибольший вклад в РНП в спектральном диапазоне для оптической связи.

Для световодов с высоким содержанием германия в сердцевине (50 вес. % GeO₂), при $T < -30$ °С было впервые обнаружено переходное РНП с максимумом полосы поглощения на больших длинах волн ($\lambda > 1750$ нм). По спектральному положению и поведению при облучении и релаксации данная полоса РНП схожа с поглощением «собственных» СТН в нелегированных ВС [16] и, очевидно, им и

является. На основе полученных экспериментальных результатов и литературных данных предложены две наиболее вероятные модели «собственных» STH в германосиликатных ВС.

В конце главы представлены результаты оценки РНП в рамках модели кинетики n -го порядка [17] к концу 15-летней миссии в космосе в нелегированных ВС с различным содержанием хлора и различной степенью деформированности сетки стекла. Также сравнение делается с ВС с сердцевинной из германосиликатного стекла. Установлено, что РНП в нелегированных ВС в космических условиях ($T = -60$ °С, поглощенная доза ~ 1 кГр за время миссии 15 лет, $\lambda = 1550$ нм) не будет зависеть от технологических параметров изготовления ВС, а для обеспечения приемлемого уровня РНП достаточно просто исключить германий из сердцевины.

В качестве **заключения** приводятся основные результаты диссертационной работы. Далее следует список использованной литературы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В спектре радиационно наведенного поглощения (РНП) световодов с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла обнаружены полосы с максимумами на 2,6 и 2,16 эВ, принадлежащие радиационно индуцированным самозахваченным дыркам на немостиковой p -орбитали атомов кислорода сетки стекла («self-trapped holes», STH). Эти полосы ранее наблюдались только в спектрах РНП объемных образцов. В таких световодах также обнаружена ранее не наблюдавшаяся короткоживущая полоса РНП с центром на ~ 1 эВ.

2. Предложена концепция двух классов радиационно индуцированных STH – «собственных» и «деформационных». «Собственные» STH характеризуется крайне низкой термостабильностью. Определен класс всех ранее известных полос STH (полосы на 2,16, 2,6 и 0,8 эВ принадлежат «собственным» STH, на 1,63 и 1,88 эВ – «деформационным» STH). Выявлена и объяснена аномалия зависимости РНП от температуры в световодах с сердцевинной из

нелегированного кварцевого стекла при температуре около 0°C , при которой РНП достигает экстремально большого значения из-за роста полос поглощения «деформационных» СТН. Эта аномалия обусловлена эффектом экстремального сжатия кварцевого стекла при $T \sim 0^{\circ}\text{C}$.

3. В световоде с высоколегированной германосиликатной сердцевинной (50 мол. % GeO_2) обнаружена полоса РНП с центром на $E \leq 0,8$ эВ негауссовой формы. Обосновано, что эта полоса принадлежит «собственными» СТН. В световодах с германосиликатной сердцевинной также обнаружена сравнительно долгоживущая полоса РНП гауссовой формы с максимумом на 1,38 эВ. Показано, что данная полоса является основным механизмом, ограничивающим радиационную стойкость стандартных световодов для оптической связи.

4. Установлено, что для максимального подавления РНП в световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой необходимо, во-первых, большой избыток кислорода над тетрагидридом кремния в парогазовой смеси при синтезе сердцевинной (не менее ~ 60), что позволяет подавить вхождение хлора в сетку стекла. Во-вторых, необходимо, чтобы избыток кислорода был сбалансирован с количеством фтора в оболочке (чем больше концентрация фтора, тем больше должен быть избыток кислорода при синтезе сердцевинной). Установлено, что в этом случае достигается минимума РНП, обусловленное «деформационными» СТН.

5. Определено влияние параметров вытяжки таких световодов на величину РНП в ближнем ИК-диапазоне. РНП в наибольшей степени возрастает с ростом температуры вытяжки. При увеличении температуры вытяжки на 50°C РНП увеличивается в 2-3 раза. Увеличение натяжения и скорости вытяжки также приводят к увеличению РНП, но в гораздо меньшей степени.

6. Оптимизация процессов изготовления заготовки и вытяжки световода позволила снизить РНП в световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла в лабораторной технологии НЦВО-ИХВВ РАН более чем на порядок величины на длине волны 1550 нм (при дозе до 1 кГр и мощности дозы в интервале и 1,1-1,6 Гр/с). При этих условиях РНП в оптимизированных в работе

световодах совпало со средним значением в серии радиационно стойких световодов «RRSMFB» фирмы «Fujikura», считающихся мировыми лидерами по радиационной стойкости.

Список цитируемой литературы:

1. 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
2. Matthijsse P. et al. Fluorine-doped optical fiber: пат. 7526177 США. – 2009.
3. Aikawa K. et al. Radiation resistant single-mode optical fiber and method of manufacturing thereof: пат. 7440673 США. – 2008.
4. Nagel S. R., MacChesney J. B., Walker K. L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1982. – Т. 30. – №. 4. – С. 305-322.
5. http://www.j-fiber.com/images/pdf_english/DB-FTR-101-00-0608-specialty-rad-hard-MIL-Spec_09-125-500.pdf
6. Neustruev V. B. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres //Journal of Physics: Condensed Matter. – 1994. – Т. 6. – №. 35. – С. 6901.
7. Friebele E. J., Griscom D. L. Color centers in glass optical fiber waveguides //MRS Online Proceedings Library Archive. – 1985. – Т. 61. С. 319-331.
8. Alessi A. et al. Influence of the manufacturing process on the radiation sensitivity of fluorine-doped silica-based optical fibers //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2012. – Т. 59. – №. 4. – С. 760-766.
9. 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.
10. 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.

11. Girard S. et al. Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Т. 60. – №. 3. – С. 2015-2036
12. Griscom D. L., Friebele E. J. Fundamental radiation-induced defect centers in synthetic fused silicas: Atomic chlorine, delocalized E' centers, and a triplet state //Physical Review B. – 1986. – Т. 34. – №. 11. – С. 7524-7533.
13. 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. – Т. 352. – №. 23-25. – С. 2601-2617.
14. Sasajima Y., Tanimura K. Optical transitions of self-trapped holes in amorphous SiO₂ //Physical Review B. – 2003. – Т. 68. – №. 1. – С. 014204.
15. Brückner R. Properties and structure of vitreous silica. I //Journal of non-crystalline solids. – 1970. – Т. 5. – №. 2. – С. 123-175.
16. Chernov P. V. et al. Spectroscopic Manifestations of Self -Trapped Holes in Silica //Phys.Status Solidi B. – 1989. – Т.155. – С. 663-675.
17. Friebele E. J., Gingerich M. E., Griscom D. L. Survivability of optical fibers in space //Optical materials reliability and testing: Benign and adverse environments. – International Society for Optics and Photonics, 1993. – Т. 1791. – С. 177-189.

Список публикаций по теме диссертации:

- в изданиях, содержащихся в базах данных Web of Science или Scopus:

1. 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.

2. 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.
3. Kashaykin P.F., Tomashuk A. L., Salgansky M. Yu., Abramov A. N., Iskhakova L. D., Lobanov N. S., Nishchev K. N., Gurynov 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
4. Kashaykin, P. F., Tomashuk, A. L., Salgansky, M. Y., 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. – Т. 121. – №. 21. – С. 213104.
5. 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.
6. Kashaykin P. F. Gamma Radiation Induced Attenuation in Ge-doped Fibers in Near IR Range: Influence of Irradiation Temperature and Doping Level, GeY-center //Optical Sensors. – OSA Advanced Photonics Proc., – 2018. – С. JTu6A.1.
7. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Khopin V.F., Firstov S.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. Observation of radiation-induced absorption of self-trapped holes in Ge-doped silica fiber in near infrared range at reduced temperature //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2018. – Т. 496. – С. 24-28.
8. Кашайкин П. Ф., Томашук А. Л., Хопин В. Ф., Гурьянов А. Н., Семёнов С. Л., Дианов Е. М. Новый радиационный центр окраски в световодах из германосиликатного стекла //Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 12. – С. 1143-1146.

9. 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.

- в издании из перечня ВАК:

10. Томашук А.Л., Дворецкий Д.А., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Салганский М.Ю., Кашайкин П.Ф., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Отечественные радиационно-стойкие волоконные световоды //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2016. – №. 5. – С. 110-124.

-патент РФ на изобретение:

11. Томашук А.Л., Салганский М.Ю., Кашайкин П.Ф., Хопин В.Ф., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. «Радиационно-стойкий волоконный световод, способ его изготовления и способ повышения радиационной стойкости волоконного световода (варианты)», **Патент РФ на изобретение** № 2537523. Заявка № 2013141980, входящий номер ФИПСа № 064255, дата подачи (приоритета) 13.09.2013 г.

-публикации в сборниках трудов конференций:

12. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Абрамов А.Н., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Нищев К.Н., Дианов Е.М. Радиационно-стойкие световоды, изготовленные методом MCVD //Сборник трудов 12-ой Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-,

оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применения», Изд. Мордовского ун-та. – 2013. – С.66.

13. Султангулова А.И., Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Абрамов А.Н., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Нищев К.Н., Дианов Е.М. Оптические потери в волоконных световодах после γ -облучения сверхвысокими (мегагрейнными) дозами //Сборник трудов 12-ой Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применения», Изд. Мордовского ун-та. – 2013. – С.69.
14. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Абрамов А.Н., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Нищев К.Н., Дианов Е.М. Повышение радиационной стойкости волоконных световодов в технологии MCVD //Фотон-экспресс. – 2013. – №. 6. – С. 152-153.
15. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю. Получение MCVD – методом фторированного кварцевого стекла и волоконных световодов на его основе с повышенной радиационной стойкостью // Тезисы докладов 2-го симпозиума, 7-ой школы молодых учёных «Новые высокочистые материалы» – 2013. С. 99.
16. Султангулова А.И., Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Абрамов А.Н., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Оптические потери в волоконных световодах после γ -облучения сверхвысокими (мегагрейнными) дозами // Аннотация докладов в 3 томах. Том 2. Экспериментальная электроника и сенсорика. Радиационные технологии. Теоретическая физика и математическое моделирование (прикладная математика). Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. – 2014. С. 178-179.
17. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю. Волоконные световоды на основе кварцевого стекла, стойкие к воздействию радиации // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции с международным участием молодых ученых по химии «Менделеев-2014». – 2014. С. 89-90.

18. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Сравнение отечественных и зарубежных волоконных световодов по радиационной стойкости //Сборник трудов 13-ой Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применения», Изд. Мордовского ун-та. – 2014. – С. 68.
19. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю. Радиационно-стойкие волоконные световоды, разработанные в ИХВВ-НЦВО РАН: сравнение с зарубежными аналогами // Труды XV Всероссийской конференции и VIII Школы молодых ученых «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» Н. Новгород. – 2015. – С. 125.
20. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А. Л. Получение волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного фтором, обладающих повышенной радиационной стойкостью //Труды IV Международной конференции по химии и химической технологии, Ереван, – 2015. – С.155-156.
21. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Нищев К.Н., Дианов Е.М. Радиационная стойкость волоконных световодов при низких температурах //Сборник трудов 14-ой Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применения», Изд. Мордовского ун-та. – 2015. – С. 70.
22. Кашайкин П.Ф., Салганский М.Ю., Томашук А.Л., Лобанов Н.С., Нищев К.Н., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Влияние температуры на радиационно-наведенное поглощение света в волоконных световодах //Фотон-экспресс. – 2015. – №. 6. – С. 138-139.
23. Кашайкин П.Ф., Томашук А.Л., Салганский М.Ю., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. Радиационно-индуцированные автолокализованные дырочные состояния в сетке стекла волоконных световодов из нелегированного SiO₂ //Фотон-экспресс. – 2017. – Т. 6. – №. 6. – С. 264-265.