

Радиационная стойкость оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа

Азанова И. С.^{1,2*}, Шаронова Ю. О.², Шевцова А. Д.², Поспелова Е. А.²,
Вахрушев А. С.², Вохмянина О. Л.², Волынцев А. Б.¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

*azanova@pnppk.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования специализированных волоконно-оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), разработанного ПАО ПНППК, на стойкость к непрерывному и импульсному ионизирующему излучению (ИИ). В случае воздействия непрерывного ИИ работоспособность ВОГ определяется радиационно-наведенными оптическими потерями (РНП) оптических компонентов: оптического волокна (ОВ) с сохранением поляризации излучения типа «Панда» гироскопического волоконного контура и активного ОВ, входящего в состав суперлюминисцентного волоконного источника излучения (СВИ), а также стабильностью средневзвешенной длины волны СВИ. Изменение средневзвешенной длины волны целесообразно компенсировать как систематическую погрешность. В случае воздействия импульсного ИИ время восстановления работоспособности ВОГ определяется в первую очередь временем релаксации РНП ОВ типа «Панда».

Ключевые слова: радиационная стойкость; оптическое волокно; волоконно-оптический гироскоп

Поступила в редакцию 31.10.2022; после рецензии 19.12.2022; принята к опубликованию 19.12.2022

Radiation-resistant optic components of a fiber-optic gyroscope

Azanova I. S.^{1,2*}, Sharonova Yu. O.², Shevtsova A. D.², Pospelova E. A.²,
Vakhrushev A. S.², Vokhmyanina O. L.², Volyntsev A. B.¹

¹ Perm State University, Perm, Russia

² Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia

*azanova@pnppk.ru

The paper presents the results of an experimental study of specialized fiber-optic components of a fiber-optic gyroscope (FOG) developed and manufactured by PJSC PNPPK. The study aimed to test their resistance to continuous and pulse ionizing radiation (IR). When exposed to continuous IR, the FOG performance is determined by radiation-induced optical attenuation (RIA) of both the Panda-type polarization maintaining optical fiber (OF) of the gyroscope fiber circuit and the active OF, which is part of the superluminescent fiber radiation source (SFS), as well as by the average wavelength stability of the SFS. It is advisable to compensate a change in the average wavelength as a systematic error. In the case of pulse IR, the recovery time of the FOG is determined primarily by the relaxation time of the RIA of the Panda OF.

Keywords: radiation resistance; optical fiber; fiber-optic gyroscope

Received 31 October 2022; revised 19 December 2022; accepted 19 December 2022

doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-05-20

1. Введение

Анализ существующих тенденций развития специальной техники показывает, что в настоящее время для топопривязки и автономной навигации современные системы управления все чаще используют бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) с применением кольцевых лазерных или волоконно-оптических гироскопов (ВОГ).

БИНС на базе ВОГ характеризуется широким диапазоном измеряемых параметров, высокой точностью измерений, надёжностью и большим ресурсом работы. Отсутствие в ВОГ электромеханических компонентов позволяет проводить высокоточные измерения параметров углового перемещения в сложных динамических режимах движения. Развитие вычислительной техники даёт возможность реализовать высокие требования к алгоритмам бесплатформенной системы, проводить компенсацию инструментальных погрешностей датчиков, вводить диагностические и сервисные функции.

Для ряда гражданских и специальных применений к БИНС выдвигаются требования стойкости к непрерывному и импульсному ионизирующему излучению (ИИ). Требования значительно варьируются качественно и количественно по видам ИИ, мощности дозы и дозе в зависимости от планируемых применений.

Обеспечение характеристик БИНС в режиме автономной инерциальной навигации в основном осуществляется за счет устойчивого к внешним воздействующим факторам инерциального измерительного модуля (ИИМ).

В качестве датчиков угловых скоростей в ИИМ используются волоконно-оптические гироскопы, принцип действия которых основан на измерении разности фаз двух встречных оптических волн инфракрасного диапазона, распространяющихся в кольцевом волоконно-оптическом интерферометре. Разность фаз двух встречных волн возникает при вращении волоконного контура (катушки) ВОГ вследствие эффекта Саньяка [1]. Структурная схема ВОГ в составе ИИМ показана на рис. 1.

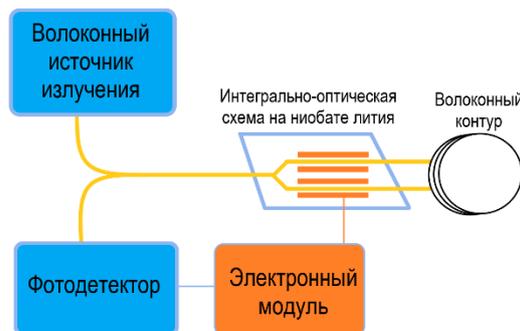


Рис. 1. Структурная схема ВОГ

В состав ВОГ входят: волоконный источник излучения – суперлюминесцентный волоконный источник (СВИ), элемент чувствительный, содержащий многофункциональную интегрально-оптическую схему (СИОМ), волоконно-оптический контур, изготовленный из оптического волокна (ОВ), сохраняющего поляризацию излучения и электронный модуль управления и обработки сигналов.

Выходные параметры СВИ оказывают непосредственное влияние на показания ВОГ. Измеренное значение разности фаз Саньяка связано с углом поворота через масштабный коэффициент, который обратно пропорционален средневзвешенной длине волны источника (1):

$$MK = \frac{\Delta\varphi_c}{\Omega} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\lambda_c \cdot c}, \quad (1)$$

где λ_c – средневзвешенная длина волны света, Ω – угловая скорость вращения, L – длина волокна в оптическом контуре, c – скорость света. Средневзвешенная длина волны λ_c определялась по формуле (2):

$$\lambda_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (2)$$

где n – количество интервалов длин волн, на которое разделен измеряемый спектр, P_i – мощность, приходящаяся на длину волны λ_i .

Поэтому при воздействии внешних воздействующих факторов, в том числе ИИ, особое внимание уделяется изменениям выходных параметров СВИ: средневзвешенной длины волны и мощности оптического излучения.

СИОМ представляет собой электрооптическую микросхему на синтетическом сегнетоэлектрическом монокристалле ниобата лития и содержит поляризующие протонообменные каналные волноводы, Y-образный разветвитель излучения и модуляторы фазы излучения (рис. 1). Наряду с оптическими потерями одной из важнейших характеристик СИОМ является коэффициент сохранения поляризации излучения (СПИ) (3):

$$СПИ = \log \frac{P_{гл}}{P_{негл}}, \quad (3)$$

где $P_{гл}$ – оптическая мощность в главной оптической оси, $P_{негл}$ – оптическая мощность в неглавной оптической оси.

В качестве волокна, сохраняющего поляризацию распространяющегося излучения, является ОВ типа «Панда». Сечение данного типа волокна представлено на рис. 2.

В настоящий момент на рынке представлены радиационно-стойкие модели оптических компонентов (рад. стойкие активные ОВ и с сохранением поляризации), входящих в состав ВОГ, от зарубежных производителей. Однако однозначных данных по их стойкости для различных видов и уровней

воздействия ИИ нет. Поэтому для разработчика ВОГ актуален вопрос этих исследований.

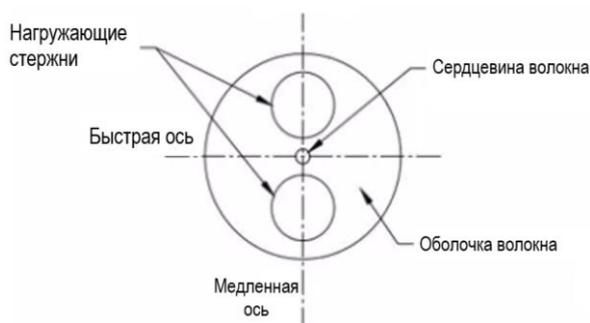


Рис. 2. Поперечное сечение ОВ типа «Панда»

Воздействие ИИ на кварцевое стекло оптических волокон и на кристаллы ниобата лития СИОМ вызывает появление точечных дефектов – центров окраски, вызывающих поглощение проходящего света, что приводит к радиационно-наведенному увеличению коэффициента затухания, т.е. радиационно-наведенным оптическим потерям (РНП) [2,3] в оптическом волокне и протонообменных волноводах СИОМ. Зависимость радиационно-наведенных оптических потерь от времени t (РНП) рассчитывается по формуле

$$\text{РНП}(t) = \frac{10 \cdot \log \frac{P_0}{P_1}}{L}, \quad (4)$$

где P_0 – начальный сигнал до воздействия, P_1 – текущий сигнал для времени t , L – длина образца в километрах.

Для ВОГ наличие РНП в оптическом тракте означает ухудшение соотношения сигнал-шум, обуславливая при этом является увеличение случайной составляющей выходного сигнала ВОГ, обратно пропорциональной квадратному корню из оптической мощности [1]. Также ИИ индуцирует нестабильность спектра оптического излучения источника, которая влияет на масштабный коэффициент ВОГ [1], что приводит к увеличению погрешности показаний ВОГ. А при превышении РНП критического значения происходит потеря работоспособности. Если не предпринимать специальных мер по выбору электронных, оптических компонентов и алгоритмов обработки сигнала ВОГ, то уровень РНП около 7 дБ в оптическом тракте можно считать критическим для работоспособности ВОГ.

Имеются единичные отечественные и зарубежные разработки БИНС на базе ВОГ для космических применений [4, 5], но нет четкого понимания того, какие факторы определяют работу такого ВОГ. Например, в работе [6] был экспериментально замечен эффект фотообесцвечивания оптического волокна в ходе эксплуатации БИНС в космосе, что позволило продлить срок эксплуатации прибора. При этом авторы не приводят данных, как

этот эффект распределялся между активным волокном источника излучения и пассивным волокном волоконного контура, поскольку вывод был сделан по косвенным данным значений тока лазерного диода. Литературные данные относительно сравнения стойкости оптических компонентов ВОГ к воздействию как непрерывного, так и импульсного ИИ в литературе практически отсутствуют, поскольку в исследованиях обычно рассматривается какой-либо один вид излучения.

В ПАО ПНППК было разработано и освоено серийное производство радиационно-стойких оптических компонентов ВОГ: одномодового сохраняющего поляризацию излучения ОВ типа «Панда», одномодового активного эрбиевого ОВ, а также СИОМ.

Цель данной работы – исследование стойкости оптических компонентов ВОГ разработки и производства ПАО ПНППК к воздействию непрерывного и импульсного ИИ, а также выявление компонентов ВОГ, чья стойкость является определяющей для случаев воздействия непрерывного и импульсного ИИ.

2. Постановка эксперимента

Для исследования влияния стойкости отдельных компонентов оптической схемы на критически важные характеристики ВОГ, такие как РНП, средневзвешенная длина волны, коэффициент деления, СПИ, необходимо исследовать изменение характеристик каждого из них при одинаковых условиях облучения. Это требование вызвано сильным влиянием условий опыта на результирующее изменение характеристик. Согласно [7] разброс накопленной дозы излучения в различных опытах может составлять до 20%. Поскольку зависимость изменения характеристики от величины накопленной дозы почти всегда нелинейная [3,8] итоговую погрешность сложно спрогнозировать. Наилучшим выходом из этой ситуации является облучение сравниваемых образцов в одном опыте.

Исследования проводились в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва) на моделирующей установке непрерывного ИИ (ГУТ-200М на основе изотопа ^{60}Co). Для исследования влияния импульсного ИИ были использованы моделирующие установки РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров): линейный индукционный ускоритель ЛИУ-30 и импульсный реактор нейтронов БР1М. Тормозное импульсное излучение линейного индукционного ускорителя в литературе еще называют фотонным [9], отличая его от истинного гамма-излучения, получаемого от изотопных источников или на реакторе. Характеристики воздействий ИИ приведены в табл. 1.

Согласно руководящим документам, таким как соответствующие ГОСТ и базовые методики, опыты должны проводиться как при нормальных климатических условиях, так и при наиболее критических температурах из рабочего температур-

Таблица 1. Характеристики воздействий ионизирующего излучения

Моделирующая установка	Основные характеристики установки	Мощность дозы	Доза / поток нейтронов
Линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУЗ0	Энергия электронов до 40 МэВ, время импульса ~20 нс	$3 \cdot 10^{10} - 22.5 \cdot 10^{12}$ Р/с	0.6 – 45 крад 10^3 крад
Импульсный реактор нейтронов БР1М	Время импульса 65 мкс, 150 с	-	$100 - 1.2 \cdot 10^3$ крад $3 \cdot 10^{10}$ н/см ² – $5 \cdot 10^{13}$ н/см ²
ГУТ-200М (на основе изотопа ⁶⁰ Со)	Средняя энергия гамма-квантов 1.25 МэВ	1 – 500 рад/с	До $1.5 \cdot 10^6$ крад

Таблица 2. Образцы и контролируемые параметры

Название образца	Описание	Контролируемый параметр
ОВ «Панда»	Сохраняющее поляризацию ОВ типа «панда» с сердцевинной нелегированного кварцевого стекла	Мощность проходящего оптического излучения (по изменению мощности вычислялось РНП)
ВК	Гироскопический волоконный контур из ОВ «Панда» длиной 1000 м	
Активное ОВ	Активное волокно, сердцевина легирована ионами эрбия, алюминия и церия в схеме СВИ, под воздействие ставилось только активное ОВ с свободной намотке диаметром 70 мм	Спектр излучения выходной мощности СВИ, РНП
СИОМ	Многофункциональная интегрально-оптическая схема на монокристалле ниобата лития с протонообменными канальными волноводами	РНП, коэффициент деления, коэффициент поляризационной экстинкции (СПИ)

ного диапазона прибора. Типичным рабочим диапазоном для ВОГ является от -60 °С до $+60$ °С. При этом скорость распада радиационно-наведенных центров окраски (РЦО) замедлена при отрицательных температурах [10].

Исследование проведено на следующих группах образцов разработки и производства ПАО ПНППК: СИОМ, активное волокно в схеме усилителя спонтанной эмиссии (СВИ), анизотропное одномодовое ОВ типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевинной в виде свободной намотки или гироскопического волоконного контура. Группы образцов и контролируемые параметры приведены в табл. 2. В каждой группе исследовалось не менее двух образцов при одних и тех же условиях опыта, суммарно – более пятидесяти образцов. Повторные облучения образцов проводились с целью определения изменений реакции образцов на повторные облучения. При этом результаты этих опытов не принимались в расчет при анализе данных для первого облучения, поскольку результаты предыдущего облучения могут влиять на реакцию образца при повторном облучении.

Исследуемые образцы устанавливались на определенном расстоянии от установки гамма-излучения, выходного фланца ускорителя или активной зоны реактора. Расстояние выбиралось из известного в каждом случае распределения

мощности дозы в зависимости от конкретного положения от источника ИИ с учетом равномерного распределения мощности дозы для области, в которой располагались образцы. Толщина образцов не превышала 30 мм. Для исключения «затенения» образцы располагались рядом. Исключение делалось только для образцов свободных намоток ОВ, поскольку их логичнее объединять в сборки вследствие малой толщины одного образца. Таким образом, для этих образцов создавались максимально одинаковые условия облучения. Предварительно в выбранных областях для установки образцов по методикам испытательных центров проводилась калибровка для уточнения мощности дозы и времени облучения (для непрерывного ИИ) и дозы в импульсе (для импульсного ИИ). Дозиметрия во всех опытах, кроме облучения потоком нейтронов, проводилась с помощью термолуминесцентной методики дозиметрии, которая позволяла сразу получать значения поглощенной дозы в кварцевом стекле. Дозиметры представляют из себя сборку из двух стекол в виде таблетки диаметром примерно 10 мм и толщиной примерно 4 мм. Точность определения поглощенной дозы ± 10 %. [7].

Во время опыта на образцах с фронтальной и тыльной сторон закреплялись пронумерованные ИКС. После опыта ИКС промерялись на спектрофотометре по методикам испытательного центра. На образцах ОВ и ВК ИКС закреплялись в четырех

Таблица 3. Условия измерения контролируемых параметров

Контролируемый параметр	Условия измерения	Образец
Мощность проходящего оптического излучения, начальное значение 5 мВт, 1.1 мкВт (схема 1)	Источник света – СВИ с рабочей длиной волны 1550 нм. Мощность излучения контролировалась измерителем мощности EXFO в случае непрерывного ИИ и фотодетектором и осциллографом с частотой не менее 1 МГц для случая импульсного ИИ	ОВ «Панда» SiO ₂ , активное волокно, изотропное ОВ SiO ₂ , СИОМ
Спектр излучения (схема 2)	Спектроанализатор NIRQuest-512 компании Ocean Optics в спектральном диапазоне от 1500 нм до 1600 нм с разрешением 1.55 нм и периодом записи 15 мс.	Активное волокно

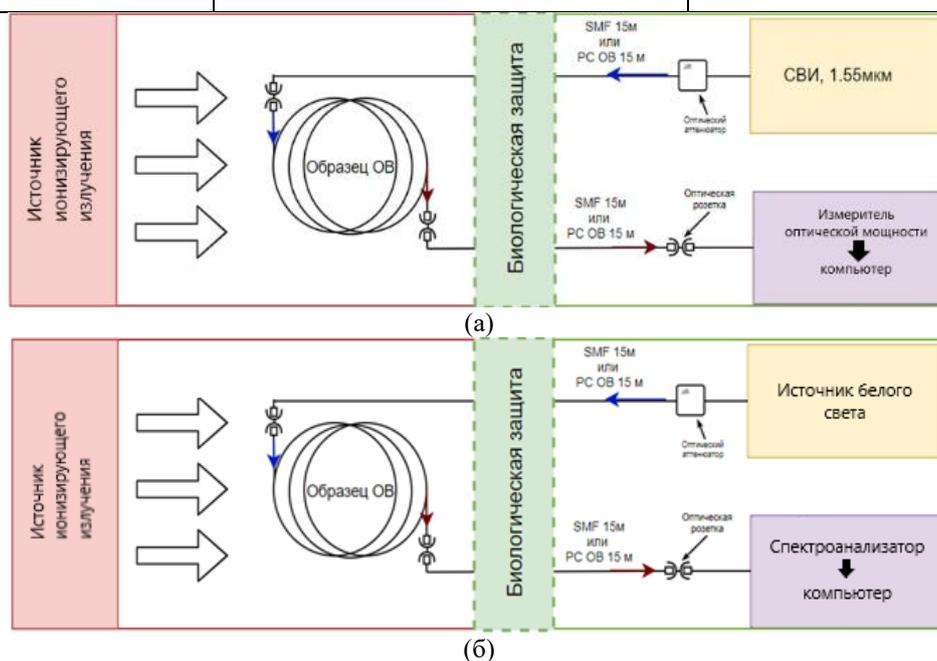


Рис. 3. Схемы испытаний: а – схема 1; б – схема 2

равноудаленных точках (всего 8 шт), на образцах СИОМ – по одному ИКС с фронтальной и тыльной сторон. Данные по всем точкам для одного образца усреднялись по методикам испытательного центра. Разница данных ИКС с фронтальной и тыльной поверхностей образцов находилась в пределах погрешности определения накопленной дозы. Это связано с высокой проникающей способностью ИИ выбранных диапазонов доз в импульсе (для случая импульсного ИИ) и мощности дозы (для случая непрерывного ИИ). Такой подход позволил получить в опыте требуемую экспозиционную дозу с требуемой мощностью дозы.

Исследования РНП волокна согласно ГОСТ Р МЭК 793-1-93 должны проводиться при уровне мощности оптического сигнала в волокне менее 1 мкВт во избежание фотообесцвечивания.

При этом необходимо прогнозировать изменение оптических характеристик ОВ в реальных условиях эксплуатации, когда уровень мощности оптического сигнала достигает 10 мВт. Поэтому

исследования образцов волокна длиной от 100 до 1000 м в виде свободной намотки диаметром от 100 мм до 150 мм проводились в двух режимах (схема 1 и 2, табл. 3, рис. 3).

В исследованиях стойкости образцов волокна к импульсному излучению использовалась только схема 1. Запись на осциллографе включалась с небольшим опережением по сигналу системы синхронизации с импульсом моделирующей установки.

3. Результаты исследования для случая непрерывного ионизирующего излучения

3.1. Результаты исследований СИОМ

Литературные данные свидетельствуют о высокой радиационной стойкости как ниобата лития, так и протонообменных канальных волноводов в области длин волн 1550 нм при медленном наборе

дозы до 1 Мрад для γ -излучения [11]. При этом ввиду отсутствия данных возникла задача проверки свойства сохранения поляризации излучения для протонообменных волноводов при воздействии ИИ.

На рис. 4 приведены результаты исследований СИОМ на воздействие непрерывного гамма-излучения. На рис. 4, а представлена зависимость РНП (левая шкала) и коэффициента деления (правая шкала) от времени облучения. Во время воздействия непрерывного ИИ (доза 100 крад, мощность дозы от 40 Р/с до 110 Р/с) зафиксировано незначительное снижение выходной мощности излучения в каналах образцов СИОМ (РНП до 0.06 дБ). После облучения выходная мощность восстанавливается до начальных значений, изменение коэффициента деления оптической мощности не было зафиксировано.

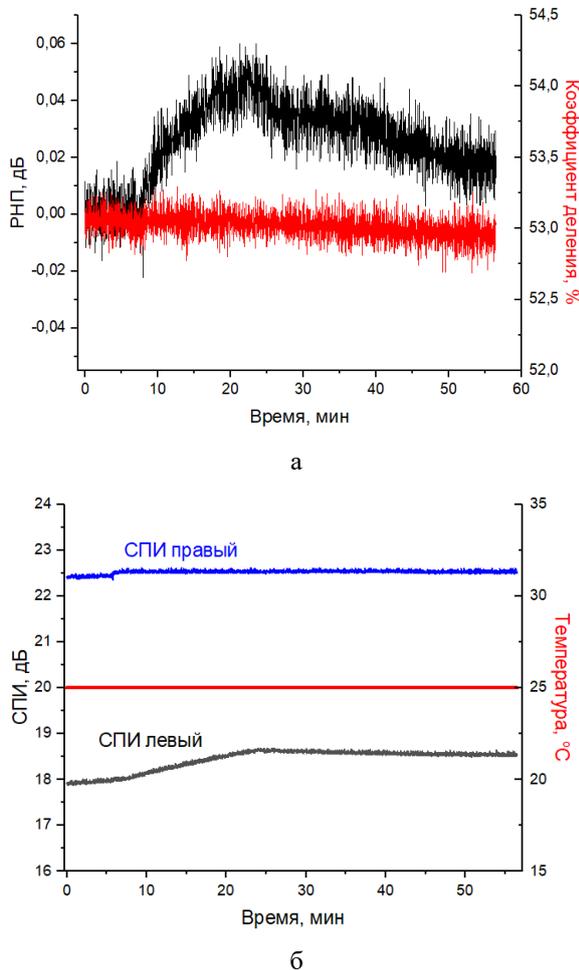


Рис. 4. Зависимость от времени: а – оптических потерь и коэффициента деления от времени (до, во время и после облучения); б – коэффициента сохранения поляризации излучения для образца СИОМ. Облучение с 10 мин по 25 мин; доза облучения 100 крад; мощность дозы 110 рад/с; температура 25 °С

При этом удалось зафиксировать интересный результат. Во время облучения на каждом из образцов увеличивался коэффициент сохранения поляризации (рис. 4, б). Поскольку это происходило синхронно с падением оптической мощности, можно сделать предположение о том, что имеет место эффект фотообесцвечивания. Тогда получается, что в неглавной оптической оси (рис. 2), в которой практически нет оптического излучения, РНП намного больше, чем в главной оптической оси, по которой проходит основная часть оптического излучения. В данном случае считаем главной ту оптическую ось, по которой распространяется оптическое излучение, и неглавной – противоположную. Каждая из осей может быть как медленной, так и быстрой. Такой эффект замечен впервые.

3.2. Результаты исследования активного волокна в схеме СВИ

В ВОГ навигационного класса точности предпочтительно использование СВИ на базе кварцевых оптических волокон с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами эрбия с рабочей длиной волны 1550 нм. Достоинством таких СВИ является соответствие жестким требованиям, предъявляемым к ним со стороны навигационной системы. Эрбиевые СВИ позволяют генерировать практически деполаризованное выходное оптическое излучение достаточно высокой мощности (до 35 мВт) с малой длиной временной когерентности (примерно 3 мм), широким непрерывным и стабильным во времени спектром излучения (до 7,5 нм в зависимости от конфигурации схемы СВИ), не имеющим линейчатой структуры спектральной плотности мощности [12].

По данным литературы [13–20] известно, что активное волокно – наиболее чувствительный к ИИ элемент СВИ, вносящий вклад в радиационно-наведенные оптические потери при воздействии гамма-излучения [14, 15].

Уровень РНП в волокнах, легированных ионами редкоземельных элементов, значительно выше в сравнении с РНП в пассивных волокнах. Высокая чувствительность активных волокон к облучению связана с легирующими добавками – фосфором и алюминием, которые необходимы для предотвращения образования кластеров ионов, снижающих эффективность преобразования излучения накачки в выходное излучение [13]. Таким образом, при воздействии ИИ, из-за увеличения поглощения на длинах волн накачки и генерации, в СВИ наблюдается уменьшение выходной мощности сигнала.

Конфигурация СВИ также оказывает сильное влияние на РНП и стабильность средневзвешенной длины волны [21], поскольку на разные области спектра излучения СВИ в разной степени оказывает негативное влияние воздействие ИИ.

В данной работе исследовалась однопроходная схема СВИ с встречной накачкой (рис. 5). Лазерный

диод был подключен к драйверу лазерного диода ThorLabs CLD1015. Выходная мощность лазерного излучения стабилизировалось по току накачки лазерного диода.

В СВИ, созданном для обеспечения стойкости к воздействию ИИ, применили активные оптические волокна, разработанные НЦВО РАН и ИХВВ РАН по заказу и совместно с ПАО «ПНППК», при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) Пермского края, в рамках проекта РФФИ № 14-42-08025. Активированная ионами эрбия кварцевая сердцевина оптических волокон дополнительно легирована ионами алюминия и церия. Церий обеспечивает стойкость к воздействию гамма-излучения, в то время как алюминий необходим для получения большой ширины спектра излучения СВИ. Оптические волокна являлись одномодовыми на длине волны накачки ~980 нм. Поглощение на длине волны 1530 нм составляло ~20 дБ/м.

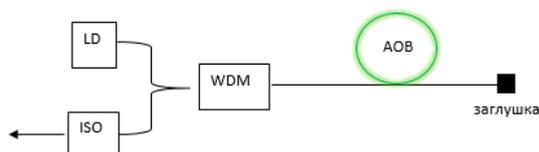


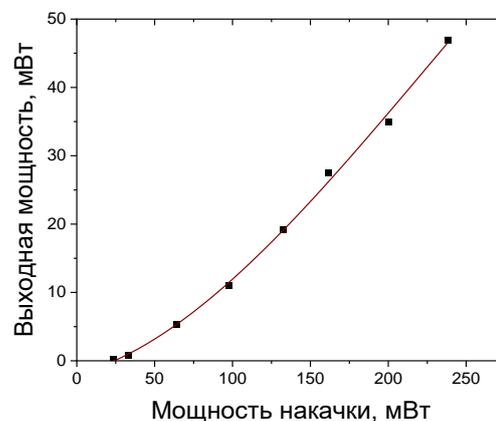
Рис. 5. Принципиальная схема однопроходного СВИ с встречной накачкой: LD – лазерный диод накачки с длиной волны излучения 980 нм, WDM – спектрально-селективный ответвитель, ISO – оптический изолятор на 1550 нм, АОВ – активное оптическое волокно, заглушка – бессердцевинное оптическое волокно

Одним из параметров СВИ является дифференциальная эффективность – отношение выходной оптической мощности к поглощенной мощности накачки. Результаты измерения данного параметра СВИ показали, что легирование сердцевинки ионами церия, требуемое для повышения стойкости эрбиевых оптических волокон к ИИ, привело к снижению дифференциальной эффективности СВИ на 25 - 30 % в сравнении с традиционными алюмосиликатными ОВ, легированными ионами эрбия. Ширина спектра излучения на полувысоте СВИ составила порядка 6 нм при выходной мощности 35 мВт (рис. 6, а, б), тогда как известно, что ширина спектра источника для ВОГ должна составлять не менее 5 нм [13].

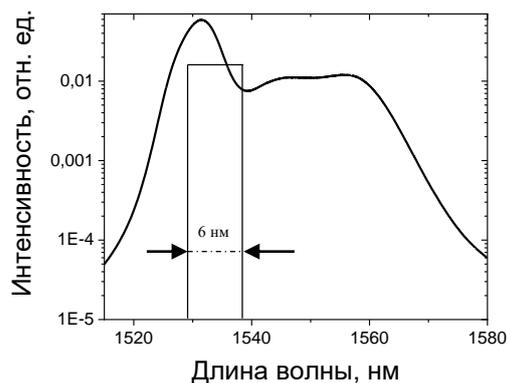
При этом параметры полученных СВИ оказались близки результатам работы [14], где сообщается о параметрах СВИ с радиационно-стойким волокном, легированным эрбием компании iXfiber – мирового лидера по производству оптических волокон. За счет использования двухпроходной схемы в iXfiber получили высокую дифференциальную эффективность порядка 32–35 % при ширине спектра излучения на полувысоте порядка

6 нм, при этом максимальная выходная мощность СВИ составляла 40 мВт.

Таким образом, параметры СВИ с радиационно-стойким эрбиевым волокном, использованным в настоящей работе, соответствуют требованиям к источникам излучения для ВОГ и не уступают разработкам мировых лидеров.



а



б

Рис. 6. Выходные параметры СВИ: а – зависимость выходной мощности от мощности накачки на 980 нм; б – спектр излучения при выходной мощности СВИ 35 мВт

При проведении опытов по воздействию ИИ обратная связь, стабилизирующая мощность выходного излучения в СВИ, была отключена, чтобы получить корректные данные по деградации активного ОВ. Под воздействием находился только контур активного ОВ, все остальные компоненты были в измерительном зале. Такая схема может вносить определенные искажения в результаты, поскольку существенную роль начинает играть длинное транспортное ОВ, по которому в одну сторону поступает оптическое излучение накачки на 980 нм, а в обратную – выходное излучение на 1550 нм. Хотя транспортное ОВ было выполнено в радиационно-стойком варианте, с нелегированной кварцевой сердцевинкой, РНП в таком ОВ на длине волны 980 нм уже заметны и могут исказить кар-

тину в пределах до 10 %, поскольку из-за них в активное волокно излучения накачки попадает меньше, а значит, и выходная оптическая мощность также уменьшается. В результате опытов были получены данные по уменьшению выходной оптической мощности активного волокна в схеме СВИ при пассивном (диод накачки включался на секунды во время измерения) и активном (диод накачки был включен во время опыта) облучении (рис. 7), а также изменению средневзвешенной длины волны (рис. 8).

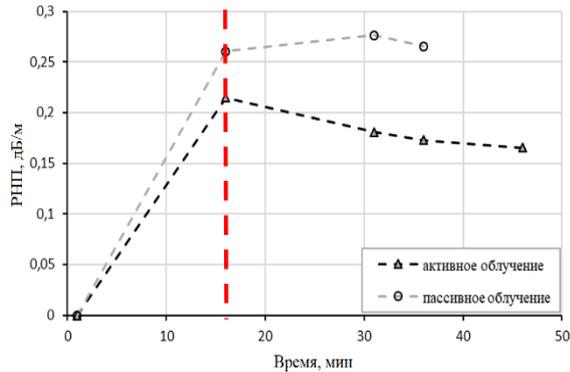


Рис. 7. Сравнение РНП в активном и пассивном режимах облучения

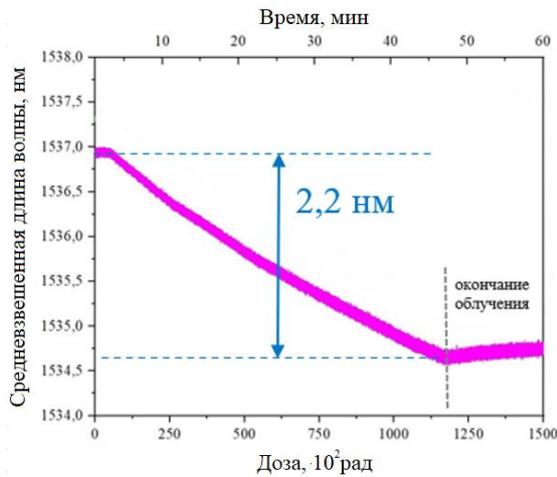


Рис. 8. Изменение выходной оптической мощности при активном и пассивном облучении и средневзвешенной длины волны однопроходного СВИ с встречной накачкой, доза в опыте 1200 крад

В СВИ при активном облучении при дозе 120 крад РНП составили 2.3 дБ, при пассивном облучении РНП – 2.8 дБ. При этом разница удельных РНП на длине волны 1550 нм активного ОВ между активным и пассивным облучением составила 0.05 дБ/м, что позволяет оценить вклад от эффекта фотообесцвечивания. Результаты по фотообесцвечиванию сопоставимы с данными в работах [19, 22–24].

В пересчете РНП активного ОВ на удельную дозу получено значение 0.002 дБ/м/крад, что является очень неплохим результатом, поскольку у коммерчески доступного аналога IXF-RAD-AMP-2 (iXFiber, Франция) в спецификации указаны данные по РНП 0.07 дБ/м/крад. Правда, стоит заметить, что условия проведения опытов не приводятся.

Изменение средневзвешенной длины волны СВИ на 2.2 нм (рис. 8) вызовет недопустимое изменение масштабного коэффициента. При этом изменение средневзвешенной длины волны имеет характер систематической погрешности, поскольку изменение квазилинейно и поддается функциональному описанию. Поэтому введение поправочных коэффициентов в значение масштабного коэффициента, связанных с уровнем выходной мощности излучения СВИ (поскольку детектировать спектр излучения в СВИ напрямую нет возможности), может значительно улучшить ситуацию.

3.3. Результаты исследования ОВ типа «Панда»

Для космических применений требуется работоспособность при очень малой мощности дозы (примерно 10⁻⁵ рад/с), при этом испытания проводятся, как правило, при значительно большей мощности дозы – примерно 100 рад/с для сокращения времени испытаний. Для прогнозирования РНП в конце космических миссий (срока службы 10–15 лет [25–27]) разработана методика экстраполяции РНП на большие времена облучения, представляющая собой модель кинетики реакций *n*-го порядка [26, 28, 29].

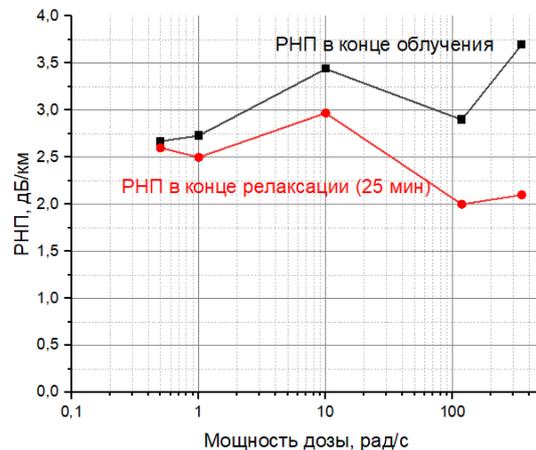


Рис. 9. График зависимости РНП анизотропного ОВ типа «Панда» с SiO₂ сердцевиной от мощности дозы в конце облучения и через 25 мин релаксации при комнатной температуре. Вводимое оптическое излучение 2 мВт, доза 120 крад

Тем не менее для некоторых применений существует необходимость знать РНП в реальных условиях облучения при средних мощностях доз. Для

анизотропного ОВ типа «Панда» с SiO₂ сердцевинной были получены результаты для РНП при мощности дозы от 0.5 рад/с до 350 рад/с (рис. 9). Облучались соседние участки вытяжки волокна для исключения влияния технологических погрешностей самого волокна. Ввиду конструкции анизотропного ОВ, наличия в сердцевине растягивающих и сжимающих напряжений, РНП заметно выше, чем для изотропных ОВ, имеющих такую же матрицу стекла. Ожидается, что РНП увеличиваются с увеличением мощности дозы, но при этом следует отметить, что, начиная с мощности дозы 10 рад/с, корреляция не наблюдается. Возможно, это связано с разной динамикой роста РНП у разных РЦО в зависимости от мощности дозы. При этом заметно замедление релаксации с уменьшением мощности дозы, при мощности дозы 0.5 рад/с релаксация наиболее затруднена. Если принять в качестве консервативной оценки, что с уменьшением мощности дозы РНП не будет уменьшаться, то результат 2.6 дБ/км в конце срока службы космической миссии вполне достаточен и может быть компенсирован путем увеличения входящей оптической мощности источника излучения. Применение к этим результатам расчетной методики по аппроксимации релаксации РНП на срок службы 15 лет дало разброс значений от 0.2 дБ/км до 3.0 дБ/км, в зависимости от мощности дозы облучения (рис. 10), что ставит вопрос о корректности применения методики к анизотропным ОВ с нелегированной кварцевой сердцевинной.

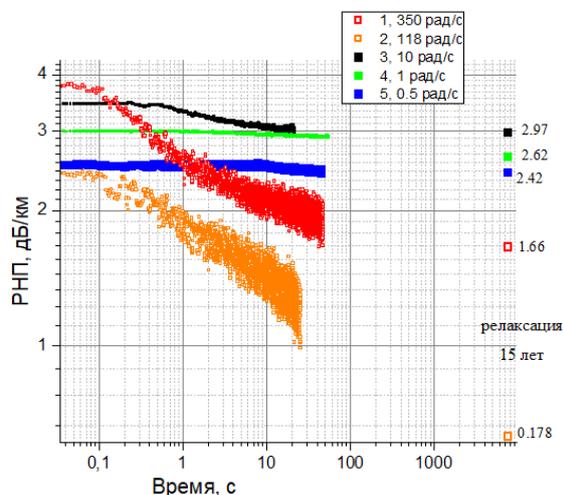


Рис. 10. Графики релаксации в течение 25 мин и расчетные точки на 15 лет после дозы 120 крад с вводимым оптическим излучением 2 мВт

К факторам, влияющим на РНП, относятся не только мощность дозы ИИ, но также и температура эксплуатации оптических волокон и уровень вводимой оптической мощности [6, 30]. Для непрерывного гамма-облучения при величине оптической мощности 0.1 мкВт ($\lambda = 1550$ нм) разница РНП для температур 25 °С и –60 °С может достигать более

10 дБ/км (рис. 11, а). При этом, повышая уровень оптической мощности до единиц милливатт, эту разницу удается значительно снизить. На рис. 11, б приведены результаты непрерывного гамма облучения до дозы 100 крад на образцах изотропного ОВ с SiO₂ сердцевинной при температуре минус 60 °С. В один образец введена оптическая мощность 1.1 мкВт на длине волны 1550 нм, в другой – 2.9 мВт. РНП во втором случае ненамного превышает РНП при комнатной температуре. Для обеспечения работоспособности прибора в первом случае пришлось бы сокращать длину ОВ почти на порядок.

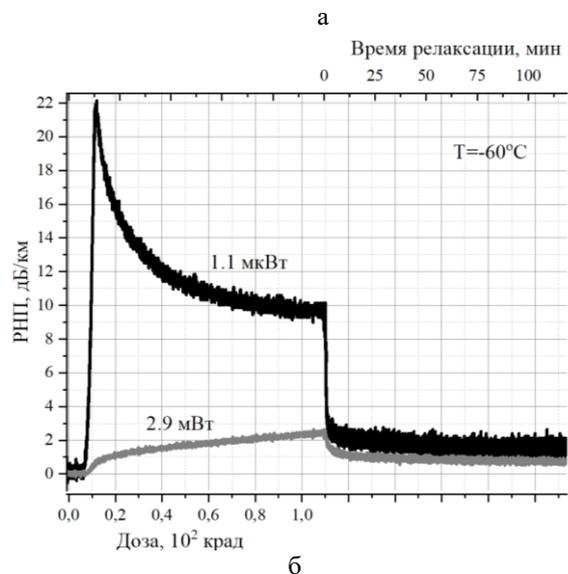
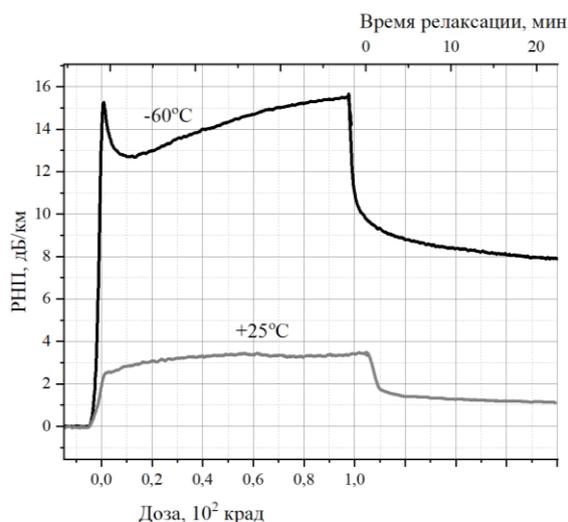


Рис. 11. График зависимости РНП изотропного ОВ с SiO₂ сердцевинной от набранной дозы излучения 110 крад с мощностью дозы 140 рад/с: а – с вводимой оптической мощностью 0,1 мкВт при температурах для первого образца минус 60 °С и для второго образца 25 °С; б – с вводимой оптической мощностью 1,1 мкВт (1) и 2,9 мВт (2) при температуре минус 60 °С

3.4. Анализ результатов для случая непрерывного гамма-излучения

Рассмотрим получившиеся в результате исследований РНП оптического тракта ВОГ с радиационно-стойкими оптическими компонентами для наиболее типичной накопленной дозы, обычно рассматриваемых для космических миссий 100 крад.

Вклад от СИОМ можно не учитывать, поскольку он составляет менее 0.01 дБ при поглощенной дозе 100 крад. Вклады от СВИ (в отсутствие обратной связи по коррекции тока лазерного диода) и от ОВ «Панда» гироскопического волоконного контура сопоставимы: около 2.6 дБ для СВИ и не более 3.5 дБ/км для ОВ типа «Панда». При этом для однопроходной схемы СВИ изменение средневзвешенной длины волны составит примерно 2.2 нм. Общий объем допустимых РНП для ВОГ можно ожидать не более 6.5 дБ при длине оптического контура 1 км. Как уже было отмечено, это крайне консервативная оценка, поскольку РНП 3.5 дБ/км взяты для мощности дозы 100 рад/с, которая скорее характерна для случая работы системы при устранении аварии на АЭС, чем в космическом пространстве, где типичная мощность дозы равна 10^{-5} рад/с.

Для построения ВОГ, предназначенного для эксплуатации в условиях воздействия ИИ, необходимо использовать лазерный диод с запасом увеличения тока накачки, достаточным для компенсации потери мощности в результате РНП. Фотоприемник следует выбирать с динамическим диапазоном и уровнем шумов, способным обеспечить соотношение сигнал-шум на уровне не менее заданного в техническом задании с учетом уменьшения выходного сигнала СВИ.

4. Результаты исследования для случая импульсного ионизирующего излучения

4.1. Результаты исследований образцов СИОМ

Образцы СИОМ продемонстрировали хорошую устойчивость к воздействию импульсного ИИ как фотонного, так и гамма-нейтронного.

На рис. 12 приведены результаты изменения РНП СИОМ после импульса фотонного излучения при наиболее критичной для уровня РНП температуре минус 60 °С. Как видно из графика, через 5 мс после импульса РНП уже были на уровне 0.5 дБ.

В отличие от реакции на импульс фотонного излучения, где возврат к первоначальным характеристикам по оптической мощности происходил за время меньшее 0.1 с, изменение оптической мощности после импульса гамма-нейтронного излучения длилось примерно 600 с, после которого оптическая мощность восстановилась практически полностью (рис. 12). Коэффициент сохранения поляризации излучения (СПИ) после выброса во

время импульсного воздействия плавно уменьшился на 0.1 дБ (рис. 13). Поскольку изменения оптической мощности и СПИ незначительны и находятся в пределах установленных допусков, то на работе ВОГ реакция оптических характеристик СИОМ сказаться не должна. Обнаружено, что после прохождения импульса происходит ступенчатое уменьшение оптической мощности. Последнее изменение наблюдалось спустя 300 с после импульсного воздействия.

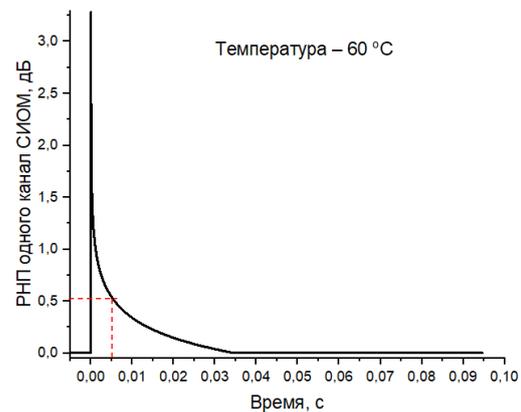


Рис. 12. Поведение РНП образца СИОМ после воздействия импульсного фотонного излучения, доза в импульсе 600 рад, температура минус 60 °С

Повторные облучения СИОМ такими же импульсами показали такую же отсроченную реакцию на воздействие сигнала оптической мощности. На рис. 13 приведены графики изменения оптической мощности на одном канале СИОМ и СПИ во время, и после импульсного воздействия.

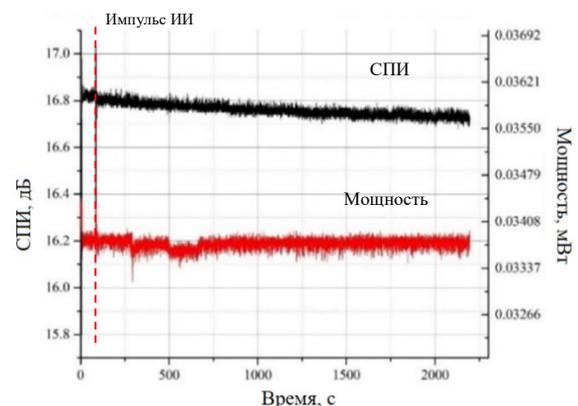


Рис. 13. Значения коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ, дБ, черным) и оптической мощности СИОМ (мВт, красным) от времени после воздействия импульсного потока нейтронов $1.5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 3,8 крад, импульс на 100-й с

Третье облучение привело к необратимому уменьшению сигнала оптической мощности, но поскольку уменьшение на 5 % находится в пределах допуска СИОМ, то на работе ВОГ не отразится.

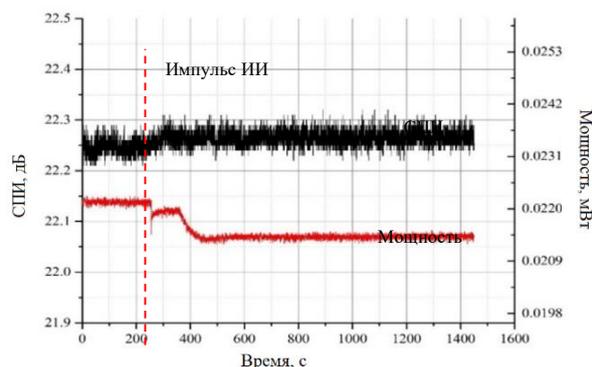


Рис. 14. Значения коэффициента сохранения поляризации излучения (СПИ, дБ, черным) и оптической мощности СИОМ (мВт, красным) от времени после воздействия импульсного потока нейтронов $3.2 \cdot 10^{13}$ н/см², доза по гамма-излучению 7.6 крад, импульс на 220-й с

На графиках зависимостей оптической мощности от времени после воздействия (рис. 13, 14) отчетливо просматриваются две разных по характеру зависимости уменьшения оптической мощности. Первая связана непосредственно с реакцией на импульсное воздействие. После импульса начинается процесс восстановления, состоящий из двух релаксационных механизмов: быстрого, за единицы секунд и медленного – за несколько сотен секунд. Процесс медленного восстановления прерывается в течение примерно 100 с процессом, связанным с уменьшением оптической мощности. Причем после окончания этого процесса оптическая мощность очень слабо, но увеличивается в течение следующих 100 с, что является показателем релаксационных процессов восстановления исходной структуры в волноводе. При этом значение параметра СПИ возрастает с каждым облучением примерно на 5 %, а оптическая мощность уменьшается на 10 – 15 % после трех облучений. На аналогичных соседних измерительных каналах, подключенных к исследуемым оптическим активному и пассивному волокнам, ничего подобного не регистрировалось. Поскольку аналогичные переходные процессы зарегистрированы для циклов последовательных облучений на нескольких образцах СИОМ, то приходится признать эти процессы относящимися к структуре волноводов СИОМ. При этом предположить природу процессов перестройки структуры волновода уже после почти полного восстановления после воздействия пока не представляется возможным.

4.2. Результаты исследования активного ОВ в схеме СВИ

В случае воздействия импульсного ИИ активное ОВ оказалось наиболее стойким оптическим компонентом ВОГ.

Оптическая мощность СВИ при воздействии импульсного фотонного излучения через 1 мс после воздействия уже составила 98 % от первоначальной, доза в импульсе при этом – 1.5 крад (рис. 15).

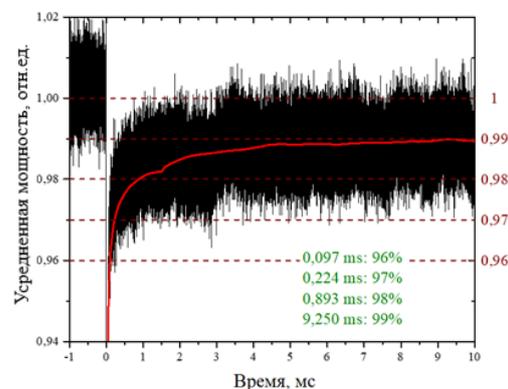


Рис. 15. Зависимость выходной мощности СВИ при воздействии импульсного фотонного излучения, 1.5 крад в импульсе

Исследование образцов активного ОВ на воздействие импульсного гамма-нейтронного излучения проводилось на импульсном реакторе нейтронов БР-1М при комнатной температуре, поток нейтронов варьировался от опыта к опыту от $1 \cdot 10^{12}$ н/см² до $2.35 \cdot 10^{13}$ н/см², доза гамма-излучения в опыте составляла от 300 рад до 7 крад, длительность импульса – примерно 60 мкс.

На рис. 16 представлено изменение нормированной оптической мощности СВИ после облучения потоком нейтронов. Черным обозначен сигнал, приходящий с фотоприемника, а красная линия отражает результат усреднения сигнала функцией скользящей средней.

В отличие от импульса фотонного излучения, на импульс нейтронов с сопутствующим гамма-излучением образцы активного ОВ практически не реагировали. В ответ на импульс зафиксировано снижение оптической мощности СВИ не более 2 % в момент импульса (рис. 16), при этом не отмечалось значимое изменение средневзвешенной длины волн.

Сравнивая результаты воздействия импульса фотонного излучения и импульса нейтронов с сопутствующим гамма-излучением на образцы активного ОВ, отмечая при этом, что дозы гамма-излучения в импульсе для случая нейтронов были даже больше, чем для фотонного излучения, более ощутимые последствия имеет импульс тормозного излучения. Из этого следует вывод, что определяющую роль в случае небольших доз играет не доза, а мощность дозы.

Интересно отметить, что в реакции активного ОВ для импульса нейтронов не удается выделить роль нейтронов. РНП образцов активного ОВ пропорциональны дозе гамма-излучения. Это подтвердил опыт, в котором поток нейтронов составил $3 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма излучения

– 54 крад, время облучения – 150 с. Образцы активного ОВ в конце облучения продемонстрировали уровень РНП сопоставимый как при гамма-облучении на источнике ^{60}Co с такой же мощностью дозы по гамма-излучению (рис. 17).

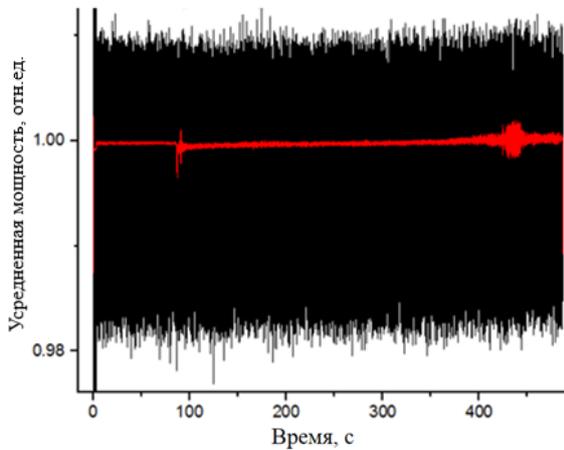


Рис. 16. Изменение усредненной оптической мощности СВЛ после облучения потоком нейтронов $2.5 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма излучения – 7 крад, время импульса – 60 мкс

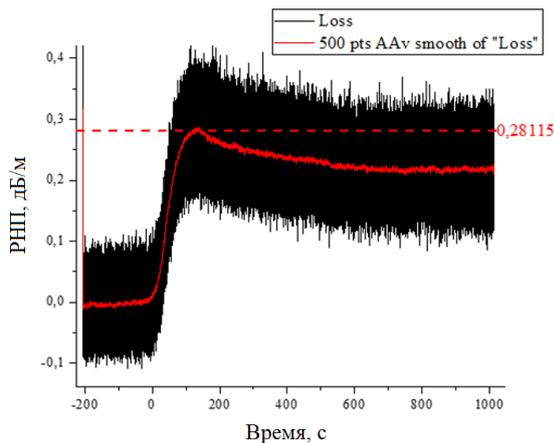


Рис. 17. Изменение РНП на длине волны 1310 нм для образца активного ОВ после облучения потоком нейтронов $3 \cdot 10^{13}$ н/см², доза сопутствующего гамма излучения – 54 крад, время облучения – 150 с

4.3. Результаты исследования ОВ типа «Панда»

Образцы ОВ типа «Панда» с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла исследовались на воздействие импульсного фотонного и гамма-нейтронного ИИ как в виде свободной намотки с диаметром намотки 170 мм, так и в виде гироскопических волоконных катушек с диаметром намотки 120 мм и некоторым уровнем дополнительных механических напряжений из-за пропиточного компаунда.

Типичные результаты исследования ОВ в свободной намотке на воздействие импульса фотонов

приведены на рис.18. Варьирование дозы в импульсе, а также уровня входящей оптической мощности в широком диапазоне показало, что время восстановления оптических характеристик по уровню 6 дБ может различаться от 0.1 мс до 0.02 с в зависимости от условий опыта.

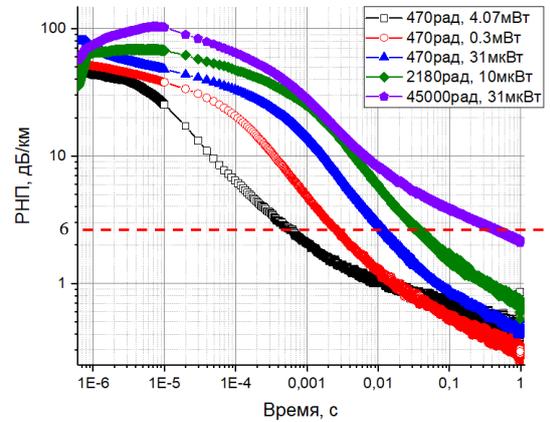


Рис. 18. Зависимость РНП образцов ОВ «Панда» от времени после воздействия импульсного ИИ; доза в импульсе, вводимая оптическая мощность, и длина волны указаны в подписи к графикам

Исследование ОВ в виде катушки показало, что механические напряжения, вносимые в область сердцевины ОВ при намотке катушки, приводят к существенному замедлению восстановления оптических характеристик ОВ, особенно в случае облучения импульсным потоком нейтронов.

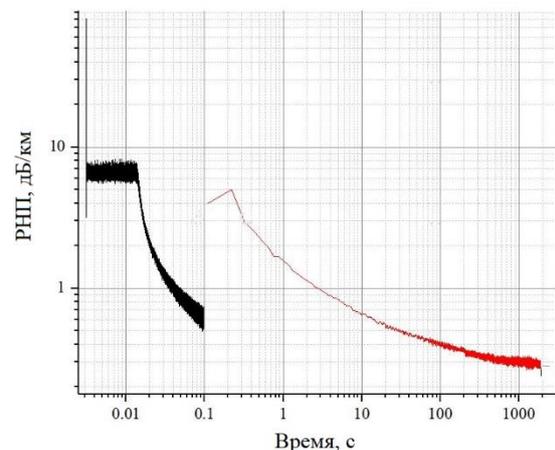


Рис. 19. Образцы волоконных контуров длиной 1000 м с одинаковыми характеристиками по двулучепреломлению волокна и величине относительной деформации. Черная кривая – РНП после импульса фотонов время импульса 20 нс, доза в импульсе 1.9 крад, остаточные потери 0 дБ/км. Светлая кривая – РНП после импульса нейтронов флюенс $2.2 \cdot 10^{13}$ н/см², время импульса 60 мкс (флак 10^{19} см⁻²с⁻¹), сопутствующая доза гамма-излучения 2.2 крад. Нерелаксируемые остаточные потери 0.4 дБ/км

На рис. 19 приведены кривые релаксации РНП для двух гироскопических волоконных контуров (катушек) длиной 1000 м из соседних участков вытяжки: одно ОВ подвергалось воздействию импульса фотонов и второе ОВ – импульса потока гамма-излучения и нейтронов. Доза гамма-излучения в этих импульсах сопоставима (1,9 крад и 2,2 крад, соответственно), величина потока нейтронов составила $2.2 \cdot 10^{13}$ н/см². РНП достигает уровня 6 дБ/км за 0.02 с после воздействия импульса фотонов и через 0.2 с после импульса нейтронов. Такие времена восстановления оптических потерь не позволят использовать ВОГ без специальных алгоритмов коррекции на время пропадания сигнала. Оптические характеристики образцов полностью восстановились примерно через 100 с после воздействия импульса фотонов и примерно через 1 ч после импульса нейтронов.

4.4. Анализ результатов для случая импульсного ИИ

Реакция оптических компонентов ВОГ на воздействие импульсного ИИ принципиально отличается от реакции на воздействие непрерывного ИИ. Результаты исследования ОВ типа «Панда» в виде волоконного гироскопического контура показали, что именно этот оптический компонент является самым уязвимым к воздействию импульсного ИИ. Именно его временем восстановления оптических характеристик будет определяться время восстановления работоспособности ВОГ после импульсного воздействия. При этом вклады в РНП оптического тракта ВОГ от СИОМ и СВИ можно не учитывать.

5. Заключение

Проведены исследования оптических компонентов ВОГ: СИОМ, активного волокна в однопроходной схеме СВИ с встречной накачкой, оптического волокна типа «Панда» с нелегированной кварцевой сердцевиной в виде свободной намотки и гироскопического волоконного контура на воздействие непрерывного и импульсного ионизирующего излучения. Поскольку в исследовании принимали участие группы практически идентичных образцов каждого вида, то результаты позволили сопоставить данные по стойкости к непрерывному и к импульсному ионизирующему излучению.

Установлено, что время восстановления работоспособности ВОГ при воздействии импульсного ионизирующего излучения определяется в первую очередь временем релаксации РНП ОВ гироскопического волоконного контура из оптического волокна типа «Панда».

В случае непрерывного ионизирующего воздействия работоспособность ВОГ определяется как РНП ОВ «Панда», так и активным ОВ, легированным эрбием и церием. При этом возможно умень-

шить РНП в оптическом тракте ВОГ путем увеличения мощности диода накачки, а изменение средней длины волны излучения СВИ дополнительно целесообразно компенсировать как систематическую погрешность.

Оптические параметры СИОМ практически не изменяются при воздействии ионизирующего излучения, поэтому их деградацию можно не учитывать при оценке оптических потерь и сохранения поляризации излучения в оптическом тракте ВОГ.

Полученные в данной работе экспериментальные результаты могут быть использованы в инженерных расчетах при обосновании выбора архитектуры и компонентов, а также алгоритмов обработки сигнала ВОГ, предназначенного для тех или иных условий эксплуатации при воздействии ионизирующего излучения.

6. Благодарности

Авторы благодарят А.В. Грунина, В.Д. Селемира, Н.К. Миронова, А.В. Силаева и Филиппова А.В. (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») за содействие при проведении исследований.

Список литературы

1. *Lefèvre H. C* The fiber-optic gyroscope. London: Artech House, 1993. 313 p.
2. *Арбузов В. И.* Основы радиационного оптического материаловедения: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ–ИТМО. 2008. 84 с.
3. *Griscom D. L.* Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: Application to color centers in silica-based optical fibers // *Physical Review B*. 2001. Vol. 64, 174201.
4. ЦЭНКИ. Космодромы России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.russian.space> (дата обращения: 31.10.2022).
5. IXblue [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixblue.com> (дата обращения: 31.10.2022).
6. *Paveau A., Cros G., Masson S. et al.* Robustness of Astrix Fiber Optic Gyros in space radiative environment // *CEAS Space Journal*. 2019. N. 11. P. 219–227.
7. *Бочвар И. А., Гумадова Т. И., Кеурим-Маркус И. Б. и др.* Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977. 221 с.
8. *Griscom D. L., Gingerich M. E., Friebele E. J.* Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1994. Vol. 41. N. 3. P. 523–527.
9. ГОСТ 15484-81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 53 с.
10. *Камайкин П.Ф.*, Радиационная стойкость волоконных световодов с сердцевиной из нелегированного и легированного германием кварцевого

- стекла в ближнем ИК-диапазоне: дис. на соиск. учён. степ. к.ф.-м.н: М.: ИЦВО РАН. 2019. 147 с.
11. Barnes C., Greenwell R. Radiation effects in photonic modulator structures // SPIE Proceedings. 1995. Vol. 2482. P. 48–83.
 12. Алейник А. С., Кикилич Н. Е., Козлов В. Н. и др. Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 593–607.
 13. Girard S. et al. Radiation hardening of optical fibers and fiber sensors for space applications: recent advances // SPIE Proceedings. 2017. Vol. 10563, 105632B.
 14. Min L., Ningfang S., Jing J. et al Gamma radiation effects on the DPB SFS in space FOGs applications // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. 2012. Vol. 123. N. 17. P. 1542–1545.
 15. Yang Y., Suo X., Yang M. Active radiation hardening technology for fiber-optic source // SPIE Proceedings. 2013. V. 8924. P. 127–130.
 16. Peng T. S., Wang L. A., Liu R. A radiation-tolerant superfluorescent fiber source in double-pass backward configuration by using reflectivity-tuning method // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. Vol. 23. N. 20. P. 1460-1462.
 17. Liu C., Zhang L., Wu X. et al. Gamma radiation effects on erbium-doped fiber in superfluorescent fiber source // Optical Fiber Technology. 2013. Vol. 19. N. 5. P. 456-460
 18. Yang Y., Suo X., Yang M. et al. Radiation-resistance technology for broadband fiber-optic source // SPIE Proceedings. 2011. Vol. 7753, 775364
 19. Yuan-Hong Y., Xin-Xin S., Wei Y. Radiation-induced attenuation self-compensating effect in super-fluorescent fiber source // Chinese Physics B. 2014. Vol. 23. N. 9, 094213.
 20. Jing J. et al. Effect of radiation-induced mean wavelength shift in optical fibers on the scale factor of an interferometric fiber optic gyroscope at a wavelength of 1300 nm // Chinese Physics B. 2012. Vol. 21. N. 9, 094220.
 21. Liu Ch., Wu X., Zhu J. et al. Radiation-resistant Er³⁺-doped superfluorescent fiber sources // Sensors. 2018. Vol. 18. N. 7, 2236.
 22. Hill M., Hankey J., Gray R. Radiation tolerance passive and active optical fiber products for use in space environment // SPIE Proceedings. 2014. V. 10563. P. 662–670.
 23. Sheng H. C. et al. Photo-annealing effect of gamma-irradiated erbium doped fiber by femtosecond pulsed laser // Journal of Physics D. 2013. Vol. 46. N. 49, 495113
 24. Mady F., Duchez J., Mebrouk Y. et al Equilibrium degradation levels in irradiated and pumped erbium-doped optical fibers // IEEE Transaction on Nuclear Science. 2015. Vol. 62. N. 6. P. 2948–2955.
 25. Girard S. et al. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications // Journal of Optics. 2018. Vol. 20. N. 9, 093001.
 26. Friebele E. J., Gingerich M. E., Griscom D. L. Survivability of optical fibers in space // SPIE Proceedings. 1993. Vol. 1791. P. 177–189.
 27. Friebele E. J. et al. Optical fiber sensors for spacecraft: applications and challenges // Photonics for Space Environments IX. 2004. Vol. 5554. P. 120–132.
 28. Jin J. et al. Effect of color center absorption on temperature dependence of radiation-induced attenuation in optical fibers at near infrared wavelengths // Journal of Lightwave Technology. 2013. Vol. 31. N. 6. P. 839-845.
 29. Valle M. J. L. et al. Radiation-induced loss predictions for pure silica core polarization-maintaining fibers // SPIE Proceedings. 2006. Vol. 6193. P. 139–150.
 30. Tomashuk A. L., Kashaykin P. F., Semjonov S. L. et al. Pulsed-X-ray-irradiation of radiation-resistant PANDA fibers: Dependence on dose, probe light power, and temperature // Optical Materials. 2020. Vol. 109, 110384.

References

1. Lefèvre H. C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. London: Artech House, 1993. 313 p.
2. Arbuzov V. I. *Osnovy radiatsionnogo opticheskogo materialovedeniia* [Fundamentals of Radiation Optical Materials Science]. St. Petersburg: ITMO University Press, 2008. 284 p. (In Russian).
3. Griscom D. L. Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: Application to color centers in silica-based optical fibers. *Physical Review B*, 2001, vol. 64, 174201.
4. TsENKI. Kosmodromy Rossii [Center for Operation of Ground-Based Space Infrastructure Facilities. Russian spaceports] (Electronic Resource). URL: <http://www.russian.space>. (Date of access: 31 Oct 2022). (In Russian).
5. IXblue (Electronic resource). URL: <https://www.ixblue.com>. (Date of access: 31 Oct 2022)
6. Paveau A., Cros G., Masson S. et al. Robustness of Astrix Fiber Optic Gyros in space radiative environment. *CEAS Space Journal*, 2019, no. 11, pp. 219–227.
7. Bochvar I. A., Gimadova T. I., Keirim-Markus I. B. et al. *Metod dozimetrii IKS* [The method of individual dosimetry with glass]. Moscow: Atomizdat, 1977. 221 p. (In Russian)
8. Griscom D. L., Gingerich M. E., Friebele E. J. Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, vol. 41, no. 3, pp. 523–527.

9. GOST 15484-81. Moscow: Standards Publ., 1981. 53 p.
10. Kashaykin P. F. *Radiatsionnaya stoikost' volokonnykh svetovodov s serdtsevidnoi iz nelegirovannogo i legirovannogo germaniem kvartseвого стекла v blizhnem IK-diapazone* [Radiation resistance of optical fibers with a core of undoped and germanium-doped quartz glass in the near infrared region]. Cand. phys. and math. sci. thesis. Moscow: Fiber Optics Research Center RAS, 2019. 147 p. (In Russian)
11. Barnes C., Greenwell R. Radiation effects in photonic modulator structures. *SPIE Proceedings*, 1995, vol. 2482, pp. 48–83.
12. Aleynik A. S., Kikilich N. E., Kozlov V. N. et al. High-stable erbium superluminescent fiber optical sources creation methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 593–607 (In Russian).
13. Girard S. et al. Radiation hardening of optical fibers and fiber sensors for space applications: recent advances. *SPIE Proceedings*, 2017, vol. 10563, 105632B.
14. Min L., Ningfang S., Jing J. et al. Gamma radiation effects on the DPB SFS in space FOGs applications. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, vol. 123, no. 17, pp. 1542–1545.
15. Yang Y., Suo X., Yang M. Active radiation hardening technology for fiber-optic source. *SPIE Proceedings*, 2013, vol. 8924, pp. 127–130.
16. Peng T. S., Wang L. A., Liu R. A radiation-tolerant superfluorescent fiber source in double-pass backward configuration by using reflectivity-tuning method. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, vol. 23, no. 20, pp. 1460–1462.
17. Liu C., Zhang L., Wu X. et al. Gamma radiation effects on erbium-doped fiber in superfluorescent fiber source. *Optical Fiber Technology*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 456–460.
18. Yang Y., Suo X., Yang M. et al. Radiation-resistance technology for broadband fiber-optic source. *SPIE Proceedings*, 2011, vol. 7753, pp. 910–913.
19. Yuan-Hong Y., Xin-Xin S., Wei Y. Radiation-induced attenuation self-compensating effect in superfluorescent fiber source. *Chinese Physics B*, 2014, vol. 23, no. 9, 094213.
20. Jing J. et al. Effect of radiation-induced mean wavelength shift in optical fibers on the scale factor of an interferometric fiber optic gyroscope at a wavelength of 1300 nm. *Chinese Physics B*, 2012, vol. 21, no. 9, 094220.
21. Liu C., Wu X., Zhu J. et al. Radiation-resistant Er³⁺-doped superfluorescent fiber sources. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 7, 2236.
22. Hill M., Hankey J., Gray R. Radiation tolerance passive and active optical fiber products for use in space environment. *SPIE Proceedings*, 2014, vol. 10563, pp. 662–670.
23. Sheng H. C. et al. Photo-annealing effect of gamma-irradiated erbium doped fiber by femtosecond pulsed laser. *Journal of Physics D*, 2013, vol. 46, no. 49, 495113.
24. Mady F., Duchez J., Mebrouk Y. et al. Equilibrium degradation levels in irradiated and pumped erbium-doped optical fibers. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2015, vol. 62, no. 6, pp. 2948–2955.
25. Girard S. et al. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications. *Journal of Optics*, 2018, vol. 20, no. 9, 093001.
26. Friebele E. J., Gingerich M. E., Griscom D. L. Survivability of optical fibers in space. *SPIE Proceedings*, 1993, vol. 1791, pp. 177–189.
27. Friebele E. J. et al. Optical fiber sensors for spacecraft: applications and challenges. *Photonics for Space Environments IX*, 2004, vol. 5554, pp. 120–132.
28. Jin J. et al. Effect of color center absorption on temperature dependence of radiation-induced attenuation in optical fibers at near infrared wavelengths. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 6, pp. 839–845.
29. Valle M. J. L. et al. Radiation-induced loss predictions for pure silica core polarization-maintaining fibers. *SPIE Proceedings*, 2006, vol. 6193, pp. 139–150.
30. Tomashuk A. L., Kashaykin P. F., Semjonov S. L. et al. Pulsed-X-ray-irradiation of radiation-resistant PANDA fibers: Dependence on dose, probe light power, and temperature. *Optical Materials*, 2020, vol. 109, 110384.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Азанова И. С., Шаронова Ю. О., Шевцова А. Д., Поспелова Е. А., Вахрушев А. С., Вохмянина О. Л., Волынец А. Б. Радиационная стойкость оптических компонентов волоконно-оптического гироскопа // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 1. С. 5–20. doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-05-20

Please cite this article in English as:

Azanova I. S., Sharonova Yu. O., Shevtsova A. D., Pospelova E. A., Vakhrushev A. S., Vokhmyanina O. L., Volyntsev A. B. Radiation-resistant optic components of a fiber-optic gyroscope. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 1, pp. 5–20. doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-05-20

Сведения об авторах

1. *Азанова Ирина Сергеевна*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990; директор научно-образовательного центра, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614007.
2. *Шаронова Юлия Олеговна*, начальник лаборатории, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614007.
3. *Шевцова Анастасия Денисовна*, инженер-исследователь, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614007.
4. *Поспелова Елена Андреевна*, инженер-исследователь, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614007.
5. *Вахрушев Александр Станиславович*, инженер-конструктор, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614007.
6. *Вохмянина Ольга Леонидовна*, начальник отдела, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», ул. 25 Октября, 106, Пермь, 614007.
7. *Волынцев Анатолий Борисович*, д-р. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990;

Author information

1. *Irina S. Azanova*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia; Director of the Scientific and Educational Center, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
2. *Yulia O. Sharonova*, Head of the Laboratory, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
3. *Anastasia D. Shevtsova*, Research Engineer, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
4. *Elena A. Pospelova*, Research Engineer, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
5. *Alexander S. Vakhrushev*, Design Engineer, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
6. *Olga L. Vokhmyanina*, Department Head, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
7. *Anatoliy B. Volyntsev*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Nanotechnologies and Microsystem Technology, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia.