

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК

Достовалов А.В.¹, Вольф А.В.¹, Симонов В.А.¹, Коробейников М.В.^{2,4},
Брызгин А.А.², Кашайкин П.Ф.³, Михайленко М.А.^{2,4}, Бабин С.А.¹

¹Институт Автоматики и Электрометрии СО РАН
(Проспект Академика Коптюга, 1, Новосибирск 630090, Россия)

²Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН
(Проспект Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск 630090, Россия,
e-mail: M.V.Korobeynikov@inp.nsk.su)

³Научный центр волоконной оптики (119991, Москва, Россия)

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
(630128 Новосибирск, Россия, ул. Кутателадзе, 18)

Аннотация

В работе представлены результаты по исследованию воздействия интенсивного электронного пучка (скорость набора дозы 2,5 кГр/с, суммарная доза до 41,1 МГр) на спектральные характеристики волоконных брэгговских решеток (ВБР) с различным коэффициентом отражения, записанных с использованием фемтосекундного лазерного излучения в световодах с германосиликатной и чисто кварцевой сердцевиной с полиимидным и металлическим покрытием. Наибольший сдвиг длины волны отражения ВБР, составляющий +55 пм, наблюдается в случае слабоотражающей ВБР (тип I), записанной в германосиликатном световоде. Сравнимое смещение длины волны +50 пм наблюдается в случае высокоотражающей ВБР (тип II), что объясняется увеличением концентрации GeE'-центров и, соответственно, увеличением эффективного показателя преломления. Кроме того, значительно меньшее смещение длины волны, равное -10 пм, было получено в случае высоко-отражающих ВБР, записанных в световодах с чисто кварцевой сердцевиной.

Ключевые слова: Волоконные брэгговские решетки, радиационно-наведенный сдвиг длины волны, радиационно-наведенные потери.

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 германосиликатных 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. Эти эффекты могут быть сведены к минимуму при использовании специализированных радиационно-стойких световодов с чисто кварцевой сердцевиной. Однако данный тип световодов не являются светочувствительным для УФ-излучения, которое традиционно используется для записи ВБР. Однако, технология записи ВБР, основанная на фемтосекундном лазерном излучении, является перспективной в этом случае, поскольку позволяет записывать ВБР в нефоточувствительных световодах.

Несмотря на то, что влияние гамма-излучения [1], а также быстрых нейтронов, возникающих при работе ядерных реакторов [2], на спектральные характеристики ВБР детально изучены, влияние бета-излучения (высокоэнергетичных электронов с энергией свыше 1 МэВ) на оптические световоды и записанные ВБР в них недостаточно исследовано на данный момент.

В данной работе представлены результаты по исследованию воздействия интенсивного электронного пучка на спектральные характеристики ВБР, записанных с использованием фемтосекундного лазерного излучения в световодах с металлическим покрытием (от НЦВО РАН) и полиимидным покрытием (от Fibercore LTD) с чисто-кварцевой сердцевиной и германосиликатных световодах. Электронный пучок генерировался мощным импульсным линейным ускорителем электронов типа ИЛУ-6 [3]. Скорость набора дозы была выбрана равной 2,5 кГр/с, максимальная поглощённая доза была 30,9 МГр для световода с полиимидным покрытием и 41,1 МГр для световода с металлическим покрытием. Исследовано влияние на спектральные характеристики ВБР предварительной (до обработки электронным пучком) термической обработки с температурой до 300°C в случае полиимидного покрытия и до 450°C для волокон с алюминиевым и медным покрытием.

Сдвиг длины волны отражения ВБР примерно на 50-55 пм наблюдается в обоих случаях: ВБР типа I и типа II, записанных в германосиликатных световодах с полиимидным покрытием при воздействии пучка электронов с общей дозой 30,9 МГр. Высокоотражающие ВБР, записанные в световодах с чисто-кварцевой сердцевиной, имеют минимальные значения смещений резонансных длин волн около -10 пм. Наименьшее изменение пропускания (0,15 дБ) наблюдается для световодов с чисто-кварцевой сердцевиной, что открывает возможность для создания долговременных радиационно-стойких волоконно-оптических датчиков на их основе.

Результаты и обсуждение

Образцы ВБР были созданы 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 [3]. 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 покрытия (в случае волокна с полиимидным покрытием), что сохраняет прочностные характеристики волокна. При этом необходимо отметить, что запись в волокнах 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: 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, во втором случае ВБР имеют высокий коэффициент отражения ($R > 95\%$) и обозначаются как тип II. Металлическое защитное покрытие Al и Cu на участке записи ВБР было удалено с помощью водного раствора хлорного железа до записи, поскольку металлический слой непрозрачен для записываемого лазерного излучения. Перед проведением экспериментов по облучению записанные ВБР в волокнах с полиимидным покрытием они были подвергнуты температурному отжигу в течение 45 часов при температуре 300°C, а волокна с металлизированным покрытием были нагреты до 450°C чтобы минимизировать влияние тепловых процессов на изменения в структуре материала в результате воздействия ионизирующего излучения, поскольку в процессе радиационного воздействия происходит нагрев образцов.

Далее были проведены эксперименты по исследованию влияния воздействия электронного пучка на спектральные характеристики ВБР, записанных на первом этапе работ с использованием фемтосекундного лазерного излучения. Исследования созданных ВБР проводились на импульсном линейном ускорителе ИЛУ-6 [4] в Институте ядерной физики СО РАН, который позволяет генерировать и выводить в атмосферу импульсный пучок электронов с максимальной энергией 2.5 МэВ, максимальным импульсным током 400 мА и длительностью импульса 0,5 мс, рабочая частота повторения импульсов была выбрана равной 15,5 Гц, что соответствует скорости набора дозы 2,5 кГр/с. Электронный пучок выводится из вакуумного объёма в атмосферу вертикально вниз через выпускное окно длиной 980 мм, закрытое

титановой фольгой толщиной 50 мкм, под которым были размещены созданные ВБР, подключенные к устройству записи оптических спектров ВБР (8-канальный интеррогатор) с частотой опроса 0,25 Гц для непрерывного мониторинга изменений спектров ВБР в процессе облучения. На Рис. 1 показан вид световодов с нанесёнными ВБР закреплённых на дюралевой пластине под выпускным окном ускорителя в зоне воздействия электронного пучка. На Рис. 2 показана оптическая схема измерений спектров ВБР на основе 8-канального интеррогатора.

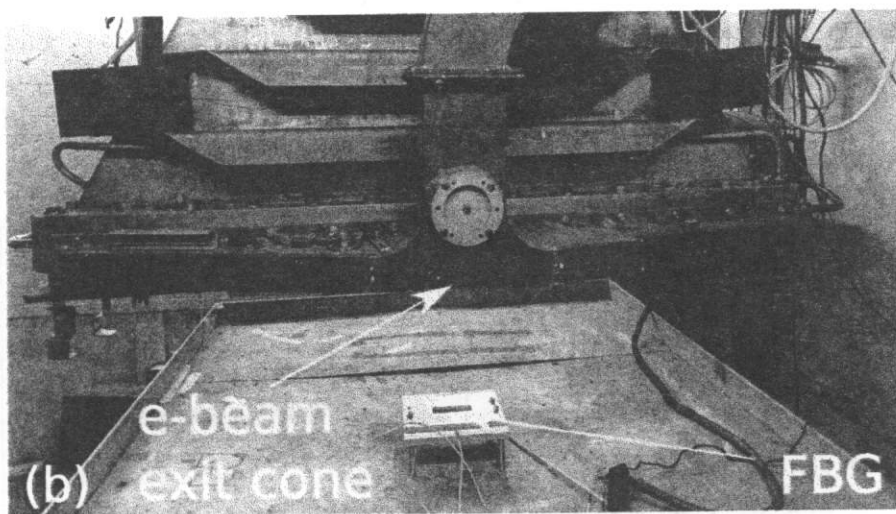


Рис 1. Вид световодов с ВБР на пластине в зоне воздействия электронного пучка

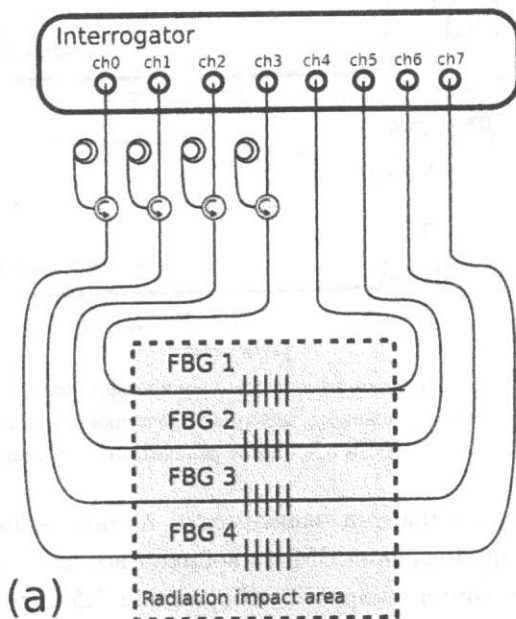


Рис 2. Оптическая схема измерений спектров ВБР на основе 8-канального интеррогатора

Для измерения спектров пропускания каждая ВБР была подключена к двум каналам интеррогатора. При этом на выходе первого канала был вставлен изолятор, который предотвращал прохождение зондирующего излучения до ВБР из первого канала и наоборот пропускал излучение, прошедшее через ВБР из второго канала. Согласно этой схеме, используя 2 канала интеррогатора возможно одновременно измерять спектры пропускания и отражения одной ВБР, а с помощью 8-ми каналов можно проводить одновременное измерение спектров 4 ВБР.

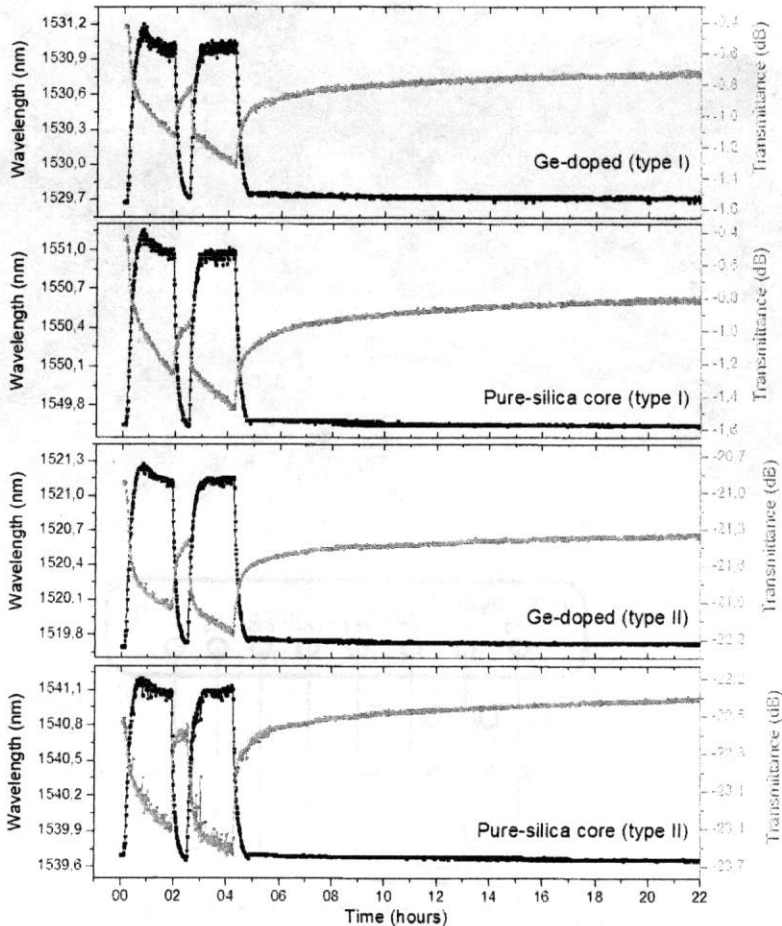


Рис 3. Зависимость длины волны отражения и коэффициента пропускания ВБР от времени воздействия интенсивного электронного пучка при постоянной скорости набора дозы 2,5 кГр/с и в процессе релаксации после воздействия

На Рис. 3 представлена зависимость длины волны отражения и коэффициента пропускания ВБР от времени воздействия электронного пучка при постоянной скорости набора дозы 2,5 кГр / с и в процессе релаксации после воздействия. Общее время воздействия электронного пучка составило 206 мин, что соответствует общей дозе 30,9 МГр и состоит из двух этапов по 103 мин и временного интервала (38 мин) без

воздействия. Затем в течение 17 часов были измерены параметры ВБР, которые показывают динамику релаксации центров окраски.

На начальном этапе облучения наблюдается резкое изменение длины волны на ≈ 150 пм, что объясняется повышением температуры металлической подложки с 24 до 180° С из-за поглощения электронного пучка. После воздействия излучения наблюдается смещение длины волны отражения вследствие охлаждения подложки до начальной температуры, при которой были измерены конечные спектры ВБР. Температура подложки контролировалась термопарами, расположенными рядом с ВБР. Было показано, что наибольший сдвиг длины волны отражения ВБР, вызванный воздействием ионизирующего излучения, равный +55 пм, наблюдается в случае слабо отражающей ВБР типа I, записанной в германосиликатном волокне (Табл. 1).

Таблица 1

Результаты спектральных изменений ВБР после обработки электронным пучком

№	Световод	Тип ВБР	R, %	λ , нм	$\Delta\lambda$, пм	ΔT , дБ
1	SM1500(9/125)P Германосиликатное волокно, полиимидное покрытие	Тип II	>95	1520	50	0,44 дБ
2	SM1500(9/125)P Германосиликатное волокно, полиимидное покрытие	Тип I	15	1530	55	0,3 дБ
3	SM1500SC(9/125)P Волокно с чисто кварцевой сердцевинной, полиимидное покрытие	Тип II	>95	1540	-10	0,15 дБ
4	SM1500SC(9/125)P Волокно с чисто кварцевой сердцевинной, полиимидное покрытие	Тип I	16	1550	20	0,36 дБ
5	FORC Cu-coated Волокно с чистокварцевой сердцевинной, медное покрытие	Тип II	>95	1560	-35	-
6	FORC Al-coated Волокно с чисто- кварцевой сердцевинной, алюминиевое покрытие	Тип II	>95	1570	-20	-

Сравнимый сдвиг в длине волны + 50 пм наблюдается в случае высокоотражающей ВБР типа II, записанной в этом же волокне. Это смещение длины волны в длинноволновую область наблюдалось также в других работах в случае воздействия γ -излучения на ВБР [5], записанных в германосиликатном волокне, что объясняется увеличением концентрации GeE'-центров и, соответственно, увеличением эффективного показателя преломления. Кроме того, значительно меньшее смещение резонансной длины волны отражения было получено в случае ВБР, записанных в волокна с чисто-кварцевой сердцевиной: 20 пм в случае слабо-отражающей ВБР (тип I) и -10 пм в случае высокоотражающей ВБР. Этот сдвиг к более коротким длинам волн наблюдался также в случае воздействия γ -излучения на ВБР [5], записанных в волокне с чисто-кварцевой сердцевиной. В дополнение к минимальному сдвигу длины волны, этот тип ВБР имеет минимальное изменение коэффициента пропускания. По этим причинам для создания датчиков на основе ВБР в областях, подверженных воздействию ускоренных электронов (β -излучения), необходимо использовать ВБР с высоким коэффициентом отражения, записанных в волокне с чисто кварцевой сердцевиной. Этот тип волокна также показал большую радиационную стойкость по сравнению с германосиликатным волокном в случае воздействия γ -излучения [6].

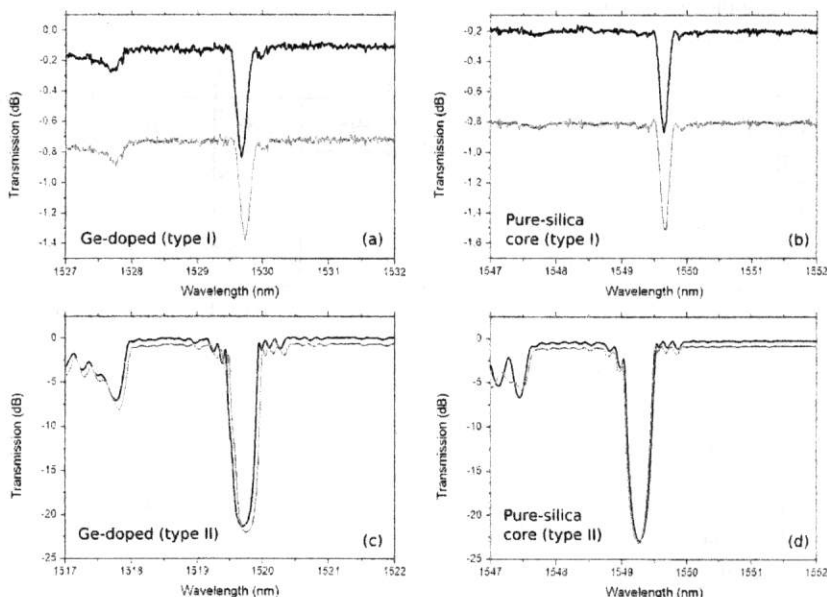


Рис. 4. Спектры ВБР до воздействия (черная линия) и после воздействия (красная линия) электронного пучка с суммарной дозой 30,9 МГр: слабо отражающей ВБР типа I, записанной в германосиликатном волокне (а), слабо отражающей ВБР типа I, записанных в волокне с чисто-кварцевой сердцевиной (б), ВБР с высоким коэффициентом отражения (тип II) записанной в германосиликатном волокне (с), ВБР с высоким коэффициентом отражения (тип II), записанных в волокне с чисто-кварцевой сердцевиной (д)

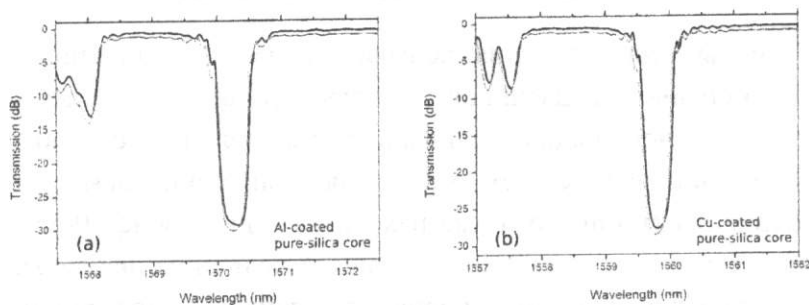


Рис. 5. Спектры ВБР до воздействия (черная линия) и после воздействия (красная линия) электронного пучка с суммарной дозой 41,1 МГр: ВБР с высоким коэффициентом отражения ВБР (тип II), записанных в волокне с чисто кварцевой сердцевиной и алюминиевым покрытием (а), ВБР с высоким коэффициентом отражения ВБР (тип II), записанных в волокне с чисто кварцевой сердцевиной и медным покрытием (б)

Для дальнейшего изучения этого типа оптических волокон под воздействием электронного пучка были измерены коэффициенты отражения и спектры пропускания высокоотражающих ВБР, записанных в волокне с чисто-кварцевой сердцевиной и металлическим покрытием (Cu и Al). В этом В этом случае ВБР предварительно отжигали при 450°C в течение 45 часов. Общее время воздействия электронного пучка в этом случае составило 275 мин, что соответствует суммарной дозе 41,1 МГр. Сравнение исходного и спектров после воздействия при фиксированной температуре показало изменение резонансной длины волны отражения -20 и -35 пм для волокна с алюминиевым и медным покрытием, соответственно (Рис. 4 и 5). Этот сдвиг в более короткие длины волн совпадает со случаем высокоотражающей ВБР, записанной в волокне с чисто кварцевой сердцевиной и полиимидным покрытием, а также со случаем воздействия γ -излучения на этот же тип волокна. Однако в отличие от случая γ -излучения, когда повышение температуры предварительного отжига ВБР снижает смещение длины волны, в нашем случае, повышение температуры отжига приводит к увеличению данного смещения, что требует дальнейших исследований механизмов модификации материала при воздействии и электронного пучка.

Выводы

Показано, что высокоотражающие ВБР (тип II), записанные фемтосекундными лазерными импульсами в волокне с чисто кварцевой сердцевиной, устойчивы к воздействию электронного пучка (β -излучения). В этом случае измеренный сдвиг длины волны отражения ВБР составляет -10 пм после воздействия электронного пучка со скоростью набора дозы 2,5 кГр/с и общей дозой 30,9 МГр. Наряду с минимальными значениями индуцированных потерь в случае волокна с чисто кварцевой сердцевиной, этот тип волокна является

перспективным для создания долговременных радиационно-стойких волоконно-оптических датчиков. В случае германосиликатных волокон измеренные значения сдвига длины волны как для ВБР с низким, так и с высоким коэффициентом отражения при одинаковых условиях воздействия электронного пучка находятся в диапазоне 50-55 пм, что совпадает с типичным поведением данной величины, наблюдаемым в случае использования γ -излучения для данного типа волокна. Но противоположное поведение сдвига длины волны отражения ВБР было показано в случае обработки электронным пучком предварительно отожженных ВБР, записанных в волокна с чисто кварцевой сердцевиной, с увеличением величины сдвига длины волны отражения ВБР при повышении температуры термообработки с 300°C до 450°C.

Литература

1. A. I. Gusarov, F. Berghmans, A. F. Fernandez, O. Deparis, Y. Defosse, D. Starodubov, M. Décreton, P. Mégret, and M. Blondel, "Behavior of fibre Bragg gratings under high total dose gamma radiation," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 47, 688–692 (2000).
2. K. P. Chen, M. Zaghoul, M. Wang, S. Huang, M. Li, S. Mihailov, D. Carpenter, J. Dow, D. Grobnic, C. Hnatovsky, and L.-W. Hu, "Radiation resilient fiber Bragg grating sensors for sensing applications in nuclear reactor cores," in *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Optical Sensors and Applications*, L. Dong, X. Zhang, H. Xiao, and F. J. Arregui, eds. (SPIE, 2018), p. 132.
3. A. V. Dostovalov, A. A. Wolf, A. V. Parygin, V. E. Zyubin, and S. A. Babin, "Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule," *Opt. Express* 24, 16232–16237 (2016).
4. А.А. Брызгин, Н.К. Куксанов, Р.А. Салимов. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ имени Г.И. Будкера СО РАН. УФН, том 188, №6, июнь 2018, стр. 672-685. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038344>
5. A. I. Gusarov, F. Berghmans, O. Deparis, A. Fernandez Fernandez, Y. Defosse, P. Mégret, M. Décreton, and M. Blondel, "High total dose radiation effects on temperature sensing fiber Bragg gratings," *IEEE Photonics Technol. Lett.* 11, 1159–1161 (1999).
6. H. Henschel, D. Grobnic, S. K. Hoeffgen, J. Kuhnhenh, S. J. Mihailov, and U. Weinand, "Development of highly radiation resistant fiber bragg gratings," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 58, 2103–2110 (2011).