

## **ОТЗЫВ**

**на автореферат диссертации Азановой Ирины Сергеевны  
«Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов  
интерферометрических датчиков физических величин»  
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния**

### **1. Актуальность темы исследования**

Актуальность диссертационного исследования Азановой Ирины Сергеевны состоит в том, что волоконно-оптические интерферометрические датчики физических величин (ВОИД) и их компоненты все активнее применяются в различных системах мониторинга состояния объектов: в космических аппаратах, на атомных силовых установках и других специальных объектах. По условиям применения, к ВОИД выдвигаются 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, например, на монокристалле ниобата лития, а также чувствительный элемент на основе оптического волокна (ОВ) с сохранением поляризации излучения.

Для проектирования ВОИД необходимо понимание влияния на радиационно-оптическую стойкость (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 радиационной стойкостью, а также радиационно-стойкого одномодового ОВ с сохранением поляризации излучения.

**Цель работы:** установление основных физических закономерностей влияния ИИ и технологии изготовления волоконно-оптических компонентов на оптические свойства компонентов ВОИД в процессе облучения и после облучения, разработка экспериментальных методов изучения влияния ИИ на РОС волоконно-оптических компонентов ВОИД, а также создание физических основ промышленной технологии радиационно-стойких компонентов для них.

## 2. Научная новизна исследований

Научная новизна работы заключается:

- впервые с помощью единой методологии в сопоставимых условиях для гамма-, фотонного (тормозного) 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;
- для ОВ с кварцевой сердцевиной чувствительность радиационно-наведенных потерь (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;
- 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;
- РОС волоконного контура ВОГ определяется уровнем внутренних упругих напряжений в сердцевине ОВ;
- 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;

- 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 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.

### **3. Практическая значимость работы**

Практическая значимость исследований состоит:

- в обосновании подхода к исследованию РОС компонентов ВОИД, позволяющего минимизировать влияние погрешности определения уровня воздействия и обеспечить достоверность определения общей РОС ВОИД;
- в полученных данных по РНП оптических компонентов ВОГ при воздействии ИИ, которые 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;
- в заложенных основах промышленной технологии изготовления радиационно-стойких гироскопических ОВ с нелегированной кварцевой сердцевиной с сохранением поляризации излучения с высоким значением двулучепреломления (до  $7,3 \cdot 10^{-4}$ ). Технология реализована в ПАО «ЛНППК», налажен серийный выпуск ОВ;
- 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.

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

Достоверность результатов исследования обеспечена 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.

На основе полученных результатов построена технологическая цепочка по выпуску радиационно-стойких оптических компонентов, подтверждённая стабильным коммерческим выпуском.

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

Результаты исследований достаточно полно отражены в 14 научных публикациях, входящих в базы данных Scopus, WebofScience и рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК, 21 докладе в сборниках трудов конференций, подтверждены 1 патентом на полезную модель и 1 патентом на изобретение.

#### **6. Реализация и внедрение результатов**

В итоге работы создана промышленная технология серийного производства радиационно-стойкого одномодового ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла с сохранением поляризации излучения, обеспечивающая высокие как начальные характеристики (уровень коэффициента затухания на  $\lambda=1550$  нм до 0,8 дБ/км и величину двулучепреломления до  $7,3 \cdot 10^{-4}$ ), так и показатели РОС при воздействии ИИ. Разработанное ОВ имеет улучшенные характеристики, как по начальным параметрам, так и по РОС, по сравнению с аналогами: ОВ с чистой кварцевой сердцевиной и с сердцевиной, легированной азотом или фтором других производителей. Запущено серийное производство.

## 7. Замечания по работе

Тем не менее, автореферат не лишён некоторых недостатков:

- на рисунке 2 а) (кривые 3, 4), рисунке 5 (кривые 3-6)), 7 а), 8 (кривые 1, 2, 4), на которых отображена информация о кинетике РНП в волокнах после импульсного воздействия ИИ, представленные кривые носят немонотонный характер и имеют максимумы. Автор выдвигает предположение что «поскольку энергия образования РЦО довольно мала по сравнению с энергией воздействующего гамма-кванта, то требуется время для уменьшения этой энергии за счёт процессов образования вторичных и последующих гамма-квантов, имеющих меньшую энергию, а также радиационного рассеивания энергии. Поскольку наряду с релаксацией РЦО идёт процесс образования новых центров, то зависимость РНП имеет немонотонный характер и на ней заметны точки перегиба». Действительно, подобная реакция волокна на радиационное воздействие не является характерной и заслуживает внимания. Автор первоначальный упор делает на временные процессы, связанные с рассеянием гамма-квантов, однако, ввиду того, что отмеченные и последующие процессы термализации вторичных электронов происходят за времена менее  $10^{-12}$  с, что на несколько порядков меньше, чем регистрируемые в эксперименте, соответственно наблюдаемый эффект определяется другими процессами. Захват неравновесных носителей, образованных вследствие воздействия ИИ, на ловушки, перераспределение носителей между различными центрами захвата с образованием РЦО, может себя проявлять в виде роста РНП после окончания импульса воздействия, что справедливо отмечено автором. Для детального исследования данного эффекта необходима вариация длины волны зондирующего источника, вероятно, в тексте диссертации данный вопрос рассмотрен в достаточном объеме;
- обнаруженная реакция образцов СИОМ на воздействие импульса гамма-нейтронного излучения (рисунок 15 б)) объясняется резкой перестройкой кристаллической структуры волноводного слоя. При флюенсах нейтронов спектра деления в экспериментах  $\sim 10^{13}$  н/см<sup>2</sup> количество смещённых в результате упругих взаимодействий атомов будет составлять  $\sim 10^{15}$  шт./см<sup>3</sup>, при таких концентрациях структурных дефектов перестройка кристаллической структуры маловероятна.

Возможно, наблюдаемая отложенная реакция СИОМ связана с ядерными реакциями тепловых нейтронов на атомах Li;

- в тексте автореферата присутствует ряд орфографических ошибок и неточностей, например: стр.4 в положении №3 пропущена буква в слове «деформацией»; стр.5 в первой строке ошибка в слове «гамма-нейтронного»; стр.5 в положении №2 не нужен предлог «в» перед словосочетанием «короткоживущих РЦО»; стр.18 в обозначении кривых на рисунке 4 не понятно какой номер относится к какой кривой; стр.22 в названии рисунка 11 ошибка в слове «закрашены»; стр. 25 в названии рисунка 13 указана единица измерения мощности дозы «Гр» вместо «Гр/с»; по тексту автореферата поглощённая доза приводится то в единицах «Гр», то «рад», необходимо единообразие.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности работы, о которых в полной мере свидетельствует представленный на отзыв автореферат.

## **8. Заключение по работе**

Автором разработана методология и выполнен комплекс исследований радиационной стойкости оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа. На основе полученных результатов обоснованы аналитические зависимости, описывающие влияние температуры, дозы ИИ, уровня напряжённо-деформированного состояния стекла сердцевины волокна на процессы релаксации характеристик оптического волокна после воздействия ИИ, выявлены особенности и условия образования новых РЦО, выявлены наиболее критические с точки зрения радиационной стойкости оптические компоненты, разработаны физические основы для промышленной технологии изготовления радиационно-стойких оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин. Результаты работы внедрены в производство на ПАО «ПНППК».

Считаю, что диссертационная работа Азановой Ирины Сергеевны «Радиационная стойкость волоконно-оптических компонентов интерферометрических датчиков физических величин» является завершённой 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».

«30» Сентября 2026г.

Александр Павленко

Информация о подписавшем отзыв:

Павленко Александр Валериевич, доктор физико-математических наук (специальность 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики), доцент

Должность: начальник отделения экспериментальной физики

Организация: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Адрес: ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская область, 456770

Тел. 8(35146)51100

e-mail: dep5@vniitf.ru

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

Подпись Павленко АВ заверяю:



учёный секретарь НТС института,

кандидат физико-математических наук

В.Н. Ногин