

УДК 681.586.5

**А.В. Достовалов¹, В.А. Симонов¹, К.А. Окотруб¹,
А.А. Вольф¹, И.Н. Немов¹, М.И. Скворцов¹, М.В. Коробейников²,
А.А. Брызгин², М.А. Михайленко², С.А. Бабин¹**

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ β -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ, ЗАПИСАННЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Представлены результаты исследований воздействия β -излучения с суммарной дозой до 70 МГр на спектральные характеристики ВБР, записанные в германосиликатных световодах и световодах с чисто кварцевой сердцевиной. Измерены спектры комбинационного рассеяния света (КРС) от ВБР до и после воздействия ионизирующего излучения. Показано, что высокоотражающие ВБР (тип II), записанные в световодах с чисто кварцевой сердцевиной фемтосекундными лазерными импульсами, имеют минимальный сдвиг длины волны 60 пм, тогда как ВБР, записанные УФ-излучением показали максимальный сдвиг длины волны 233 пм. По этим причинам ВБР, записанные фс-лазерным излучением в световодах с чисто кварцевой сердцевиной являются перспективными для создания долговременных радиационно-стойких волоконно-оптических датчиков.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, волоконно-оптические датчики, радиационно-наведенный сдвиг длины волны ВБР.

**A.V. Dostovalov¹, V.A. Simonov¹, K.A. Okotrub¹, A.A. Wolf¹,
I.N. Nemov¹, M.I. Skvortsov¹, M.V. Korobeynikov², A.A. Bryazgin²,
M.A. Mikhailenko², S.A. Babin¹**

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia,

²Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

INVESTIGATION OF β -RADIATION INFLUENCE ON FIBER BRAGG GRATINGS INSCRIBED BY FEMTOSECOND LASER RADIATION

The paper presents the results of investigation of ionizing β -radiation with total dose up to 70 MGy influence on spectral properties of FBGs inscribed in germanosilicate and pure silica core fibers. The spectra of Raman scattering from FBGs were measured before and after exposure to ionizing radiation. It is shown, that highly reflective FBGs (type II), inscribed in fibers with pure silica core by femtosecond laser pulses exhibit minimal wavelength shift of 60 pm, while FBGs inscribed by UV-radiation exhibit maximal wavelength shift of 233 pm. For this reason, FBGs inscribed by fs laser radiation in fibers with pure silica core are promising for developing of long-term radiation-resistant fiber-optic sensors.

Keywords: Fiber Bragg gratings, fiber-optic sensors, radiation-induced FBG wavelength shift.

Введение

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) широко используются для создания волоконных сенсорных систем для измерения различных физических параметров, в том числе для эксплуатации в жестких внешних условиях: высокие температуры, химически агрессивные среды, присутствие ионизирующего излучения. Использование датчиков ВБР на основе германо-силикатных световодов в средах с повышенным радиационным фоном приводит к поглощению света из-за радиационно-наведенных потерь и радиационно-наведенному сдвигу длины волны отражения ВБР, которые препятствуют длительной работе датчиков ВБР и влияют на точность измерений. Так, в частности, было показано, что резонансная длина волны ВБР изменяется на величину до 100 пм при воздействии гамма-излучения вследствие разрыва ОН связей, которые формируются в структуре стекла после записи ВБР в волокне, предварительно подвергнутом насыщению сетки стекла молекулярным водородом для увеличения фоточувствительности к УФ-излучению. Более того, оптические потери, возникающие на участке, подвергнутом воздействию радиации, ограничивают срок службы датчика на основе ВБР. В работе [1] было показано, что высокую стойкость к воздействию радиации проявляют волоконно-оптические световоды с чисто кварцевой и фторсодержащей сердцевиной. Однако нефоточувствительность этих световодов к УФ лазерному излучению не позволяет записывать в них ВБР традиционными методами. В то же время технология фемтосекундной лазерной модификации показателя преломления применима и к нефоточувствительным световодам, поэтому позволяет записывать ВБР в световоде с чисто кварцевой сердцевиной, что было показано в работе [2]. В настоящее время волоконно-оптические датчики на основе ВБР активно применяются в ускорителях заряженных частиц, например в CERN [3]. На реакторе РБМК-1000 был исследован результат комбинированного воздействия гамма-излучения и радиолитического водорода на ВБР, записанные УФ лазерным излучением в оптических волокнах с примесью германия и азота [4]. Также на исследовательском ядерном реакторе Массачусетского технологического университета были проведены эксперименты по изучению комбинированного воздействия быстрых нейтронов (энергия > 1 МэВ) и высоких температур (> 600 °С) на волоконные световоды со специализированной оболочкой, состоящей из случайно расположенных дефектов [5].

Несмотря на то, что влияние гамма-излучения, а также быстрых нейтронов, возникающих при работе ядерных реакторов, на спектральные характеристики ВБР детально изучены, влияние β -излучения (высокоэнергетичных электронов с энергией ~ 1 МэВ) на оптические световоды и записанные ВБР в них недостаточно исследовано на данный момент.

В данной работе представлены результаты по исследованию воздействия бета-излучения (суммарная доза до 70 МГр, скорость набора дозы 2,5 кГр/с) на спектральные характеристики ВБР, записанные с использованием фемтосекундного ИК и непрерывного УФ лазерного излучения в световодах с чисто кварцевой сердцевиной и германо-силикатных световодах. Измерены спектры комбинационного рассеяния света (КРС) от ВБР до и после воздействия.

1. Методы и подходы

Образцы ВБР были созданы в световодах с чисто кварцевой сердцевиной (Fibercore SM1500(9/125)SC) и германо-силикатных световодах (Fibercore SM1500(9/125)P) с помощью поточечного метода записи фемтосекундным лазерным излучением (длина волны 1026 нм, длительность импульсов 230 фс) с протяжкой световода через ферулу, при котором каждый штрих решетки создается одним лазерным импульсом, сфокусированным микрообъективом в сердцевину световода [6]. При этом сам световод перемещался через точку фокусировки с постоянной скоростью высокоточным линейным позиционером при фиксированной частоте следования лазерных импульсов (1 кГц). Запись ВБР осуществлялась без удаления защитного полиимидного покрытия, что сохраняет прочностные характеристики оптического волокна. При этом необходимо отметить, что запись в световодах с чисто кварцевой сердцевиной возможна только с использованием фемтосекундного лазерного излучения, поскольку данные световоды не фоточувствительны к УФ-излучению, которое традиционно используется для записи ВБР в фоточувствительных световодах. Запись ВБР была осуществлена в различных режимах модификации материала: в режиме плавного изменения показателя преломления при сравнительно небольших энергиях фемтосекундных лазерных импульсов 100 нДж и в режиме с большей энергией импульсов 300 нДж, при котором в материале происходит образование микропустот и локальных напряжений, что

увеличивает эффективное значение модуляции показателя преломления. При этом в первом случае ВБР имеют низкий коэффициент отражения ($R = 10...20\%$), и их обозначают как ВБР типа I (LR), во втором случае ВБР имеют высокий коэффициент отражения ($R > 95\%$) и обозначаются как тип II (HR). Также для сравнения результатов воздействия β -излучения на спектральные характеристики ВБР были созданы образцы ВБР типа II с помощью УФ-излучения в германосиликатном световоде SMF-28, запись в котором осуществлялась с удалением защитного пластикового покрытия.

Спектры ВБР после записи были измерены с помощью оптической схемы, представленной на рис. 1. Измерение пропускания производилось с помощью суперлюминесцентного диода (СЛД), излучение которого проходило через волоконный поляризатор для выделения одной поляризации, выход которого приварен к контроллеру поляризации с волокном SMF-28е. Спектр прошедшего через ВБР излучения регистрировался с помощью оптического анализатора спектров (ОСА, Yokogawa AQ6370). Поскольку ВБР, записанная с помощью поточенной технологии записи, имеет двулучепреломление [7], то спектры отражения будут зависеть от направления поляризации падающего излучения. Контроллер поляризации настраивался таким образом, что спектр пропускания решетки принимал крайние положения, при которых положение поляризации излучения совпадает с собственными поляризационными осями ВБР. Волокно от контроллера поляризации до ВБР укладывалось с минимально возможными изгибами. Спектры пропускания измерялись до и после воздействия β -излучения на ВБР (рис. 1).

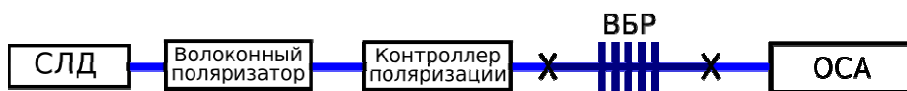


Рис. 1. Оптическая схема измерения спектров пропускания ВБР

Далее были проведены эксперименты по исследованию влияния воздействия β -излучения на спектральные характеристики созданных ВБР. Исследования проводились на импульсном линейном ускорителе «Ускоритель ИЛУ-6» Института ядерной физики СО РАН, который позволяет получать пучок электронов с максимальной энергией 2,5 МэВ в импульсном режиме с длительностью одного импульса 0,5 мс при максимальной частоте следования импульсов 15,5 Гц, что

соответствует скорости набора дозы 2,5 кГр/с. Электронный пучок выводился из вакуумного объема в атмосферу через выпускное окно, закрытое титановой фольгой толщиной 50 мкм, после которого были размещены созданные ВБР в центральной зоне воздействия β -излучения, закрепленные между двумя металлическими брусками, которые препятствовали смещению ВБР в процессе воздействия β -излучения (рис. 2). Облучение ВБР проходило в течение 50 ч, что соответствует суммарной величине дозы β -излучения 70 МГр.



Рис. 2. Схема расположения ВБР в процессе воздействия β -излучения: вид сбоку (а), вид спереди (б)

Для характеристики участвующих в эксперименте волокон методом спектроскопии КРС использовался микроскопный стенд, состоящий из твердотельного лазера, излучающего на длине волны 532,1 нм (Excelsior, Spectra-Physics), микроскопа (Orthoplan, Leitz) и спектрометра (SP2500i, Princeton Instruments). Излучение мощностью ~ 20 Вт/м фокусировалось на образец микрообъективом с числовой апертурой 0,75 (PL FLUOTAR L; Leica Microsystems). Измерения проводились в геометрии рассеяния назад, в режиме одномерного сканирования скола волокна без селекции по поляризации и ориентации волокна.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 3 и 4 представлены спектры пропускания для различных типов ВБР, записанных в световоде с чисто кварцевой сердцевиной и в германосиликатных световодах до и после облучения в обеих поляризациях. Смещение центральной длины волны ВБР после облучения

в длинноволновую область обнаружено у всех образцов. В случае сильной УФ-решетки в отличие от других образцов после облучения наблюдается существенное изменение амплитуды пропускания – с $-16,5$ до -10 дБ, что связано с деградацией ВБР в процессе воздействия β -излучения. В таблице приведены значения смещения длины волны ВБР после облучения, усредненные по 3 ВБР каждого типа, для разных типов записи и разных поляризаций. Сильная УФ ВБР имеет наибольшее смещение (233 пм). ФС ВБР, записанные в световоде с чисто кварцевой сердцевиной и в германосиликатных световодах, близки по величинам смещения (таблица), но для сильных разница больше (60 пм в кварцевом против 84 пм в германиевом), чем для слабых (66 пм для кварцевого и 71 пм для германиевого).

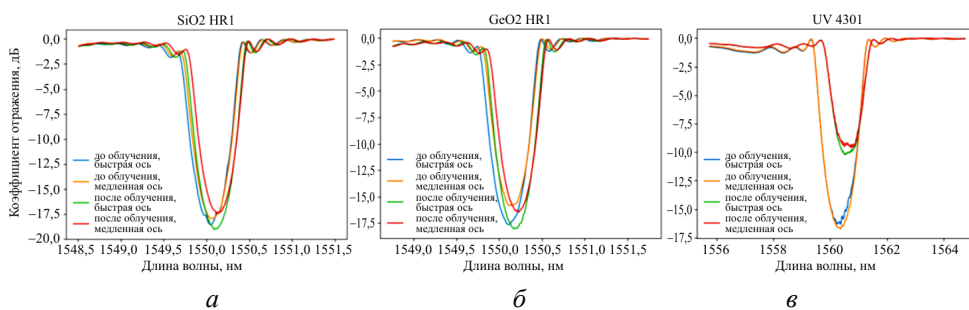


Рис. 3. Спектры пропускания ВБР для разных поляризаций до (голубой и оранжевый) и после (зеленый и красный) облучения: *а* – сильная ФС в световоде с чисто кварцевой сердцевиной; *б* – сильная ФС в германосиликатном световоде; *в* – сильная УФ в германосиликатном световоде

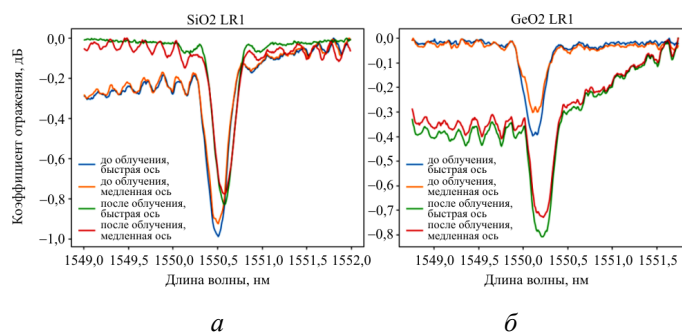


Рис. 4. Спектры пропускания ВБР для разных поляризаций до (голубой и оранжевый) и после (зеленый и красный) облучения: *а* – слабая ФС в световоде с чисто кварцевой сердцевиной; *б* – слабая ФС в германосиликатном световоде

Изменение длин волн при воздействии β -излучения
для различных типов световодов и ВБР

Тип ВБР	Смещение длины волны для быстрой оси, нм	Смещение длины волны для медленной оси, нм	Среднее смещение длины, нм
GeO2 HR	0,083	0,084	0,084
SiO2 HR	0,060	0,060	0,060
GeO2 LR	0,071	0,071	0,071
SiO2 LR	0,067	0,065	0,066
UV HR	0,238	0,228	0,233

С целью исследования механизмов наведенного спектрального смещения резонансных длин волн ВБР были проведены измерения спектров КРС от различных оптических волокон и ВБР до и после воздействия β -излучения. Были измерены КРС спектры от обоих образцов оптических волокон без ВБР: с чисто кварцевой сердцевиной и германосиликатного световода.

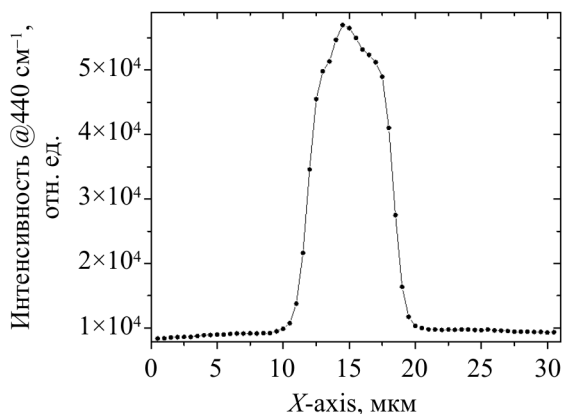


Рис. 5. Профиль интенсивности полосы SiO₂ в случае волокна Fibercore SM1500(9/125)SC

На рис. 5 показана зависимость интенсивности КРС от SiO₂ в зависимости от координаты. При значении $X \approx 10 \dots 20$ мкм, соответствующем сердцевине световода, наблюдается увеличение интенсивности КРС в ~ 5 раз. Увеличение интенсивности сигнала КРС связано с распространением части излучения по сердцевине световода, что подтверждается наблюдением излучения на обратном торце световода. Спектры, измеренные от разных областей (оболочка, сердце-

вина), были усреднены. На рис. 6 показаны усредненные спектры, приведенные к одному масштабу нормировкой по пику деформационного колебания Si-O-Si, $\delta(\text{Si-O-Si})$, (на $\sim 800 \text{ см}^{-1}$) [8]. Для обоих типов световодов наблюдается заметный вклад фотолуминесценции, интенсивность которой для оболочки была выше, чем для сердцевинны. В случае световода с чисто кварцевой сердцевинной различия между сердцевинной и оболочкой незначительны. Для германосиликатного световода можно выделить несколько отличий в спектрах. Во-первых, при нормировке на $\delta(\text{Si-O-Si})$ -колебания наблюдается возрастание интенсивности пика, связанное с примесью Ge. При этом интенсивности мод, соответствующих $3x$, D1(Si) и $4x$, D2(Si) сегментным кольцам SiO_2 , остаются пропорциональны интенсивности $\delta(\text{Si-O-Si})$ [9, 10]. Во-вторых, наблюдается сдвиг в сторону более низких частот пиков D1(Si) и D2(Si). Первый пик при переходе с оболочки в волокно сдвигается с 493 на 491 см^{-1} , D2(Si) сдвигается с 604 на 601 см^{-1} . Частотный сдвиг в сторону низких частот можно объяснить увеличением приведенной массы колец за счет вклада Ge. В-третьих, из разностного спектра видно, что в спектре волокна присутствуют дополнительные широкие максимумы на ~ 690 , ~ 1000 , $\sim 1120 \text{ см}^{-1}$, соответствующие колебаниям Ge-O-Si-связей. При этом в спектре КРС от сердцевинны не наблюдаются линии D1(Ge) на 347 см^{-1} , D2(Ge) на 520 см^{-1} , соответствующие GeO_2 [10], что указывает на относительно невысокую концентрацию Ge.

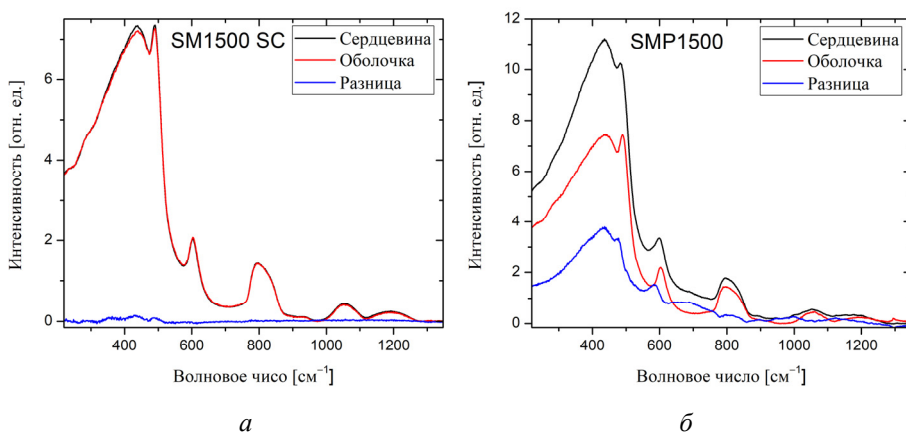


Рис. 6. Усредненные спектры КРС, полученные для световода с чисто кварцевой сердцевинной (а), и для германосиликатного световода (б)

Далее были измерены КРС от ВБР до и после облучения. Для некоторых оптических волокон с брэгговскими решетками в профиле интенсивности сигнала КРС наблюдается провал в центральной области сердцевины волокна, вероятно, связанный с областью модификации показателя преломления ВБР. Были выделены спектры КРС от оболочек, сердцевины и областей, которые были отнесены к областям модификации показателя преломления в записанных ВБР (рис. 7, 8).

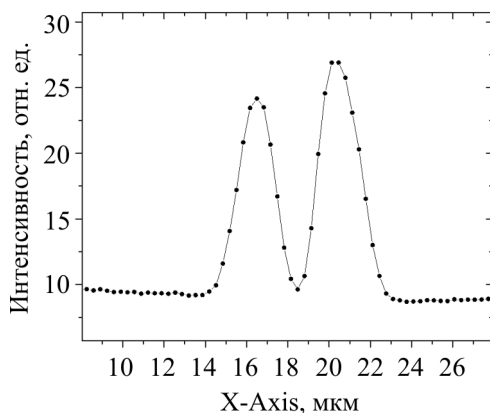


Рис. 7. Пример профиля интенсивности необлученной полосы волокна SiO_2 с брэгговской решеткой

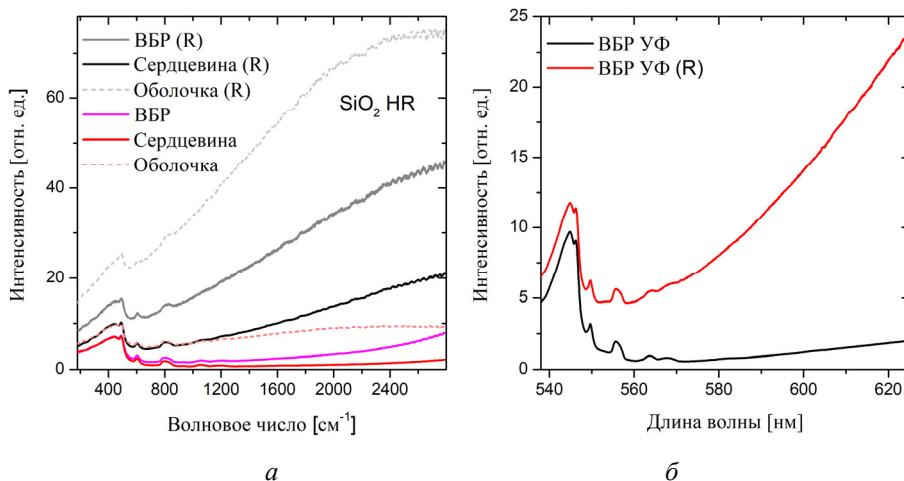


Рис. 8. Спектры, измеренные от волокон SiO_2 с высокоотражающими ВБР; спектры нормированы на $\delta(\text{Si-O-Si})$ -моду ($\sim 800 \text{ см}^{-1}$) (а); спектры, измеренные от сердцевины Ge-допированных волокон с UV записанными ВБР; спектры нормированы на $\delta(\text{Si-O-Si})$ -моду (б); пометкой (R) отмечены спектры волокна после воздействия β -излучения

Наиболее значимые различия между разными областями заключаются в отношении фотолюминесценции к сигналу КРС. При фокусировке в сердцевину излучение распространяется по всей длине световода, что приводит к увеличению объема, от которого собирается рассеянное излучение и уменьшению соотношения интенсивностей между фотолюминесценцией и КРС. Наиболее высокий уровень фотолюминесценции был обнаружен в спектрах, измеренных от оболочек. При этом для всех типов волокон и решеток после радиационного воздействия наблюдается возрастание фотолюминесценции в спектральном диапазоне от 580 до 620 нм (см. рис. 8, 9). При нормировке фотолюминесценции на сигнал КРС видно, что интенсивность фотолюминесценции после облучения возрастает приблизительно на порядок. При этом модифицирование световодов не привело к значимым изменениям линий КРС.

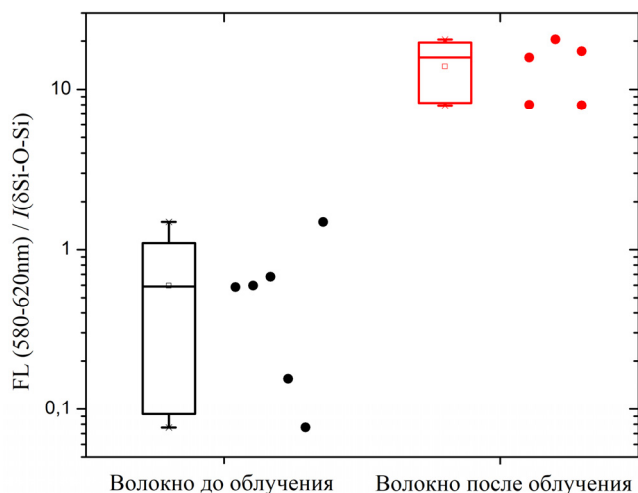


Рис. 9. Отношение интегральной интенсивности флуоресценции (в диапазоне 580–620 нм) к интенсивности линии $\delta(\text{Si-O-Si})$ в измеренных спектрах; черные круги соответствуют спектрам, измеренным от световодов, которые не облучались, красные круги соответствуют оптическим волокнам после облучения

Высокий радиационный фон модифицирует оптические свойства материалов, в том числе приводит к возникновению дополнительных полос поглощения [11]. При облучении формируются новые центры поглощения, которые могут иметь излучательные каналы релаксации. Наблюдаемая фотолюминесценция свидетельствует о формировании таких центров. С учетом того, что спектры фотолюминесценции достаточно похожи для разных типов оптические волокна, вероятно, наблюдаемые

люминесцентные центры связаны с SiO_2 и сопутствующими примесями. Поглощение на 532 нм может быть связано с СТН-центрами, примесными включениями хлора или с двухфотонным поглощением на центрах, поглощающих в УФ-диапазоне [11, 12]. Ни один тип дефектов не подходит в качестве источников наблюдаемой фотолюминесценции. Центры СТН считаются слишком короткоживущими, концентрация включений хлора не должна меняться при облучении, а интенсивность возбуждающего излучения в эксперименте мала для нелинейного поглощения. Таким образом можно ожидать что источником фотолюминесценции могут быть центры, ранее не описанные в научной литературе, либо из-за высокой концентрации дефектов происходит достаточно эффективное поглощение даже вдали от максимумов поглощения.

Выводы

В результате исследований спектров пропускания ВБР, записанных в световодах с чисто кварцевой и германосиликатной сердцевиной фемтосекундными ИК и непрерывным УФ-излучением до и после воздействия β -излучения со скоростью набора дозы 2,5 кГр/с и общей дозой 70 МГр, показано, что высокоотражающие ВБР (тип II), записанные в световодах с чисто кварцевой сердцевиной фемтосекундными лазерными импульсами, имеют минимальный сдвиг длины волны 60 пм, тогда как ВБР, записанные УФ-излучением, показали максимальный сдвиг длины волны 233 пм. По этим причинам ВБР, записанные фемтосекундными лазерным излучением в световодах с чисто кварцевой сердцевиной, являются перспективными для создания долговременных радиационно-стойких волоконно-оптических датчиков. В случае германосиликатных световодов измеренные значения сдвига длины волны как для ВБР с низким, так и с высоким коэффициентом отражения при одинаковых условиях воздействия β -излучения находятся в диапазоне 71–84 пм, что совпадает с типичным поведением данной величины, наблюдаемым в случае использования γ -излучения для данного типа световодов. Для облученных оптических волокон наблюдается рост фотолюминесценции по сравнению с интенсивностью линий КРС, свидетельствующий о том, что β -излучение ведет к формированию фотолюминесцентных центров с поглощением на 532 нм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и правительства Новосибирской области (проект 19-42-543015).

Список литературы

1. Optical Absorption in Commercial Single Mode Optical Fibers in a High Energy Physics Radiation Field / T. Wijnands, L.K. De Jonge, J. Kuhnenn, S.K. Hoeffgen, U. Weinand // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2008. – 55. – P. 2216–2222.
2. Radiation sensitivity of Bragg gratings written with femtosecond IR lasers / D. Grobncic, H. Henschel, S.K. Hoeffgen, J. Kuhnenn, S.J. Mihailov, U. Weinand // *Proc. of SPIE*; eds. Udd, H.H. Du, and A. Wang. – 2009. – Vol. 7316. – P. 73160C–73160C–9.
3. Sensors and Actuators B : Chemical Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated fiber Bragg gratings sensors / G. Berruti, M. Consales, M. Giordano, L. Sansone, P. Petagna, S. Buontempo, G. Breglio, A. Cusano // *Sensors Actuators B. Chem.* – 2013. – 177. – P. 94–102.
4. Fiber Bragg gratings in the radiation environment: Change under the influence of radiolytic hydrogen / O.V Butov, K.M. Golant, I.A. Shevtsov, A.N. Fedorov // *J. Appl. Phys.* – 2015. – 118.
5. Radiation resilient fiber Bragg grating sensors for sensing applications in nuclear reactor cores / K.P. Chen, M. Zaghoul, M. Wang, S. Huang, M. Li, S. Mihailov, D. Carpenter, J. Dow, D. Grobncic, C. Hnatovsky, L.-W. Hu // *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Optical Sensors and Applications* / eds. L. Dong, X. Zhang, H. Xiao, F.J. Arregui, eds. SPIE. – 2018. – P. 132.
6. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule / A.V. Dostovalov, A.A. Wolf, A.V. Parygin, V.E. Zyubin, S.A. Babin // *Opt. Express.* – 2016. – 24. – P. 16232–16237.
7. Point-by-point inscription of first-order fiber Bragg grating for C-band applications / Y. Lai, K. Zhou, K. Sugden, I. Bennion // *Opt. Express.* – 2007. – 15. – P. 18318–18325.
8. Малиновский В.К., Новиков В.Н., Суровцев Н.В. Изучение аморфных состояний SiO₂ методом комбинационного рпассеяния света // *Физика твердого тела.* – 2002. – 42. – P. 62–68.
9. Raman study of the structure of glasses along the join SiO₂GeO₂ / S.K. Sharma, D.W. Matson, J.A. Philpotts, T.L. Roush // *J. Non. Cryst. Solids.* – 1984. – 68. – P. 99–114.
10. The structure of GeO₂-SiO₂ glasses and melts: A Raman spectroscopy study / G.S. Henderson, D.R. Neuville, B. Cochain, L. Cormier // *J. Non. Cryst. Solids.* – 2009. – 355. – P. 468–474.
11. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers : Recent Advances and Future Challenges / S. Girard, S. Member, J. Kuhnenn, A. Gusarov,

B. Brichard, M. Van Uffelen, S. Member, Y. Ouerdane, A. Boukenter, C. Marcandella // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2013. – 60. – 2015–2036.

12. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers / S. Girard, A. Alessi, N. Richard, L. Martin-Samos, V. De Michele, L. Giacomazzi, S. Agnello, D. Di Francesca, A. Morana, B. Winkler, I. Reghioua, P. Paillet, M. Cannas, T. Robin, A. Boukenter, Y. Ouerdane // *Rev. Phys.* – 2019. – 4. – 100032.

References

1. Wijnands T., Jonge De L.K., Kuhnenn J., Hoeffgen S.K., Weinand U. Optical Absorption in Commercial Single Mode Optical Fibers in a High Energy Physics Radiation Field. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, 55, pp. 2216-2222.

2. Grobnc D., Henschel H., Hoeffgen S.K., Kuhnenn J., Mihailov S.J., Weinand U. Radiation sensitivity of Bragg gratings written with femtosecond IR lasers. *Proc. of SPIE*, eds. E. Udd, H.H. Du, A. Wang, 2009, vol. 7316, pp. 73160C-73160C-9.

3. Berruti G., Consales M., Giordano M., Sansone L., Petagna P., Buontempo S., Breglio G., Cusano A. Sensors and Actuators B : Chemical Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated fiber Bragg gratings sensors. *Sensors Actuators B. Chem.*, 2013, 177, pp. 94-102.

4. Butov O.V, Golant K.M., Shevtsov I.A., Fedorov A.N. Fiber Bragg gratings in the radiation environment: Change under the influence of radiolytic hydrogen. *J. Appl. Phys.*, 2015, 118.

5. Chen K.P., Zaghloul M., Wang M., Huang S., Li M., Mihailov S., Carpenter D., Dow J., Grobnc D., Hnatovsky C., Hu L.-W. Radiation resilient fiber Bragg grating sensors for sensing applications in nuclear reactor cores. *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Optical Sensors and Applications*, eds. L. Dong, X. Zhang, H. Xiao, F.J. Arregui, eds. SPIE, 2018, 132 p.

6. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule. *Opt. Express*, 2016, 24, pp. 16232-16237.

7. Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennion I. Point-by-point inscription of first-order fiber Bragg grating for C-band applications. *Opt. Express*, 2007, 15, pp. 18318-18325.

8. Malinovskii V.K., Novikov V.N., Surovtsev N.V. Izuchenie amorfnykh sostoianii SiO₂ metodom kombinatsionnogo rasseianiia sveta

[Study of amorphous states SiO₂ by combination light scattering]. *Fizika tverdogo tela*, 2002, 42, pp. 62-68.

9. Sharma S.K., Matson D.W., Philpotts J.A., Roush T.L. Raman study of the structure of glasses along the join SiO₂GeO₂. *J. Non. Cryst. Solids*, 1984, 68, pp. 99-114.

10. Henderson G.S., Neuville D.R., Cochain B., Cormier L. The structure of GeO₂-SiO₂ glasses and melts: A Raman spectroscopy study. *J. Non. Cryst. Solids*, 2009, 355, pp. 468-474.

11. Girard S., Member S., Kuhnhen J., Gusarov A., Brichard B., Uffelen Van M., Member S., Ouerdane Y., Boukenter A., Marcandella C. Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers : Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2013, 60, pp. 2015-2036.

12. Girard S., Alessi A., Richard N., Martin-Samos L., Michele De V., Giacomazzi L., Agnello S., Francesca D.D., Morana A., Winkler B., Reghioua I., Paillet P., Cannas M., Robin T., Boukenter A., Ouerdane Y. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers. *Rev. Phys.*, 2019, 4, 100032 p.

Получено 01.09.2021