

ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам предварительного рассмотрения диссертации

Азановой Ирины Сергеевны

на тему **«Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин»**, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния в диссертационном совете 24.2.358.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Экспертная комиссия в составе:

Председателя комиссии, доктора физико-математических наук Русакова С.В., **членов комиссии** – доктора физико-математических наук Мизева А.И., доктора физико-математических наук Перминова А.В., рассмотрела диссертацию Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» и пришла к следующему заключению.

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и посвящена разработке научных основ для прогнозирования радиационной стойкости оптического тракта волоконно-оптических интерферометрических датчиков физических величин (ВОИД). Как наиболее показательные представители, для исследований выбраны основные оптические компоненты волоконно-оптического гироскопа: суперлюминесцентный эрбиевый волоконный источник оптического излучения, многофункциональная интегрально-оптическая схема (СИОМ) на монокристалле ниобата лития, а также чувствительный элемент на основе оптического волокна (ОВ) с сохранением поляризации излучения. Разработана специальная методология испытаний радиационно-стойких изделий, максимально приближенных к условиям их эксплуатации. На основании выполненных автором комплексных исследований радиационной стойкости оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа предложены и 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, определены оптические компоненты, обуславливающие радиационную стойкость прибора при непрерывном и импульсном воздействии ионизирующего излучения. Заложены научные основы промышленной технологии изготовления радиационно-стойких оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин. Разработана и внедрена технология производства радиационно-стойких оптических волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной с сохранением поляризации излучения и организовано их серийное производство.

Актуальность и научная новизна представленных исследований определяется тем, что в работе впервые систематически изучено влияние факторов ионизирующего излучения и технологии изготовления волоконно-оптических компонентов на оптические свойства компонентов ВОИД в процессе облучения и

после облучения, а именно: уровня напряженно-деформированного состояния оптического волокна, величины оптической мощности рабочего сигнала и температуры в сочетании с вариацией интенсивности и вида воздействующего ионизирующего излучения, при этом уровень напряженно-деформированного состояния оптического волокна как влияющий фактор ранее в работах не исследовался; проведены комплексные исследования стойкости к воздействию ионизирующего излучения, в которых в одних условиях исследовались волоконно-оптические компоненты оптического тракта ВОИД, что позволило выявить компоненты, определяющие стойкость ВОИД к разным видам воздействия ионизирующего излучения; изучена функциональная зависимость от влияющих факторов эмпирических коэффициентов аналитических зависимостей, описывающих радиационный отклик оптических волокон, что позволило прогнозировать радиационную стойкость волоконно-оптических компонентов при отличающихся условиях опытов, получены аналитические зависимости радиационно-наведенных оптических потерь оптического волокна в зависимости от времени облучения (поглощенной дозы), позволяющие учесть самостоятельные вклады мощности дозы и уровня напряженно-деформированного состояния оптического волокна при воздействии непрерывного ионизирующего излучения, а также корректно описать экспериментальные результаты временной релаксации радиационно-наведенных оптических потерь оптического волокна, с наведенными механическими напряжениями после воздействия импульсного ионизирующего излучения.

В работе подробно описаны методики исследований и характеристики исследуемых образцов, экспериментальные результаты исследований, представлены аналитические зависимости радиационно-наведенных оптических потерь в оптическом волокне от рассматриваемых факторов, а также их расчетные эмпирические коэффициенты, определены границы применимости предложенных аналитических зависимостей для случая импульсного ионизирующего излучения.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для проектирования радиационно-стойких ВОИД и приборов на их основе, разработки численных математических моделей прогнозирования радиационного отклика волоконно-оптических компонентов при воздействии различных видов ионизирующего излучения, создания технологий изготовления радиационно-стойких оптических волокон и волоконно-оптических компонентов.

2. Диссертация обладает внутренним единством, полнотой и последовательностью изложения.

3. Представленная диссертационная работа по своему содержанию соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния:

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.

4. В диссертации получены следующие новые результаты:

- 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 радиационной оптической стойкости (РОС) волоконно-оптических компонентов ВОИД. Выявлены волоконно-оптические компоненты, определяющие стойкость ВОИД в условиях воздействия непрерывного и импульсного ионизирующего излучения.

- Для оптического волокна с кварцевой сердцевиной чувствительность радиационно-наведенных оптических потерь (РНП) на длине волны 1550 нм к уровню входной оптической мощности и уровню внутренних упругих напряжений, в первую очередь, определяется наличием радиационных центров окраски (РЦО) с полосами поглощения 0,95 эВ и 1,12 эВ.

- Установлены закономерности, связывающие процесс релаксации РНП в оптическом волокне после воздействия импульсного ионизирующего излучения с величиной дозы в импульсе, относительной продольной деформацией, температурой образца, входной оптической мощностью.

- Радиационная оптическая стойкость волоконного контура волоконно-оптического гироскопа определяется уровнем внутренних упругих напряжений в сердцевине оптического волокна.

- При воздействии импульсного ионизирующего излучения в анизотропном оптическом волокне с германосиликатной сердцевиной выявлено образование короткоживущих РЦО на длине волны 1550 нм с временем жизни до 0,1 мс.

- Впервые для времен миллисекундного диапазона после воздействия гамма-нейтронного и фотонного импульсного ионизирующего излучения для оптического волокна измерены спектры пропускания в диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм. Установлено, что в анизотропных оптических волокнах с кварцевой сердцевиной 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.

5. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

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.

Соискателем лично:

- выполнены постановка задачи исследований радиационной стойкости компонентов ВОИД и разработка методологии исследований, позволяющие выявить компоненты, определяющие радиационную оптическую стойкость ВОИД;
- разработаны программы и методики исследований; выполнен подбор моделирующих облучательных установок;
- выявлены и сгруппированы рассматриваемые влияющие факторы;
- организованы исследования и осуществлялось научно-техническое руководство их проведением при непосредственном участии в постановке и проведении экспериментов;
- предложены аналитические зависимости РНП от рассматриваемых факторов, позволяющие корректно описать радиационный отклик оптического волокна в напряженно-деформированном состоянии, проведены расчеты и обработка результатов исследования, выполнены анализ и обобщение результатов исследования;
- выполнены разработка конструкции и проведение технологических исследований режимов изготовления радиационно-стойкого оптического волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной;

6. Достоверность и значимость исследований Азановой И.С. подтверждается организацией серийного производства радиационно-стойких оптических волокон на ПАО «ПНППК».

Приведенные в диссертации ссылки на работы других авторов выполнены корректно, список литературы оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 37 работах. В том числе 9 из них входят в базы данных Scopus и Web of Science (2 в материалах конференций), 5 статей опубликовано в журналах из списка ВАК, индексируемых системой РИНЦ, 19 публикаций представляют собой труды в сборниках научных конференций и тезисы докладов, 1 патент на полезную модель, 1 патент на изобретение:

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. Имеется 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. Пospelова, 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. Пospelова, 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.

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.

Диссертация соответствует требованиям пп. 11, 13, 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением

На основании вышеизложенного заключаем, что:

1. рассматриваемая диссертация является **законченной** научно-квалификационной работой на актуальную тему;
2. тема и содержание диссертации **соответствуют** научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния;
3. требования к публикации основных научных результатов диссертации **соблюдены**;
4. использование в диссертации заимствованного материала без ссылки на автора или источник заимствования, а также недостоверных сведений **не выявлено**.

Диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны на тему **«Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин»** рекомендуется к принятию к защите в диссертационном совете 24.2.358.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

В качестве официальных оппонентов рекомендуются:

Полисадова Елена Федоровна

Доктор физико-математических наук

Профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Томского политехнического университета

Филатов Юрий Владимирович

Доктор технических наук, профессор,

Заведующий кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем

Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Чеботарев Сергей Николаевич

Доктор технических наук, профессор,

Профессор кафедры химических технологий и новых материалов химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

(ФГАОУ ВО СПбПУ)

195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
ул. Политехническая, д.29 литера Б

office@spbstu.ru

8 (800) 707-18-99

Председатель комиссии:

Профессор физико-математического института
ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный
исследовательский университет,
доктор физико-математических наук,
профессор Русаков Сергей Владимирович

«Я, Сергей Владимирович Русаков, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»



/ Русаков С. В.

Члены комиссии:

Заведующий кафедрой общей физики
ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
доктор физико-математических наук,
доцент Перминов Анатолий Викторович

«Я, Анатолий Викторович Перминов, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»



/ Перминов А. В.

Директор института механики сплошных сред УрО РАН,
доктор физико-математических наук,
Мизёв Алексей Иванович

«Я, Мизёв Алексей Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»



/ Мизёв А.И.

23 декабря 2025 года