

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор АО «Наука и инновации» -



кандидат технических наук

Б.З. Бештоев

2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Кашайкина Павла Федоровича «Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Кашайкина П.Ф. посвящена определению физической природы радиационно-наведенного поглощения (РНП) света в волоконных световодах с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла, идентификации конкретных радиационных центров окраски (РЦО), ограничивающих радиационную стойкость таких световодов, изучению физических свойств этих РЦО, изучению зависимости концентрации РЦО от технологических параметров изготовления преформы и вытяжки из нее световода, оптимизации параметров этих технологических процессов, приведшей к многократному снижению РНП в ближнем ИК-диапазоне в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла.

Актуальность темы диссертации обусловлена востребованностью волоконных световодов, работающих в ближнем ИК-диапазоне, стойких к воздействию ионизирующего излучения (проявляющих малое РНП в процессе  $\gamma$ -облучения), в атомной энергетике, в космической и военной технике.

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

Во введении изложены актуальность и проблематика диссертационной работы, определены цели и соответствующие им задачи, обоснована научная новизна, практическая значимость и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен обзор литературных данных по радиационным центрам окраски в нелегированных и легированных германием волоконных световодах из кварцевого стекла. Проанализированы спектральные характеристики РЦО, известных на начало диссертационной работы, и их влияние на РНП в ближнем ИК-диапазоне. Также обобщены работы по зависимости РНП в ближнем ИК-диапазоне от условий процесса изготовления заготовки и вытяжки из неё световода. Сделан обзор исследований по влиянию температуры окружающей среды на радиационную стойкость световода.

Глава 2 посвящена описанию технологии изготовления заготовок одномодовых волоконных световодов с нелегированной сердцевиной и фторсиликатной светоотражающей оболочкой. Представлены методики  $\gamma$ -облучения и исследования спектров РНП, использованные в работе. Описана разработанная в рамках диссертационной работы методика исследования зависимости РНП от температуры в процессе облучения.

В главе 3 представлены результаты исследований зависимости РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне от соотношения расходов реагентов при синтезе сердцевины в MCVD-процессе. Описан новый оригинальный способ радикального снижения РНП при условии согласования избытка кислорода в сердцевине и концентрации фтора в оболочке. Показано, что РНП таких световодов в значительной степени зависит также от условий при вытяжке, при этом

определяющим параметром является температура. Приведены результаты по оптимизации технологических режимов MCVD процесса и условий вытяжки световодов в лабораторной технологии ИХВВ и НЦДВО РАН, приведших к радикальному снижению РНП в световодах с нелегированной сердцевиной в ближнем ИК-диапазоне.

В главе 4 диссертационной работы представлены результаты исследования зависимости РНП в видимом и ближнем ИК-диапазоне от температуры, поддерживаемой при  $\gamma$ -облучении, для световодов с нелегированной и легированной германием сердцевиной. Впервые выявлены объяснены аномалии и особенности температурной зависимости РНП таких световодов.

В заключении перечислены наиболее важные результаты, полученные автором диссертационной работы, среди них:

1. Впервые в спектре РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла обнаружены полосы РНП с максимумами на 2.6 и 2.16 эВ, принадлежащие радиационно-индуцированным самозахваченным дыркам на немостиковой р-орбитали атомов кислорода сетки стекла («self-trappedholes», STH). Эти полосы ранее наблюдались только в спектрах РНП объемных образцов. В таких световодах также обнаружена ранее не наблюдавшаяся короткоживущая полоса РНП с центром на  $\sim 1$  эВ.

2. Впервые предложена концепция двух классов радиационно-индуцированных STH – «собственных» и «деформационных». «Собственные» STH характеризуется крайне низкой термостабильностью. Определен класс всех ранее известных полос STH (полосы на 2.16, 2.6 и 0.8 эВ принадлежат «собственным» STH, на 1.63 и 1.88 эВ – «деформационным» STH). Впервые выявлена и объяснена зависимость РНП от температуры в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла при температуре около  $0^\circ$  С, при которой РНП достигает экстремально большого значения из-за роста полос поглощения «деформационных» STH. Эта аномалия обусловлена эффектом экстремального сжатия кварцевого стекла при  $T \sim 0^\circ$  С.

3. В световоде с высоколегированной германосиликатной сердцевиной (50 мол. % GeO<sub>2</sub>) впервые обнаружена полоса РНП с центром на E≤0.8 эВ негауссовой формы. Обосновано, что полоса принадлежит «собственными» STH. Обнаружена сравнительно долгоживущая полоса РНП гауссовой формы с максимумом на 1.38 эВ в световодах с германосиликатной сердцевиной. Показано, что данная полоса является основным механизмом, ограничивающим радиационную стойкость стандартных световодов для оптической связи.

4. Впервые установлено, что для максимального подавления РНП в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой необходим, во-первых, большой избыток кислорода над тетрахлоридом кремния в парогазовой смеси при синтезе сердцевины, что позволяет подавить вхождение хлора в сетку стекла. Во-вторых, необходимо, чтобы избыток кислорода был сбалансирован с количеством фтора в оболочке (чем больше концентрация фтора, тем больше избыток кислорода при синтезе сердцевины). Установлено, что в этом случае достигает минимума РНП, обусловленное «деформационными» STH.

5. Определено влияние параметров вытяжки таких световодов на величину РНП в ближнем ИК-диапазоне. Впервые установлено, что РНП в наибольшей степени возрастает с ростом температуры вытяжки. Так, при увеличении температуры вытяжки на 50 °С РНП увеличивается в 2-3 раза.

6. Оптимизация процессов изготовления заготовки и вытяжки световода позволила снизить РНП в световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в лабораторной технологии НЦВО-ИХВВ РАН более чем на порядок величины на длине волны 1.55 мкм (при дозе до 1 кГр и мощности дозы в интервале и 1.1-1.6 Гр/с). При этих условиях РНП в оптимизированных в работе световодах совпало со средним значением в серии радиационно-стойких световодов «RRSMFB» фирмы «Fujikura», считающихся мировыми лидерами по радиационной стойкости.

Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности, а автореферат полностью и верно отражает ее содержание. Результаты диссертации опубликованы в 23 научных работах, 9 из которых – в изданиях, содержащихся в базах данных Web of Science или Scopus, 1 работа – в журнале из списка ВАК, 1 – в патенте РФ на изобретение. Кроме того, опубликованы 12 работ в других изданиях. Основные результаты были апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Диссертационная работа была заслушана и одобрена на секции НТС отделения «Материалов радиационной фотоники» АО «ВНИИХТ», где был высказан ряд замечаний:

1. В четвертой главе диссертации используется аппроксимация спектра РНП суммой гауссовых компонент РЦО, однако, в тексте не приведена используемая для этого формула и не описана примененная методика гауссового разложения.

2. В работе экспериментально показано, что при балансе избытка кислорода в сердцевине и количества фтора в оболочке достигается минимум РНП. Утверждается, что это связано с выравниванием свойств сердцевины и оболочки. Однако прямых экспериментальных доказательств, таких как, сравнение коэффициента термического расширение, температуры стеклования, вязкости, для стекол сердцевины и оболочки не приводится.

3. В диссертации отсутствует завершающий раздел «Обсуждение результатов». С учетом многообразия составов исследованных волокон, изученных физических свойств РЦО, а также полученных незаурядных (новых) результатов, этот раздел был бы вполне уместным.

4. Высказанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают теоретической и практической значимости полученных результатов.

Подводя итог обсуждаемой диссертационной работы, можно сказать, что Кашайкиным П.Ф. проведено полное и систематическое исследование, вносящее значительный вклад в область знаний о ионизирующих поведении оптических волокон при ионизирующем излучении. Помимо значительного

фундаментального вклада, работа будет иметь и прикладную значимость при промышленном освоении технологий радиационно-стойких волоконных световодов на таких предприятиях как Пермская научно-производственная приборостроительная компания, РФЯЦ-ВНИИТФ (ГК «Росатом»).

Диссертационная работа Кашайкина П.Ф. на тему «Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне» отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.) для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Кашайкин Павел Федорович, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация и автореферат Кашайкина П.Ф. «Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого стекла в ближнем ИК-диапазоне» обсуждены, а отзыв заслушан и утвержден на заседании секции НТС отделения «Материалов радиационной фотоники» АО «ВНИИХТ», протокол № 2-19 от 18.07.2019 года.

Начальник отделения «Функциональных материалов радиационной фотоники», председатель секции НТС отделения «Материалов радиационной фотоники»  
АО «ВНИИХТ», к.т.н.

П.Б. Басков



Басков Петр Борисович, кандидат технических наук, начальник отделения «Функциональные материалы радиационной фотоники» АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 33, раб. тел. 8-499-324-40-30, e-mail: baskovpb@vniiht.ru)