

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ**Эрбиевые световоды с повышенной стойкостью к ионизирующему излучению для суперлюминесцентных волоконных источников****А.А.Поносова, И.С.Азанова, Н.К.Миронов, М.В.Яшков, К.Е.Рюмкин, О.Л.Кель, Ю.О.Шаронова, М.А.Мелькумов**

Сообщается об исследовании свойств эрбиевых световодов повышенной стойкости к воздействию гамма-излучения с большой мощностью дозы. Исследовались образцы световодов с сердцевинной основой кварцевого стекла с различными легирующими добавками. Стойкость оптических волокон к гамма-излучению достигалась дополнительным легированием сердцевины ионами церия и германия, а также оптимизацией концентрации алюминия. Проведено исследование влияния состава световодов на радиационно-наведенные потери на длине волны 1310 нм, а также на выходную мощность и средневзвешенную длину волны суперлюминесцентных волоконных источников на основе эрбиевых световодов при воздействии импульсного гамма-излучения (доза в импульсе составляла ~ 20 Гр). Установлено, что оптимальным для стойкого к гамма-излучению широкополосного суперлюминесцентного волоконного источника является волокно, легированное оксидами алюминия, германия и церия.

Ключевые слова: суперлюминесцентный волоконный источник, световод, эрбий, церий, ионизирующее излучение, гамма-излучение, радиационная стойкость, радиационно-наведенные потери.

1. Введение

Суперлюминесцентные волоконные источники (СВИ) на базе эрбиевых световодов являются предпочтительными источниками излучения для волоконных датчиков интерференционного типа, особенно для волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) навигационного класса точности [1]. В ряде важных применений СВИ могут подвергаться воздействию гамма-излучения [2, 3]. В результате взаимодействия гамма-квантов с оптическими материалами происходит образование радиационных центров окраски (ЦО), поглощающих излучение как в видимой, так и в ИК области спектра [4, 5], что может приводить к значительному (более чем в 100 раз) падению выходной мощности СВИ [6].

А.А.Поносова. ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Россия, 614007 Пермь, ул. 25 Октября, 106; Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: nastya-aleksi@mail.ru

И.С.Азанова. ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Россия, 614007 Пермь, ул. 25 Октября, 106; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614990 Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: azanova@ppk.perm.ru

Н.К.Миронов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: mironovn@expd.vniief.ru

М.В.Яшков. Институт химии высококочистых веществ им. Г.Г.Девятых РАН, Россия, 603951 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: yashkovmv@yandex.ru

К.Е.Рюмкин, М.А.Мелькумов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: 3bc@mail.ru, melkoumov@fo.gpi.ru

О.Л.Кель, Ю.О.Шаронова. ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Россия, 614007 Пермь, ул. 25 Октября, 106; e-mail: kel@ppk.perm.ru, sharonova@pnppk.ru

Поступила в редакцию 5 октября 2018 г., после доработки – 27 марта 2019 г.

В большинстве случаев требуется стойкость СВИ к долговременному (годы или десятки лет) воздействию непрерывного ионизирующего излучения с относительно малой мощностью дозы, при этом, например, для типичных космических миссий полная доза находится на уровне единиц кГр. Вопросам стабильности характеристик СВИ при воздействии непрерывного гамма-излучения посвящен ряд работ (см. [6–13] и ссылки в них). Однако для некоторых традиционных [14] и ряда специальных [15–17] применений требуется, чтобы волокно выдерживало воздействие импульсного излучения со сравнительно высокой мощностью дозы. Кратковременное ионизирующее излучение (ИИ) со значимой дозой гамма-радиации возникает, например, при грозовых разрядах (частое явление с всплесками ИИ низкой интенсивности) [18], вспышках на солнце (частота событий от нескольких раз в год для вспышек малой интенсивности до одного раза в несколько десятков лет для вспышек средней интенсивности), взрывах сверхновых в нашей галактике (примерно 1–2 события в год со средней интенсивностью ИИ) и взрывов более мощных объектов (нейтронных звезд, черных дыр и т. д.) со сравнительно высокой интенсивностью. Длительность воздействия ИИ при подобных событиях находится в пределах от миллисекунд до нескольких часов. За это время доза радиации может составить от долей миллигрей до сотен и даже тысяч грей (для очень редких событий) в зависимости от близости и масштаба события. В настоящей работе мы ограничились не слишком редкими событиями, не приводящими к катастрофическим последствиям на Земле, такими, для которых суммарная доза не превышает единиц или десятков грей. Поэтому мы выбрали дозу при импульсном воздействии на уровне 20 Гр. Время воздействия определялось не столько временами, характерными для рассматриваемых возможных событий, сколько временными возможностями оборудования для подобных исследований, к которому имелся доступ (это десятки нс).

Цель настоящей работы – установление оптимального состава сердцевины эрбиевых световодов, обеспечивающего высокую (или повышенную) стойкость к радиации при сохранении широкой полосы люминесценции, а также определение закономерности изменения выходной мощности и спектров излучения СВИ, подвергнутых ионизирующему излучению.

2. Методика измерений и экспериментальные результаты в отсутствие радиации

2.1. Технология изготовления и свойства эрбиевых световодов

Эрбиевые световоды различного состава были разработаны и изготовлены в НЦВО РАН совместно с ИХВВ РАН. Заготовки оптических волокон изготавливались методом MCVD. Образцы световодов отличались составом сердцевины (табл.1).

В сердцевину всех исследуемых образцов вводились ионы церия, поскольку он как элемент переменной валентности способствует снижению концентрации наводных центров окраски (ЦО). Высокой эффективностью подавления дырочных ЦО характеризуется Се (III), а электронных ЦО – Се (IV) [4]. При этом, в отличие от других известных ионов переменной валентности (например, железа, никеля), легирование церием не приводит к увеличению потерь в ИК области спектра, а кроме того, обе валентные формы церия легко перезаряжаются под действием ИИ. Концентрация церия в растворе, используемом для пропитки пористого слоя заготовки световода, была примерно одинаковой для всех образцов.

Световедущая структура волоконного образца А была образована за счет легирования сердцевины оксидом фосфора, сердцевина образца Б была легирована оксидом алюминия, а образцы В содержали оксиды алюминия и германия. Концентрация оксида алюминия в сердцевине образца В1 приблизительно в 1.5 раза превышала таковую в образцах В2 и В3. Образец В3 был легирован оксидом германия с концентрацией примерно вдвое меньшей, чем в образцах В1 и В2.

Часть компонентов стекла сердцевины (Si, P, Al, Ge) осаждалась из газовой фазы на внутреннюю поверхность опорной кварцевой трубы с формированием пористого слоя стекла. Затем пористый слой пропитывался раствором, содержащим ионы Er^{3+} и Ce^{3+} , и после процедуры удаления растворителя переплавлялся в прозрачный слой. На завершающем этапе изготовления трубчатая заготовка схлопывалась в стержень. Из заготовок были вытянуты оптические волокна с длиной волны отсечки второй моды вблизи 0.95 мкм. Оптические потери в области 1150 нм составляли не более 25 дБ/км.

Табл.1. Состав стекла сердцевины.

Образцы	Состав сердцевины	Пик поглощения ионами Er^{3+} на $\lambda = 1530$ нм (дБ/м)	Легированные примеси			
			Се	P	Al	Ge
А	$P_2O_5(Er/Ce)$	3.7	+	+		
Б	$Al_2O_3(Er/Ce)$	6 ± 2	+		++	
В1	$Al_2O_3-GeO_2(Er/Ce)$	20 ± 5	+		++	++
В2	$Al_2O_3-GeO_2(Er/Ce)$	25 ± 5	+		+	++
В3	$Al_2O_3-GeO_2(Er/Ce)$	25 ± 5	+		+	+

2.2. Схема и параметры суперлюминесцентных волоконных источников

Для исследования спектральных и мощностных характеристик эрбиевых световодов при воздействии гамма-излучения была использована однопроходная схема СВИ со встречной накачкой (рис.1). Такая схема не оптимальна с точки зрения стабильности средневзвешенной длины волны, ширины спектра и эффективности, но позволяет сравнивать поведение различных волокон, используемых в СВИ, под действием радиации при минимальном влиянии других факторов (длина активного волокна, потери на сварках, коэффициент отражения на дальнем конце световода и т.д.).

Для накачки эрбиевых световодов использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 980 нм. Накачка на $\lambda = 980$ нм позволяет достичь более высокого уровня инверсии по сравнению с накачкой в области 1.42–1.48 мкм и способствует интенсивному фотообесцвечиванию ЦО [19]. Излучение лазера накачки вводилось в активные световоды через спектрально-селективный ответитель (ССО) 980/1550 нм. На выходе устройства устанавливался оптический волоконный изолятор для подавления паразитной генерации. Длины активных световодов в схеме СВИ выбирались такими, чтобы поглощение излучения накачки мощностью 150 мВт составляло не менее 30 дБ.

Спектры излучения СВИ и зависимость выходной мощности от мощности накачки были измерены до воздействия ионизирующего излучения. Спектры излучения регистрировались с помощью оптического спектроанализатора в диапазоне 1500–1620 нм с разрешением 0.1 нм. На рис.2 представлены типичные мощностные и спектральные характеристики СВИ на основе исследуемых эрбиевых световодов. Максимальная дифференциальная эффективность $\eta = 32.5\%$ и ширина спектра на полувысоте (FWHM) $\Delta\lambda = 6.9$ нм выходного излучения СВИ получены в волокнах, легированных оксидом алюминия, – $Al_2O_3(Er/Ce)$. Наименьшая ширина спектра выходного излучения была у волокна $P_2O_5(Er/Ce)$, легированного оксидом фосфора ($\Delta\lambda = 2.3$ нм). Формы спектров образцов, легированных оксидами алюминия, германия и церия, отличались незначительно, а спектральная ширина основного максимума на $\lambda = 1530$ нм составляла около 6.4 нм. Отметим, что большее содержание алюминия в образце В1 по сравнению с образцами В2 и В3 способствовало увеличению дифференциальной эффективности СВИ почти в 1.5 раза.

С точки зрения применения в ВОГ предпочтение отдается СВИ с наибольшей шириной спектра излучения га-

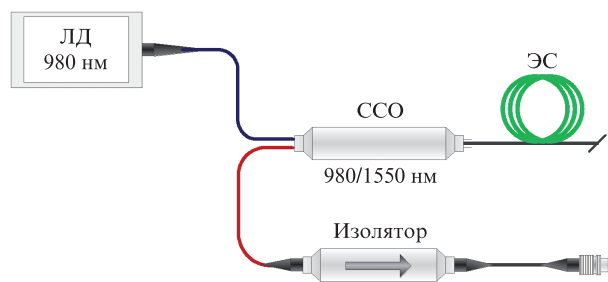


Рис.1. Конфигурация суперлюминесцентного волоконного источника:

ЛД – лазерный диод накачки; ССО – спектрально-селективный ответитель; ЭС – эрбиевый световод.

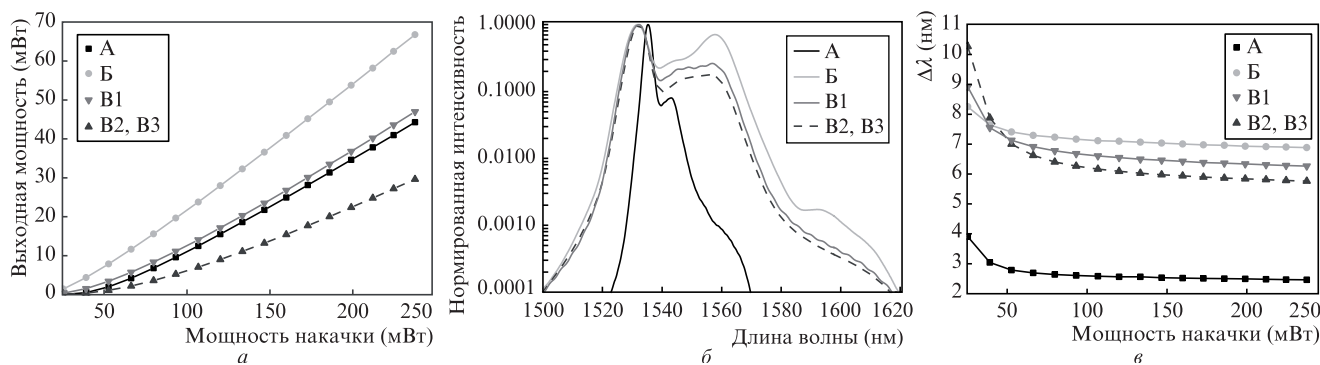


Рис.2. Характерные выходные параметры СВИ с радиационно-стойкими эрбиевыми световодами, отличающимися составом сердцевины (образцы А, Б, В1, В2 и В3): а – зависимости выходной мощности от мощности накачки; б – спектры излучения; в – зависимость ширины спектра Δλ от мощности накачки. T = 25°C.

усовой формы и с наибольшей мощностью выходного излучения [20]. Согласно работе [21] ширина спектра источника для ВОГ навигационного класса точности должна составлять не менее 5 нм с тем, чтобы снизить погрешность измерения угловой скорости, обусловленную рэлеевским рассеянием, перекрестной связью излучений различной поляризации и эффектом Керра в чувствительном волоконном контуре ВОГ.

Таким образом, из исследованных однопроходных СВИ со встречной накачкой наиболее подходящими для применения в навигационных системах являются источники со световодами на основе Al₂O₃(Er/Ce), поскольку световоды P₂O₅(Er/Ce) не обеспечивают требуемой ширины спектра на λ = 1530 нм.

3. Методика измерений и экспериментальные результаты при воздействии ИИ

Исследования стойкости к воздействию импульсного ИИ проводились на линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-30 с непрерывным спектром тормозного излучения [22], который позволяет получать гамма-кванты с энергией от 0.8 до 6 МэВ [23]. Доза гамма-излучения в импульсе была около 20 Гр. Мощность дозы в ходе исследований составляла (3.2–12.5) × 10⁸ Гр/с.

В поле тормозного излучения ускорителя помещались только контуры из активного оптического волокна,

поскольку оно является наиболее чувствительным элементом СВИ к воздействию гамма-излучения [6]. Остальные оптические и электронные элементы экспериментальных схем были защищены от ИИ.

Были измерены радиационно-наведенные потери (РНП) в активных световодах, а также изменение спектров излучения и выходной мощности СВИ в процессе воздействия импульсного гамма-излучения при температурах –60 °С и +25 °С. Схема экспериментов представлена на рис.3. Для измерения РНП на длине волны 1310 нм использовались отрезки эрбиевых световодов вдвое короче, чем в схеме СВИ.

Спектры излучения СВИ измерялись непрерывно в процессе облучения ИИ в спектральном диапазоне 1500–1600 нм с помощью спектрофотометра OceanOptics NIR-QUEST. Спектральное разрешение составляло ~3 нм, а временной интервал между последовательными измерениями спектров был ~15 мс. Средневзвешенная длина волны определялась из спектров по формуле

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n I_i}, \tag{1}$$

где n – число интервалов длин волн, на которое разделен измеряемый спектр; I_i – плотность мощности, приходящаяся на интервал длин волн с центральной длиной волны λ_i.

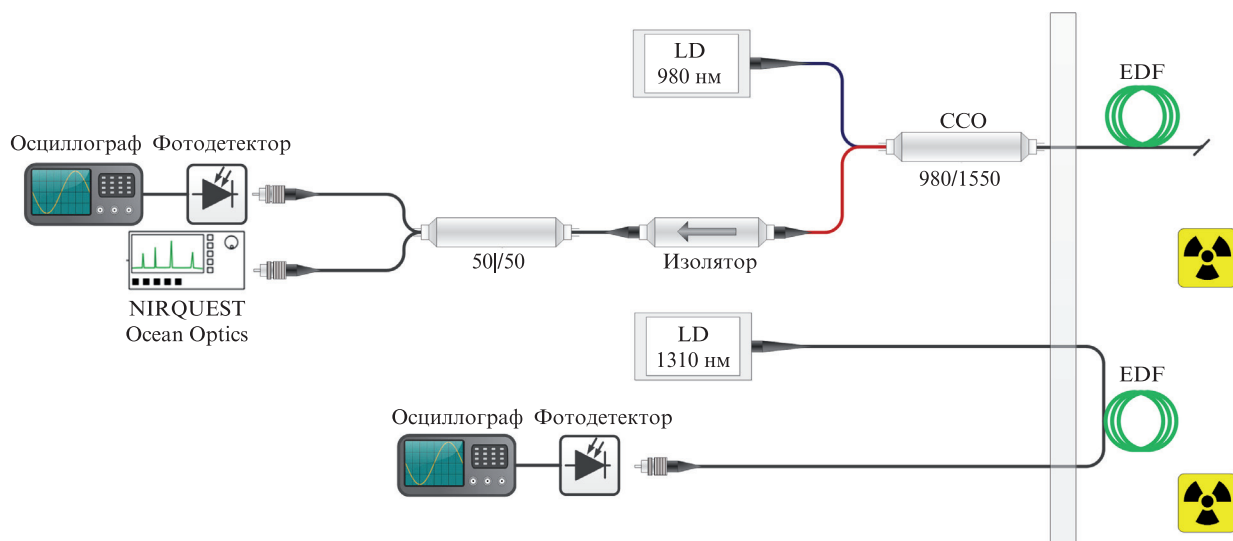


Рис.3. Экспериментальные установки для исследования стойкости к ионизирующему излучению активных оптических волокон.

Для оценки изменения мощности СВИ и определения уровня РНП на длине волны 1.3 мкм при воздействии ИИ выходная мощность излучения детектировалась фотодетектором и осциллографом в течение примерно 20 мс до импульса и 90 мс после облучения.

Расчет РНП (в дБ/м) на длине волны 1310 нм проводился по формуле

$$\alpha = \frac{10 \lg P}{L}, \quad (2)$$

где L – длина световода в метрах; P – нормированная прошедшая мощность (отношение мощности на выходе активного световода до облучения к мощности после облучения).

4. Результаты и их обсуждение

На рис.4 показана динамика изменения мощности СВИ с исследованными образцами активных волокон А, Б, В1 и В2 при воздействии импульса гамма-излучения при 25 °С. В момент воздействия импульса было зафиксировано скачкообразное уменьшение мощности СВИ и последующее быстрое ее восстановление. В образце А, сердцевина которого легирована оксидами фосфора и церия, выходная мощность восстановилась до исходного уровня менее чем через 1 мс после окончания импульса. В образцах В1 и В2, легированных оксидами алюминия, германия и церия, остаточные потери мощности СВИ через 50 мс составляли от 1% до 2.5%. В образце Б потери мощности через 50 мс были более 10%.

Низкая стойкость к гамма-излучению световода Б связана с отсутствием оксида германия. В кварцевых стеклах на основе $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ и $\text{SiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5$ РНП, как правило, связаны с центрами окраски, обусловленными образованием немостиикового кислорода у ионов алюминия и фосфора (Al-oxygen-hole center и P-oxygen-hole center). Введение в состав стекла оксида германия эффективно снижает образование дефектов дырочного типа при воздействии ИИ [24, 25].

Подтверждение положительного влияния оксида германия на стойкость эрбиевых световодов можно получить, сравнив их РНП. На рис.5 представлена динамика изменения РНП на длине волны 1310 нм в образцах А, В1 и В3. В сердцевину образцов В1 и В3 вводилось одинаковое количество церия, но концентрация оксида германия

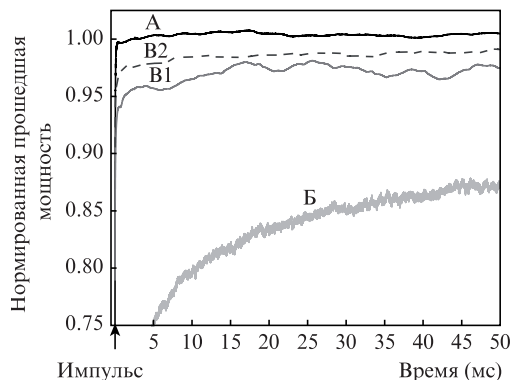


Рис.4. Динамика восстановления мощности сигнала СВИ после воздействия импульса гамма-излучения на образцы А, Б, В1 и В2 при $T = 25^\circ\text{C}$.

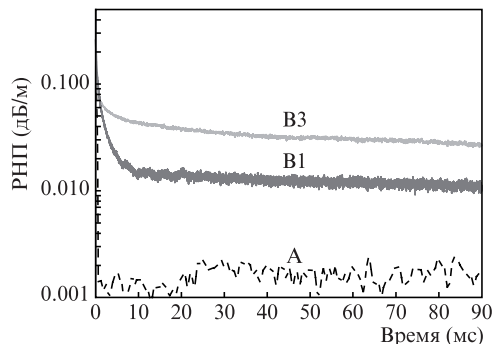


Рис.5. Динамика изменения радиационно-наведенных потерь на длине волны 1310 нм после воздействия импульса гамма-излучения на образцы А, В1 и В3 при $T = 25^\circ\text{C}$.

в образце В3 с меньшей концентрацией алюминия была примерно в два раза ниже. Измеренное через 90 мс значение РНП в световоде В3 с меньшей концентрацией GeO_2 оказалось почти в три раза выше, чем в образцах В1 и В2.

Максимальную стойкость к гамма-излучению продемонстрировал образец А. Однако, как уже упоминалось выше, для применения в ВОГ ширина спектра излучения СВИ должна быть не менее 5 нм. Поэтому оптимальными для СВИ являются образцы световодов, содержащие алюминий в заметных количествах, что необходимо для достижения нужной ширины спектра на $\lambda = 1530$ нм. Кроме того, как видно из полученных данных, для достижения повышенной стойкости эрбиевых световодов к ИИ алюмосиликатное стекло сердцевины необходимо дополнительно легировать оксидами германия и церия в заметных концентрациях.

Влияние температуры окружающей среды на стойкость эрбиевых световодов исследовалось в образце В1 при 25 °С и –60 °С. На рис.6 приведены временные зависимости выходной мощности, изменения средневзвешенной длины волны ($\delta\lambda_m$) и РНП. Видно, что понижение температуры оказывает заметное, но не критическое влияние на изменение параметров активного волокна при воздействии гамма-излучения. Измеренное значение РНП было несколько выше при отрицательной температуре, чем при положительной. Так, через 100 мс после окончания импульса ИИ РНП составляли около 0.006 дБ/м при –60 °С и 0.003 дБ/м при 25 °С; выходная мощность СВИ через 100 мс после воздействия восстановилась соответственно до 99% и 97.5% от исходного значения. Отсутствие прямого соответствия между уровнем РНП и падением мощности СВИ в протестированном образце, на наш взгляд, вызвано двумя факторами:

- дополнительным просветлением образцов под действием мощного излучения накачки;
- различием в уровне РНП на длине волны накачки (980 нм) и на тестируемой длине волны (1310 нм). По-видимому, основной вклад в падение мощности СВИ в данном случае вносят именно потери, наведенные на длине волны 980 нм.

В момент воздействия ИИ зафиксировано уменьшение средневзвешенной длины волны λ_m . Относительное ее отклонение от значения до воздействия составило не более 1.5×10^{-4} при $T = 25^\circ\text{C}$ и не более 2.5×10^{-4} при $T = -60^\circ\text{C}$. И уже через 1 с после окончания воздействия изменение $\delta\lambda_m$ не превышало 0.6×10^{-4} при 25 °С и 0.8×10^{-4} при –60 °С.

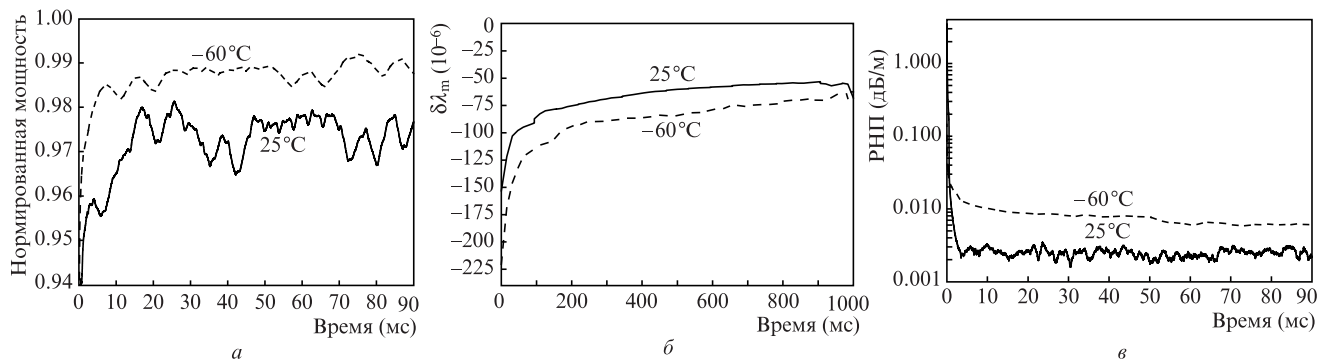


Рис.6. Эволюция выходной мощности (а), средневзвешенной длины волны СВЛ (б) и РНП (в) в образце В1 при температурах 25°C и -60°C.

5. Заключение

Установлено, что максимальной стойкостью к воздействию импульсного гамма-излучения из исследованных образцов обладает волокно $P_2O_5(Er/Ce)$. Однако ширина спектра выходного излучения СВЛ на таком волокне составляет ~ 2.3 нм, что не удовлетворяет требованию со стороны ВОГ к спектру излучения СВЛ [21]. Максимальная дифференциальная эффективность и ширина спектра выходного излучения СВЛ получены в образцах световодов с высоким содержанием оксида алюминия $Al_2O_3(Er/Ce)$. К сожалению, такие образцы продемонстрировали самую низкую стойкость к импульсному гамма-излучению.

Оптимальным волокном для использования в стойком к гамма-излучению СВЛ является волокно, легированное оксидами алюминия, германия и церия. Подбор оптимального соотношения элементного состава кварцевого стекла сердцевины волокна позволил получить образцы с высокой радиационной стойкостью и широким спектром излучения ионов эрбия. При воздействии на эрбиевые световоды состава $Al_2O_3-GeO_2(Er/Ce)$ (образец В1) импульсного гамма-излучения зафиксировано скачкообразное уменьшение оптической мощности СВЛ на 10%–12% при $T = 25^\circ C$ и на 5% при $T = -60^\circ C$. РНП через 0.1 с после воздействия составили при $T = -60^\circ C$ 0.006 дБ/м, а при $T = 25^\circ C$ 0.003 дБ/м. Максимальное изменение средневзвешенной длины волны не превышало 2.5×10^{-4} .

Авторы выражают благодарность А.Л.Томашуку (НЦВО РАН) за полезные обсуждения и ценные замечания, Н.В.Завьялову и А.В.Силаеву («РФЯЦ-ВНИИЭФ») за помощь в организации проведения исследований на линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-30.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Пермской научно-производственной приборостроительной компании, а также при поддержке Минобрнауки (проекты № АААА-А19-119011690112-0 и АААА-А19-119012590263-7).

1. Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Козлов В.Н., Власов А.А., Никитенко А.Н. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **16** (4), 593 (2016).
2. Faussot N., Cottreau Y., Hardy G., Simonpietri P., Gaiffe T. *Proc. SPIE*, **10569**, 105690S (2017).
3. Korkishko Y.N., Fedorov V.A., Prilutskiy V.E., Ponomarev V.G., Morev I.V., Obuhovich D.V., Kostritskii S.M., Zuev A.I., Varna-

- kov V.K., Belashenko A.V., Yakimov E.N., Titov G.V., Ovchinnikov A.V., Abdul'minov I.B., Latyntsev S.V. *Proc. IEEE Intern. Symp. on Inertial Sensors and Systems* (Laguna Beach, CA, USA, 2016, p.37).
4. Арбузов В.И. *Основы радиационного оптического материаловедения. Учебное пособие* (СПб: СПб ГУИТМО, 2008).
5. Томашук А.Л., Дворецкий Д.А., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Салганский М.Ю., Кашайкин П.Ф., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение*, **5**, 111 (2016).
6. Li M., Song N., Jin J., Wang X. *Optik-Intern. J. Light and Electron. Optics*, **123** (17), 1542 (2012).
7. Girard S., Ouedane Y., Pinsard E., Laurent A., Ladaci A., Robin T., Cadier B., Mescia L., Boukenter A. *Proc. SPIE*, **10563**, 105632B (2017).
8. Yang Y., Suo X., Yang M. *Proc. SPIE*, 89240W (2013).
9. Peng T.S., Wang L.A., Liu R. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23** (20), 1460 (2011).
10. Liu C., Zhang L., Wu X., Ruan S. *Opt. Fiber Technol.*, **19** (5), 456 (2013).
11. Yang Y., Suo X., Yang M., Shi X., Jin W. *Proc. SPIE*, **7753**, 775364 (2011).
12. Yuan-Hong Y., Xin-Xin S., Wei Y. *Chin. Phys. B.*, **23** (9), ID 094213 (2014).
13. Jing J. et al. *Chin. Phys. B*, **21** (9), ID 094220 (2012).
14. Tomashuk A.L., Filippov A., Kashaykin P.F., Bychkova E.A., Galanova S.V., Tatsenko O.M., Kuzyakina N.S., Zverev O.V., Salgansky M.Yu., Abramov A.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **37** (3), 956 (2019).
15. Greenwell R.A. *Opt. Eng.*, **30** (6), 802 (1991).
16. Tomashuk A.L., Filippov A.V., Moiseenko A.N., Bychkova E.A., Tatsenko O.M., Zavialov N.V., Grunin A.V., Batova E.T., Salgansky M.Yu., Kashaykin P.F., Azanova I.S., Tsibinogina M.K., Levchenko A.E., Guryanov A.N., Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **35** (11), 2143 (2017).
17. Girard S., Baggio J., Bisutti J. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **53** (6), 3750 (2006).
18. Бабич Л.П., Донской Е.Н., Кузык И.М. *ЖЭТФ*, **134** (1), 65 (2008).
19. Zotov K.V., Likhachev M.E., Tomashuk A.L., Kosolapov A.F., Bubnov M.M., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20** (17), 1476 (2008).
20. Yan Li, Yanfeng Sun, Man Jiang. *Optik-Intern. J. Light and Electron. Optics*, **125** (14), 3718 (2014).
21. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y., Shaw H.J. *J. Lightwave Technol.*, **12** (3), 550 (1994).
22. Pavlovskij A.I., Bossamykin V.S., Gerasimov A.I., et.al. *ИТЭ*, **41** (2), 13 (1998).
23. Миронов Н.К., Горноста́й-Польский С.А., Грунин А.В., Зайялов А.Н., Лазарев С.А. *Международ. науч. конф. «XIV Харитоновские чтения»* (Саров, 2012, с.160).
24. Rose T.S., Gunn D., Valley C.G. *J. Lightwave Technol.*, **19** (12), 1918 (2001).
25. Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Tomashuk A.L. *Sov. Lightwave Commun.*, **2** (4), 311 (1992).