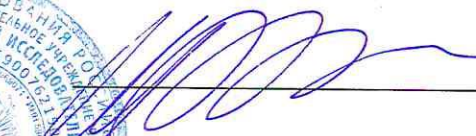


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО «Пермский
государственный национальный
исследовательский университета»,
кандидат физико-математических наук
В.А. Ирха




« 20 » июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский государственный национальный
исследовательский университет» о диссертационной работе Азановой И.С.
«Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов
интерферометрических датчиков физических величин», представляемой на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная
стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических
датчиков физических величин» выполнена на кафедре Нанотехнологий и
микросистемной техники Физико-математического института Федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Пермский государственный национальный исследовательский
университет» (ПГНИУ).

Соискатель Азанова Ирина Сергеевна, 1977 года рождения, в 2001 г.
окончила магистратуру Пермского государственного университета по
специальности «Физика конденсированного состояния вещества», в 2006
году в Пермском государственном университете защитила диссертацию на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Поверхность, структура и оптические свойства протонообменных
волноводных слоев на монокристалле ниобата лития» по специальности
01.04.07 — Физика конденсированного состояния. В настоящее время
соискатель работает доцентом на кафедре нанотехнологий и микросистемной

техники Физико-математического института «ПГНИУ», а также директором научно-образовательного центра – главным конструктором по волоконным световодам ПАО «ПНППК».

Научный консультант – Волынцев Анатолий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники Физико-математического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение по возможности рекомендации диссертации к защите по физико-математическим наукам по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния:

Актуальность темы

Волоконно-оптические интерферометрические датчики физических величин (ВОИД) и их компоненты все активнее применяются в различных системах мониторинга состояния объектов. Воздействие внешних факторов может ухудшить работоспособность ВОИД. Повышенный уровень радиационного фона может как ослабить чувствительность этих датчиков, так и привести к потере работоспособности. Применение таких систем в космических аппаратах, на атомных силовых установках и других специальных объектах выдвигает требования по их стойкости к воздействию непрерывного, а также импульсного ионизирующего излучения (ИИ).

Наиболее показательным представителем ВОИД является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Основными волоконно-оптическими компонентами ВОИД, в том числе и ВОГ, обычно выступают источник оптического излучения, многофункциональная интегрально-оптическая схема (СИОМ), например, на монокристалле ниобата лития, а также чувствительный элемент на основе оптического волокна (ОВ) с сохранением поляризации излучения. Поэтому результаты исследований радиационно-оптической стойкости (РОС) волоконно-оптических компонентов ВОГ вполне применимы для других ВОИД.

Для проектирования ВОИД необходимо понимание влияния на РОС компонентов ВОИД факторов, а именно: уровня напряженно-деформированного состояния ОВ, величины оптической мощности рабочего сигнала и температуры в сочетании с вариацией интенсивности и вида

воздействующего ИИ. Поэтому актуальной задачей является исследование влияния факторов ИИ и технологии изготовления волоконно-оптических компонентов на оптические свойства компонентов ВОИД в процессе облучения и после облучения, определения аналитических зависимостей, позволяющих численно оценить радиационный отклик компонентов ВОИД при отличающихся условиях опытов.

Особую актуальность носит необходимость разработки научных основ для создания промышленной технологии производства оптических компонентов с повышенной РОС, а также радиационно-стойкого одномодового ОВ с сохранением поляризации излучения.

Цель работы

Разработка методологии для изучения влияния ИИ на РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД, а также создание физических основ промышленной технологии радиационно-стойких компонентов для них.

Научная новизна

1. Впервые с помощью единой методологии в сопоставимых условиях для гамма, фотонного и гамма-нейтронного видов излучений для широкой вариации доз и мощностей доз получены сведения о РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД. Выявлены волоконно-оптические компоненты, определяющие стойкость ВОИД в условиях воздействия непрерывного и импульсного ИИ.
2. Для ОВ с кварцевой сердцевиной чувствительность РНП на длине волны 1550 нм к уровню входной оптической мощности и уровню внутренних упругих напряжений определяется, в первую очередь, наличием радиационных центров окраски (РЦО) с полосами поглощения 0,95 эВ и 1,12 эВ.
3. Установлены закономерности, связывающие процесс релаксации РНП в ОВ после воздействия импульсного ИИ с величиной дозы в импульсе, относительной продольной деформацией, температурой образца, входной оптической мощностью.
4. РОС волоконного контура ВОГ определяется уровнем внутренних упругих напряжений в сердцевине ОВ.
5. При воздействии импульсного ИИ в анизотропном ОВ с германосиликатной сердцевиной выявлено образование короткоживущих РЦО на длине волны 1550 нм с временем жизни до 0,1 мс.

6. Впервые для времен миллисекундного диапазона после воздействия гамма-нейтронного и фотонного импульсного ИИ для ОВ измерены спектры пропускания в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм. Установлено, что в анизотропных ОВ с кварцевой сердцевинкой в течение промежутка времени до 3 секунд после импульсного гамма-нейтронного воздействия происходит перераспределение РЦО, приводящее к уменьшению РНП в области длин волн более 1000 нм с одновременным их увеличением в области длин волн менее 1000 нм.

Практическая значимость

1. Обоснован подход к исследованию РОС компонентов ВОИД, позволяющий минимизировать влияние погрешности определения уровня воздействия и обеспечить достоверность определения общей РОС ВОИД.
2. Полученные данные по РНП оптических компонентов ВОГ при воздействии ИИ позволяют прогнозировать РНП в оптическом тракте ВОИД при условии воздействия ИИ разного уровня, а также осознанно проектировать волоконно-оптические приборы, устойчивые к воздействию как непрерывного, так и импульсного излучения.
3. Заложены основы промышленной технологии изготовления радиационно-стойких гироскопических ОВ с нелегированной кварцевой сердцевинкой с сохранением поляризации излучения с высоким значением двулучепреломления (до $7,3 \cdot 10^{-4}$). Технология реализована в ПАО «ПНППК», налажен серийный выпуск ОВ.
4. Исследования по теме диссертации являются составной частью проектов, направленных на создание высокотехнологичных производств радиационно-стойких оптических волокон, реализованных при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-059 от 22 ноября 2019 г.), Российского Научного Фонда (Проект № 18-12-00436), Программы, введенной Постановлением Правительства РФ от 08.06.2021 № 872.

Достоверность результатов

Достоверность результатов исследования обеспечивается проведением исследований с использованием аттестованного и поверенного контрольно-измерительного оборудования, применением современных методов обработки экспериментальных данных, достаточной статистической выборкой повторяющихся серий опытов, а, в ряде случаев, и многократным воспроизведением выполненных экспериментов. Результаты работы

рецензированы и приняты к публикации в ведущих высокорейтинговых научных журналах, апробированы на международных конференциях.

Для повышения достоверности данных РОС различных волоконно-оптических компонентов разработана специальная методология исследования, характеризующаяся следующими подходами:

- Данные по РОС волоконно-оптических компонентов фиксируются в одних условиях воздействия, сравнительные эксперименты для импульсных воздействий проводятся в рамках одного опыта (кроме вариации температуры в опыте), что позволяет минимизировать влияние погрешности определения уровня воздействия.
- Исследовались эффекты, происходящие в волоконно-оптических компонентах как непосредственно в ходе облучения, так и после него. Состав возникающих при облучении РЦО в ОВ выявлялся при воздействии непрерывного ИИ, а данные о характерных временах их релаксации – при воздействии импульсного ИИ.
- Для определения влияния условий опыта и технологических факторов на РОС волоконно-оптических компонентов контролировались спектры пропускания ОВ во время и после воздействия ИИ, состояния сохранения поляризации излучения, оптическая мощность входного сигнала зондирующего излучения, начальный уровень напряженно-деформированного состояния ОВ с помощью измерения частотного смещения Бриллюэна, а также температура в опыте.
- Для исследования закономерностей процессов облучения и релаксации в ОВ применена математическая аппроксимация экспериментальных зависимостей РНП, позволившая выявить связи эмпирических коэффициентов аппроксимации с варьируемыми параметрами.

На основе полученных результатов построена технология изготовления радиационно-стойких оптических компонентов, подтвержденная стабильным коммерческим выпуском.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является результатом работы автора в ПАО «ПНППК» и ПГНИУ и представляет собой обобщение исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками ПАО «ПНППК», ПГНИУ, НЦВО РАН, ИХВВ РАН и РФЯЦ ВНИИЭФ. Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его

непосредственном участии и руководстве. Автор лично участвовала в организации и налаживании серийного производства радиационно-стойких оптических волокон на ПАО «ПНППК».

В работах [1,2] автору принадлежит постановка задачи сравнительного исследования радиационной стойкости оптических волокон с отличающимися технологиями, формирование требований к конструкции и проверка технологических указаний на изготовление образцов оптических волокон с чисто кварцевой сердцевиной, выполнение подбора оборудования и подготовка опытов, участие в обработке результатов и их анализе, формировании выводов, в работе [1] также руководила и участвовала в проведении облучательных экспериментов.

В работе [3] автором выполнена постановка задачи, разработана программа и методики исследования, руководила и непосредственно участвовала в проведении облучательных экспериментов, участвовала в расчетах по обработке результатов экспериментов, выполнила анализ результатов, обсуждение результатов и формирование выводов выполнено совместно с Поносовой А.А. и Мелькумовым М.А.

В работах [4-8,10], автором выполнена постановка задачи, разработаны программы и методики исследования, сформированы требования к конструкции экспериментальных образцов радиационно-стойких оптических волокон с чистой кварцевой сердцевиной и принято непосредственное участие в их изготовлении, также руководила и участвовала в проведении облучательных экспериментов, участвовала в расчетах по обработке результатов экспериментов, руководила и принимала участие в расчетах по обработке результатов, выполнила анализ результатов, обсуждение результатов и формирование выводов проведено совместно с Томашуком А.Л. и Кашайкиным П.Ф, в работе [5] в обсуждении результатов работы также принимал участие академик Дианов Е.М.

В работе [9] автор участвовала в подготовке образцов германосиликатного ОВ и схем экспериментов, а также обсуждении результатов.

В серии работ [11, 12, 14, 17-20, 24-29, 31, 32, 37] автором выполнена постановка задачи, разработаны программы и методики исследования, сформированы требования к конструкции и принято непосредственное участие в изготовлении экспериментальных образцов радиационно-стойких оптических волокон с чистой кварцевой сердцевиной, а также руководила и участвовала в проведении облучательных экспериментов, автор предложила подходы и новые аналитические зависимости для математической

аппроксимации результатов исследования, участвовала в расчетах по обработке результатов экспериментов, выполнила анализ результатов и сформировала выводы.

В работах [13, 21, 22, 30, 33, 35, 36] автору принадлежат постановка задачи, разработка методики исследования, анализ результатов; совместно с соавторами проведено обсуждение результатов и сформированы выводы.

В патенте на полезную модель [15] автор предложила идею и обоснование конструкции радиационно-стойкого активного оптического волокна с сохранением поляризации излучения. Технологическая проверка реализуемости выполнена совместно с соавторами.

В патенте на изобретение [16] автор предложила идею и обоснование конструкции радиационно-стойкого оптического волокна с сохранением поляризации излучения, позволяющую обеспечить высокую радиационную стойкость в сочетании с достижением низких оптических потерь и величины двулучепреломления выше, чем у мировых аналогов. Проверка технологической реализуемости выполнена совместно с Вохмяниной О.Л. и Мальцевым И.А.

Студенты Хисамов Д.В., Лунегова (Поспелова) Е.А., Ладыжец Е.А., Шевцова А.Д., Вахрушев А.С., Рахматуллина А.Р. принимали участие в исследованиях в рамках выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ под руководством Азановой И.С.

Для проведения экспериментов автором выполнены анализ и подбор облучательных установок, выбор контрольно-измерительного оборудования, подготовлены схемы опытов, выполнены подготовка к транспортировке исследуемых образцов и оборудования, обеспечено сопровождение их в испытательные центры. Автор непосредственно на месте руководила группой исследователей при проведении экспериментов на линейном индукционном ускорителе ЛИУ30М (кроме экспериментов работы [3]) и реакторе быстрых нейтронов БР1М, ускорителе электронов ЛУ 10-20 в РФЯЦ-ВНИИЭФ, установке на основе изотопа кобальта НИЦ «Курчатовский институт», отвечала за безопасность группы исследователей по приказу на проведение исследований, монтировала оптические схемы, размещала образцы в облучательном зале, участвовала в проведении дозиметрии, снимала показания приборов. Разработала и применила меры по минимизации потерь данных и измерительного оборудования от электромагнитного импульса и наводок во время опытов на ЛИУ30М.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных семинарах и конференциях: «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.); международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2022 г.); международная научная конференция-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2018, 2022 гг.); «Всероссийская конференция по волоконной оптике» (Пермь, 2017, 2019, 2021, 2023 гг.); «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2019 г.); «Высокочистые вещества. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 2018 г.). научный семинар по Теоретической физике ПГНИУ, рук. проф. В.А. Демин (Пермь, 2023 г.), научный семинар НЦВО РАН и ИОФ РАН, 2023 г., научно-технический совет ПАО «ПНППК» 2020 г., научный семинар кафедры общей физики ПНИПУ (Пермь, 2024 г.).

Основное содержание диссертационной работы изложено в 37 работах [1-37]. В том числе 9 из них входят в базы данных Scopus и Web of Science [1-9] (2 в материалах конференций), 5 статей опубликовано в журналах из списка ВАК, индексируемых системой РИНЦ [10-14], 19 публикаций представляют собой труды в сборниках научных конференций и тезисы докладов [17-37], 1 патент на полезную модель [15], 1 патент на изобретение [16].

Список опубликованных автором работ по теме диссертации

Основные публикации по теме диссертационной работы в рецензируемых изданиях

1. Tomashuk A.L. Comparison study of radiation-resistant polarization-maintaining panda fibers with undoped- and N-doped-silica core / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, S.L. Semjonov, A.V. Filippov, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, I.S. Azanova, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, N.V. Zavyalov, E.A. Pospelova, T.V. Dimakova, V.V. Voloshin, I.L. Vorob'ev, A.O. Kolosovskii, Y.K. Chamorovskiy // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38, № 20. P. 5817-5824.
2. Tomashuk A.L. Pulsed-X-ray-irradiation of radiation-resistant panda fibers: dependence on dose, probe light power, and temperature / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, S.L. Semjonov, A.V. Filippov, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, I.S. Azanova, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, E.A. Pospelova,

T.V. Dimakova, V.V. Voloshin, I.L. Vorob'ev, A.O. Kolosovskii, Y.K. Chamorovskiy // Optical Materials. 2020. Vol. 109. N. 110384.

3. Поносова А.А. Эрбиевые световоды с повышенной стойкостью к ионизирующему излучению для суперлюминесцентных волоконных источников / А.А. Поносова, И.С. Азанова, Н.К. Миронов, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, О.Л. Кель, Ю.О. Шаронова, М.А. Мелькумов // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 7. С. 693-697.

Перевод: Ponosova A.A. Erbium-doped optical fibre with enhanced radiation resistance for superluminescent fiber sources / A.A. Ponosova, I.S. Azanova, O.L. Kel, Y.O. Sharonova, N.K. Mironov, M.V. Yashkov, K.E. Riumkin, M.A. Melkumov // Quantum Electronics. 2019. Vol. 49, № 7. P. 693-697.

4. Kashaykin P.F. Radiation induced attenuation in pure silica polarization maintaining fibers / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, I.S. Azanova, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, A.V. Filippov, E.M. Dianov, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Pospelova, O.M. Tatsenko, N.S. Kuzyakina, O.V. Zverev // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. Vol. 508. P. 26-32.

5. Кашайкин П.Ф. Прогнозирование радиационно-наведенного поглощения света в волоконных световодах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла в космических применениях / П.Ф. Кашайкин, А.Л. Томашук, М.Ю. Салганский, И.С. Азанова, М.К. Цибиногина, Т.В. Димакова, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, № 5. С. 752-758.

Англоязычная версия: Kashaikin P.F. Prediction of radiation-induced light absorption in optical fibers with an undoped silica core for space applications / P.F. Kashaikin, A.L. Tomashuk, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, A.N. Gur'yanov, I.S. Azanova, M.K. Tsibinogina, T.V. Dimakova // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 64, № 5. P. 701-707.

6. Tomashuk A.L. Enhanced radiation resistance of pure-silica-core polarization-maintaining panda optical fibers / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, I.S. Azanova, Y.O. Sharonova, E.A. Pospelova, O.L. Vokhmyanina, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, S.L. Glushkov // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. Vol. 31, № 17. P. 1413-1416.

7. Kashaykin P.F. Gamma-radiation-induced attenuation of light in polarization-maintaining pure-silica-core panda fibers / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, I.S. Azanova, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, E.M. Dianov, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Pospelova // В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 6. Сер. "Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VI" 2019. N. 110290V.

8. Kashaykin P.F. Microscopic mechanisms of radiation-induced light attenuation in pure silica-core fibers: influence of heat treatment in the process of metal and polyimide coating application / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, I.S. Azanova, O.L. Vokhmyanina, Y.O. Sharonova, E.M. Dianov, T.V. Dimakova, I.A. Maltsev, E.A. Pospelova // В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 6. Сер. "Micro-Structured and Specialty Optical Fibres VI" 2019. N. 110290U.
9. Tomashuk A.L. Pulsed-bremsstrahlung-radiation effect on undoped- and Ge-doped-silica-core optical fibers at wavelength of 1.55 μm / A.L. Tomashuk, A.E. Levchenko, E.M. Dianov, A.V. Filippov, A.N. Moiseenko, E.A. Bychkova, O.M. Tatsenko, N.V. Zavialov, A.V. Grunin, E.T. Batova, M.Y. Salgansky, A.N. Guryanov, P.F. Kashaykin, I.S. Azanova, M.K. Tsibinogina // Journal of Lightwave Technology. 2017. Vol. 35, № 11. P. 2143-2149.
10. Томашук А.Л. Поглощение света, наведенное в двулучепреломляющем волоконном световоде типа "Панда" с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла импульсным воздействием ионизирующего излучения / А.Л. Томашук, П.Ф. Кашайкин, И.С. Азанова, А.В. Филиппов, Ю.О. Шаронова, О.Л. Вохмянина, Е.А. Бычкова, С.В. Галанова // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. Т. 45, № 12. С. 21-26.
- Англоязычная версия: Tomashuk A.L. Light absorption induced in undoped-silica-core panda-type birefringent optical fiber by pulsed action of ionizing radiation / A.L. Tomashuk, P.F. Kashaykin, I.S. Azanova, A.V. Filippov, Y.O. Sharonova, O.L. Vokhmyanina, E.A. Bychkova, S.V. Galanova // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2018. Vol. 45, № 12. P. 385-388.
11. Азанова И.С. Радиационная стойкость оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, А.Д. Шевцова, Е.А. Поспелова, А.С. Вахрушев, О.Л. Вохмянина, А.Б.Волынцев // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 1. С. 5-20.
12. Азанова И.С. Исследование радиационного отклика оптического волокна при воздействии импульсного ионизирующего излучения / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, Д.В. Хисамов, А.Б. Волынцев, А.В. Филиппов, И.В. Петухов // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 4. С. 52-69.
13. Хисамов Д.В. Влияние радиуса изгиба на долговечность оптических волокон типа "Панда" / Д.В. Хисамов, А.Н. Смирнова, И.С. Азанова // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 4. С. 52-57.
14. Азанова И.С. Опыт разработки термостойкого, радиационно-стойкого и водородостойкого оптического волокна / И.С. Азанова, Д.И. Шевцов,

О.Л. Вохмянина, И.Д. Саранова, А.Н. Смирнова, М.И. Булатов, Е.А. Пospelова, Ю.О. Шаронова, Т.В. Димакова, П.Ф. Кашайкин, А.Л. Томашук, А.Ф. Косолапов, С.Л. Семёнов // Фотоника. 2019. Т. 13. № 5. С. 444-451.

Патенты:

15. Одномодовое эрбиевое радиационно-стойкое оптическое волокно с сохранением состояния поляризации / Андреев А.Г., Ермаков В.С., Азанова И.С., Вохмянина О.Л., Рогожников П.Ю., Вахрушев А.С., Нурмухаметов Д.И., Яшков М.В., Димакова Т.В. // Патент на полезную модель №203256, 29.03.2021. Приоритет от 01.09.2020.

16. Одномодовое радиационно-стойкое оптическое волокно с сохранением состояния поляризации / Азанова И.С., Вохмянина О.Л., Мальцев И.А. // Патент на изобретение №2829456 Рос. Федерация №2023130164; 20.11.2023; опубл. 30.10.2024, Бюл. № 31.

Публикации в сборниках научных конференций и тезисы докладов:

17. Азанова И.С. Влияние гамма-нейтронного воздействия на оптико-механические характеристики оптического волокна / И.С. Азанова, Д.В. Хисамов, Ю.О. Шаронова, Е.А. Лунегова, М.Н. Напарин // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024», С. 43-44.

18. Хисамов Д.В. Математический расчет радиационного отклика оптических волокон с чистокварцевой сердцевиной / Д.В. Хисамов, И.С. Азанова, Е.А. Лунегова, А.С. Вахрушев, Ю.О. Шаронова // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024», С. 45-46.

19. Азанова И. С. Факторы, влияющие на радиационную стойкость оптического волокна / И. С. Азанова, О. Л. Вохмянина, Е. А. Пospelова [и др.] // Труды XIII Межотраслевой конференции по радиационной стойкости ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ": В 4-х т., Саров, 13–17 сентября 2021 года. – Саров: ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», 2024. – С. 110-116.

20. Азанова И.С. Сравнение реакции оптического волокна на воздействие импульсных гамма-нейтронного и фотонного излучений / Азанова И.С., Шаронова Ю.О., Пospelова Е.А. / В книге: Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость-2022". Научно-технический сборник 25-й Всероссийской научно-технической конференции. Лыткарино, 2022. С. 31-32.

21. Шевцова А.Д. Радиационная стойкость активного оптического волокна в зависимости от конфигурации суперлюминисцентного волоконного источника А.Д. Шевцова, И.С. Азанова, А.С. Вахрушев, Ю.О. Шаронова // В книге: Радиационная стойкость электронных систем "Стойкость-

2022". Научно-технический сборник 25-й Всероссийской научно-технической конференции. Лыткарино, 2022. С. 33-34.

22. Шевцова А.Д. Влияние конфигурации суперлюминесцентного волоконного источника на радиационную стойкость активного оптического волокна / А.Д. Шевцова, В.Д. Степанова, Ю.О. Шаронова, И.С. Азанова, А.С. Вахрушев // В книге: 10 Международный семинар по волоконным лазерам. Материалы семинара. Новосибирск, 2022. С. 118-119.

23. Азанова И.С. Опыт разработки специальных оптических волокон / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, О.Л. Вохмянина // В книге: 10 Международный семинар по волоконным лазерам. Материалы семинара. Новосибирск, 2022. С. 177-178.

24. Азанова И.С. Водородостойкость оптических волокон при высоком давлении и температуре / И.С. Азанова, Ю.А. Лаптева, И.О. Молчанов // В сборнике: Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение. Программа и материалы 19-й Международной научной конференции-школы. Редколлегия: Н.С. Аверкиев [и др.]. Саранск, 2022. С. 24.

25. Азанова И.С. Влияние напряженно-деформированного состояния оптического волокна на радиационно-наведенное затухание после воздействия импульсного гамма-излучения / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, Е.А. Ладыжец, А.Б. Волынцев, А.В. Филиппов // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 26-27.

26. Азанова И.С. Изготовление многомодового низкоапертурного оптического волокна с градиентным профилем показателя преломления в сочетании с радиационной стойкостью и исследование его свойств / И.С. Азанова, О.Л. Вохмянина, Е.А. Ладыжец, И.А. Мальцев, Е.А. Поспелова, А.Р. Рахматуллина, А.Н. Смирнова, Ю.О. Шаронова // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 330-331.

27. / Вахрушев А.С. Влияние структуры пористого слоя кварцевого стекла на процесс изготовления активных оптических волокон методом пропитки / А.С. Вахрушев, Д.И. Нурмухаметов, О.Л. Вохмянина, И.С. Азанова, М.В. Япков // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7, № 1. С. 55-61.

28. Томашук А.Л. Сравнительное исследование радиационной стойкости световодов типа "панда" с сердцевинной из чистого и легированного азотом кварцевых стекол / А.Л. Томашук, П.Ф. Кашайкин, С.Л. Семенов, А.В. Филиппов, Е.А. Бычкова, С.В. Галанова, И.С. Азанова, О.Л. Вохмянина, Е.А. Поспелова, Ю.О. Шаронова, Т.В. Димакова, В.В. Волошин, И.Л. Воробьев, А.А. Колосовский, Ю.К. Чаморовский, К.М. Голант // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 184-185.

29. Азанова И.С. Радиационно стойкие нелегированные световоды типа "панда" в условиях воздействия непрерывного и импульсного ионизирующего излучения / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, О.Л. Вохмянина, И.А. Мальцев, Т.В. Димакова, П.Ф. Кашайкин, А.В. Филиппов, О.М. Таценко, А.Л. Томашук // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 188-189.

30. Вахрушев А.С. Опыт разработки радиационно-стойкого анизотропного эрбиевого оптического волокна в ПАО ПНППК / А.С. Вахрушев, Д.И. Нурмухаметов, О.Л. Вохмянина, И.С. Азанова, Т.В. Димакова, П.Ю. Рогожников, М.В. Яшков // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 368-369.
31. Рахматуллина А.Р. Изготовление многомодового волокна с высокими оптическими характеристиками в сочетании с радиационной стойкостью / А.Р. Рахматуллина, И.А. Мальцев, И.С. Азанова, О.Л. Вохмянина, Р.Р. Кашина // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 373.
32. Азанова И.С. Радиационно-стойкие оптические компоненты для волоконно-оптического гироскопа / И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, О.Л. Вохмянина, И.А. Мальцев, Т.В. Димакова, Д.И. Шевцов // В книге: Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. Тезисы докладов. Москва, 2019. С. 80-83.
33. Поносова А.А. Эрбиевые световоды, стойкие к повреждению ионизирующим излучением, для суперлюминесцентных волоконных источников / А.А. Поносова, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, И.С. Азанова, Ю.О. Шаронова, М.А. Мелькумов // В книге: Высокочистые вещества и материалы получение, анализ, применение. сборник тезисов XVI Всероссийской конференции и IX Школы молодых ученых, посвященные 100-летию академика Г.Г. Девярых. 2018. С. 163.
34. Рахматуллина А.Р. Исследование режимов генерации эрбиевых волоконных лазеров / А.Р. Рахматуллина, И.С. Азанова, М.К. Цибиногина, О.Л. Кель, А.А. Поносова // В сборнике: Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение. Программа и материалы 17-й Международной научной конференции-школы. Ответственный редактор К.Н. Нищев. 2018. С. 26-27.
35. Мелькумов М.А. Эрбиевые световоды с повышенной радиационной стойкостью, оптимизированные для широкополосных суперлюминесцентных волоконных источников излучения / М.А. Мелькумов, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, П.Ф. Кашайкин, А.А. Поносова, И.С. Азанова, О.Л. Кель, А.Н. Абрамов, Н.Н. Вечканов, А.Н. Гурьянов // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 29-30.
36. Кель О.Л. Суперлюминесцентный волоконный эрбиевый источник излучения, стойкий к воздействию ионизирующего излучения / О.Л. Кель, М.А. Мелькумов, И.С. Азанова, А.Н. Гурьянов, К.Е. Рюмкин, М.Н. Яшков, Е.А. Носова, Ю.О. Шаронова, К.В. Коффер, А.А. Поносова // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 45-46.
37. Азанова И.С. Радиационно-стойкие двулучепреломляющие световоды типа "панда" для применений на космических летательных аппаратах и в условиях воздействия импульсного ионизирующего излучения / И.С. Азанова, М.К. Цибиногина, Т.В. Димакова, О.Л. Вохмянина, Ю.О. Шаронова, Е.А. Поспелова, П.Ф. Кашайкин, А.Е. Левченко, А.Л. Томашук, Н.К. Миронов, А.В. Филиппов, О.М. Таценко // Фотон-экспресс. 2017. № 6 (142). С. 119-120.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, физико-математические науки:

П.2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности.

П.4. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.

П.6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Выводы:

1. Диссертация Азановой И.С. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором комплексных исследований радиационной стойкости оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа обоснованы аналитические зависимости, определяющие закономерности влияния температуры, дозы в импульсе, уровня напряженно-деформированного состояния стекла сердцевины оптического волокна на процессы релаксации оптического волокна после воздействия ионизирующего излучения, выявлены особенности и условия образования новых радиационных центров окраски, выявлены оптические компоненты, определяющие радиационную стойкость прибора при непрерывном и импульсном воздействии ионизирующего излучения, разработаны физические основы для промышленной технологии изготовления радиационно-стойких оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин.

2. Результаты работы внедрены в производство на ПАО «ПНППК» (акт внедрения 65/66-34-а от 02.04.2025 г., экспертное разрешение на публикацию диссертации от ПАО ПНППК от 06.04.2025 г.):

- На основе научных результатов о влиянии на радиационную стойкость оптических волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной различных режимов осаждения стекла преформы и вариации

конструктивных параметров заготовок, в ПАО «ПНППК» с 2015 г. по 2021 г. разработаны конструкции и технологии изготовления 9 типов радиационно-стойких изотропных и анизотропных оптических волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной с литерой «О1». В настоящее время оптические волокна регулярно поставляются заказчикам, объем выпуска превысил 400 км.

- Результаты по исследованию влияния внутренних напряжений в оптическом волокне на радиационную оптическую стойкость гиротропических контуров учтены в конструкции контура.
- На основе исследования влияния различных составов стекла сердцевины радиационно-стойких активных эрбиевых оптических волокон на выходные характеристики и радиационную стойкость оптической схемы суперлюминесцентного волоконного источника, разработаны конструкция и технология серийного производства радиационно-стойкого активного эрбиевого оптического волокна с литерой «О». С применением этого оптического волокна разработан и поставляется заказчику суперлюминесцентный волоконный источник для космических применений. Заказы на данный источник уже подтверждены до 2027 г.
- На основе созданных в рамках диссертационной работы методик исследования стойкости волоконно-оптических компонентов разработаны инструкции по проверке радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов.
- С помощью созданных методик проведены исследования и определена радиационная стойкость разрабатываемых изделий, в которых применены волоконно-оптические компоненты.
- Постоянно используется созданный в ходе диссертационной работы экспериментальный комплекс для исследования радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов.

3. Исследования по теме диссертации являются составной частью проектов, направленных на создание высокотехнологичных производств радиационно-стойких оптических волокон, при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-059 от 22 ноября 2019 г.), Российского Научного Фонда (Проект № 18-12-00436), Программы, введенной Постановлением Правительства РФ от 08.06.2021 № 872.

4. Совокупность результатов работы можно квалифицировать как крупное научное достижение в области исследования радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов.

5. Диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» соответствует требованиям пп. 9–14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», принятого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара Физико-математического института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

В голосовании приняли участие 13 из 16 человек базового состава участников научного семинара Физико-математического института. Результаты голосования: «за» – 8 чел., «против» – 1 чел., «воздержалось» – 4 чел. Протокол № 2 от «11» июня 2025 г.



Барулина М.А.,
д.ф.-м.н., доцент, директор Физико-математического института, председатель заседания научного семинара Физико-математического института ПГНИУ



Петров Д.А.,
д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры физики фазовых переходов, секретарь заседания научного семинара Физико-математического института ПГНИУ

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, тел. 8 (342) 2396227, факс (342) 2371611 e-mail: info@psu.ru



18.07.2025