

Отзыв

официального оппонента 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 диссертационной работы

В последние годы имеет место рост научного и практического интереса к интерферометрическим волоконно-оптическим системам, что обусловлено расширением областей их применения в связи с развитием соответствующей элементной базы и методов улучшения основных характеристик таких интерферометрических схем. Среди таких систем особое место принадлежит волоконно-оптическим гироскопам (ВОГ), которые стали в настоящее время наиболее распространенными чувствительными элементами бесплатформенных систем ориентации и навигации средней и высокой точности и в значительной степени вытеснили традиционно использовавшиеся ранее механические гироскопы различных типов. Одним из важных направлений использования ВОГ является его установка на системах космического применения, важной особенностью которых является наличие ионизирующего излучения, воздействующего на волоконный тракт прибора и его элементы интегральной оптики. Воздействие ионизирующего излучения может приводить к существенным изменениям характеристик ВОГ и навигационных систем, в которых он используется.

В диссертационной работе анализируется влияние ионизирующего излучения на параметры распространения света в оптическом волокне различной конфигурации и на характеристики источников излучения и интегрально-оптических схем. Проводимый анализ направлен на выбор элементов волоконно-оптических систем, наилучшим образом проявляющих себя в условиях воздействия непрерывного и импульсного ионизирующего излучения различной мощности и длительности. Таким образом, можно сделать вывод о том, что содержание диссертационной работы Азановой Ирины Сергеевны имеет значительную актуальность ввиду высокой практической и научной значимости.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, семи содержательных разделов и списка литературы. **Во введении** диссертационной работы раскрыта её актуальность, поставлены цель и задачи работы, отражены научная новизна и теоретическая и практическая значимости работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту. В содержательных разделах описываются проведенные Азановой И.С. исследования, на основе которых сформулированы выносимые на защиту положения. **Первая глава** носит обзорный характер. Рассматриваются основные механизмы влияния ионизирующего излучения на оптическое волокно, при этом акцент делается на

возникающих под действием ионизирующего излучения внутренних точечных дефектах и анализе изменения под действием ионизирующего излучения таких характеристик как радиационно-наведенные оптические потери (РНО). Рассматриваются также известные данные о влиянии ионизирующего излучения на интегрально-оптические схемы и источники излучения. **Во второй главе** рассмотрены методы, использованные в диссертации для анализа влияния ионизирующего излучения на параметры волоконно-оптических интерферометрических датчиков. Определяется уровень напряженно-деформируемого состояния волокна с помощью измерения сдвига частоты Бриллюэна. Проводится анализ спектра излучения для оценки средневзвешенной частоты излучения, в значительной степени определяющей величину масштабного коэффициента ВОГ. Значительное внимание в работе уделено типу воздействующего излучения – непрерывному и импульсному. При анализе воздействия импульсного излучения основное внимание уделяется релаксации характеристик во времени после облучения. Для интегрально-оптической схемы оценивается коэффициент сохранения поляризации и коэффициент деления светоделителя. **Третья глава** посвящена исследованию влияния непрерывного ионизирующего излучения на характеристики оптического волокна, сохраняющего поляризацию. Исследования проведены для различных волокон – волокна с германосиликатной сердцевиной и волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной. При этом основное внимание уделено влиянию напрягающих стержней и изменению уровня напряженно деформируемого состояния волокна за счет различного пространственного состояния волокна – при намотке в гироскопический волоконный контур и при свободной намотке. Показано, что уровень напряженно деформированного состояния существенно влияет на величину РНО, возникающих при воздействии ионизирующего излучения. Показано, что существенное влияние оказывает уровень содержания кислорода в сетке стекла. Создание кислороднодефицитной среды при осаждении фторсиликатной оболочки и сердцевины волокна приводят к повышению радиационно-оптической стойкости волокна. Полученные результаты использованы для создания промышленной технологии производства радиационно-стойкого волокна. **В четвертой главе** приведены результаты исследования влияния импульсного ионизирующего излучения на РНО волокна в спектральном диапазоне от 0,9 мкм до 1,6 мкм. Основное внимание уделено исследованию релаксационных процессов как в волокне, сохраняющем поляризацию, так и в изотропном волокне при различном деформационном состоянии – при свободной намотке и при намотке в гироскопический контур ВОГ. В экспериментах использовались два вида импульсного ионизирующего излучения – фотонное (тормозное) излучение и гамма-нейтронное излучение. Анализ полученных результатов показал, что релаксационные процессы после импульсного воздействия фотонного излучения хорошо аппроксимируются с помощью суммы двух растянутых экспонент. Обнаружено образование под воздействием импульсного излучения короткоживущих радиационно-наведенных центров окраски в анизотропном волокне с сердцевиной, легированной германием. Эксперименты с нейтронным излучением показали, что его воздействие на время релаксации волокна является наиболее сильным при любом типе сердцевины. **Пятая глава** посвящена исследованию влияния непрерывного и импульсного ионизирующего

излучения на параметры активного оптического волокна. Основное внимание уделено спектральным характеристикам излучения, также рассмотрены мощностные параметры. Показано, что положительную роль играет легирование сердцевины активного волокна германием или алюминием, а деформационные напряжения замедляют релаксационные процессы. **В шестой главе** рассмотрено влияние непрерывного и импульсного ионизирующего излучения на работу интегрально-оптических схем. Результаты исследований показали, что интегрально-оптические схемы являются наиболее стойкой составляющей волоконных систем. **Седьмая глава** посвящена обобщению результатов работы и выработке рекомендаций для разработки радиационно-стойких ВОГ, наилучшим образом пригодных для космического использования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выносимых на защиту

Обоснованность результатов, полученных в рецензируемой диссертационной работе, определяется, в целом, использованием современного математического аппарата, привлечением для анализа адекватных физических моделей рассматриваемых процессов, проведением численных оценок, сравнение которых с данными, известными из литературы, характеризует их как вполне реальные и соответствующие устоявшимся критериям.

В диссертации выносятся на защиту положения, сформулированные на основе полученных соискателем результатов. Работа содержит подробное описание применяемых для этого подходов, которые включают в себя сложные эксперименты с использованием таких источников ионизирующего излучения, как установка «ГУТ-200М», расположенная в НИЦ «Курчатовский институт», «Гамма-Н», расположенная в АО «НИИП», установки «ЛИУ-30М» и «БР-1М», расположенные в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Численные расчеты проведены с использованием широко применяемых математических пакетов и корректных моделей расчета. Большая часть полученных результатов основывается на проведенных соискателем экспериментальных исследованиях. Достоверность результатов проведенных исследований обеспечена многократным повторением экспериментов и их воспроизводимостью, а также согласованностью основных положений работы с имеющимися в современной научной литературе данными. Результаты диссертации представлялись на ведущих международных и всероссийских научных конференциях и были опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в базы Scopus, Web of Science, РИНЦ, и перечень ВАК. Таким образом, обоснованность выносимых на защиту положений не подлежит сомнению.

Степень новизны результатов, полученных автором диссертации.

В рассматриваемой работе впервые был проведен обширный комплекс исследований радиационной стойкости волоконных интерферометрических датчиков с использованием уникального оборудования, предоставленного для проведения экспериментов научными организациями, находящимися на высоком уровне развития современной физики. В результате проведения экспериментальных исследований и их всестороннего анализа получена обширная информация о влиянии как непрерывного, так и импульсного ионизирующего излучения на основные параметры волокна различного типа (изотропного, сохраняющего поляризацию, легированного различными материалами) и

основных элементов датчиков (источник излучения, интегрально-оптические схемы). Обнаружено определяющее влияние возникновения радиационно-наведенных центров окраски на уровень радиационно-наведенных потерь сохраняющего поляризацию волокна с нелегированной сердцевиной. Важным результатом проведенных исследований является обнаружение влияния уровня напряженно-деформированного состояния волокна на степень его радиационной деградации. В анизотропном волокне с нелегированной кварцевой сердцевиной обнаружено перераспределение радиационных центров окраски в коротковолновую область спектра после воздействия импульсного гамма-нейтронного ионизирующего излучения.

Оценка научной и практической ценности, реализация результатов работы.

Научная значимость диссертационной работы определяется комплексностью проведенных исследований, включающих в себя применение различных источников ионизирующего излучения как непрерывных, так и импульсных, варьирование параметров излучения, использование в качестве объектов исследования оптических волокон различной конфигурации (изотропные, сохраняющие поляризацию, легированные различными материалами). Разработка комплексной методики исследований и обработки полученных результатов позволили получить новые важные результаты.

Основным фактором практического использования полученных результатов является разработка основ промышленной технологии создания радиационно-стойких волоконных интерференционных датчиков и в частности волоконно-оптических гироскопов.

Замечания по работе

Следует отметить ряд недостатков, выявленных в ходе анализа диссертационной работы Азановой И.С.:

1. Большое внимание в работе уделено влиянию ионизирующего излучения на радиационно-наведенные потери волокна. При этом отсутствуют какие-либо попытки оценить тип и величину погрешности волоконно-оптического гироскопа, обусловленной увеличением потерь. Влияние изменения средневзвешенной длины волны оценивается как изменение масштабного коэффициента и, соответственно, определяются допустимые пределы изменения, для потерь же пределы оцениваются только с точки зрения возможности функционирования.

2. Одним из аспектов проведенной работы явился контроль спектров пропускания волокна в довольно широких пределах от 0,4 мкм до 1,6 мкм. При этом в работе практически полностью отсутствует анализ происхождения светом волокна на разных длинах волн. Модовый состав излучения не рассматривается, хотя очевидно, что модовый состав в значительной мере определяет пропускную способность волокна.

3. В диссертации делается вывод о влиянии входной мощности оптического излучения на величину радиационно-наведенных потерь. В автореферате даже написано, что «...обнаружена уникальная возможность радикального снижения РНП при повышении величины P_0 ...». В тексте диссертации также отмечается возможность снижения потерь при

повышении P_0 на три порядка, с мкВт до мВт. При этом, однако, отсутствует какой-либо анализ причин такого явления.

4. В работе предлагается компенсировать изменение масштабного коэффициента ВОГ с помощью полученной зависимости средневзвешенной длины волны от мощности воздействующего ионизирующего излучения. Однако для реализации такой компенсации необходимо снабжать ВОГ измерителем мощности ионизирующего излучения. Этот аспект в работе не обсуждается.

5. Часть рисунков выполнена с использованием английского текста, что может затруднять восприятие материала, также в ряде случаев имеется путаница в обозначениях, так, например, на Рис 5.4 доза излучения показана в радианах.

Однако, приведенные замечания не снижают ценность полученных результатов и не влияют на положительное впечатление о работе.

Диссертация Азановой Ирины Сергеевны является **законченной научно-квалификационной работой**. Содержание диссертации полно отражено в автореферате. С учетом вышесказанного, представленное диссертационное исследование полностью соответствует требованиям пп. 9 и 14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, а также требованиям п.п. 9-11, 13 и 14 Положения о присуждении ученых степеней ФГАОУ ВО СПбГУ (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Азанова Ирина Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Заведующий кафедрой Лазерных измерительных и навигационных систем
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,

д.т.н., профессор



Филатов Юрий Владимирович

«21» апреля 2026 г.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58.

Сайт организации: <https://etu.ru>

Электронная почта: info@etu.ru

Подпись Ю.В. Филатова удостоверяю
Секретарь Диссертационных советов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Т.Л. Русьева