

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Азановой Ирины Сергеевны «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

### 1. Актуальность темы исследования

Диссертация И.С. Азановой посвящена исследованию радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин (ВОИД), в первую очередь волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения в широком диапазоне доз, мощностей доз и температур.

Для ракетно-космических технологий радиационная стойкость элементной базы является одним из ключевых требований. Космические аппараты и специальные объекты в течение длительного времени эксплуатируются в условиях действия космического ионизирующего излучения и жестких температурных режимов, что приводит к деградации параметров компонентов, а в пределе – к отказам систем. ВОИД сочетают высокую чувствительность и точность с широким динамическим диапазоном измеряемых величин и технологичностью, что способствует их растущей популярности и расширению сферы применений. В последние годы ВОИД, в том числе ВОГ, всё шире рассматриваются как элементы навигационных и измерительных систем космического и специального назначения. При этом именно радиационно-наведённое поглощение в оптических волокнах и чувствительных элементах зачастую ограничивает область их применения. Дополнительной проблемой является отсутствие полноценной отечественной элементной базы радиационно-стойких волокон и источников, а также надёжных моделей, позволяющих прогнозировать поведение таких компонентов на стадии проектирования изделий и планирования испытаний.

В этой связи комплексная работа, направленная на фундаментальное исследование физических механизмов деградации волоконно-оптических компонентов ВОИД под воздействием различных видов ионизирующего излучения, построение феноменологических моделей, пригодных для численного прогноза их поведения, и разработку надёжной технологии радиационно-стойких оптических волокон, является исключительно актуальной как для физики конденсированного состояния, так и для ракетно-космической техники.

## 2. Общая характеристика работы

Текст диссертации изложен на 341 странице, включает в себя введение, шесть основных разделов, заключение, список сокращений, список литературы, содержащий 240 ссылок, список трудов соискателя по теме диссертации и приложение. Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи работы, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

В первой главе выполнен аналитический обзор источников по теме диссертации, показано, что существующие данные разрозненны, часто неполны и несопоставимы, а особенности совместного влияния вида излучения, температуры, механических напряжений и оптической мощности на радиационно-наведённое поглощение и поляризационные свойства волокон изучены недостаточно.

Во второй главе изложена методология исследования радиационной стойкости: описаны используемые образцы волокон и компонентов, виды ионизирующего излучения (непрерывное  $\gamma$ -излучение, импульсное тормозное и  $\gamma$ -нейтронное излучение), диапазоны доз и мощностей доз, температурные условия, а также методы регистрации спектров пропускания, радиационно-наведённого поглощения (РНП), поляризационных характеристик, оптической мощности и деформационного состояния. Важным элементом работы является единый подход к постановке экспериментов для различных типов волокон и компонентов, что обеспечивает корректное сопоставление результатов.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния непрерывного  $\gamma$ -излучения на радиационную стойкость волокон типа «Панда» с германосиликатной ( $\text{PGeO}_2$ ) и кварцевой ( $\text{PSiO}_2$ ) сердцевиной, а также изотропных кварцевых волокон ( $\text{ISiO}_2$ ). Анализируются спектры поглощения и РНП в диапазоне от 900 до 1600 нм для различных условий облучения и температур. Показана решающая роль радиационных центров окраски с полосами вблизи 0,95 и 1,12 эВ для волокон с кварцевой сердцевиной, выявлено влияние кислородного баланса стекла, технологических режимов и внутренних напряжений на радиационно-оптические характеристики. На основе этих исследований разработана промышленная технология радиационно-стойких волокон с сохранением поляризации ( $\text{PSiO}_2$ ), обеспечивающих низкое затухание, высокое двулучепреломление и высокую радиационную стойкость, и внедрена их серийная продукция.

В четвертой главе исследовано воздействие импульсного ионизирующего излучения (тормозного и  $\gamma$ -нейтронного) на оптические характеристики

(радиационно-наведенные оптические потери в спектральном диапазоне длин волн от 900 нм до 1600 нм и величины  $h$ -параметра) образцов анизотропного оптического волокна, с германосиликатной и нелегированной кварцевой сердцевиной в условиях свободной намотки и волоконных контуров ВОГ. Особое внимание уделено процессам релаксации РНП в широком диапазоне температур, доз в импульсе, уровней деформации и оптической мощности. На основе подходов химической кинетики и использования функции Колмогорова–Аврами, растянутых экспонент и моделей растянутой кинетики выделены две группы радиационных центров — условно «короткоживущие» и «деформационные» — и получены аппроксимационные зависимости РНП(t), позволяющие описывать и прогнозировать поведение волокон после импульсного облучения.

Пятая глава посвящена исследованию активных волокон и суперлюминесцентных волоконных источников (СВИ) на их основе с различными матрицами стекла (алюмо-, алюмогермано- и фосфоро-силикатной) и легированием ионами эрбия и церия. Анализируется влияние непрерывного и импульсного излучения на мощностные и спектральные характеристики СВИ. Показано, что для определённых составов стекла и режимов легирования возможно обеспечить сочетание высокой радиационной стойкости и требуемых спектральных параметров для работы в ВОГ, а изменение средневзвешенной длины волны СВИ с дозой носит квазилинейный характер и может учитываться как систематическая погрешность в метрологии гироскопа.

В шестой главе рассмотрены результаты исследований радиационной стойкости интегрально-оптических схем (СИОМ) на монокристалле ниобата лития. Подтверждена их высокая стойкость к непрерывному  $\gamma$ -излучению, показано, что импульсные воздействия могут приводить к кратковременным переходным изменениям характеристик, не выводящим устройство из рабочего состояния.

В седьмой главе выполнено обобщение результатов исследований по всем компонентам ВОГ и другим ВОИД. Определён вклад каждого элемента (волоконный контур, активное волокно и СВИ, СИОМ) в радиационную стойкость датчика в целом, предложены рекомендации по выбору компонентов, технологических и эксплуатационных параметров для обеспечения требуемого уровня стойкости в заданных радиационных и температурных условиях.

Содержание диссертационной работы в достаточно полно отображено в автореферате. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК и адекватно отражает содержание диссертации: представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна исследования, подтверждена апробация работы.

### **3. Научная новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе**

1. Впервые в рамках единой экспериментальной методологии и в сопоставимых условиях для гамма-, фотонного (тормозного) и гамма-нейтронного излучений получены систематические данные о радиационно-оптической стойкости волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин (ВОИД), включая пассивные и активные оптические волокна, суперлюминесцентный волоконный источник излучения и интегрально-оптические схемы. Показано, какие именно компоненты определяют радиационную стойкость ВОИД при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения.

2. Впервые установлена и экспериментально обоснована физическая связь между режимами осаждения фторсиликатной оболочки и кварцевой сердцевины преформы и концентрацией радиационных центров окраски с полосами поглощения  $\sim 0,95$  и  $1,12$  эВ, определяющих радиационно наведённые оптические потери и их чувствительность к уровню входной оптической мощности и уровню внутренних упругих напряжений на длине волны  $1550$  нм в волокнах с нелегированной кварцевой сердцевиной.

3. Установлено, что в анизотропных оптических волокнах типа «Панда» с германосиликатной сердцевиной наличие внутренних упругих напряжений является необходимым условием формирования короткоживущих радиационных центров окраски, вносящих вклад в радиационно наведённые оптические потери на длине волны  $1550$  нм при воздействии импульсного ионизирующего излучения. Показано, что вклад этих центров и их времена жизни зависят от уровня анизотропии напряжённо деформированного состояния сердцевины.

4. Впервые количественно установлены закономерности релаксации радиационно наведённых оптических потерь, обусловленных короткоживущими и деформационными центрами окраски, в зависимости от дозы, температуры, относительной продольной деформации и оптической мощности зондирующего излучения. Показано, что характерное время релаксации короткоживущих центров экспоненциально возрастает с увеличением относительной продольной деформации, что свидетельствует о ключевой роли механически индуцированной деформации сетки стекла в кинетике распада радиационных дефектов. При этом релаксация описывается бездиффузионным режимом на начальных временах с последующим переходом к диффузионно ограниченному режиму, что подтверждено анализом в рамках модели Колмогорова–Аврами и растянутых экспонент Кольрауша.

5. Впервые для времён миллисекундного диапазона после воздействия

импульсного гамма нейтронного и фотонного излучения измерены спектры пропускания в диапазоне длин волн 900–1600 нм для анизотропных и изотропных волокон с кварцевой и германосиликатной сердцевиной. Установлено перераспределение радиационно наведённых потерь из длинноволновой области ( $>1000$  нм) в коротковолновую ( $<1000$  нм) после гамма нейтронного воздействия, что интерпретируется как обратимая перестройка структуры сетки стекла и дополнительная деформация под действием нейтронного потока.

6. Установлено, что легирующие примеси (германий, алюминий) в сердцевине оптического волокна существенно ускоряют процессы релаксации радиационно наведённых оптических потерь после импульсного нейтронного облучения, тогда как внутренние упругие напряжения в сетке стекла приводят к замедлению релаксации. Показано, что совместное управление легированием и напряжённо деформированным состоянием позволяет целенаправленно формировать временной профиль восстановления оптических характеристик и, тем самым, управлять длительностью неработоспособности волоконно-оптических датчиков.

7. Экспериментально показано, что при воздействии непрерывного ионизирующего излучения на суперлюминесцентный волоконный источник излучения средневыбранная длина волны его спектра квазилинейно зависит от поглощённой дозы. Установленная закономерность позволяет применить расчетную компенсацию спектрального сдвига в зависимости от поглощенной дозы при оценке дрейфа волоконно-оптических интерферометрических датчиков.

8. На основе сопоставления радиационно наведённых потерь в волоконном контуре и спектральных изменений суперлюминесцентного источника показано, что радиационная стойкость волоконно оптических интерферометрических датчиков при воздействии непрерывного ионизирующего излучения определяется совокупным вкладом этих двух компонентов. Установлено, что при импульсном облучении время восстановления метрологических характеристик датчиков определяется, в первую очередь, кинетикой релаксации радиационно наведённых потерь в волоконном контуре.

9. Разработаны и реализованы физические принципы промышленной технологии радиационно стойких одномодовых волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной, сохраняющих поляризацию излучения, с низким коэффициентом затухания (до 0,8 дБ/км на  $\lambda=1550$  нм) и высоким двулучепреломлением (до  $7,3 \times 10^{-4}$ ), а также активных эрбиево цериевых волокон и интегрально оптических схем на ниобате лития. Показано, что разработанные волокна по совокупности характеристик (затухание, двулучепреломление, радиационно наведённые потери) превосходят мировые

аналоги и обеспечивают повышение точностных и эксплуатационных характеристик волоконно-оптических гироскопов и других ВОИД.

Совокупность полученных результатов представляет собой существенный вклад в физику конденсированного состояния стеклообразных материалов под воздействием ионизирующего излучения и одновременно формирует феноменологическую базу для инженерного расчёта радиационной стойкости волоконно-оптических компонентов.

#### **4. Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии представлений о:

- механизмах формирования и релаксации радиационно-индуцированных дефектов и центров окраски в оптических стеклообразных материалах;

- связи между структурой стекла (компактность сетки, кислородный баланс, легирование, внутренние напряжения) и радиационно-наведённым поглощением;

- закономерностях кинетики РНП при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения в широком диапазоне температур, доз и механических деформаций;

- построении физически обоснованной феноменологической модели, пригодной для расчёта и прогноза поведения волоконно-оптических компонентов в условиях радиационных воздействий.

Практическая значимость работы:

- разработанные феноменологические модели и аппроксимационные зависимости позволяют количественно прогнозировать деградацию и восстановление оптических волокон и волоконно-оптических компонентов при заданных режимах непрерывного и импульсного ионизирующего излучения и температурных условиях;

- результаты могут быть использованы при планировании испытаний, оценке ресурса и обосновании требований к радиационной стойкости волоконно-оптических элементов, применяемых в бортовой аппаратуре космических аппаратов и других объектов специального назначения;

- разработка и внедрение промышленной технологии радиационно-стойких волокон, организация их серийного выпуска в ПАО «ГНППК» создают отечественную элементную базу для построения радиационно-стойких навигационных и измерительных систем;

- сформулированные в работе рекомендации по выбору параметров СВЧ, волоконных контуров, фотоприёмников и учёту изменения спектральных характеристик источников могут быть непосредственно применены при проектировании волоконно-оптических гироскопов и других ВОИД для космической и специальной техники.

## **5. Достоверность и обоснованность результатов исследований**

Достоверность полученных результатов и сделанных выводов подтверждается:

- использованием аттестованных и поверенных средств измерений и облучательных установок, соответствующих требованиям, предъявляемым к испытателям элементной базы для ракетно-космической техники;

- тщательной методологией постановки экспериментов, обеспечивающей корректное сопоставление результатов при разных типах волокон и компонентах, видах излучения, дозах и температурах;

- значительным объёмом экспериментальных данных, полученных на различных типах волокон и компонентов, и применением современных методов обработки данных;

- согласованием полученных результатов с известными литературными данными и их подтверждением промышленным выпуском радиационно-стойких волокон, успешно применяемых в реальных изделиях;

- широкой апробацией результатов на российских и международных конференциях, а также публикациями в рецензируемых журналах и патентами.

С учётом перечисленного степень обоснованности и достоверности результатов диссертации следует признать высокой.

## **6. Апробация работы и публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертационного исследования прошли публичную апробацию, результаты работы доложены на более чем 15 международных и всероссийских научных конференциях, а также полно отражены в опубликованных автором 37 научных работах, в том числе в 14 статьях в рецензируемых журналах, 2 патентах, 2 статьях в трудах конференций, индексируемых международными базами данных.

## **7. Личный вклад автора**

Из материалов диссертации и автореферата видно, что И.С. Азанова принимала непосредственное участие на всех этапах работы:

- анализировала состояние проблемы и формулировала задачи исследования;

- участвовала в разработке и подготовке экспериментов, выборе режимов облучения и измерений;

- проводила основной объём экспериментальных исследований по испытаниям волокон и компонентов при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения;

- разрабатывала модели для описания кинетики РНП; анализировала экспериментальные данные, участвовала в их математической обработке;
- разработала конструкцию и принимала участие в разработке технологических подходов к изготовлению радиационно-стойких волокон;
- являлась основным автором и соавтором публикаций по теме диссертации.

Это позволяет сделать вывод, что представленные результаты в своей основной части принадлежат лично диссертанту и в совокупности отражают самостоятельный вклад И.С. Азановой в разработку рассматриваемого направления.

## **8. Реализация и внедрение результатов**

Результаты диссертационного исследования стали составной частью проектов по созданию 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, а также внедрены в ПАО «ПНППК», что подтверждено соответствующим актом внедрения.

## **9. Соответствие диссертации паспорту специальности 1.3.8**

По своему содержанию диссертация И.С. Азановой соответствует паспорту специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния», в частности позициям, связанным с:

- экспериментальными и теоретическими исследованиями физических свойств конденсированных сред, в том числе стеклообразных материалов;
- изучением влияния внешних воздействий (включая ионизирующее излучение) на структуру и свойства конденсированных веществ;
- разработкой физических основ промышленной технологии материалов с заданными свойствами.

Несмотря на сильную прикладную и технологическую составляющую, ядро работы составляет физический анализ процессов в оптических стеклообразных средах под воздействием ионизирующего излучения и построение физически обоснованной феноменологической модели их поведения. Технологические решения логически вытекают из выполненных физических исследований, а не подменяют их.

В этом смысле диссертация является полновесной докторской работой по физике конденсированного состояния, выполненной на стыке с материаловедением и приборостроением, что полностью соответствует современной практике оценки междисциплинарных исследований.

## 10. Замечания по работе

При всех несомненных достоинствах диссертации И.С. Азановой по ее содержанию можно высказать несколько замечаний и пожеланий:

1. В работе получены подробные модели для отдельных типов волокон и режимов облучения, однако вклад технологических разбросов и вариаций партий волокон (как по составу, так и по напряжённо-деформированному состоянию) обсуждается в основном на уровне общих соображений. Для практики сертификационных испытаний было бы полезно дополнительно оценить, насколько чувствительны параметры предложенных феноменологических описаний к допустимым технологическим разбросам, и в каком объёме требуется валидация модели для конкретных производственных партий.
2. В диссертации подробно анализируется влияние температуры и деформации на радиационно-наведённое поглощение и релаксацию, однако эффект суперпозиции сложных эксплуатационных профилей (переменные по времени температура, дозовая нагрузка, механические воздействия) в основном рассматривается через набор отдельных типовых режимов. Для задач сертификации и длительной эксплуатации было бы полезно в дальнейшем развить подход к использованию феноменологической модели при нестационарных, многорежимных профилях нагружения, что позволило бы ещё ближе подойти к реалистичным сценариям работы космических и других специальных систем.
3. В диссертации детально исследованы физические механизмы деградации и восстановления оптических характеристик волокон и компонентов, однако интерпретация этих результатов в терминах функциональной работоспособности конкретных приборов (при различных требованиях к точности, дрейфу и допустимому уровню деградации сигнала) дана достаточно компактно. В дальнейшем представляется полезным более подробно показать, как выбор допустимых порогов изменений параметров со стороны конкретного прибора влияет на использование феноменологической модели.
4. Полученная феноменологическая модель, по сути, задаёт набор взаимосвязанных расчётных процедур для разных типов волокон и режимов облучения. Вместе с тем вопросы программной реализации этих процедур (в виде, например, прикладного программного комплекса или библиотек для прикладных расчётов) в диссертации не рассматриваются. Для более широкого практического внедрения результатов в деятельность проектных и испытательных организаций было бы целесообразно в дальнейшем

формализовать модель в виде программных средств, с явно описанными входными параметрами, ограничениями и областями применимости.

5. Работа содержит значительный объём материала по активным волокнам и суперлюминесцентным источникам, однако вопросы влияния радиационно-индуцированных изменений их спектральных характеристик на алгоритмы обработки сигналов и компенсации погрешностей в системах высшего уровня затронуты лишь в общем виде. Представляется перспективным направление дальнейших исследований, в рамках которых параметрические изменения источника и волокна будут увязаны с алгоритмическими методами коррекции и фильтрации на уровне бортовой обработки, что ещё более усилит прикладное значение полученных физико-феноменологических результатов.

Отмеченные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **11. Заключение по работе**

Диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» является завершённой, самостоятельной и крупной научно-квалификационной работой, в которой:

- решена важная научная и научно-техническая задача исследования физики радиационной деградации и восстановления оптических волокон и компонентов ВОИД при воздействии непрерывного и импульсного ионизирующего излучения в широком диапазоне доз и температур;

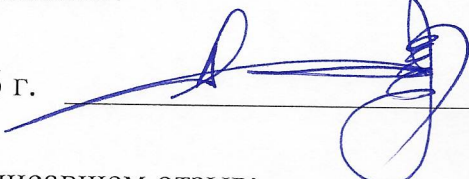
- предложена и обоснована феноменологическая модель, позволяющая численно прогнозировать деградацию и восстановление как анизотропных, так и изотропных волокон при различных видах и режимах радиационного воздействия в сочетании с температурным фактором;

- разработаны физические основы промышленной технологии радиационно-стойких волокон, внедрённой в серийное производство и обеспечивающей отечественную элементную базу для волоконно-оптических датчиков;

- полученные результаты обладают значительной практической ценностью для задач проектирования, испытаний и сертификации элементов и приборов ракетно-космической техники.

Диссертация по своему содержанию и уровню выполненных исследований соответствует паспорту специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» и требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по физико-математическим наукам.

Считаю, что диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует паспорту заявленной научной специальности и требованиям пп. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции от 16 октября 2024 г.), а ее автор, Азанова Ирина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

«29» 04 2026 г.  / П.Б.Лагов /

Информация о подписавшем отзыв:

Лагов Петр Борисович, доктор технических наук (специальность – 05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах), доцент, начальник отдела научного центра сертификации элементов и оборудования АО «Российские космические системы», 111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53,

телефон: +7 (495) 673-94-30, e-mail: contact@spacecorp.ru

Я, Лагов Петр Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«29» 04 2026 г.  / П.Б.Лагов /

Подпись П.Б. Лагова удостоверяю





Начальник отдела кадров  
И.М. Софронов