на правах рукописи

Томашук Александр Леонидович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ РАДИАЦИОННО ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОТЕРЬ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Официальные оппоненты:

Сулимов Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией вычислительных систем и прикладных технологий программирования Научно-исследовательского вычислительного центра Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Родионов Николай Борисович, доктор физико-математических наук, начальник сектора «Алмазный детектор» отдела нейтронной и спектроскопической диагностики Частного учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» (Частного учреждения «ИТЭР-Центр»)

Дукельский Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, научный руководитель Акционерного общества «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Защита состоится 20 апреля 2026 года в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу 119991 г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН https://diss.gpi.ru/all

Автореферат разослан «____»_____2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.223.03
канд. физ.-мат. наук
тел. +7 (499) 503-8780

Осадчий Александр Валентинович

1. Общая характеристика работы

Практически все применяемые сегодня волоконные световоды (ВС) изготовлены на основе кварцевого стекла. Это – вся волоконно-оптическая связь и почти все волоконные датчики и лазеры.

Во многих актуальных применениях ВС подвергаются воздействию ионизирующего излучения (ИИ): γ- и рентгеновского излучения, потокам нейтронов, протонов и электронов. ИИ создает точечные дефекты в сетке стекла [1]. Точечные дефекты, поглощающие распространяющийся по ВС световой сигнал, известны как радиационные центры окраски (РЦО), а поглощение, ими вызванное, – как радиационно-наведенное поглощение (РНП) [1]. Из-за РНП ВС теряет прозрачность, что ухудшает отношение сигнал-шум вплоть до выхода ВС из строя.

Сферы применения ВС, в которых они подвергаются воздействию ионизирующего излучения, – это атомная энергетика (АЭС, места захоронения отработанного ядерного топлива, экспериментальные ядерные установки, такие как Большой адронный коллайдер, экспериментальные термоядерные установки ИТЭР, NIF, Laser Megajoule), космос и др. [2]. Для этих применений востребованы специальные радиационно-стойкие ВС, в которых РНП минимизировано. Большая потребность в радиационно-стойких ВС в науке и технике и определяет **актуальность** данной работы. При этом к началу работы пути снижения РНП с целью получения радиационно-стойких ВС практически не были известны.

Исследования РЦО в ВС на основе кварцевого стекла начались в мире вскоре после создания первых лабораторных технологий ВС, еще в 1970-1980-ые годы [3]. Эти исследования носили чисто фундаментальный характер и были посвящены определению микроскопической структуры и спектральных свойств РЦО. Они не были нацелены на оптимизацию параметров получения ВС и на создание радиационно-стойких ВС.

В данной работе по измерениям дозной и спектральной зависимости РНП, его времени жизни и термостабильности мы идентифицировали РЦО, описали их физические свойства и установили связь между концентрацией этих РЦО и особенностями изготовления ВС. Эти исследования позволили сформулировать физические основы получения радиационно-стойких ВС трех типов – 1) многомодовых ВС, предназначенных для работы в видимом спектральном диапазоне, 2) одномодовых ВС для работы на длинах волн оптической связи λ=1.31 и 1.55 мкм и 3) активных эрбиевых ВС для космических применений.

Работа была инициирована в НЦВО РАН проф. К.М. Голантом в 1995 г. и началась с исследований по созданию радиационно-стойких ВС для систем оптической диагностики плазмы в Международном термоядерном экспериментальном реакторе ИТЭР [2]. В этих системах актуальным был видимый спектральный диапазон. Преформы (заготовки для вытяжки) многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины, необходимых для таких систем, обычно изготавливаются с помощью POD-процесса (plasma outside deposition) [4]. В POD-процессе осуществляется плазмохимическое осаждение слоя фторсиликатного стекла (оболочки будущего ВС) на стержень из кварцевого стекла (сердцевину).

К началу нашего исследования не были в достаточной степени изучены РЦО в видимом спектральном диапазоне и закономерности их возникновения в зависимости от параметров получения ВС. В частности, не были идентифицированы полосы поглощения радиационно индуцированных автолокализованных дырок в сетке стекла (АД) [1], которые, как оказалось, являются важнейшими фактором РНП. Не был известен и необходимый для обеспечения радиационной стойкости ВС процесс получения кварцевого стекла для сердцевины, оптимальные толщины сердцевины и оболочки ВС, концентрация фтора в оболочке, температура синтеза преформы, условия вытяжки и нанесения защитного покрытия. Все эти параметры, как показало наше исследование, влияют на образование предшественников РЦО, а значит, должны быть оптимизированы в радиационно-стойких ВС.

К началу данной работы было известно, что предшественники РЦО «немостиковый атом кислорода» (НАК) [1] – важнейшего РЦО в видимом диапазоне – возникают в процессе изготовления преформы. Грискомом была построена модель эффекта возникновения предшественников НАК [4]. Согласно ей, этими предшественниками являются пероксидные связи Si–O–O–Si, возникающие в результате проникновения молекул фтора из плазменного факела в стекло стержня и их реакции с парными ОН-группами. Наши исследования опровергли эту модель и позволили определить реальные механизмы и, соответственно, пути оптимизации процесса изготовления преформы с целью подавления предшественников РЦО.

К началу наших исследований было известно, что молекулярный водород, растворенный в стекле ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, подавляет РЦО, вступая с ними в химическую связь [1], [5]. В частности, так подавляется НАК, E’-центр [1], [3], кислородо-дефицитный центр (=Si:) [3] и Cl^0-центр [1], [3]. Однако практическое использование H_2 для подавления РЦО представлялось невозможным, т.к. H_2 очень быстро выходит из стекла ВС.

Мы исследовали особенности образования новых РЦО, связанных с вхождением водорода в сетку стекла – H(I)- и E_β-центров [1], [6]. Было установлено, что эти РЦО подавляются самим водородом при дальнейшем увеличении его концентрации в стекле. Затем совместно с учеными

Химического факультета МГУ нам удалось разработать способ насыщения молекулярным водородом (или дейтерием) ВС в герметичном покрытии (алюминий, медь или углерод), через которое выход водорода и дейтерия из ВС при комнатной температуре практически невозможен. В сравнительных экспериментах, проведенных в ТРИНИТИ и в Бельгийском центре по ядерным исследованиям SCK*CEN, разработанные нами ВС с H_2 в стекле и с алюминиевым покрытием для его удержания значительно превзошли по радиационной стойкости лучшие зарубежные ВС.

Далее представлялось актуальным применить изобретенный способ насыщения водородом ВС через герметичное покрытие к активным эрбиевым ВС, в которых требовалось подавить РЦО, связанные с атомами P,Al и Er и таким образом создать радиационно-стойкие активные эрбиевые ВС для космических применений. Эти исследования оказались успешными.

В 2000-ые годы появились микроструктурированные «дырчатые» ВС и возникла очевидная задача попытаться использовать продольные отверстия в оболочке ВС для подачи H_2 в стекло *in-situ,* непосредственно при работе ВС в радиационном поле или перед его размещением в радиационной поле, поскольку подавать H_2 в стекло ВС через отверстия гораздо проще, чем через герметичное покрытие.

В 2011 году были начаты исследования по созданию радиационно-стойких одномодовых ВС для работы на длинах волн оптической связи и датчиков λ~1,31 и 1,55 мкм. К началу исследования из литературы было известно, что наивысшей радиационной стойкостью в ближнем ИК диапазоне обладают ВС с сердцевиной и оболочкой из фторсиликатного стекла [7]. Однако, изготовление фторсиликатных ВС в России было невозможно из-за ограничений MCVD-процесса (modified chemical vapor deposition), в котором осуществляется химическое осаждение стекла из парогазовой смеси реагентов внутри опорной трубки и который являлся единственным методом получения преформ одномодовых ВС, в достаточной степени развитым в России. Поэтому встала задача разработать радиационно-стойкие ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой («нелегированные» ВС, химический состав их сердцевины и оболочки SiO_2/F:SiO_2).

Исследуя РНП в наших ВС, мы обнаружили, что кроме трех «классических» полос поглощения автолокализованных дырок (АД) в ВС (λ=1,88, 1,63 и ~0,65 эВ) [1] существуют еще четыре, и все эти полосы принадлежат трем различным видам АД. Была построена качественная модель образования АД, введена классификация АД на собственные (λ=2,60 и 2,16 эВ), деформационные (λ=1,88 и 1,63 эВ) и промежуточные (λ=1,12 и 0,95 эВ) и описаны свойства АД этих трех видов, включая зависимость интенсивности полос поглощения от параметров получения ВС, температуры облучения и интенсивности распространяющегося света. Описаны взаимопревращения видов АД при радиационно-индуцированной перестройке сетки стекла.

Далее в работе была осуществлена оптимизация параметров получения преформ и вытяжки одномодовых ВС SiO_2/F:SiO_2 с целью подавления вхождения хлора в стекло и образования АД под облучением. Разработанные ВС по радиационной стойкости оказались сравнимы с лучшими образцами зарубежных фторсиликатных ВС.

Все вышеописанные исследования были проведены в условиях γ-облучения, интенсивность которого (мощность дозы) сравнительно мала (~1-10 Гр/с). Представляло большой интерес исследование стойкости ВС к импульсному воздействию ИИ при мощностях дозы на порядки большей (~10^6-10^{11} Гр/с при длительности импульса ~20 нс).

Такое исследование было бы интересно как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. С фундаментальной точки зрения, короткое, но интенсивное воздействие ИИ должно приводить к возникновению РЦО, концентрация которых зависит не от дозы, как при γ-облучении, а от мощности дозы. Таковыми как раз являются АД, определяющие РНП в ближнем ИК диапазоне. Кроме того, при γ-облучении не удается дискриминировать виды АД по времени жизни, хотя оно и сильно различается между видами АД. В то же время, измерения РНП сразу после импульса с временным разрешением 10^{-7} с позволили бы сделать такую дискриминацию, а измерения одновременно на нескольких длинах волн видимого и ближнего ИК диапазонов позволили бы одновременно дискриминировать различные виды АД еще и по спектру. Эти возможности были реализованы в данной работе.

Практический интерес к РНП при импульсном воздействии обусловлен, в первую очередь, перспективными применениями ВС в термоядерных реакторах, работающих в импульсном режиме (напр., NIF в США и Laser Megajoule во Франции) [2].

К началу данной работы РНП в ВС при импульсном воздействии было исследовано очень слабо. Было известно, что после прекращения радиолюминесценции центров окраски и черенковского излучения, начиная с момента времени ~10^{-7} с после импульса ИИ, РНП монотонно спадает [2]. Конкретные РЦО, ответственные за это РНП, известны не были. Было установлено, что РНП в ВС SiO_2/F:SiO_2 на субсекундных временах после импульса ИИ на длинах волн оптической связи λ~1,31 и 1,55 мкм многократно больше, чем в ВС с легирующими добавками Ge, P и N [8]. Известно, что при γ-облучении ВС SiO_2/F:SiO_2, наоборот, имеют многократно меньшее РНП, чем легированные ВС [1], [2], [8]. Объяснения этому расхождению не было. Возможным практическим решением при применениях, в которых ВС подвергается импульсно-непрерывному воздействию, считалось использование параллельно двух ВС – один с сердцевиной из германосиликатного стекла (GeO_2:SiO_2/SiO_2) обеспечит стойкость к импульсному воздействию, а второй ВС SiO_2/F:SiO_2 – к непрерывному воздействию.

В данной работе предстояло определить РЦО, ответственные за РНП на длинах волн оптической связи λ~1,3 и 1,55 мкм на субсекундных временах после воздействия, объяснить столь различное поведение нелегированных ВС при непрерывном и импульсном воздействии ионизирующего излучения и попытаться создать ВС, стойкий одновременно и к непрерывному и импульсному воздействию.

Таким образом, пять **целей** данной работы и **задачи**, необходимые для их достижения, были следующие (задачи даны в виде перечисления после формулировки каждой из пяти целей).

1. Создание радиационно-стойких многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины для применений в видимом спектральном диапазоне.

– определение РЦО в видимом спектральном диапазоне в ВС с сердцевиной из различных синтетических кварцевых стекол,

– определение оптимального синтетического кварцевого стекла для сердцевины радиационно-стойких ВС,

– определение микроскопических механизмов образования предшественников РЦО при синтезе преформы по методу осаждения фторсиликатного стекла (оболочки) на стержень из кварцевого стекла (сердцевину),

– оптимизация процесса получения преформ радиационно-стойких ВС,

– создание лабораторной технологии насыщения молекулярным водородом стекла ВС в герметичном алюминиевом покрытии,

– исследование радиационной стойкости разработанных ВС с герметичным алюминиевым покрытием, содержащих молекулярный водород в стекле, и их сравнение с зарубежными радиационно-стойкими ВС,

– исследование возможности насыщения стекла ВС молекулярным водородом путем подачи молекул H_2 по продольным отверстиям в оболочке микроструктурированного ВС.

2. Создание радиационно-стойких активных эрбиевых ВС.

– исследование возможности подавления РНП в эрбиевых ВС за счет растворения молекулярного водорода в стекле,

– создание лабораторной технологии насыщения молекулярным водородом стекла эрбиевых ВС в герметичном углеродном покрытии,

– сравнение эффективности генерации активных эрбиевых ВС $Er,Al:SiO_2/SiO_2$ в герметичном углеродном покрытии, содержащих и не содержащих H_2 в стекле при их γ-облучении.

3. Создание радиационно-стойких одномодовых ВС для применений на длинах волн оптической связи λ~1,3–1,55 мкм.

– определение РЦО в ВС SiO_2/F:SiO_2, поглощающих на λ=1,31 и 1,55 мкм, и зависимости их концентрации от параметров синтеза преформы с помощью MCVD-процесса,

– исследование зависимости РНП от соотношения расходов $SiCl_4$ и O_2 при синтезе стекла сердцевины и оптимизация расходов реагентов,

– исследование зависимости РНП от температуры и натяжения вытяжки ВС,

– создание лабораторной технологии получения радиационно-стойких одномодовых ВС для применений на длинах волн оптической связи λ=1,31 и 1,55 мкм.

4. Исследование радиационно-индуцированных автолокализованных дырок (АД) в ВС SiO_2/F:SiO_2.

– идентификация полос поглощения АД в спектре РНП ВС SiO_2/F:SiO_2,

– построение модели, классифицирующей три вида АД с различным спектральным положением полос поглощения и различным временем жизни,

– определение зависимости интенсивности полос поглощения АД от температуры и степени сжатия стекла сердцевины, которая задается параметрами получения ВС,

5. Исследование стойкости ВС SiO_2/F:SiO_2 к интенсивному импульсному воздействию ИИ.

– сравнение РНП на субсекундных временах после импульсного воздействия ИИ в ВС SiO_2/F:SiO_2, в ВС с различными легирующими добавками и в ВС с полой сердцевиной,

– определение физических механизмов РНП в ВС SiO_2/F:SiO_2 на субсекундных временах после импульса ИИ,

– исследование зависимости формы временного хода РНП в ВС SiO_2/F:SiO_2 после импульса ИИ от температуры, интенсивности распространяющегося света, и температуры вытяжки ВС,

– исследование возможности оптимизации радиационной стойкости ВС одновременно к интенсивном импульсному воздействию ИИ (мощность дозы ~10^6-10^{11} Гр/с) и непрерывному γ-излучению (~1-10 Гр/с),

– исследование особенностей радиационно-индуцированной перестройки сетки стекла ВС SiO_2/F:SiO_2 при интенсивном импульсном воздействии ИИ.

Научная новизна

1) Впервые установлен критерий выбора синтетического кварцевого стекла как материала сердцевины радиационно-стойких многомодовых ВС в видимом спектральном диапазоне. Им оказалась концентрация примесей гидроксила и хлора, т.к. эти примеси являются ведут к образованию одних РЦО (Cl^0-центра, НАК и E'-центра) и подавляют образование других (АД). Впервые показано, что для высокодозных применений (>1 МГр) предпочтительным является

стекло с минимальной концентрацией гидроксила и хлора (напр., марки КС-4В), а для малодозных (<1 МГр) – стекло с большим содержанием гидроксила и малым содержанием хлора (напр., марки КУ-1).

2) Впервые установлены предшественники РЦО и физические механизмы их образования при изготовлении преформы ВС по методу осаждения фторсиликатного слоя на опорный стержень с высоким содержанием гидроксила. Показано, что этими предшественниками являются пероксидные связи –O–O– и напряженные связи Si–O, вызванные термоиндуцированным выходом молекул H_2 и H_2O из сетки стекла. Впервые определен путь оптимизации процесса изготовления преформы с целью повышения радиационной стойкости ВС с высоким содержанием гидроксила – снижение температуры и длительности процесса. Обоснована предпочтительность PCVD-процесса (plasma chemical vapor deposition) над POD-процессом из-за более низкой температуры PCVD-процесса.

3) Впервые предложен и реализован новый тип радиационно-стойких ВС, содержащих молекулярный водород в стекле и имеющих покрытие, не проницаемое для водорода в нормальных условиях. Продемонстрированы две разновидности таких ВС: i) пассивные ВС с большим диаметром сердцевины (100-200 мкм) в алюминиевом покрытии для спектроскопии в видимом спектральном диапазоне, многократно превзошедшие по радиационной стойкости зарубежные радиационно-стойкие ВС, и ii) активные эрбиевые ВС в углеродном покрытии, в которых обеспечивается многократно большее время жизни в условиях космоса, чем в ВС без H_2.

4) Впервые показано, что единственным источником РНП на λ=1,31 и 1,55 мкм в ВС SiO_2/F:SiO_2 без существенной примеси хлора являются АД. Впервые в ВС обнаружены полосы АД на 1,12 и 0,95 эВ. Впервые построена модель, выделяющая три вида АД: собственные (полосы поглощения на 2,16, 2,60 и ~0,65 эВ), деформационные (1,88 и 1,63 эВ) и промежуточные (1,12 и 0,95 эВ) и объясняющая зависимость интенсивности полос поглощения и времени жизни трех видов АД от длины связей Si–O, температуры облучения и интенсивности света, распространяющегося по ВС. Впервые обнаружены и объяснены взаимопревращения видов АД при радиационно-индуцированной перестройке сетки стекла ВС.

5) Впервые определены параметры синтеза преформ радиационно-стойких одномодовых ВС SiO_2/F:SiO_2 с помощью MCVD-процесса (создание значительного избытка O_2 над $SiCl_4$ в парогазовой смеси при синтезе сердцевины, величина которого согласована с концентрацией фтора в оболочке) и параметры вытяжки радиационно-стойких ВС (снижение температуры вытяжки до уровня, при котором натяжение остается допустимо малым).

6) Впервые определены РЦО, ответственные за РНП в ВС SiO_2/F:SiO_2 на субсекундных временах после импульсного воздействия рентгеновского излучения с высокой мощностью дозы

(~10^6-10^{11} Гр/с), которыми оказались собственные АД на малых временах (<1 мс) и промежуточные АД на больших временах (>10 мс). Впервые определены пути снижения РНП в таких ВС либо на малых, либо на больших временах после импульсного воздействия в зависимости от требуемого времени восстановления прозрачности ВС. Это достигается оптимизацией i) температуры вытяжки ВС, ii) температуры ВС при импульсном воздействии и/или iii) интенсивности распространяющегося по ВС света.

7) Впервые установлено, что ВС SiO_2/F:SiO_2, оптимизированные по стойкости к непрерывному γ-излучению, обладают высокой стойкостью одновременно и к интенсивному импульсному ИИ, значительно превосходя германосиликатные ВС (GeO_2:SiO_2/SiO_2).

Теоретическая значимость

1) Определены микроскопические механизмы образования и подавления предшественников РЦО в процессе синтеза преформы ВС SiO_2/F:SiO_2 плазмохимическим осаждением фторсиликатного стекла на стержень из кварцевого стекла. Предшественники НАК и трехкоординированного атома кремния (E'-центра) – пероксидные связи –O–O– и напряженные связи Si–O – возникают в случае стержня из стекла с высоким содержанием гидроксила и вызваны термоиндуцированным выходом молекул H_2 и H_2O из парных OH-групп в междоузлие сетки стекла. В случае стержня из стекла с малым содержанием гидроксила при синтезе преформы происходит, наоборот, подавление напряженных связей Si–O.

2) Обнаружены новые полосы АД в ВС SiO_2/F:SiO_2 и создана модель АД, выделяющая три вида АД – собственные (2,16, 2,60 и 0,65 эВ), деформационные (1,88 и 1, 63 эВ) и промежуточные (1,12 и 0,95 эВ), отличающиеся спектральным положением полос поглощения и временем жизни. Сделано и обосновано предположение о зависимости времени жизни видов АД и интенсивности их полос поглощения от длины связей Si–O. Выявлены и объяснены изменения интенсивности полос поглощения различных видов АД при вариации температуры и интенсивности распространяющегося по ВС света.

3) Идентифицированы РЦО, ответственные за РНП на субсекундных временах после интенсивного импульсного воздействия ИИ на ВС SiO_2/F:SiO_2, которыми оказались собственные АД на малых временах после воздействия (<1 мс) и промежуточные АД на больших временах (>10 мс), установлена и объяснена зависимость концентраций собственных и промежуточных АД от температуры ВС и интенсивности зондирующего света.

4) Выявлены особенности радиационно-индуцированной перестройки сетки стекла ВС SiO_2/F:SiO_2 при интенсивном импульсном воздействии ИИ (мощность дозы ~10^6-10^{11} Гр/с). Установлено, что перестройка происходит существенно быстрее, чем при непрерывном γ-

облучении (~1-10 Гр/с), и что наряду с исчезновением деформационных АД растет концентрация собственных и промежуточных АД. Эти эффекты объяснены ускорением процесса перестройки при одновременном радиационном разрыве нескольких близлежащих связей Si–O и образованием связей большей длины на месте разорванных связей малой длины.

Практическая значимость

1) Определен критерий выбора синтетического кварцевого стекла в качестве материала сердцевины радиационно-стойких ВС SiO_2/F:SiO_2 в видимом спектральном диапазоне: для малых доз (<1 МГр) используется стекло с высоким содержанием примеси гидроксила и малым хлора, для больших доз – стекло с малым содержанием обеих примесей.
2) Определен путь оптимизации процесса получения преформ радиационно-стойких ВС SiO_2/F:SiO_2 по методу осаждения слоя фторсиликатного стекла на стержень из кварцевого стекла с высоким содержанием гидроксила, состоящий в снижении температуры и продолжительности процесса и в переходе от высокотемпературного процесса POD (1600-1900 °C) к низкотемпературному процессу PCVD (1000-1200 °C).
3) Разработаны пассивные радиационно-стойкие ВС SiO_2/F:SiO_2 с сердцевиной из кварцевого стекла большого диаметра (~100-200 мкм), содержащие молекулярный водород в стекле и имеющие покрытие, не проницаемое для водорода (напр., алюминиевое или углеродное). Такие ВС многократно превзошли зарубежные ВС по радиационной стойкости (по малости РНП в видимом спектральном диапазоне). Планируется применение разработанных ВС в системах диагностики плазмы строящегося Международного термоядерного реактора ИТЭР.
4) Разработаны активные эрбиевые ВС, содержащие H_2 в стекле и имеющие углеродное покрытие для удержания H_2 в ВС. Показано, что такие ВС будут обладать многократно бо̀льшим временем жизни в условиях космоса, чем ВС без H_2.
5) Предложен и продемонстрирован удобный на практике способ повышения радиационной стойкости ВС путем подавления РЦО молекулярным водородом при его доставке в стекло ВС по продольным отверстиям в оболочке. Изобретенный способ применим *in-situ,* непосредственно при работе ВС в радиационном поле.
6) Для обеспечения высокой радиационной стойкости ВС SiO_2/F:SiO_2 на длинах волн оптической связи λ=1,31 и 1,55 мкм определен путь оптимизации параметров синтеза преформы по MCVD-методу и путь оптимизации параметров вытяжки ВС. Стойкость оптимизированных ВС к непрерывному γ-облучению оказалась сравнима со стойкостью фторсиликатных ВС (F:SiO_2/F:SiO_2) фирмы «Фуджикура», обладающих рекордной радиационной стойкостью.

7) Установлено, что ВС SiO_2/F:SiO_2 с оптимизированной стойкостью к непрерывному γ-облучению обладают высокой стойкостью и к интенсивному импульсному воздействию ИИ, значительно превосходя по стойкости германосиликатные ВС (GeO_2:SiO_2/SiO_2), считавшиеся ранее более стойкими, чем ВС SiO_2/F:SiO_2.
8) Установлены пути дополнительного повышения стойкости ВС SiO_2/F:SiO_2 к интенсивному импульсному воздействию ИИ. Показано, что РНП в требуемый момент времени восстановления прозрачности ВС после импульсного воздействия можно снизить необходимым выбором температуры вытяжки ВС, температуры ВС во время импульсного воздействия и интенсивности рабочего светового сигнала.

Методология и методы исследования

Общая методология работы включала изготовление экспериментальных образцов преформ, вытяжку ВС, измерение величины радиационно индуцированных потерь, измерение спектров РНП и других параметров ВС, идентификацию радиационных центров окраски и, наконец, коррекцию параметров получения преформ и вытяжки ВС с целью снижения радиационно индуцированных потерь в следующем образце.

Для реализации этой методологии применялись следующие методы.

Преформы многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины изготавливались в НЦВО РАН путем нанесения фторсиликатного слоя на стержень из кварцевого стекла в плазме СВЧ-разряда с помощью POD-процесса, либо по методу «штабик в трубке» (rod-in-tube). В том числе одна преформа была изготовлена методом POD из фторсиликатного стержня, синтезированного в Токийском технологическом институте. ВС вытягивались из преформ в НЦВО РАН на экспериментальных установках с нанесением полимерного или алюминиевого покрытия. Несколько ВС были изготовлены в фирмах «FiberGuide Industries» (США), «Heraeus» (Германия), «Fujikura» и «Mitsubishi» (Япония) и переданы нам для сравнительного исследования радиационной стойкости в рамках Международного проекта ИТЭР.

Исследования многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины (измерения спектров начальных оптических потерь и РНП в ВС и в срезах преформ, спектров комбинационного рассеяния в ВС и др.) проводились в НЦВО РАН. Ряд экспериментов по измерению спектров РНП в ВС проведен *in-situ*, непосредственно в процессе γ-облучения или реакторного облучения (нейтроны + γ-излучение).

Преформы активных эрбиевых ВС изготавливались в ИХВВ РАН на лабораторных установках, реализующих MCVD-процесс осаждения кварцевого стекла внутри опорной трубки. ВС вытягивались на установках в НЦВО РАН с нанесением углеродного покрытия.

Насыщение водородом стекла ВС в алюминиевом и углеродном покрытии проводилось на газостатах на Кафедре высоких давлений Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Облучения ВС осуществлялись от источников γ-облучения с изотопом ^{60}Co на установках ГУРХ-100000 в ИФХЭ РАН и ГУТ-200М в НИЦ «Курчатовский институт». Реакторное облучение многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины было проведено на исследовательском ядерном реакторе ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт».

Основные измерения спектров оптических потерь и РНП в ВС всех трех исследованных типов проводились по стандартным методикам на установках на базе волоконных спектрометров на диодных линейках фирм «Ocean Optics» и «Avantes». При этом измерения РНП в пассивных многомодовых и одномодовых ВС проведены *in-situ*, непосредственно в процессе облучения ВС.

Радиационная стойкость активных эрбиевых ВС определялась путем измерения дифференциальной эффективности волоконного лазера с резонатором, образованным метровым отрезком предварительно облученного ВС.

При разработке радиационно-стойких одномодовых ВС SiO_2/F:SiO_2 для работы на λ=1,31 и 1,55 мкм изготовление преформ осуществлялось в ИХВВ РАН на лабораторных MCVD-установках, а вытяжка ВС – на экспериментальных установках в НЦВО РАН. По результатам исследования РНП вносились коррекции в величины молярных расходов $SiCl_4$ и O_2 в MCVD-процессе. Также, в режиме обратной связи «изготовление ВС – эксперимент» с целью снижения РНП в следующем образце ВС вносилась коррекция в параметры вытяжки (температуру, натяжение и скорость).

Измерения РНП на субсекундных временах после импульсного воздействия проводились после импульса тормозного излучения линейных ускорителей электронов И-3000, ЛИУ-10М и ЛИУ-30М во РФЯЦ-ВНИИЭВ. В экспериментах при длительности импульса 18-20 нс обеспечивалась мощность дозы ~10^6-10^{11} Гр/с и измерялась интенсивность света на выходе ВС после импульсного воздействия в интервале ~10^{-6}–2 с с временным разрешением 10^{-7} с на четырех длинах волн видимого и ближнего ИК диапазонов: λ=1550, 1310, 659 и 828 нм.

Положения, выносимые на защиту

1. Основными радиационными центрами окраски в волоконных световодах (ВС) с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и оболочкой из фторсиликатного стекла (SiO_2/F:SiO_2) в видимом спектральном диапазоне являются при малых дозах ионизирующего излучения (недостаточных для завершения перестройки сетки стекла) автолокализованные дырки, при больших дозах – немостиковый атом кислорода и Cl^0-центр.

2. Оптимальные составы синтетических кварцевых стекол в сердцевине радиационно-стойких ВС в видимом спектральном диапазоне характеризуются высоким содержанием гидроксила и малым содержанием хлора при малых дозах ионизирующего излучения и малым содержанием одновременно и гидроксила, и хлора при больших дозах.

3. В процессе синтеза преформы ВС SiO_2/F:SiO_2 по методу нанесения фторсиликатного слоя на стержень из кварцевого стекла с высоким содержанием гидроксила происходит термоиндуцированный выход молекул H_2O и H_2 из парных ОН-групп и возникают напряженные связи Si–O и пероксидные связи O–O – прекурсоры немостикового атома кислорода.

4. Радиационная стойкость ВС SiO_2/F:SiO_2 повышается при снижении температуры и/или продолжительности процесса синтеза преформы ВС SiO_2/F:SiO_2 по методу нанесения фторсиликатного слоя на стержень из кварцевого стекла с высоким содержанием гидроксила.

5. Пассивные ВС SiO_2/F:SiO_2 для передачи излучение в видимом спектральном диапазоне и активные эрбиевые ВС, генерирующие излучение на длине волны 1,55 мкм, содержащие молекулярный водород или дейтерий в стекле в концентрации не менее 10^{19} $см^{-3}$ и имеющие покрытие, не проницаемое для молекул H_2 (D_2) в нормальных условиях, обладают высокой и долгосрочной радиационной стойкостью.

6. В стекле ВС SiO_2/F:SiO_2 возникают радиационно-индуцированные автолокализованные дырки трех видов: собственные, деформационные и промежуточные, отличающиеся спектральным положением полос поглощения и временем жизни, которое минимально у собственных автолокализованных дырок и максимально у деформационных.

7. Получение радиационно-стойкого одномодового ВС SiO_2/F:SiO_2 для применений на длинах волн оптической связи 1,31 и/или 1,55 мкм в присутствии γ-излучения включает i) создание многократного избытка молекулярного кислорода над тетрахлоридом кремния в парогазовой смеси MCVD-процесса при синтезе сердцевины преформы, величина которого определяется концентрацией фтора в светоотражающей оболочке, и ii) снижение температуры вытяжки до предельного уровня, соответствующего максимально допустимому значению натяжения.

8. Радиационно-стойкие одномодовые ВС SiO_2/F:SiO_2, оптимизированные по параметрам MCVD-процесса и вытяжки для применений на длинах волн оптической связи 1,31 и/или 1,55 мкм при γ-облучении низкой интенсивности (мощность дозы ~1-10 Гр/с), проявляют высокую стойкость и к высокоинтенсивному импульсному воздействию ионизирующего излучения (~10^6-10^{11} Гр/с), значительно превосходя ВС с сердцевиной из германосиликатного стекла.

9. Радиационно-индуцированное поглощение в ВС SiO_2/F:SiO_2 в ближнем инфракрасном диапазоне определяется собственными автолокализованными дырками на малых временах после

высокоинтенсивного импульсного воздействия ионизирующего излучения (<1 мс) и промежуточными автолокализованными дырками на больших временах (>10 мс).

10. Оптимальная температура вытяжки ВС $SiO_2/F:SiO_2$ с малым требуемым временем восстановления после высокоинтенсивного импульсного воздействия ионизирующего излучения (<1 мс) на ~20°-30° выше, чем у ВС с большим требуемым временем восстановления (>10 мс).

11. Мощность распространяющегося по ВС $SiO_2/F:SiO_2$ света и температура ВС в момент высокоинтенсивного импульсного воздействия ионизирующего излучения существенно влияют на соотношение концентраций собственных и промежуточных автолокализованных дырок, что позволяет контролируемо снизить величину радиационно-индуцированного поглощения в требуемый момент времени восстановления ВС.

Достоверность полученных результатов и их апробация

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными, имеют качественное и количественное совпадение экспериментальных результатов с теоретическими. В экспериментальных исследованиях использовались надежные и многократно проверенные методы измерений. Все полученные результаты имеют ясную физическую интерпретацию, согласующуюся с существующими представлениями и данными научной литературы.

В составе авторского коллектива работы «Синтез материалов для волоконной оптики плазмохимическим осаждением в СВЧ-разрядах» в 2002 г. соискатель был удостоен Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники. Его вклад в работу состоял в разработке радиационно-стойких ВС с использованием плазмохимических процессов POD и PCVD. Рекордно высокая радиационная стойкость ВС, разработанных с помощью POD-процесса, была подтверждена при экспериментальном сравнении со стойкостью ВС ведущих зарубежных производителей. Сравнения стойкости были проведены независимыми учеными в ТРИНИТИ, Бельгийском центре по ядерным исследованиям (SCK*CEN Belgian Nuclear Research Centre) и в Лаборатории «NRL» в США (Naval Research Laboratory).

Исследования диссертанта по классификации и описанию свойств радиационно-индуцированных автолокализованных дырок в ВС получили подтверждение в работах зарубежных ученых и широко используются в их дальнейших исследованиях, став неоспоримым элементом современного состояния дел в области радиационно-оптических эффектов в ВС.

Изложенные в диссертационной работе научные результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и семинарах, таких как Конференция по волоконно-оптической связи (Optical Fiber Communication, OFC, Сан-Хосе, США), 25 февр. - 1

марта 1996 г., Европейская конференция по оптической связи (European Conference on Optical Communication, ECOC, Канны, Франция), 24-28 сент. 2006 г, Европейские конференции по ионизирующим излучениям и их воздействию на элементы и системы электроники (European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS, Франция) 1995, 1997, 1999, 2001, 2007 гг., Конгресс по современной фотонике Американского оптического общества (OSA Advanced Photonics Congress, Цюрих, Швейцария) 2-5 июля 2018 г., международные конференции Общества “SPIE” – Photonics for Space and Radiation Environments II 2001 г., Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks II 2006 г., Micro-structured and Specialty Optical Fibres IV 2015 и 2018 гг., 14-ая Международная конференция по оптике лазеров (14^{th} International Conference "Laser Optics 2010", С.-Петербург) 28 июня – 2 июля 2010 г., 9-ая международная конференция по материалам для термоядерных реакторов (9^{th} Int. Conf. on Fusion Reactor Materials, Колорадо Спрингс, США) 10-15 окт. 1999 г., 6-ой Симпозиум «Современные диэлектрические материалы и устройства на основе SiO_2» (6^{th} Symposium "SiO_2 Advanced Dielectrics and Related Devices", Палермо, Италия) 25-28 июня 2006 г., 21-ый и 24-ый Симпозиумы по технологии термоядерного синтеза (21^{st} and 24^{th} Symposium on Fusion Technology, SOFT, Мадрид, Испания) 11-15 сент. 2000 г. и 11-15 сент. 2006 г., 12-ый международный семинар по радиационно-индуцированным эффектам в керамических диэлектриках в ИТЭР (12^{th} IEA Workshop on Radiation Effects in Ceramic Insulators, Хельсинки, Финляндия) 11 сент. 2002 г., семинары международной экспертной группы по диагностике плазмы в реакторе ИТЭР (Meetings of the ITPA Topical Group on Diagnostics, Meetings on ITER/BPX Relevant Diagnostic Developments), Всероссийская конференция по волоконной оптике в 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг., XI, XIV и XVII Всероссийские конференции «Высокочистые вещества. Получение, анализ, применение» и Школы молодых ученых «Особочистые стекла для волоконной оптики» (Нижний Новгород) 2015, 2018 и 2022 гг., XII и XX Харитоновские тематические научные чтения по проблемам высоких плотностей энергии и применениям лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии (г. Саров) 2010 и 2018 гг., 7-ая Научно-практическая конференция по надежности и безопасности ядерных объектов (7^{th} Scientific and Practical Conference "Nuclear Facilities: Reliability and Safety", Славутич, Украина) 20-23 сент. 2005 г., Конференция "Ядерное приборостроение 2007: Аппаратурное обеспечение ядерной и радиационной безопасности объектов Росатома", Москва, 18-19 апр. 2007 г., IV Международная конференция по химии и химической технологии, ИОНХ, Ереван, 14-18 сентября 2015 г., международные Научные школы по фоточувствительности волоконных световодов и стекол (White Nights' Summer School on Photosensitivity in Optical Waveguides and Glasses, POWAG'2002, С.-Перербург) 17-21 июня 2002 г. и по современной

нанофотонике стекол (Summer-School on Advanced Glass-Based Nano-Photonics, Бат, Великобритания) 12-16 июля 2004 г.

Публикации автора по результатам работы

Работы автора по теме диссертации включают **44 публикации**, индексируемые в базах данных **«Web of Science»** и/или **«Scopus»**, среди которых

– 34 статьи в рецензируемых научных журналах [A1-A34],

– 10 докладов и тезисов докладов в трудах международных конференций и статей в нерецензируемых международных сборниках [A35-A44].

Автором получены 4 патента РФ на изобретение [A45-A48].

Личный вклад автора в работу

Все результаты работы получены автором лично, либо под его научным руководством.

Структура и объем диссертации

Работа изложена на 281 странице и состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, включающего 303 источника. Работа содержит 135 рисунков и 15 таблиц.

2. Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, ее научная новизна, методология и методы исследования, научная и практическая значимость результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, аргументируется достоверность результатов и указывается их апробация, личный вклад автора в получение результатов, публикации автора по теме диссертации, ее объем и структура.

В **Главе 1** дан литературный обзор по теме работы. В **разделе 1.1** рассмотрена структура сетки кварцевого стекла и результаты воздействие на нее ионизирующего излучения. В **разделе 1.2** описаны основные РЦО в кварцевом стекле и ВС. В **разделе 1.3** делается сравнение воздействия радиационных полей, содержащих высокоэнергетичные частицы (протоны, нейтроны, электроны), и γ-излучения. В **разделе 1.4** обсуждаются методы синтеза преформ и вытяжки ВС и их возможное влияние на радиационную стойкость ВС. В **разделе 1.5** обсуждаются различные типы радиационно-стойких ВС. **Раздел 1.6** посвящен взаимодействию молекулярного водорода, растворенного в стекле ВС, с РЦО. В **разделе 1.7** обосновывается отсутствие заметного вклада рэлеевского рассеяния в радиационно-наведенное затухание света в ВС. В **разделе 1.8** рассматриваются области применения радиационно-стойких ВС. В **разделе 1.9** даны выводы из Главы 1.

Глава 2 посвящена исследованию и оптимизации параметров получения радиационно-стойких многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины для применений в видимом спектральном диапазоне.

Преформы ВС данного типа изготавливаются плазмохимическим осаждением слоя фторсиликатного стекла (оболочки ВС) на стержень из кварцевого стекла (сердцевину).

Априори мы предположили, что радиационная стойкость стержней определяется в первую очередь наличием примесей хлора и гидроксила, и это оказалось правильным.

В **разделе 2.1** дано сравнение спектров начальных оптических потерь в ВС с разными типами стекла в сердцевине. Установлено, что рост потерь с уменьшением длины волны минимален у ВС с сердцевиной из стекла с высоким содержанием гидроксила – КУ-1. Это связано с тем, что одновалентные атомы Н подавили деформации сетки при синтезе стекла. В результате снижено и рэлеевское рассеяние [9] и экспоненциальный рост потерь из-за урбаховского хвоста межзонных переходов [10].

В **разделе 2.2** описан эксперимент и дано сравнение ВС с различными стеклами по величине РНП при γ-облучении до дозы 11 МГр.

Одновременно облучаются 4 ВС с различными концентрациями ОН-групп, фтора и хлора в стекле сердцевины. Каждый ВС представлен 2 отрезками (основным и опорным), имеющими разную длину в бухте в центре γ-источника ^{60}Co, облучаемой с одинаковой мощностью дозы. РНП вычисляется как

$$\alpha(\lambda, D)[\partial Б / км] = \frac{10}{\Delta L} \cdot \lg\left(\frac{j(\lambda, D) \cdot I(\lambda, 0)}{J(\lambda, 0) \cdot i(\lambda, D)} \right) \qquad (1)$$

где λ – длина волны, D – доза, i и j – интенсивности выходных сигналов основного и опорного отрезков ВС в процессе облучения, I и J – интенсивности выходных сигналов тех же отрезков до начала облучения, ΔL=1,77 м – разница длин основного и опорного отрезков. Отношение входных интенсивностей было постоянным в течение всего эксперимента.

Установлено, что при малых дозах (<1 МГр) минимальное РНП у стекол с высоким содержанием гидроксила (800-1000 ppm), т.к. из-за крайне малой деформированности сетки в нем не возникают АД с полосами на 1,88 и 1,63 эВ и при этом отсутствует «коротковолновый хвост» РНП из-за Cl^0-центра [3] (рисунок 1).

При больших дозах (>1 МГр) «работают» другие РЦО: Cl^0-центр [3] и НАК [1], возникающие в ВС из стекол с большим содержанием хлора или гидроксила (рисунок 2).

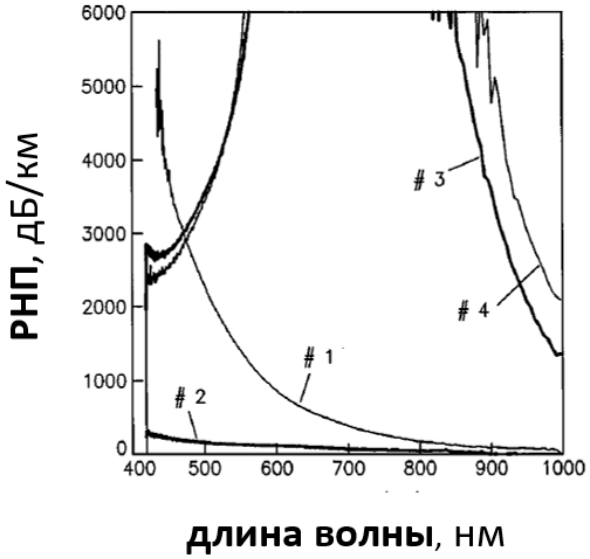

Рисунок 1 – Спектры РНП в четырех ВС с различными кварцевыми стеклами в сердцевине при дозе всего 254 Гр (5,6 Гр/с): #1 – ВС из стекла F-300 с высоким содержанием хлора (1200 ppm), #2 – ВС из стекла КУ-1 с высоким содержанием гидроксила (800 ppm), #3 – ВС из стекла КС-4В, #4 – ВС из японского фторсиликатного стекла. В ВС #3 и #4 крайне мало содержание примесей и хлора и гидроксила (≤40 ppm Cl, ≤3 ppm OH)

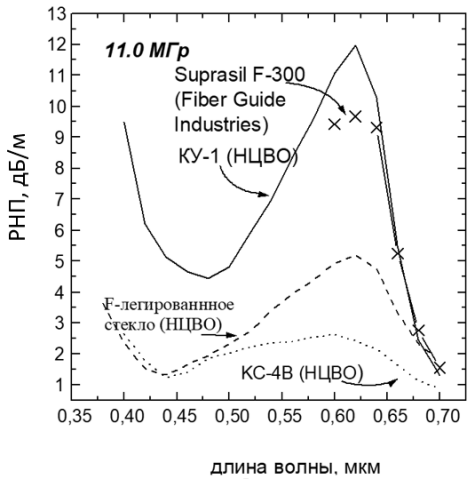

Рисунок 2 – РНП в тех же ВС, что и на рисунке 1, при дозе 11 МГр (6,9 Гр/с). Сплошная линия – ВС #2 (КУ-1), кресты – ВС #1 (F-300), пунктирна линия – ВС #4 (японское фторсиликатное стекло), точечная линия – ВС #3 (КС-4В).

Поэтому сделан вывод, что высокая радиационная стойкость при больших дозах обеспечивается стеклами, практически не содержащими этих примесей (КС-4В и японское стекло со фтором).

В **разделе 2.3** исследуются физические механизмы образования предшественников важнейших «парных» РЦО НАК и E’-центра (трехкоординированного атома кремния ≡Si•) [1], [3] при изготовлении преформы ВС плазмохимическим нанесением фторсиликатного слоя (оболочки ВС) на опорный стержень.

Анализируются спектры РНП в поперечных срезах стержней (рисунок 3), прошедших воздействие плазменного СВЧ-факела в установке для плазмохимического осаждения фтор-силикатного стекла (POD-установке) [11] при различных температурах, продолжительностях и химических составах плазменного факела.

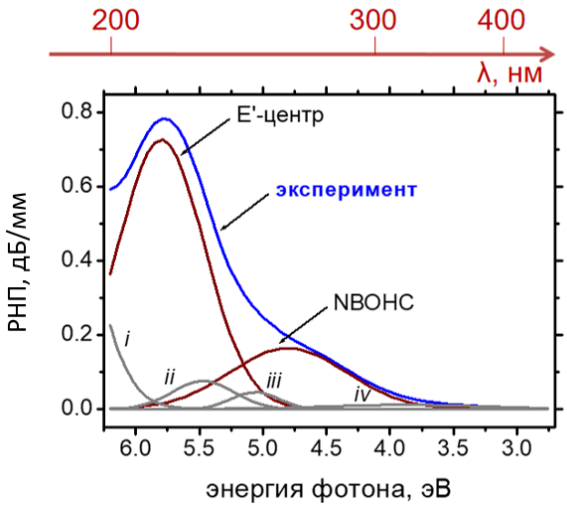

Рисунок 3 – Типичный спектр РНП в поперечном срезе стержня (синий) и его гауссовые составляющие – E'-центр, НАК (коричневые) и четыре виртуальные малые полосы i-iv (серые).

Из спектров РНП по формуле Смакулы (1) [12] определяются концентрации НАК и E'-центра:

$$Cf \approx 8.72\times10^{16}\frac{n}{(n^2+2)^2}\alpha\,\Delta\times\left[cm^{-2}eV^{-1}\right] \qquad (2)$$

где C – концентрация центра окраски, f – сила осциллятора полосы поглощения, n – показатель преломления в этой полосе, α – амплитуда полосы поглощения, выраженная в см$^{-1}$, Δ – полная ширина полосы поглощения на полувысоте (FWHM).

Из анализа спектров РНП уточнено на ~25% значение силы осциллятора НАК (f(НАК) =0,067 при f(E') = 0,14) и получены точные выражения для пересчета амплитуд этих полос поглощения α в концентрации РЦО:

$$C_{E'} = (4.03\times10^{16})\alpha_{E'} \qquad (3)$$

$$C_{HAK} = (1.17\times10^{17})\alpha_{HAK} \qquad (4)$$

Далее анализируются зависимости $C_{E'}$ от $C_{HAK,}$ в образцах из стекла КУ-1 с высоким содержанием гидроксила (рисунок 4), и из этих зависимостей определяются механизмы образования предшественников РЦО. Установлено, что предшественники возникают из-за термоиндуцированного выхода молекул H_2O и H_2 из стекла (рисунок 5). Делается вывод, что для получения радиационно-стойких ВС с сердцевиной из стекла с высоким содержанием гидроксила необходимо максимальное снижение температуры и продолжительности процесса

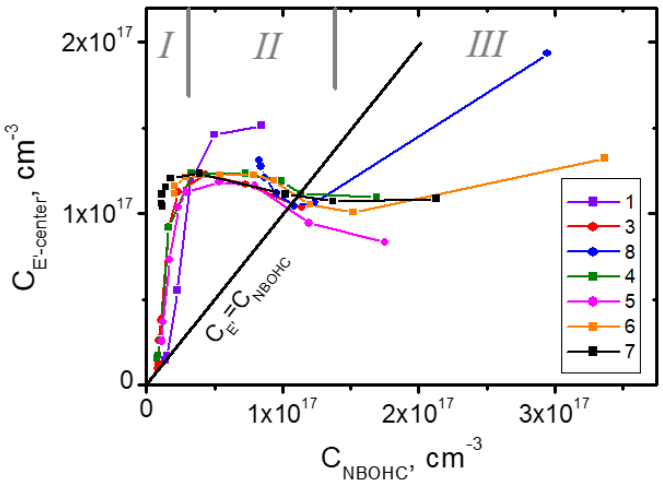

Рисунок 4 – Зависимость концентрации E'-центра от концентрации НАК (NBOHC) в образцах 1-7 из стекла КУ-1, прошедших различную обработку в POD-установке. I- центральная часть стержня, II-промежуточная, III-периферийная.

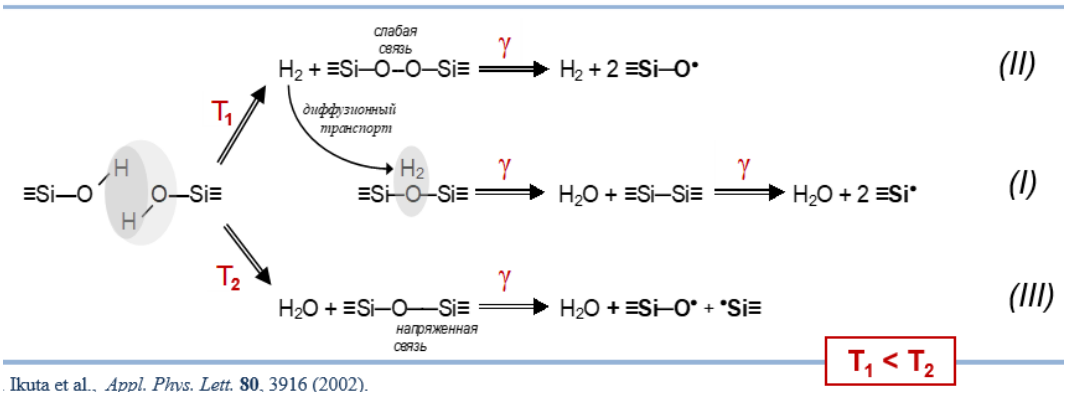

Рисунок 5 – Термоиндуцированные и следующие за ними радиационно-индуцированные процессы в сетке стекла КУ-1, приводящие к образованию НАК и E'-центра. Римские цифры обозначают области стержня на рисунке 4, в которых эти процессы являются доминирующими.

осаждения фторсиликатного слоя (т.е. минимизация его толщины). Для снижения температуры также рекомендована замена POD (1600-1900 °C) на PCVD-процесс (1000-1200 ºC).

В стекле КС-4В с малым содержанием гидроксила вместо образования предшественников РЦО в POD-процессе происходит отжиг напряженных связей Si–O – предшественников РЦО.

В **разделе 2.4** исследуется образование предшественников РЦО при вытяжке ВС. Показано, что для гидроксильного стекла КУ-1 вытяжка не приводит к возникновению новых предшественников (причины – малое время термического воздействия и подавление водородом разорванных при вытяжке ВС связей). Для стекла КС-4В вытяжка, наоборот, приводит к возникновению предшественников РЦО – напряженных связей Si–O. Т.о., изготовление преформы, с одной стороны, и вытяжка ВС, с другой, влияют н а стекло с высоким и низким

содержанием гидроксила противоположным образом.

В **разделе 2.5** описывается принцип действия изобретенного дозиметра на радиационно-стойком ВС, в котором, освобождаясь под облучением, атомы водорода из оболочки с высоким содержанием гидроксила проникают в безводную сердцевину, вызывая рост полосы поглощения ОН-групп, по амплитуде которой и определяется доза.

Раздел 2.6 – выводы из Главы 2.

В **Главе 3** описываются радиационно-стойкие ВС в герметичном покрытии, содержащие молекулярный водород в стекле, и обеспечение высокой радиационной стойкости микроструктурированных ВС путем подачи H_2 через продольные отверстия в их оболочке.

В **разделе 3.1** изучается спектр РНП в γ-облученных ВС из стекла КУ-1 с высоким содержанием гидроксила и стекла КС-4В с малым содержанием гидроксила, которые предварительно были насыщены молекулярным водородом.

Насыщение ВС газом H_2 проводилось в газостате при давлении 2,4–10 МПа и Т~25-100 °С (для полимерного покрытия) и 5–154 МПа и 150–300 °С (для герметичного покрытия).

Равновесное значение количества молекул H_2, растворенных в единице объема кварцевого стекла определяется достаточно «громоздкой» формулой [13]:

$$n_s/p = (h^2/2\pi mkT)^{3/2} \cdot (kT)^{-1} \cdot N_s \cdot [e^{-h\nu/2kT}/(1 - e^{-h\nu/kT})]^3 \cdot \exp(-E_0/RT) \quad (5)$$

где n_s – количество молекул H_2 в единице объема стекла, p – парциальное давление водорода, h – постоянная Планка, m – масса молекулы водорода, k – постоянная Больцмана, T – температура, N_s – количество потенциальных дислокаций (мест) в единице объема сетки стекла, в которых может расположиться молекула H_2, ν – частота колебаний молекулы H_2, R – универсальная газовая постоянная, E_0 – энергия связи молекулы H_2 с сеткой стекла.

Из (5) экспериментально получается важное соотношение: концентрация молекул H_2 $1 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ дает амплитуду характеристического пика поглощения H_2 в кварцевом стекле на λ=1,24 мкм в 3,4 дБ/км при Т=300 К [13], которое мы и использовали в работе.

Установлено, что при облучении ВС с водородом (n_s=$7 \cdot 10^{19}$ $см^{-3}$) атомы водорода постепенно входят в сетку стекла, подавляя НАК и АД. При этом кроме снижения РНП в видимом диапазоне наблюдается одновременно и его рост, особенно в области λ≤0,5 мкм, из-за коротковолнового хвоста, обусловленного «новыми» РЦО. Это оказались H(I)- и E'$_\beta$-центры (трехкоординированные атомы кремния, модифицированные атомом водорода: ≡Si•–H и

≡Si•….H–Si≡ соответственно) [1], [6]. Установлено, что эти РЦО подавляются самим молекулярным водородом, при его большей концентрации в стекле ($\geq 1 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$), при этом необходимо полностью исключить диффузионный выход H_2 из ВС, т.е., иметь герметичное покрытие (непроницаемое для молекул H_2 в нормальных лабораторных условиях).

В **разделе 3.2** разрабатываются и исследуются ВС в герметичном покрытии (алюминиевом или углеродном), содержащие высокие концентрации H_2 в стекле (до $n_s \sim 5{,}2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$). При такой величине n_s достигнуто многократное подавление РНП как из-за НАК и АД, так и из-за Н(I)- и Е'$_\beta$-центров (рисунок 6).

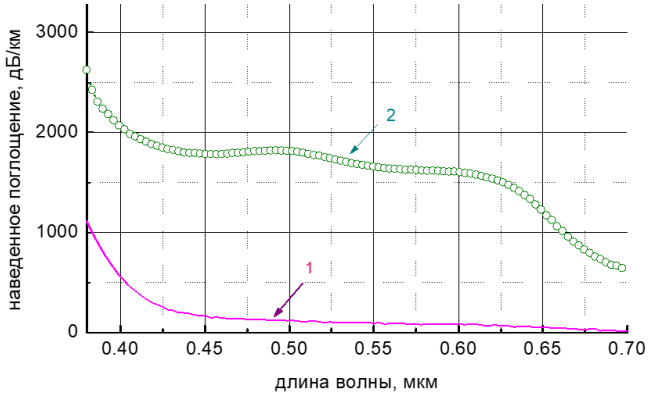

Рисунок 6 – Спектры РНП в двух отрезках ВС из стекла КС-4В в алюминиевом покрытии: насыщенном H_2 (1) и не насыщенном (2) после γ-облучения до 1,7 МГр

В **разделе 3.3** рассматривается радиационная стойкость ВС в алюминиевом покрытии, содержащих H_2 в стекле, в условиях реакторного облучения. Показано, что по радиационной стойкости (по малости величины РНП в видимом диапазоне) наши ВС в герметичном покрытии, содержащие молекулярный водород ($n_s \sim 7 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$), многократно превзошли радиационно-стойкие ВС ведущих мировых производителей (рисунок 7).

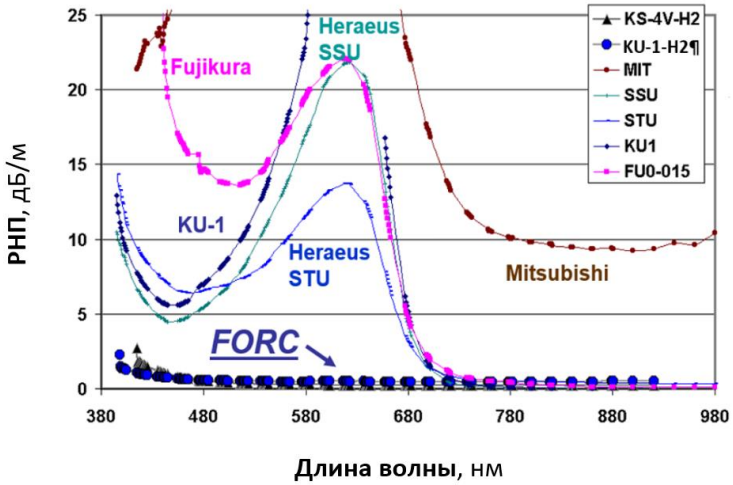

Рисунок 7 – Спектры РНП в ВС фирм «Fujikura», «Heraeus», «Mitsubishi», в ВС из стекла КУ-1 (KU-1) и в ВС НЦВО РАН («FORC») в алюминиевом покрытии и с молекулами H_2 в стекле (две нижние кривые) при их облучении от ядерного реактора. Измерения сделаны во время остановки реактора при достижении флюенса быстрых нейтронов $2.8 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$ и γ-дозы 16 МГр. Насыщенные водородом ВС имеют стекла марок КУ-1 и КС-4В в сердцевине.

Раздел 3.4 посвящен исследованию спектров РНП и генерационных свойств эрбиевого ВС с сердцевиной, солегированной алюминием (Er,Al: SiO_2/SiO_2), имеющего герметичное углеродное покрытие и насыщенного газом H_2 до n_s~$2{,}5\cdot10^{19}$ см$^{-3}$ Сравнивались спектры РНП и дифференциальная эффективность η волоконного лазера на отрезках этого ВС, насыщенных H_2 перед облучением или не насыщенных. Кроме прямого измерения делалась оценка η по (6):

$$\eta = \eta_0(1-\alpha_p C_p)(1-\alpha_s C_s) \qquad (6)$$

где η_0 – эффективность до облучения, α_p и α_s – РНП на длине волны накачки (“pump”) и сигнала (“signal”), C_p и C_s – константы, зависящие от параметров резонатора и поглощения накачки при малом уровне сигнала в ВС до облучения. Оказалось, что (6) дает заниженное η *для ВС* с H_2 на λ_p=980 нм, что, как было установлено, связано с интенсивным фотообесцвечиванием РНП излучением накачки. Таким образом, была установлена предпочтительная длина волны накачки λ_p=980 нм для эрбиевого ВС с H_2. Выигрыш в радиационной стойкости активного эрбиевого ВС за счет насыщения молекулярным водородом ВС с покрытием, не проницаемым для H_2, нами оценивается, исходя из сравнения доз, при которых происходит 20-процентное снижение дифференциальной эффективности (рисунок 8). Для ВС с водородом оно происходит при ~3,8-4,0 кГр, а для ВС без водорода – уже при ~0,13-0,15 Гр. То есть, выигрыш в радиационной стойкости (т.е. во времени жизни ВС в космосе) – в ~25-30 раз! Выигрыш будет еще более значительным при использовании дейтерия вместо водорода.

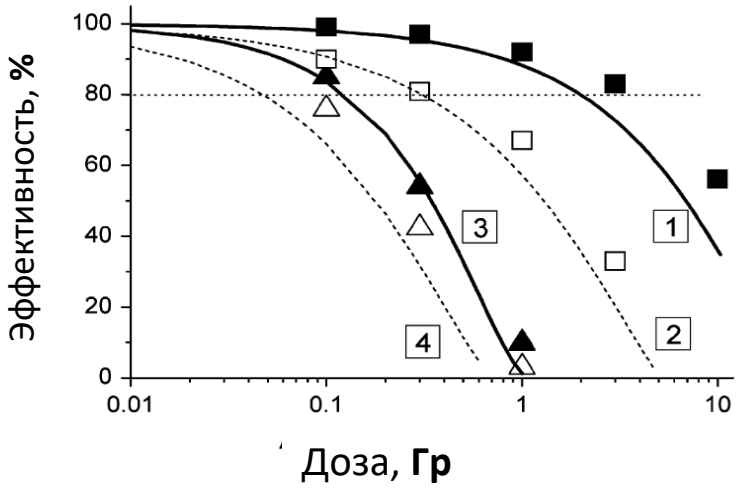

Рисунок 8 – Дифференциальная эффективность (η) волоконного лазера, нормированная на ее значения до облучения, как функция γ-дозы. Значение η измерено через 10 мин. работы лазера. Квадраты (1,2) – эрбиевый ВС, насыщенный H_2; треугольники (3,4) – ненасыщенный. Заполненные символы (1,3) – накачка λ_p=980 нм; незаполненные (2,4) – λ_p=1480 нм. Линии – кривые, вычисленные по (6).

В **разделе 3.5** показано, что применение H_2 и D_2 для снижения РНП на длинах волн оптической связи λ=1,31 и 1,55 мкм возможно при нахождении компромисса между РНП и ростом потерь из-за колебательных полос поглощения H_2, D_2, OH и OD.

В **разделе 3.6** описано подавление РНП за счет подачи H_2 в стекло ВС по продольным отверстиям в оболочке.

В **разделе 3.7** даны выводы из Главы 3.

Глава 4 посвящена созданию физических основ получения радиационно-стойких одномодовых ВС для применения на длинах волн оптической связи и датчиков λ~1,3 и 1,55 мкм.

Оптимизируется радиационная стойкость ВС из MCVD-преформ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и оболочкой из фторсиликатного стекла (SiO_2/F:SiO_2).

Установлены основные источники РНП на λ~1,3 и 1,55 мкм, – это хвосты полосы поглощения Cl^0-центра и полос АД с центрами на 1,88 и 1,63 эВ.

Для подавления вхождения хлора в стекло и проявления Cl^0-центра под облучением оптимизируются параметры MCVD-процесса: создается большой избыток O_2 над $SiCl_4$ в смеси реагентов при синтезе сердцевины.

Установлено, что зависимость РНП из-за АД от отношения молярных расходов O_2 и $SiCl_4$ *r* носит выраженный резонансный характер и минимизируется при согласовании величины избытка кислорода в сердцевине и концентрации фтора в оболочке.

Установлено, что зависимость РНП из-за АД ($РНП_{STH}$) от температуры вытяжки (т.е. фактически от фиктивной температуры T_f) имеет аррениусовский вид (рисунок 9):

$$РНП_{STH} = C \times exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \qquad (7)$$

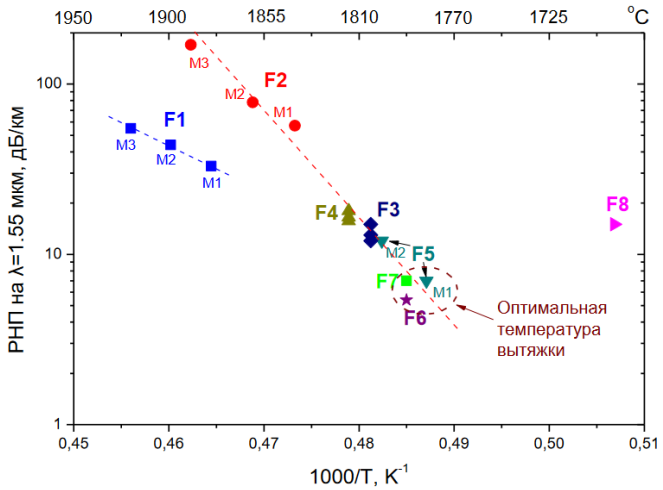

Рисунок 9 – Зависимость максимума РНП в ВС на λ=1,55 мкм, достигаемого при мощности дозы γ-облучения 7,6 Гр/с и дозе 2,5 кГр, от обратной температуры вытяжки. ВС из преформы F1 (синие символы) имели высокое содержание гидроксила (4 вес. ppm). ВС F8 (розовый символ) вытянут при избыточно низкой температуре.

где T – температура вытяжки, E_a – энергия активации реакции образования предшественников деформационных АД при вытяжке ВС, C – константа.

Установлено также, что и рэлеевское рассеяние растет с температурой вытяжки линейно, как и предсказывалось теоретически [14]:

$$\alpha = \frac{8}{3}\frac{\pi^3}{\lambda^4}(n^8 p^2)(kT_f)\beta_T \qquad (8)$$

где p – упругооптический коэффициент стекла ВС, k – постоянная Больцмана, β_T – изотермическая сжимаемость ВС.

Таким образом, складывается следующая физическая картина зависимости величины РНП от температуры вытяжки. Вытяжка повышает T_f, т.е. степень сжатия сетки стекла. Кроме того, фрагменты со сжатыми связями Si–O чередуются с фрагментами с удлиненными связями (застывшая картина тепловых колебаний сетки при T_f.). С увеличением контрастности продольного распределения плотности растет рэлеевский коэффициент. С другой стороны, время жизни и концентрация АД, тоже растут с ростом сжатия и ростом контрастности продольного распределения плотности, т.к. АД стабилизируются электронными облаками соседних атомов кремния и обладают заметным временем жизни только на сжатых связях Si–O.

При избыточно низкой температуре вытяжки деформационное состояние сетки стекла ВС (степень ее сжатия в поперечном сечении) определяется уже не температурой, а натяжением вытяжки (образец F8, рисунок 9).

Оптимизация MCVD-процесса и параметров вытяжки позволили получить ВС состава $SiO_2/F:SiO_2$, сравнимые по радиационной стойкости со фторсиликатными ВС фирмы «Фуджикура» ($F:SiO_2/F:SiO_2$), обладающими рекордной радиационной стойкостью (рисунок 10).

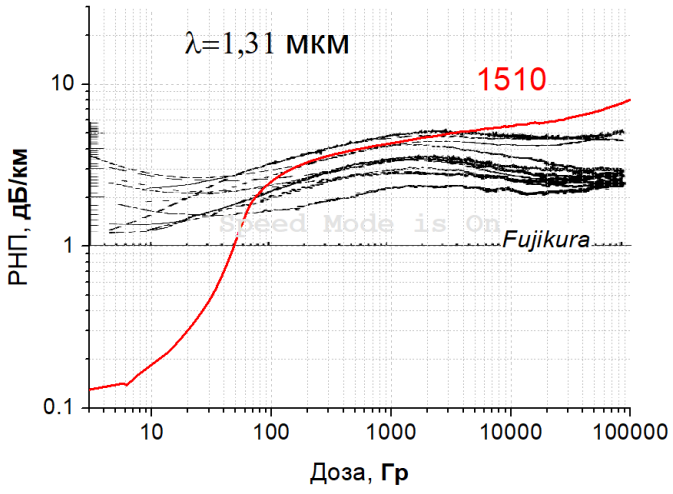

Рисунок 10 – РНП в нелегированном ВС 1510 данной работы (красная кривая) и в серии номинально одинаковых фторсиликатных ВС фирмы «Фуджикура» (черные кривые) [7].

В **Главе 5** исследуются АД, которые, как было известно, возникают при рассеянии ионизирующего излучения на электроне немостиковой p-орбиталей атомов кислорода.

Обосновывается зависимость АД от деформационного состояния (степени сжатия) сетки стекла, делается классификация видов АД на собственные, деформационные и промежуточные и описываются изменение соотношения концентраций различных видов АД при изменении температуры и при радиационно-индуцированной перестройке сетки стекла.

В **разделе 5.1.** рассматриваются проявления АД при изменении температуры облучения ВС.

Установлено, что амплитуда «классических» полос АД на 1,63 и 1,88 эВ, наблюдавшихся в ВС [1], достигает максимума при ~0 °С, температуре максимального сжатия кварцевого стекла (рисунок 11). Это доказывает зависимость их времени жизни от деформационного состояния стекла (от степени сжатия связи Si–O, на которой автолокализуется дырка).

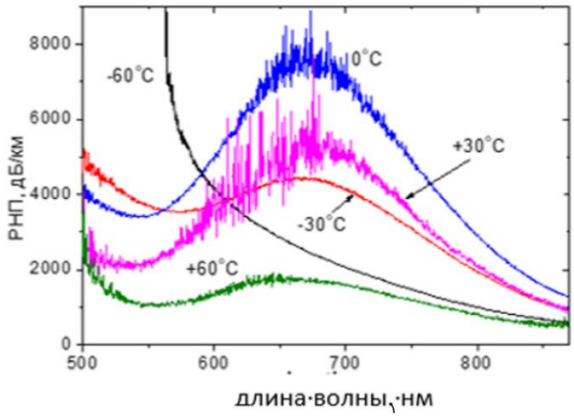

Рисунок 11 – Спектры РНП в ВС 1306 в процессе γ-облучения при дозе 1 кГр (1,1 Гр/с) при пяти температурах в пределах ±60 °С. Полоса РНП на ~700 нм есть сумма полос АД на 1,63 и 1,88. Виден растущий при снижении температуры хвост полосы АД на 2.60 эВ.

В ВС нами идентифицированы полосы АД на 2.16 и 2.60 эВ, которые ранее наблюдались только в срезах объемных образцов кварцевого стекла [15]. Установлено, что их амплитуда в ВС монотонно растет при понижении температуры и при -196 °С становится практически на порядок больше, чем амплитуда полос на 1,63 и 1,88 эВ (рисунок 12).

В **разделе 5.2** по экспериментальным проявлениям полос АД при вариации температуры делается классификация трех видов АД .

Т.к. амплитуды всех полос АД выше у ВС, полученных при неоптимальных параметрах, делается вывод, что сжатие связей Si–O благоприятствует стабилизации дырки за счет электронных облаков соседних атомов кремния.

АД на 2.16 и 2.60 эВ наблюдаются при малом сжатии сетки (в первую очередь, в срезах объемных образцов, имеющих низкую фиктивную температуру по сравнению с ВС). В ВС эти

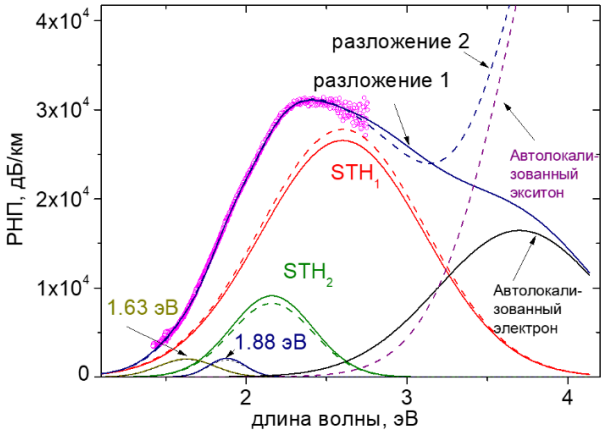

Рисунок 12 – Разложение на гауссовые составляющие спектра РНП нелегированного ВС 1207 при его γ-облучении при дозе 1 кГр (1,1 Гр/с) и при азотной температуре. Полосы АД на 2.16 и 2.60 эВ обозначены как «STH_1» и «STH_2». Даны два варианта разложения, по-разному аппроксимирующие вклад от высоких энергий (автолокализованный экситон либо автолокализованный электрон).

полосы растут монотонно при снижении температуры, т.е. с уменьшением термического обесцвечивания и соответствующим увеличением времени жизни. Эти АД отнесены нами к виду «собственных» («inherent») АД, т.е. присущих кварцевому стеклу как таковому. Установлено, что для АД этого вида сжатие связи Si–O также приводит к росту интенсивности полос.

Длинноволновая полоса с максимумом на ~0.6-0.7 эВ, известная как «low-temperature infrared absorption (LTIRA)» [16], также отнесена нами к собственным АД, так как обладает такой же температурной стабильностью, как и полосы на 2.16 и 2.60 эВ [16]. Ее особенность – негауссовая форма: резкий спад с длиной волны ее длинноволнового фронта и медленный спад коротковолнового фронта (рисунок 13). При комнатной температуре термостабильная часть этой полосы определяет РНП в ВС на λ=1,31 и 1,55 мкм наряду с полосами АД на 1,88 и 1,63 эВ:

$$\text{РНП}(E) = B_0 \cdot E \cdot \exp\left(-\frac{E}{S}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{E}{Q}\right) - \exp\left(\frac{E_p}{Q}\right)\right] \qquad (9)$$

где E – длина волны в единицах энергии, $Q=D+S/(D-S)$, B_0, D, S – «подгоночные» параметры, определяемые из аппроксимации экспериментального РНП по (9), E_p=0,65 эВ – энергия автолокализации дырки. Коротковолновый край LTIRA, влияющий на РНП на λ=1,33 и 1,55 мкм, аппроксимируется простой экспонентой [16]:

$$\text{РНП}(E)=C\cdot\exp(-E/R) \qquad (10)$$

где R определяется из хода РНП и характеризует скорость спада РНП при увеличении энергии (уменьшении длины волны).

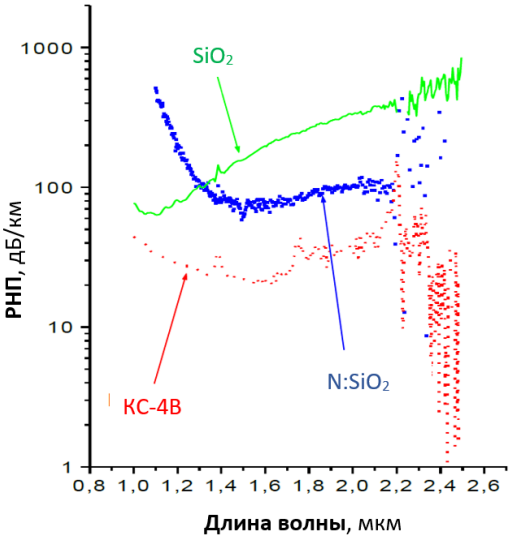

Рисунок 13 – Спектры РНП, измеренные после γ-облучения до дозы 0,94 МГр (4,0 Гр/с) в трех ВС: нелегированном, полученном с помощью SPCVD-процесса («SiO_2», зеленый), ВС с сердцевиной из стекла КС-4В, полученном с помощью POD-процесса («КС-4В», красный), и в ВС с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом («$N:SiO_2$», синий). Именно длинноволновая полоса АД создает РНП в ВС «КС-4В» и «$N:SiO_2$»

Полоса представляет собой континуум состояний с разной энергией; в процессе термического распада ее амплитуда снижается, а максимум сдвигается в сторону меньших длин волн (бо̀льших энергий). В [16] обосновывается предположение, что полоса описывает прыжковый транспорт дырки по сетке стекла.

АД на 1,63 и 1,88 эВ [1], [17] наблюдаются только в ВС, т.к. они имеют высокую фиктивную температуру T_f, по сравнению со объемным стеклом, не подвергавшимся нагреву с быстрым охлаждением (вытяжке). При росте степени сжатия сетки стекла ВС (при росте температуры от -196 °С к 0 °С) растут и АД на 1,63 и 1,88 эВ. Эти АД классифицированы нами как деформационные («strain-assisted»). Из-за изменения состояния сжатия сетки стекла ВС при изменении температуры происходит взаимопревращение собственных и деформационных АД (т.е. происходит одновременный рост полос АД одного вида и распад полос другого вида).

При нагреве ВС до +60 °С, а также в самом начале облучения нами обнаружена еще одна полоса АД с максимумом вблизи 1 эВ. Принадлежность этой полосы к АД доказывается сильной зависимостью ее амплитуды от мощности дозы и высокой скоростью термического распада после остановки облучения.

Установлено, что полоса состоит из двух близких полос с центрами на 1,12 и 0,95 эВ (1,20 и 0,93 эВ по данным более поздней работы [18]). Эти новые АД отнесены нами к «промежуточному» виду («intermediate»), т.к. они, с одной стороны, обладают на 5 порядков бо̀льшим временем жизни, чем собственные АД, а с другой, в 1,8 раз меньшим временем жизни,

чем деформационные АД.

При облучении происходит радиационно-индуцированная перестройка сетки стекла, ведущая к исчезновению сильно сжатых связей Si–O. Деформационные АД в процессе облучения ВС достигают максимальной популяции при дозе ~3-5 кГр. При дальнейшем облучении деформационные АД монотонно исчезают в результате радиационно-индуцированной перестройки сетки, ведущей к исчезновению сильно сжатых связей. При непрерывном γ-облучении деформационные АД исчезают к дозе ~2-10 МГр (тем раньше, чем больше мощность дозы). Установлено, что на месте деформационных АД возникают АД двух других видов, соответствующих большей длине связи Si–O (собственные и промежуточные АД). Этот факт доказывает, что промежуточные АД возникают на фрагментах сетки с меньшим сжатием связей Si–O, чем у деформационных АД.

Таким образом, исходя из степени сжатия связи Si–O и времени жизни делается вывод, что виды АД различаются по энергии автолокализации: собственные и деформационные АД имеют малую и большую энергию автолокализации соответственно, а промежуточные АД – некоторое промежуточное значение.

В **разделе 5.3** обосновывается, что АД являются единственным источником РНП в ВС состава сердцевины/оболочки $SiO_2/F:SiO_2$ на длинах волн оптической связи после подавления примеси хлора (рисунки 14 и 15).

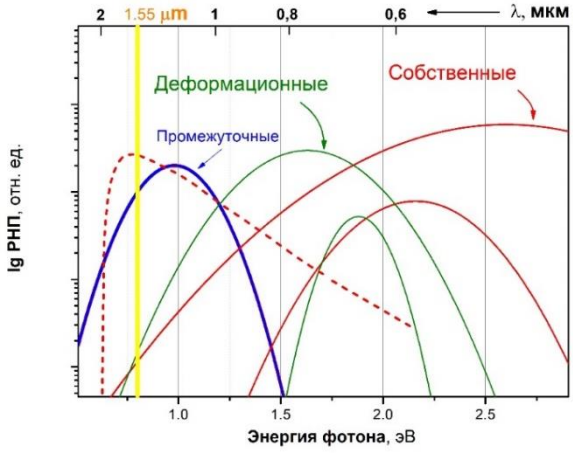

Рисунок 14 – Полосы поглощения АД в нелегированных ВС (состав $SiO_2/F:SiO_2$). Красными и зелеными линиями показаны полосы АД собственного и деформационного вида соответственно. Красный пунктир изображает LTIRA. Для двух полос АД промежуточного вида показана их совокупная полоса (синяя).

В **разделе 5.4** обобщены данные о проявлениях АД в легированных ВС и в нелегированных ВС с высоким содержанием хлора или гидроксила. АД в таких ВС сильно подавлены, так как подавлены деформации сетки стекла.

В **разделе 5.5** даны выводы из Главы 5, важнейшие из которых следующие.

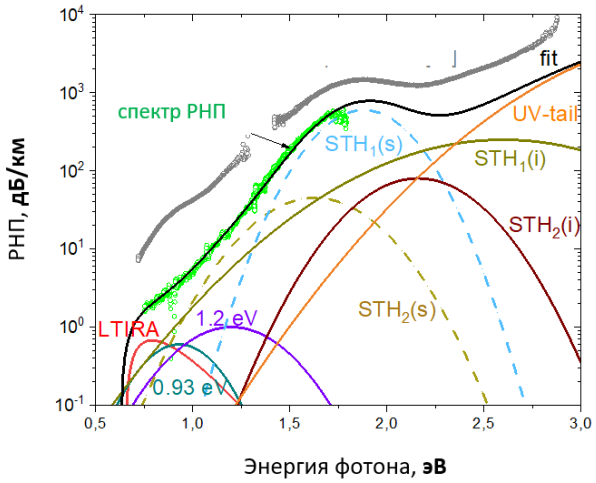

Рисунок 15 – Типичный спектр РНП в ВС состава SiO_2/F:SiO_2 и его разложение на полосы АД ("STH") и ультрафиолетовый хвост. Видно, что РНП на длинах волн оптической связи полностью описывается полосами АД.

АД возникает на немостиковой *p*-орбитали атомов кислорода при условии ее стабилизации электронными облаками соседних атомов кремния, и сжатость связи Si–O – необходимое условие возникновения достаточно стабильных АД. Установлено существование одновременно трех видов АД в одном ВС, которые отличаются спектральным положением полос поглощения и которые возникают на фрагментах сетки с разной степенью сжатия связей Si–O: собственные АД – при наибольшей длине связи Si–O, промежуточные АД – при умеренно сжатой связи Si–O и деформационные АД – при сильно сжатой связи Si–O. Соответственно, виды АД отличаются энергией автолокализации и временем жизни: собственные и деформационные АД имеют малую и большую энергию автолокализации соответственно, и промежуточные АД – промежуточное значение. Виды АД совершают взаимопревращения (одновременные изменения интенсивности полос) при изменении деформационного состояния сетки, напр., при изменении температуры облучения или при радиационно-индуцированной перестройке сетки стекла.

В **Главе 6** описываются исследования стойкости ВС к интенсивному импульсному воздействию ионизирующего излучения.

В **разделе 6.1.** обсуждаются особенности экспериментального подхода в нашей работе. Использовалось тормозное излучение импульсов линейных ускорителей электронов во РФЯЦ-ВНИИЭФ с энергией электронов 3-40 МэВ. Длительность импульса – 18-20 нс. Мощность дозы 10^6-10^{11} Гр/с.

РНП в ВС измерялось на временах ~10^{-6}–2 с после импульсного воздействия. В основном, все опыты проведены на λ=1550 нм, но в некоторых опытах измерения проводились одновременно на четырех длинах волн λ=1550, 1310, 659 и 828 нм, что позволило

дискриминировать виды АД не только по времени жизни, но и по спектральному положению их полос поглощения.

В **разделе 6.2.** делается сравнение временного хода РНП и его дозной зависимости на λ=1550 нм в нелегированных ВС, оптимизированных для случая воздействия непрерывного γ-излучения (см. Главу 4), и германосиликатных ВС, а также сравнение с литературными данными для ВС, легированных фосфором и азотом, и фотоннокристаллических ВС с полой сердцевиной.

Установлено, что дозная зависимость РНП в оптимизированных нелегированных ВС описывается степенным законом с показателем q~0,2,-0,5, что означает стремление к насыщению с дозой. В то же время дозная зависимость РНП у германосиликатных ВС близка к линейной (q~0,7-1,0). Поэтому РНП в оптимизированных нелегированных ВС оказалось меньше, чем в германосиликатных ВС начиная с дозы ~2 Гр, при этом превосходство нелегированных ВС растет с дозой.

Таким образом, показано, что нелегированные ВС, оптимизированные для случая воздействия непрерывного γ-излучения, являются наиболее стойкими ВС и к интенсивному импульсному облучению, что опровергает предыдущее представление о невозможности оптимизации ВС одновременно к обоим видам воздействия.

В **разделе 6.3.** дается физическое объяснение формы временной зависимости РНП в нелегированных ВС, анализируется зависимость временного хода РНП от температуры вытяжки и возможность подавление РНП путем малодозного импульсного предоблучения.

Установлено, что временной ход РНП при вводимой в нелегированный ВС световой мощности милливаттного уровня указывает на наличие двух РЦО с различными временами жизни (рисунок 16). Был сделан анализ формы временного хода РНП в рамках модели кинетики второго порядка [19]:

$$\alpha(t) = \sum_{i=1}^{2} C_i \left[1 + \left(\frac{t}{\tau_i} \right)^{\beta_i} \right]^{-1} \qquad (11)$$

где $\alpha(t)$ – РНП в момент времени t, C_i – концентрации АД двух видов в единицах РНП, τ_i – характеристическое время жизни АД, β_i – показатель экспоненты ($0<\beta_i<1$).

Аппроксимация по (11) позволила определить характеристические времена жизни τ для АД обоих видов, отличающиеся на пять порядков величины: τ_1=8,5·10^{-6} с и τ_2=1,7 с (рисунок 16). Исследования временного хода РНП на четырех длинах волн (раздел 6.5, см. ниже) показали, что АД, доминирующие на малых временах (от ~0,1 мкс и до ~ 1 мс, рисунок 16), – это собственные АД, а на больших временах (> 10 мс) – промежуточные АД, а не деформационные АД, как считалось ранее в [20].

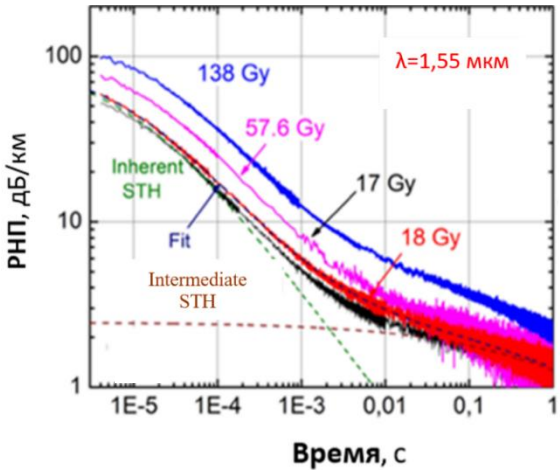

Рисунок 16 – Временной ход РНП на λ=1,55 мкм в оптимизированном нелегированном ВС после каждого из нескольких импульсов тормозного излучения с различной дозой. Зеленая и коричневая пунктирные линии показывают ход РНП от собственных АД («inherent STH») и промежуточных АД («intermediate STH»), вычисленный путем разложения РНП после импульса дозой 18 Гр (красная кривая) по (11). Черная пунктирная линия – их сумма.

Сравнение временного хода РНП в ВС с различной температурой вытяжки показало, что ее изменение на 20 °С приводит к изменению деформационного состояния сетки таким образом, что преобладают либо собственные, либо промежуточные АД. Поэтому в зависимости от температуры вытяжки РНП в одних ВС меньше на малых временах после импульса <0,01 с, в других – на больших временах (рисунок 17). Так, ВС, вытянутые с меньшей температурой (1860 °С в нашем случае) демонстрируют меньшую популяцию промежуточных и деформационных АД и бо̀льшую собственных АД, а вытянутые с бо̀льшей температурой (1880 °С) – наоборот. Таким образом, меняя температуру вытяжки, можно получить снижения РНП либо на малых, либо на больших временах после импульса в зависимости от требуемого времени восстановления ВС после импульсного воздействия.

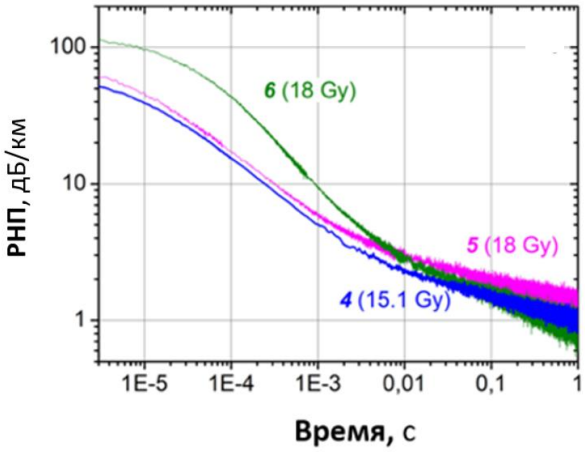

Рисунок 17 – Временной ход РНП на λ=1,55 мкм после импульсного воздействия в трех нелегированных ВС, отличавшихся только температурой вытяжки: 4 – 1890 °С, 5 – 1880 °С, 6 – 1860 °С.

Отклик ВС на импульсное воздействие оказался полезным и еще одним индикатором деформационного состояния сетки стекла ВС (наряду с рэлеевским рассеянием и интенсивностью РНП деформационных АД при непрерывном γ-облучении).

При многократном импульсном облучении оптимизированных нелегированных ВС форма временной зависимости РНП в них воспроизводится, т.е. деформационное состояние сетки стекла, определяющее соотношение собственных и промежуточных АД, не меняется.

При вытяжке с T_d =1890 °С увеличивается концентрация собственных АД. Установлено, что эти дополнительные собственные АД могут быть подавлены предварительным малодозным импульсным облучением (100-200 Гр). Делается вывод, что это радиационное упрочнению физически аналогично ранее известному упрочнение путем предварительного γ-облучения [17]. Но в отличие от последнего, импульсное предоблучение применимо практически, т.к. в силу малости требуемой дозы не приводит к существенному повышению стабильного РНП.

Далее описывается возникновение дополнительных собственных АД при отклонении от оптимального отношения расходов реагентов при синтезе преформы. В этом случае избыточные собственные АД также подавляются импульсным предоблучением.

В **разделе 6.4.** исследуется зависимость РНП в оптимизированных нелегированных ВС после импульсного воздействия от температуры и интенсивности зондирующего света.
Установлено, что повышение интенсивности зондирующего светового сигнала (λ=1,55 мкм) на 3 порядка величины (от 30-40 мкВт до 10 мВт) меняет форму временного хода РНП после импульса (рисунок 18): РНП снижается на малых и возрастает на больших временах. Дается следующее объяснение эффекту. Собственные АД, ответственные за РНП на временах менее 1 мс, при повышении интенсивности света подавляются за счет эффекта фотообесцвечивания РЦО [17]. РНП на больших временах при этом возрастает, т.к. поглощение излучения в сердцевине увеличивает амплитуду колебаний сетки, т.е. уменьшает длину связи Si–O в фазе сжатия. Из-за этого растет время жизни промежуточных АД, для которых этот эффект оказывается более сильным, чем фотообесцвечивание.

Аналогичные изменения РНП наблюдаются при вариации температуры ВС (рисунок 18).

Таким образом, оптимизируя интенсивность рабочего светового сигнала, можно снизить РНП на малых, или больших временах в зависимости от требуемого времени восстановления ВС после импульсного воздействия. Этот эффект аналогичен эффекту температуры вытяжки, описанному в разделе 6.3 и тоже может использоваться на практике. Подстройка температуры вытяжки ВС и одновременно интенсивности светового сигнала дадут наибольший результат.

В **разделе 6.5.** описывается исследование РНП одновременно на 4 длинах волн видимого и ближнего ИК диапазонов, позволившее доказать, что РНП описывается именно собственными

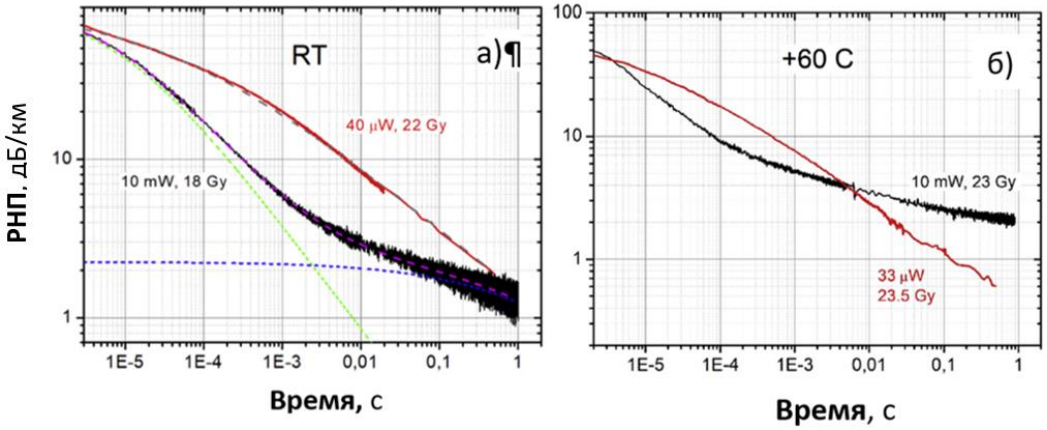

Рисунок 18 – Временной ход РНП в нелегированном ВС на λ=1,55 мкм после двух импульсов облучения с различными интенсивностями света: (а) – при комнатной температуре («RT») с 18 Гр и 10 мВт (черная кривая) и 22 Гр и 40 мкВт (красная). Пунктиром показаны вклады собственных и промежуточных АД. Только собственные АД ответственны за РНП при 40 мкВт, (б) – при + 60 °С с 23 Гр и 10 мВт (черная кривая) и 23,5 Гр и 33 мкВт (красная). Вертикальная ось обоих графиков – РНП в дБ/км.

АД на малых временах и промежуточными АД на больших и пронаблюдать особенности радиационно-индуцированной перестройки сетки стекла при импульсном воздействии.

Эволюция РНП на λ=659 и 828 нм, попадающих практически в максимумы полос деформационных АД, после 7 импульсов с суммарной дозой ~440 Гр (рисунок 19) однозначно указывала на радиационно-индуцированную перестройку сетки. Видно, что амплитуды полос деформационных STH монотонно возрастали до величины ~300-1000 дБ/км при дозе ~300 Гр, после чего также монотонно уменьшалась и практически обнулялась при дозе ~440 Гр (после 7-го импульса). В то же время, при γ-обучении обнуление поглощения деформационных АД и завершение перестройки происходит при мегагрейных дозах [17]. Т.е. при интенсивном импульсном воздействии перестройка сетки происходит значительно быстрее (рисунок 19). Это объяснено большей мощностью дозы (как минимум на 8 порядков), т.к. при одновременном разрыве нескольких близлежащих связей фрагменту сетки со сжатыми связями Si–O легче перестроиться в несжатое или менее сжатое состояние.

Из соотношения РНП на λ=659, 828, 1310 и 1550 нм, показано, что РНП на λ=1310 и 1550 нм не может объясняться хвостами полос деформационных АД с полосами на λ=1,88 и 1,63 эВ, вопреки выводам работы [20], (рисунок 20). При этом РНП на λ=1310 и 1550 нм хорошо описывается суперпозицией полос промежуточных АД с суммарной полосой с центром на ~1,0-1,2 эВ [18]. Следовательно, промежуточные АД и являются причиной РНП на длинах волн оптической связи λ=1,31 и 1,55 мкм на больших временах после импульсного воздействия (>0,01 с).

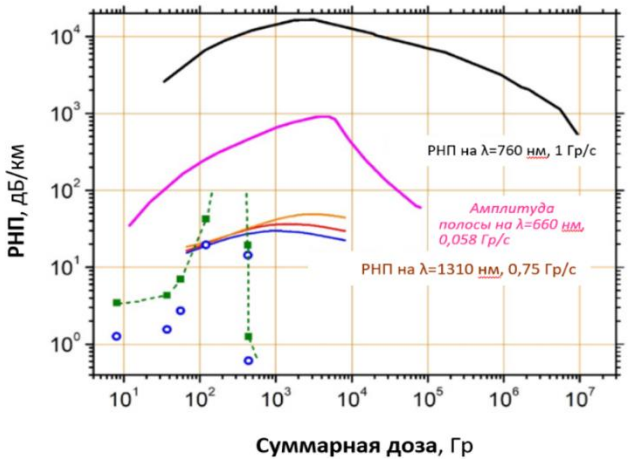

Рисунок 19 – Дозные зависимости РНП в различных нелегированных ВС при непрерывном γ-облучении (сплошные линии) и РНП, измеренное через 2 с после каждого из семи импульсов излучения (кроме 2-го). Заполненные зеленые символы – λ=659 нм, пустые синие символы – λ=838 нм.

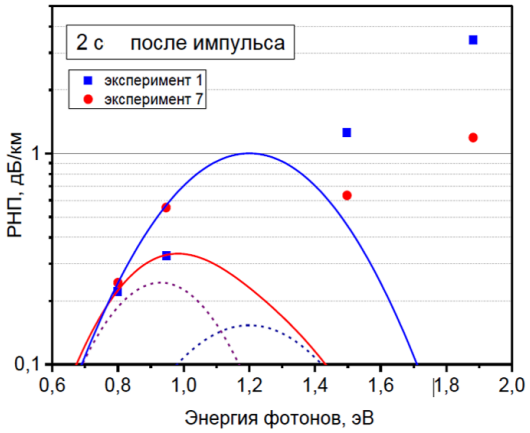

Рисунок 20 – РНП на длинах волн, соответствующих энергии фотонов 1,88, 1,50, 0,95 и 0,80 эВ (λ=659, 828, 1310 и 1550 нм) через 2 с после 1-ого импульса с дозой 8,1 Гр (синие символы) и 7-ого импульса с дозой 9 Гр (суммарная доза 439 Гр, красные символы). Сплошные линии показывают аппроксимацию с помощью линейной комбинации полос АД промежуточного вида (пунктирные линии) с параметрами, взятыми из [18] (центры на 1,20 и 0,93 эВ, FWHM=0,56 и 0,42 эВ).

Сравнение РНП на λ=1310 и 1550 нм на малых временах после импульса (<1 мс) показало, что оно действительно определяется хвостом широкой полосы собственных АД с центром на 2,60 эВ и FWHM=1,2 эВ [15].

Разность временных ходов РНП после 1-го импульса (8,1 Гр) и последнего 7-го (9 Гр, суммарная доза 439 Гр, рисунок 21) указало на то, что радиационно-индуцированная перестройка сетки стекла, ведущая к подавлению сильно сжатых связей Si–O и, соответственно, деформационных АД, привела также к росту концентрации промежуточных и собственных АД, «работающих» на больших (>10 мс) и малых (<1 мс) временах соответственно.

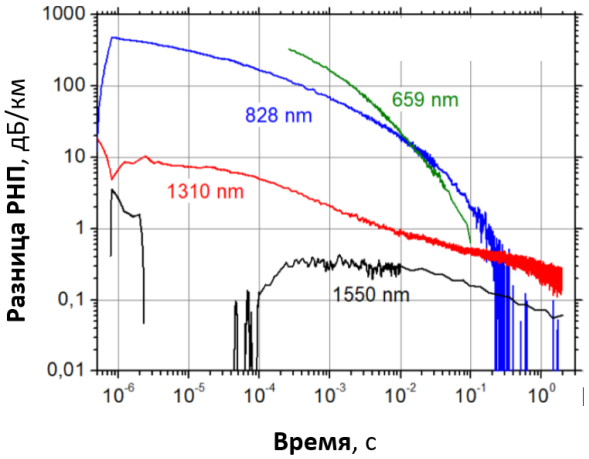

Рисунок 21 – Временной ход дополнительного РНП, проявившегося после 7-го импульса (разность РНП, измеренного после 7-го импульса с дозой в импульсе 9 Гр и суммарной дозой 439 Гр и после 1-го импульса с дозой 8,1 Гр) на λ= 659 нм (зеленая кривая), 825 нм (синяя), 1310 нм (красная) и 1550 нм (черная).

В **разделе 6.6.** сформулированы выводы из главы, важнейшие из которых следующие.

Установлено, что ВС состава SiO_2/F:SiO_2, полученные с оптимизированными параметрам MCVD-процесса и вытяжки для обеспечения высокой стойкости к непрерывному γ-излучению, проявляют высокую стойкость и к интенсивному импульсному ионизирующему излучению и при этом превосходят по стойкости германосиликатные ВС, считавшиеся ранее более стойкими.

Определены физические механизмы РНП в ВС состава SiO_2/F:SiO_2 на субсекундных временах после импульсного воздействия – собственные АД на малых временах (<1 мс) и промежуточные АД на больших временах (>10 мс). При этом эти АД легко дискриминируются по времени жизни, которое, как оказалось, отличается в $>10^5$ раз.

Найдены и физически обоснованы пути дополнительного снижения РНП на субсекундных временах после импульсного воздействия 1) тонкой подстройкой температуры вытяжки, 2) радиационным упрочнением путем предварительного воздействия самого импульсного облучения на ВС и 3) выбором оптимальной интенсивности рабочего светового сигнала уже при работе ВС в условиях возможного импульсного воздействия ионизирующего излучения.

Установлено, что радиационно-индуцированная перестройка сетки кварцевого стекла ВС под действием интенсивного импульсного излучения происходит при существенно меньших дозах, чем при γ-облучении. Более быстрое течение процесса перестройки обусловлено на порядки большей мощностью дозы, при который становится вероятен одновременный разрыв нескольких близлежащих связей.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе созданы физические основы получения трех типов радиационно-стойких волоконных световодов (ВС) на основе кварцевого стекла: 1) **многомодовых ВС с большим диаметром сердцевины** для применений **в видимом спектральном диапазоне,** в частности, в системах оптической диагностики плазмы Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, 2) **активных эрбиевых ВС** для космических применений, и 3) **одномодовых ВС для применений на длинах волн оптической связи** λ~1,3–1,55 мкм в датчиках и локальных системах связи в атомной энергетике, на экспериментальных термоядерных реакторах и на космических аппаратах.

При этом для радиационно-стойких одномодовых ВС исследованы механизмы радиационно-наведенного поглощения (РНП) и пути их подавления для двух типов воздействия: **1) непрерывное γ-излучение** и **2) интенсивное импульсное рентгеновское излучение.**

Получены новые знания о радиационно-индуцированных **автолокализованных дырках (АД)**, являющихся, как установлено в работе, основным источником РНП на длинах волн оптической связи λ~1,3–1,55 мкм.

Более подробно, результаты работы состоят в следующем.

1. Идентифицированы **радиационные центры окраски (РЦО)**, ответственные за РНП в ВС SiO_2/F:SiO_2 в видимом спектральном диапазоне. Определены **критерии выбора синтетического кварцевого стекла для сердцевины** радиационно-стойких ВС – для малых доз (<1 МГр) оптимально стекло с большим содержанием гидроксила и малым содержанием хлора, для больших доз (>1 МГр) – стекло с малым содержанием обеих примесей.

Определены механизмы образования и подавления предшественников РЦО в процессе синтеза преформы ВС нанесением фторсиликатной оболочки на стержень из кварцевого стекла и пути оптимизации этого процесса для повышения радиационной стойкости.

Разработаны радиационно-стойкие **ВС в алюминиевом покрытии, содержащие молекулярный водород в стекле.** По радиационной стойкости в видимом спектральном диапазоне они радикально превзошли зарубежные радиационно-стойкие ВС в сравнительных экспериментах, проведенных в рамках Проекта ИТЭР в России и за рубежом. В НИЦ «Курчатовский институт» планируется использование разработанных нами ВС в системах оптической диагностики плазмы строящегося реактора ИТЭР.

2. Разработаны радиационно-стойкие **активные эрбиевые ВС** в углеродном покрытии, содержащие молекулярный водород в стекле. Установлено, что при такой конструкции эрбиевые ВС сохраняют генерационные свойства в резонаторе волоконного лазера при дозах в **25-30 раз**

больших; следовательно, можно ожидать соответствующее многократное продление времени жизни эрбиевого ВС в космосе.

3. Продемонстрирована подача молекулярного водорода для подавления РЦО по продольным отверстиям в оболочке микроструктурированного ВС, которая может использоваться *in situ*, непосредственно при работе ВС в радиационном поле.

4. Обнаружены новые виды радиационно-индуцированных **автолокализованных дырок (АД)** в ВС SiO_2/F:SiO_2 и изучены их оптические свойства. Предложена модель, классифицирующая *три вида АД – собственные, деформационные и промежуточные.* Виды отличаются длиной связей Si–O, временем жизни и спектральным положением полос поглощения.

Собственные АД характеризуются большой длиной связей Si–O, а *деформационные* АД – малой длиной связей Si–O. Соответственно, время жизни и энергия автолокализации наименьшие у *собственных* АД, и наибольшие у *деформационных* АД.

Установлено, что интенсивность полос поглощения АД всех видов зависит от параметров получения преформы и вытяжки ВС и увеличивается с ростом фиктивной температуры стекла ВС и с увеличением удлинения сердцевины (т.е. с ростом ее поперечного сжатия). Обнаружена и объяснена зависимость интенсивности полос поглощения различных видов АД от температуры облучения и от интенсивности распространяющегося по ВС света.

Обнаружены и объяснены **особенности радиационно-индуцированной перестройки сетки стекла** под действием *интенсивного импульсного ионизирующего излучения.* При перестройке исчезают сильно сжатые связи Si–O и, соответственно, деформационные АД. Установлено, что вместо деформационных АД возникают промежуточные и собственные АД. Перестройка сетки при этом происходит уже при сравнительно малых дозах, что обусловлено ускорением процесса перестройки при одновременном разрыве нескольких близлежащих связей.

5. Установлены параметры синтеза преформ и параметры вытяжки **радиационно-стойких одномодовых ВС** SiO_2/F:SiO_2 для применений на длинах волн оптической связи λ~1,31-1,55 мкм. При оптимальных параметрах подавляется вхождение хлора в стекло, снижается фиктивная температура стекла и степень сжатия связей Si–O. Как следствие, подавляются оба фактора РНП: Cl^0-центр и АД.

Установлено, что РНП в оптимизированных ВС SiO_2/F:SiO_2 сравнимо с РНП в ВС F:SiO_2/F:SiO_2 фирмы «Фуджикура», обладающих рекордной радиационной стойкостью.

6. Исследовано РНП в одномодовых ВС на субсекундных временах после **интенсивного импульсного воздействия рентгеновского излучения**.

Установлено, что ВС SiO_2/F:SiO_2 с оптимизированной стойкостью к непрерывному γ-излучению проявляют **высокую стойкость и к интенсивному импульсному воздействию**, при этом они значительно превосходят по стойкости *германосиликатные* ВС, считавшиеся ранее более стойкими, чем нелегированные ВС SiO_2/F:SiO_2 .

Установлены РЦО, определяющие РНП в ВС SiO_2/F:SiO_2 на субсекундных временах после интенсивного импульсного воздействия. Это АД двух видов: собственные АД на малых временах (<1 мс) и промежуточные АД на больших временах после воздействия (>10 мс).

Найден и обоснован путь дальнейшего снижения РНП либо на малых, либо на больших временах после импульсного воздействия в зависимости от требуемого момента времени восстановления прозрачности ВС. Это делается выбором 1) температуры вытяжки ВС и/или 2) температуры ВС во время импульсного воздействия и/или 3) интенсивности рабочего светового сигнала в ВС.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1) Органичным развитием данной работы было бы исследование и оптимизация радиационной стойкости волоконных брэгговских решеток – чувствительного элемента перспективных внутриреакторных датчиков температуры, деформации и давления.

2) В последние годы приобрела актуальность задача создания внутриреакторных волоконных датчиков интенсивности ядерной реакции, использующих эффект радиолюминесценции в ВС на основе легированного кварцевого стекла. Для таких датчиков требуется снижение радиационно индуцированных потерь в люминесцирующем ВС, которого можно добиться, в том числе с использованием методов, разработанных в данной работе.

3) Параллельно с нашим исследованием происходило развитие «револьверных» ВС с полой сердцевиной. Представляется перспективным исследование возможности их применения в качестве транспортных ВС во внутриреакторных датчиках. Также интерес представляет исследование возможности применение полых ВС, наполненных газом, в качестве чувствительного элемента радиолюминесцентных датчиков.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

A1. γ-Radiation resistance of aluminum-coated all-silica optical fibers fabricated using different types of silica in the core / D.L. Griscom, K.M. Golant, **A.L. Tomashuk,** D.V. Pavlov, Y.A. Tarabrin // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 69, no. 3. – P. 322-324. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.118047

A2. Super-high-strength metal-coated low-hydroxyl low-chlorine all-silica optical fibers / V.A.Bogatyrjov, I.I. Cheremisin, E.M. Dianov, K.M. Golant, **A.L. Tomashuk** // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – Vol. 43, no. 3. – P. 1057-1060. DOI: 10.1109/23.510755

A3. Performance of special radiation-hardened optical fibers intended for use in the telecom spectral windows at a megagray level / **A.L Tomashuk**, E.M. Dianov, K.M. Golant, R.R. Khrapko, D.E. Spinov // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1998. – Vol. 45, no. 3. – P. 1566-1569. DOI: 10.1109/23.685240

A4. γ-radiation-induced absorption in pure-silica-core fibers in the visible spectral region: the effect of H_2-loading / **A.L. Tomashuk**, E.M. Dianov, K.M. Golant, A.O. Rybaltovskii // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1998. – Vol. 45, no. 3. – P. 1576-1579. DOI: 10.1109/23.685242

A5. Principle of operation of fibre optic dosimeter / **A.L. Tomashuk**, K.M. Golant, E.M. Dianov, I.V. Nikolin, R.R. Khrapko // Electronics Letters. – 1999. – Vol. 35, no. 2. – P. 170-171. DOI: 10.1049/el:19990070

A6. Round-robin evaluation of optical fibres for plasma diagnostics / B. Brichard, M. Van Uffelen, A.F. Fernandez, F. Berghmans, M. Decreton, E. Hodgson, T. Shikama, T. Kakuta, **A. Tomashuk**, K. Golant, A. Krasilnikov // Fusion Engineering and Design. – 2001. – Vol. 56-57 – P. 917-921. DOI: 10.1016/S0920-3796(01)00418-5

A7. The role of fluorine-doped cladding in radiation-induced absorption of silica optical fibers / M.O. Zabezhailov, **A.L. Tomashuk**, I.V. Nikolin, K.M. Golant // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2002. – Vol. 49, no. 3 – P. 1410-1413. DOI: 10.1109/TNS.2002.1039675

A8. Round-robin irradiation test of radiation resistant optical fibers for ITER diagnostic application / T. Kakuta, T. Shikama, T. Nishitani, D. Brichard, A. Krassilnikov, **A. Tomashuk**, S. Yamamoto, S. Kassai // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – Vol. 307-311, Part 2. – P 1277-1281. DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01277-1

A9. Radiation-hardening techniques of dedicated optical fibres used in plasma diagnostic systems in ITER / B. Brichard, A. Fernandez Fernandez, H. Ooms, F. Berghmans, M. Decreton, **A. Tomashuk**, S. Klyamkin, M. Zabezhailov, I. Nikolin, V. Bogatyrjov, E. Hodgson. T. Kakuta, T. Shikama, T. Nishitani, A. Costley, G. Vayakis // Journal of Nuclear Materials. – 2004. – Vol. 329-333. – P. 1456-1460. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2004.04.159

A10. Optical losses in as-prepared and gamma-irradiated microstructured silica-core optical fibers / A.F. Kosolapov, I.V. Nikolin, **A.L. Tomashuk**, S.L. Semjonov, M.O. Zabezhailov // Inorganic Materials. – 2004. – Vol. 40, no. 11. – P. 1229-1232. DOI: 10.1023/B:INMA.0000048228.05607.5d

A11. Radiation-induced absorption in high-purity silica fiber preforms / M.O. Zabezhailov, **A.L. Tomashuk**, I.V. Nikolin, V.G. Plotnichenko // Inorganic Materials. – 2005. – Vol. 41, no. 3. – P. 315-321. DOI: 10.1007/s10789-005-0130-0

A12. Механизмы поглощения света в гамма-облученных заготовках для волоконных световодов на основе высокочистого кварцевого стекла / М.О. Забежайлов, **А.Л. Томашук**, И.В. Николин, В.Г. Плотниченко, Е.Б. Крюкова, В.В. Колташев // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 12. – С. 16-20. URL: http://journals.ioffe.ru/articles/11602. (Mechanisms of light absorption in gamma-irradiated blanks for optical fibers based on high-purity quartz glass / M.O. Zabezailov, **A.L. Tomashuk**, I.V. Nikolin, V.G. Ploinichenko, T.B. Kryukova, V.V. Koltashev // Technical Physics Letters. – 2005. – Vol. 31, no. 6. – P. 498-499. DOI: 10.1134/1.1969778)

A13. Исследование радиационной стойкости оптических волокон из кварцевого стекла в условиях реакторного облучения / А.В. Бондаренко, А.П. Дядькин., Ю.А. Кащук, А.В. Красильников, Г.А. Поляков, И.Н. Растягаев, Д.А. Скопинцев, С.Н. Тугаринов, В.П. Ярцев, В.А. Богатырев, **А.Л. Томашук**, С.Н. Клямкин, С.Е. Бендер // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – №2. – С. 49-58. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9199087 (A study of radiation resistance of silica optical fibers under conditions of reactor irradiation / A.V. Bondarenko, A.P. Dyad'kin, Yu.A. Kashchuk, A.V. Krasil'nikov, G.A. Polyakov, I.N. Rastyagaev, D.A. Skopintsev, S.N. Tugarinov, V.P. Yartsev, V.A. Bogatyrev, **A.L. Tomashuk**, S.N. Klyamkin, S.E. Bender // Instruments and Experimental Techniques. – 2006. – Vol. 49, no. 2. – P. 190-198. DOI: 10.1134/S0020441206020060)

A14. Reduction of the radiation-induced absorption in hydrogenated pure silica core fibres irradiated in situ with γ-rays / B. Brichard, **A.L. Tomashuk**, V.A. Bogatyrjov, A.F. Fernandez, S.N. Klyamkin, S. Girard, F. Berghmans // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2007. – Vol. 353 – P. 466-472. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.10.039

A15. Radiation assessment of hydrogen-loaded aluminium-coated pure silica core fibres for ITER plasma diagnostic applications / B. Brichard, **A.L. Tomashuk**, H. Ooms, V.A. Bogatyrjov, S.N. Klyamkin, A.F. Fernandez, F. Berghmans, M. Decreton // Fusion Engineering and Design. – 2007. – Vol. 82, no. 15-24. – P. 2451-2455. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.04.045

A16. Радиационно-стойкий волоконный световод на основе кварцевого стекла, легированного эрбием / К.В. Зотов, М.Е. Лихачев, **А.Л. Томашук**, М.М. Бубнов, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов // Квантовая электроника**.** – 2007. – Т. 37. – № 10. – С. 946-949. URL: https://quantum-electronics.ru/wp-content/uploads/2007/1/13660.pdf

(Radiation-resistant erbium-doped silica fibre / K.V. Zotov, M.E. Likhachev, **A.L. Tomashuk**, M.M. Bubnov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov // Quantum Electronics. – 2007. – Vol. 37, no. 10. – P. 946-949. DOI: 10.1070/QE2007v037n10ABEH013660)

A17. Radiation-resistant erbium-doped fiber for spacecraft applications / K.V. Zotov, M.E. Likhachev, **A.L. Tomashuk**, M.M. Bubnov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, S.N. Klyamkin // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Vol. 55, no. 4. – P. 2213-2215. DOI: 10.1109/TNS.2008.2001834

A18. Radiation resistant Er-doped fibers: optimization of pump wavelength / K.V. Zotov, M.E. Likhachev, **A.L. Tomashuk**, A.F. Kosolapov, M.M. Bubnov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Vol. 20, no. 17. – P. 1476-1478. DOI: 10.1109/LPT.2008.927909

A19. Formation mechanisms of precursors of radiation-induced color centers during fabrication of silica optical fiber preform / **A.L. Tomashuk**, M.O. Zabezhailov // Journal of Applied Physics**.** – 2011. – Vol. 109 – 083103. DOI: 10.1063/1.3561435

A20. Radiation resistance of Er-doped silica fibers: effect of host glass composition / M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, K.V. Zotov, **A.L. Tomashuk**, D.S. Lipatov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31, no. 5. – P. 749-755. DOI: 10.1109/JLT.2012.2233196

A21. Enhanced radiation resistance of silica optical fibers fabricated in high O_2 excess conditions / **A.L. Tomashuk**, M.Yu. Salgansky, P.F. Kashaykin, V.F. Khopin, A.I. Sultangulova, K.N. Nishchev, S.E. Borisovsky, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32, no. 2. – P. 213-219. DOI: 10.1109/JLT.2013.2285157

A22. Fiber-optic dosimeter based on radiation-induced attenuation in P-doped fiber: suppression of post-irradiation fading by using two working wavelengths in visible range / **A.L. Tomashuk**, M.V. Grekov, S.A. Vasiliev, V.V. Svetukhin // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, no. 14 – P. 16778-16783. DOI: 10.1364/OE.22.016778

A23. Radiation-induced attenuation in silica optical fibers fabricated in high O_2 excess conditions / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, M.Yu. Salgansky, A.N. Abramov, K.N. Nishchev, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Lightwave Technology. – 2015. – Vol. 33, no. 9. – P. 1788-1793. DOI: 10.1109/JLT.2015.2394806

A24. Pulsed-bremsstrahlung-radiation effect on undoped- and Ge-doped-silica-core optical fibers at wavelength of 1.55 μm / **A.L. Tomashuk**, A.V. Filippov, A.N. Moiseenko, E.A. Bychkova, O.M. Tatsenko, N.V. Zavialov, A.N. Grunin, E.T. Batova, M.Yu. Salgansky, P.F. Kashaykin, I.S.

Azanova, M.K. Tsibinogina, A.E Levchenko, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Lightwave Technology. – 2017. – Vol. 35, no. 11. – P. 2143-2149.
DOI: 10.1109/JLT.2016.2623359

A25. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica optical fibers at different temperatures / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, M.Yu. Salgansky, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – 213104. DOI: 10.1063/1.4984601

A26. Observation of radiation-induced absorption of self-trapped holes in Ge-doped silica fiber in near infrared range at reduced temperature / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, V.F. Khopin, S.V. Firstov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2018. – Vol. 496 – P. 24-28. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.05.023

A27. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica-core optical fibers / **A.L. Tomashuk**, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, O.M. Tatsenko, N.S. Kuzyakina, O.V. Zverev, M.Yu. Salgansky, A.N. Abramov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Journal of Lightwave Technology. – 2019. – Vol. 37, no. 3. – P. 956-963. DOI: 10.1109/JLT.2018.2884078

A28. 1.55-μm-light absorption induced by pulsed-X-ray radiation in pure-silica core fiber: Effects of light power and temperature / **A.L. Tomashuk**, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, M.Yu. Salgansky, S.L. Glushkov, O.M. Tatsenko, A.N. Guryanov, S.L. Semjonov // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. – Vol. 521. – 119504. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119504

A29. Радиационно наведенное поглощение в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне: влияние условий вытяжки / П.Ф. Кашайкин, **А.Л. Томашук**, М.Ю. Салганский, Н.Н. Вечканов, А.Н. Гурьянов, А.Ф. Косолапов, С.Л. Семенов // Краткие сообщения по физики ФИАН. – 2019. – № 11. – С. 14-19. (Radiation-induced absorption of light in undoped-silica-core optical fibers in the near-infrared range: effect of drawing conditions / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, M.Yu. Salgansky, N.N. Vechkanov, A.N. Guryanov, A.F. Kosolapov, S.L. Semjonov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2019. –vol. 46. – P. 340-346. DOI: 10.3103/S1068335619110034)

A30 Radiation resistance of singlemode optical fibers at λ=1.55 μm under irradiation at IVG.1M nuclear reactor / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, S.A. Vasiliev, V.A. Britskiy, A.D. Ignatyev, Yu.V. Ponkratov, T.V. Kulsartov, K.K. Samarkhanov, V.S. Gnyrya, A.V. Zarenbin, S.L. Semjonov // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2020. – Vol. 67, no. 10. – P. 2162-2171. DOI 10.1109/TNS.2020.3019404

A31. Behavior of strain-assisted self-trapped holes in pure-silica optical fibers upon pulsed-X-ray irradiation / **A.L. Tomashuk**, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, M.Yu. Salgansky, S.A. Vasiliev,

O.V. Zverev, A.N. Guryanov, S.L. Semjonov // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 566. – 120880. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120880

A32. Radiation resistance of single-mode optical fibres with view to in-reactor applications / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, S.A. Vasiliev, A.D. Ignatyev, A.A. Shaimerdenov, Yu.V. Ponkratov, T.V. Kulsartov, Y.A. Kenzhin, Sh. Kh. Gizatulin, T.K. Zholdybayev, Y.V. Chikhray, S.L. Semjonov // Nuclear Materials and Energy. – 2021. – Vol. 27. – 100981. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100981

A33. Radiation-induced attenuation in single-mode pure-silica-core optical fibers two years after high-fluence reactor irradiation / I.E. Kenzhina, P.F. Kashaykin, S.A. Vasiliev, Zh.A. Zaurbekova, S.K. Askerbekov, A.U. Tolenova, K.K. Samarkhanov, A.M. Akhanov, T.V. Kulsartov, A.A. Shaimerdenov, **A.L. Tomashuk** // Optical Fiber Technology. – 2023. – Vol. 80. – 103441. DOI: https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103441

A34. Optical spectra in pure-silica-core single mode optical fibers after high-fluence reactor irradiation / I.E. Kenzhina, P.F. Kashaykin, S.A. Vasiliev, Zh.A. Zaurbekova, S.K. Askerbekov, A.U. Tolenova, K.K. Samarkhanov, T.V. Kulsartov, A.A. Shaimerdenov, **A.L. Tomashuk** // Nuclear Materials and Energy. – 2024. – Vol. 39 – 101669. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nme.2024.101669

A35. Low-loss nitrogen-doped silica fibers: the prospects for applications in radiation environments / E.M. Dianov, K.M. Golant, R.R. Khrapko, **A.L. Tomashuk** // Optical Fiber Communication, OFC'96 (25 Feb. - 1 March, San Jose). Technical Digest. Vol. 2. – Optical Society of America, 1996. – TuL5 – P. 61-62. DOI: 10.1109/OFC.1996.907642.

A36. Rad-hard optical fibres for diagnostics of experimental fusion reactors / O. Deparis, P. Megret, M. Decreton, M. Blondel, K.M. Golant, **A.L. Tomashuk** // Diagnostics for experimental thermonuclear fusion reactors 2. / Ed. by Peter E. Stott, Giuseppe Gorini, Paolo Prandoni, Elio Sindoni. – Springer, Plenum Press, New York, 1998. – P. 291-295. // URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-5353-3_35 (дата обращения 08.09.2023).

A37. Radiation-resistant and radiation-sensitive silica optical fibers / **A.L. Tomashuk**, K.M. Golant // Proceedings of the SPIE. – 2000. – Vol. 4083. – P. 188-201. DOI: 10.1117/12.385646

A38. Radiation-induced absorption in optical fibers in the near-infrared region: the effect of H_2- and D_2-loading / M.O. Zabezhailov, **A.L. Tomashuk**, I.V. Nikolin, K.M. Golant // Proceedings of the 6th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS'2001, (Grenoble, France, 10-14 Sept). – IEEE, 2001 – P. 192-194. DOI: 10.1109/RADECS.2001.1159279

A39. Hermetically coated H_2-containing radiation-resistant optical fibers / **A.L. Tomashuk**, V.A. Bogatyrjov, E.M. Dianov, K.M. Golant, S.N. Klyamkin, I.V. Nikolin, M.O. Zabezhailov // Proceedings of the SPIE. – 2002. – Vol. 4547. – P. 69-73. DOI: 10.1117/12.454378

A40. Improvement of radiation resistance of multimode silica-core holey fibers / A.F. Kosolapov, S.L. Semjonov, **A.L. Tomashuk** // Proceedings of the SPIE. – 2006. – Vol. 6193. – 61931E. DOI: 10.1117/12.662429

A41. H_2-loaded carbon-coated Er-doped fibre with enhanced radiation resistance / **A.L. Tomashuk**, M.E. Likhachev, K.V. Zotov, M.M. Bubnov, S.L. Semjonov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Proceedings of the European Conference on Optical Communication, ECOC'2006, (Cannes, France, 24-28 Sept) – IEEE, 2006. – Vol. 1. – P. 79-80. DOI: 10.1109/ECOC.2006.4800905

A42. Silica optical fibers with high oxygen excess in the core: a new type of radiation-resistant fiber / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, M.Yu. Salgansky, A.N. Abramov, L.D. Iskhakova, N.S. Lobanov, K.N. Nishchev, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Proceedings of the SPIE. – 2015. – Vol. 9507. – 950705. DOI: 10.1117/12.2087317

A43. Inherent and strain-assisted radiation-induced self-trapped holes in pure-silica optical fibers / **A.L. Tomashuk** // Proceedings of the OSA Advanced Photonics Congress (2-5 July, 2018, Zurich, Switzerland). – 2018. – BM2A.6. DOI: 10.1364/BGPPM.2018.BM2A.6

A44. Influence of drawing conditions on radiation-induced attenuation of pure-silica-core fibers in the near-IR range / P.F. Kashaykin, **A.L. Tomashuk**, M.Yu. Salgansky, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Proceedings of the SPIE. – 2018. – Vol. 10681. – 1068110. DOI: 10.1117/12.2306420

A45. Патент № 2133486 Российская Федерация, МПК G01T 1/00 (1995.01), G01T 1/06 (1995.01), G02B 6/00 (1995.01). Способ определения дозы ионизирующего излучения и волоконно-оптический датчик (его варианты): № 98104621/25: заявл. 19.02.1998: опубл. 20.07.1999 / М.М. Бубнов, К.М. Голант, Е.М. Дианов, И.В. Николин, С.Л. Семенов, **А.Л. Томашук**, Храпко Р.Р., Щебуняев А.Г.: заявитель Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН // URL: https://www.freepatent.ru/patents/2133486 (дата обращения 18.10.2024).

A46. Патент № 2222032 Российская Федерация, МПК G02B 6/16 (2000.01), C03C 25/60 (2000.01), C03B 37/01 (2000.01). Волоконный световод (варианты) и способ его получения : № 2000116833 : заявл. 29.06.2000: опубл. 20.01.2004 / **А.Л. Томашук**, К.М. Голант, Е.М. Дианов, С.Н. Клямкин, М.М. Бубнов, С.Л. Семенов : заявитель Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН // URL: https://www.freepatent.ru/patents/2222032 (дата обращения 18.10.2024).

А47. Патент № 2337385 Российская Федерация, МПК G02B 6/02 (2006.01). Волоконный световод, стойкий к ядерному и/или ионизирующему излучению (варианты), микроструктурный волоконный световод, стойкий к ядерному и/или ионизирующему излучению, и способ регулирования концентрации молекулярного водорода или дейтерия в волоконном световоде: № 2005129181: заявл. 19.09.2005: опубл. 27.10.2008 / Е.М. Дианов, **А.Л. Томашук**, С.Л. Семенов, А.Ф. Косолапов : заявитель Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН // URL: https://www.freepatent.ru/patents/2337385 (дата обращения 18.10.2024).

А48. Патент № 2537523 Российская Федерация, МПК G02B 6/028 (2006.01). Радиационно-стойкий волоконный световод, способ его изготовления и способ повышения радиационной стойкости волоконного световода (варианты) № 2013141980/28: заявл. 13.09.2013: опубл. 10.01.2015 / **А.Л. Томашук**, М.Ю. Салганский, П.Ф. Кашайкин, В.Ф. Хопин, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов: Патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации // URL: https://www.freepatent.ru/patents/2537523 (дата обращения 18.10.2024).

Литература

1. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers / S. Girard et al. // Reviews in Physics. – 2019. – Vol. 4. – 100032.
2. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges / S. Girard et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Vol. 60. – no. 3. – P. 2015-2035.
3. Fundamental radiation-induced defect centers in synthetic fused silicas: atomic chlorine, delocalized E’-center, and a triplet state / D.L. Griscom, E.J. Friebele // Physical Review B. – 1986. – Vol. 34. – no. 11. – P. 7524-7533.
4. Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers by ultra-high-dose γ-ray pre-irradiation / D.L. Griscom // Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 77. – P. 5008-5013.
5. The role of hydrogen as a radiation protection agent at low temperature in a low-OH, pure silica optical fiber / B.D. Evans // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1988. – Vol. 35. P. 1215-1220.
6. Radiation color center formation in silica glasses: a review of photo- and thermochemical aspects of the problem / A.V. Amossov, A.O. Rybaltovsky // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1997. – Vol. 179. – P. 226-234.
7. Radiation tolerant optical fibers: From sample testing to large series production / T. Wijnands at al. // Journal of Lightwave Technology. – 2011. – Vol. 29. – no. 22. – P. 3393–3400.

8. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica core optical fibers / S. Girard et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2004. – Vol. 215. – P. 187–195.
9. Loss factors in optical fibres / K. Yoshida et al. // Optical and Quantum Electronics. – 1981. – Vol. 13. – no. 1. – P. 85–89.
10. Urbach rule in solid state physics / I. Studenyak, M. Kranjčec, M. Kurik // International Journal of Optics and Applications. – 2014. – Vol. 4. – no. 3. – P. 76-83.
11. Trends in specialty fiber optic materials: characterization and applications /A. Langner et al. // Proceedings of the SPIE. – 2021. – Vol. 11635. – 1163506.
12. Optical properties of defects in silica / L. Skuja // Defects in SiO_2 and related dielectrics: science and technology / Ed. By G. Pacchioni, L. Skuja, D.L. Griscom: NATO Science series. Dodrecht. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 2000. – P. 73-116.
13. Loss increase for optical fibers exposed to hydrogen atmosphere / K. Noguchi et al. // Journal of Lightwave Technology. – 1985. – Vol. 3. – no. 2. – P. 236-243.
14. Fundamental optical attenuation limits in the liquid and glassy state with application to fiber optical waveguide materials / D.A. Pinnow et al. // Applied Physics Letters. – 1973. – Vol. 22. – no. 10. – P. 527–529.
15. Optical transitions of self-trapped holes in amorphous SiO_2 / Y. Sasajima, K. Tanimura // Physical Review B. – 2003. – Vol. 68. – 014204.
16. Spectroscopic manifestations of self -trapped holes in silica: theory and experiment / P.V. Chernov et al. // Physica Status Solidi (b). – 1989. – Vol. 155. – P. 663-675.
17. Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers: Reduction of induced absorption bands associated with self-trapped holes / D.L. Griscom // Applied Physics Letters. – 1997. – Vol. 71. – no. 2. – P. 175-177.
18. Extreme radiation sensitivity of ultra-low loss pure-silica-core optical fibers at low dose levels and infrared wavelengths / A. Morana et al. // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – 7254.
19. Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: Application to color centers in silica-based optical fibers / D.L. Griscom // Physical Review B. – 2001. – Vol. 64. – 174201.
20. Transient optical absorption in pulsed-X-ray-irradiated pure-silica-core optical fibers: Influence of self-trapped holes / S. Girard et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2006. – Vol. 352. – P. 2637-2642.