

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора отделения материаловедения ТПУ Полисадовой Елены Федоровны на диссертацию Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации

Работа посвящена исследованию радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов: изучению влияния ионизирующего излучения (ИИ) и технологии изготовления на их оптические свойства, разработке методов испытаний и созданию физических основ для промышленного производства радиационно-стойких изделий.

Волоконно-оптические интерферометрические датчики (ВОИД) физических величин являются инструментом высокоточного мониторинга состояния ответственных объектов. Всё большее распространение получает эксплуатация этих датчиков в экстремальных радиационных условиях: открытый космос, внутренние контуры АЭС, ускорительные комплексы, зоны специального назначения, где ИИ выступает одной из главных деградирующих нагрузок.

Экспериментально и теоретически подтверждено, что непрерывное и, особенно, импульсное ионизирующее излучение способно не только постепенно ухудшать чувствительность датчиков, но и приводить к внезапной катастрофической потере их работоспособности. Несмотря на многочисленные исследования волоконно-оптических компонентов, механизмы радиационно-индуцированных изменений в интерферометрических схемах изучены недостаточно глубоко — без учёта уровня напряжённо-деформированного состояния волокна, температуры и других влияющих факторов. Требуется поиск зависимостей, позволяющих численно оценивать радиационный отклик компонентов ВОИД в различных условиях эксплуатации.

Большинство исследований выполнено для стационарных режимов радиационного воздействия. Однако для перечисленных специальных объектов (космос, атомная энергетика) необходимы датчики с гарантированной радиационной стойкостью. Существующие коммерческие и даже специализированные ВОИД, как правило, не имеют подтверждённых характеристик стойкости к импульсному воздействию ИИ, что создаёт риск ложных показаний или полного отказа систем мониторинга. Это определяет

необходимость разработки методик оценки радиационного отклика при таких условиях воздействия.

Таким образом, актуальность работы продиктована практической потребностью в создании и аттестации радиационно-стойких ВОИД, необходимостью установления фундаментальных закономерностей влияния радиационного облучения на оптические характеристики оптоволоконна, а также отсутствием единого подхода к изучению влияния ионизирующего излучения на радиационно-оптическую стойкость волоконно-оптических компонентов. Решение этих задач является критически важным для обеспечения надёжности и безопасности систем мониторинга в условиях радиационного воздействия.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций

Положения и выводы диссертации базируются на системном подходе к решению разрабатываемых научных задач. Автором сделан детальный анализ научных и технических проблем радиационной стойкости ВОИД. На основе анализа данных и синтеза информации выявлена основная проблематика отрасли и поставлены задачи исследования. Для решения этих задач подобраны объекты исследования в виде многофункциональных интегрально-оптических схем, образцов активных ОВ с ионами церия и эрбия, образцы пассивных ОВ нелегированной кварцевой и германосиликатной сердцевины, одномодовое гироскопическое волокно с сохранением поляризации излучения, германосиликатное и с нелегированной кварцевой сердцевиной типа «Панда», образцы изотропного одномодового ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной. Образцы исследовались в свободном состоянии и в виде гироскопических бескаркасных волоконных контуров. Автор акцентирует особое внимание на обеспечении валидности и репрезентативности выборки образцов, а также на стандартизации условий изготовления образцов и методов испытаний. Методики исследования характеристик образцов при воздействии ионизирующего излучения тщательно выстроены. Для оценки уровня напряженно-деформированного состояния в образцах ОВ была применена методика измерения сдвига частоты Бриллюэна. Для измерения параметров и характеристик волоконно-оптических элементов использовалось калиброванное и поверенное оборудование. Для исследования радиационной стойкости использовались различные типы ионизирующего излучения, и различные режимы облучения: непрерывное гамма-излучение, импульсное тормозное излучение, импульсное гамма-нейтронное излучение. Тщательно проводилась дозиметрия ИИ. Методы и подходы, использованные автором для изучения радиационной стойкости, выявления причин деградации, установления корреляционных связей с условиями производства ВОК обеспечивают высокую степень надежности полученных результатов,

обоснованности научных положений. Поставленные в работе задачи проработаны на высоком уровне, достигнута цель работы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов подтверждена использованием поверенного оборудования, современных методов обработки данных, достаточной статистической выборкой и многократной воспроизводимостью экспериментов. На основе полученных результатов построена технологическая цепочка выпуска радиационно-стойких компонентов, а их стабильное коммерческое производство служит дополнительным доказательством достоверности. Работа прошла рецензирование, опубликована в ведущих научных журналах и апробирована на международных конференциях.

Результаты диссертационного исследования в полной мере апробированы. Основное содержание диссертации отражено в 14 статьях в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и индексируемых международными базами данных Web of Science (WoS) и Scopus, в 9 статьях в журнале, входящем в список ВАК по смежным специальностям, 1 журнале, индексируемом РИНЦ. Получены патенты на изобретение и на полезную модель. Результаты доложены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях, семинарах, отражены в тезисах и материалах конференций, опубликованы в 17 трудах и сборниках конференций. Отдельные блоки исследований проводились в рамках проектов, поддержанных Минобрнауки, РФФИ, программы по постановлению Правительства РФ №872.

Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация содержит введение, семь глав, заключение, список сокращений, перечень иллюстраций и таблиц, список литературы, в том числе опубликованных автором работ. Общий объем диссертации составляет 308 страниц, в том числе 113 рисунков, 25 таблиц, 1 приложение. Список литературы содержит 240 наименований.

Во введении обоснована актуальность и проанализирована степень разработанности темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы, личном вкладе автора, публикациях, структуре и объеме диссертации. **В первой главе** проведен анализ современного состояния исследований, проведен обзор оптических компонентов волоконно-оптических гироскопов (СИОМ, активного волокна, ОВ с сохранением поляризации) и анализ их деградации под действием ионизирующего излучения (ИИ). Уделено внимание методам изготовления волокон, т.к. особенности технологий могут существенно влиять

на стойкость к ионизирующему излучению. Показано, что ключевую роль в деградации их оптических характеристик под действием ИИ играют радиационно-индуцированные точечные дефекты (РЦО), возникающие в материале волокон и интегральной оптики. Рассмотрены известные подходы к повышению РОС. На основе проведенного анализа были сформулированы проблемные вопросы в отрасли и поставлены задачи исследования. Для создания радиационно-стойкого ВОГ навигационного класса требуются компоненты, автономно выдерживающие как непрерывное, так и импульсное ионизирующее излучение, однако открытых данных по импульсному воздействию практически нет, что делает необходимыми комплексные исследования. Основные нерешенные проблемы: неизвестны причины радиационно-индуцированных потерь (РНП) в волокнах с сохранением поляризации, отсутствуют данные по температурной зависимости РНП, по стойкости к импульсному облучению и по влиянию внутренних напряжений.

Во второй главе детально описаны методики проведения экспериментов, приведены технические характеристики применяемого аналитического оборудования, описаны алгоритмы обработки результатов. Приведена детальная характеристика выбранных групп образцов, описаны особенности технологий их получения. **В третьей главе** показаны результаты исследования влияния непрерывного гамма-излучения на РНП в спектральном диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм и величины h -параметра для ОБ ПSiO₂ и ПGeO₂ в условиях свободной намотки и волоконных контуров ВОГ. По результатам третьей главы сформулировано первое защищаемое положение. **В четвертой главе** представлены результаты исследования влияния импульсного ионизирующего излучения на РНП в спектральном диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм ОБ ИSiO₂, ПGeO₂, ПSiO₂ в виде свободной намотки и в виде волоконных контуров ВОГ (для последних двух типов ОБ). По результатам четвертой главы сформулированы второе и третье защищаемые положения. **В пятой главе** приведены результаты по исследованию радиационно-стойкого активного оптоволокна в составе однопроходной схемы СВИ со встречной накачкой при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения. результатам пятой главы сформулированы четвертое и пятое защищаемые положения. **В шестой главе** рассматриваются результаты исследований РОС оптических характеристик СИОМ при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения. **В седьмой главе** проведено обобщение и анализ полученных данных по стойкости рассматриваемых оптических компонентов ВОГ к воздействию ИИ. Сформированы рекомендации повышения стойкости ВОИД к воздействию как непрерывного, так и импульсного ИИ, применимые для этапа проектирования и эксплуатации ВОИД. По результатам седьмой главы

сформулированы шестое и седьмое защищаемые положения. В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки технологии производства оптических компонентов с повышенной радиационно-оптической стойкостью.

Структура диссертации логически выстроена, охвачены все аспекты, определяющие радиационную стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин. Избранный автором многогранный подход к исследованиям, к изложению экспериментальных результатов позволил последовательно подвести к доказательству защищаемых положений, аргументировать выводы и выработать практически значимые рекомендации по использованию установленных закономерностей для решения прикладных задач в области промышленной технологии производства оптических компонентов с повышенной радиационной стойкостью.

Научная новизна исследования

В работе получены новые результаты, имеющие высокую научную и практическую значимость:

1. Получены данные о РОС компонентов ВОИД в единой методологии и сопоставимых условиях для гамма-, фотонного (тормозного) и гамма-нейтронного излучений в широком диапазоне доз и мощностей. Выявлены компоненты, определяющие радиационную стойкость ВОИД при непрерывном и импульсном ИИ.

2. Для ОВ с кварцевой сердцевиной чувствительность радиационно-наведённых потерь (РНП) на длине волны 1550 нм к входной оптической мощности и уровню внутренних упругих напряжений обусловлена главным образом радиационными центрами окраски (РЦО) с полосами поглощения 0,95 эВ и 1,12 эВ.

3. Установлены закономерности релаксации РНП в ОВ после импульсного ИИ в зависимости от дозы в импульсе, относительной продольной деформации, температуры образца и входной оптической мощности.

4. Доказано, что РОС волоконного контура ВОГ определяется уровнем внутренних упругих напряжений в сердцевине ОВ.

5. При импульсном ИИ в анизотропном германосиликатном ОВ обнаружены короткоживущие РЦО на длине волны 1550 нм с временем жизни до 0,1 мс.

6. Установлено, что в анизотропных ОВ с кварцевой сердцевиной в течение 3 с после импульсного воздействия гамма-нейтронного и фотонного облучения происходит перераспределение РЦО: уменьшение РНП в области >1000 нм и их увеличение в области <1000 нм.

Следует отметить вклад автора в методологию исследований радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов, которая впервые объединила комплексное воздействие непрерывного и импульсного ионизирующего излучения, контролируемое изменение уровня напряжённо-деформированного состояния волокна и стандартизацию условий испытаний, что позволило получить сопоставимые результаты для различных типов волокон и интегрально-оптических схем.

Замечания по диссертации

Несмотря на общую положительную оценку диссертации, высокую научно-практическую значимость, представляется необходимым отметить ряд вопросов, которые вызывают дискуссии, а также некоторые выявленные недостатки и замечания:

1. Автором проведен обстоятельный качественный литературный обзор по тематике диссертации, позволивший выявить проблемы в области исследования радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов, технологий серийного производства радиационно-стойкого волокна с сохранением поляризации излучения. Обзору посвящено 68 страниц, что является несколько избыточным, составляет почти четверть основного объема диссертации.

2. Зависимости времени жизни центров окраски от уровня напряженно-деформированного состояния имеет недостаточную статистическую обоснованность. Зависимости $\tau_{\text{соб}}(\Delta\varepsilon)$ и $\tau_{\text{деф}}(\Delta\varepsilon)$, представленные на рисунке 4.21, построены по ограниченному числу экспериментальных точек (по 3–4 точки для каждого типа волокон). Для PSiO_2 в свободной намотке и в виде ВК автор приводит два возможных варианта аппроксимации (стр. 206–207) с практически одинаковым коэффициентом детерминации, но с противоположным поведением $\tau_{\text{деф}}$. Это указывает на неоднозначность интерпретации и требует дополнительных экспериментов с промежуточными значениями деформации. Не приведены доверительные интервалы для коэффициентов аппроксимации, что снижает прогностическую ценность полученных функциональных зависимостей.

3. Разделение радиационно-индуцированных центров окраски (РЦО) на «короткоживущие — собственные дырки» и «долгоживущие — деформационные дырки» обосновывается математической аппроксимацией кривых релаксации $R_{\text{НП}}(t)$ с помощью суммы двух растянутых экспонент или кинетики разных порядков. Однако в работе не представлены прямые физико-химические или спектроскопические доказательства (например, ЭПР-спектроскопия, оптическая спектрометрия с временным разрешением, термолюминесценция), подтверждающие, что за первую и вторую компоненту релаксации отвечают именно разные типы дефектов. Разные времена жизни

формально могут описываться и перераспределением энергии внутри одной группы центров или диффузионно-ограниченной рекомбинацией. Без независимого подтверждения природы центров само их деление на «собственные» и «деформационные» остается удобной феноменологической моделью, а не физически установленным фактом.

4. Недостаточное внимание в работе уделено эффекту накопления повреждений при повторных импульсных облучениях. Исследовано влияние повторных облучений только для образцов PSiO_2 первого варианта технологии (стр. 173–174), причем сделано это в ограниченном объеме. Для СИОМ показано, что «последующие импульсные облучения нейтронами приводят к необратимым изменениям» (стр. 254), однако для волоконных контуров и активных волокон систематические исследования многократных импульсных воздействий отсутствуют. Между тем, в реальных условиях возможны серии импульсов ИИ, и накопление остаточных РНП может повлиять на прогнозирование радиационной стойкости.

Заключение

Диссертация Азановой Ирины Сергеевны на тему «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Совокупность полученных результатов, обобщений и выводов можно квалифицировать как значительное научное достижение в области физики конденсированного состояния вещества. Следует отметить высокое прикладное значение выявленных закономерностей, тесную связь с реальными производственными задачами.

Диссертация и автореферат соответствуют пунктам паспорта специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния», отрасль – 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.

Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации, адекватно отражает ее содержание.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» по актуальности темы, по научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов, обоснованности выводов является логически законченным исследованием, выполненном на высоком уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года (в редакции от 16 октября 2024 года). Автор работы, Азанова Ирина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»
Полисадова Елена Федоровна



Контактная информация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Адрес организации: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30
Тел: +7(3822)606310
Адрес электронной почты: elp@tpu.ru

« 04 » 05 2026 г.

Подпись Полисадовой Елены Федоровны заверяю

Ученый секретарь ТПУ



 В.Д. Новикова