

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

Гончаренко И.А., Ильюшенок А.В., Рябцев В.Н.

Цель. Целью работы является анализ методов измерения и конструкций датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе оптических волноводных структур.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических методов исследования (анализ, синтез, сравнение).

Результаты. Проведен анализ методов измерения и конструкций датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе оптических волноводных структур. Рассмотрены различные физические эффекты, лежащие в основе методов. Показано, что с точки зрения чувствительности перспективными являются детекторы на основе микрокольцевых резонаторов на базе кремниевых волноводов, покрытых фторполимером.

Область применения исследований. Результаты обзора и анализа сведений о методах измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения могут послужить базой для создания эффективных конструкций дозиметров на основе оптических волноводных структур высокой чувствительности.

Ключевые слова: оптический волновод, ионизирующее излучение, доза излучения, скантллятор, брэгговская решетка, кольцевой микрорезонатор.

(Поступила в редакцию 13 апреля 2022 г.)

Введение

Измерения доз ионизирующего излучения находят широкое применение в атомной энергетике (контроль обстановки в реакторном зале атомных электростанций, в технологических каналах ядерных реакторов), радиационной безопасности (контроль радиационной обстановки), медицине (при радиотерапии онкологических больных, рентгеноскопическом обследовании), радиологических исследованиях. Блокам детектирования большинства традиционных дозиметров необходимо электрическое питание. Для обеспечения электрической энергией отдельных сенсорных элементов и передачи информации от них используются электрические или беспроводные соединения, которые могут нарушаться в результате аварии [1; 2]. Детекторы на основе оптических волноводных структур имеют ряд существенных преимуществ перед традиционными устройствами. Они обладают высокой надежностью, поскольку устойчивы к электромагнитным, химическим и механическим воздействиям, а также малым весом и поперечными размерами. Для работы оптических волноводных дозиметров не требуется электрического питания чувствительного элемента, поэтому они могут продолжать работу даже при полном отключении электроснабжения. При этом полностью устраняется возможность искрения и возгорания. Такие дозиметры позволяют проводить измерения в режиме реального времени, а оператор может находиться на значительном удалении от контролируемого объекта [3; 4].

В данной работе проведен анализ методов измерения и конструкций датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе оптических волноводных структур. Рассмотрены различные физические эффекты, лежащие в основе этих методов.

Основная часть

Датчики на эффекте потерь, наведенных ионизирующим излучением в оптических волноводах. Первоначально воздействие ионизирующего излучения (ИИ) на оптические волноводы и устройства на их основе исследовалось с точки зрения влияния на их

направляющие свойства [5; 6]. Волноводные оптические устройства могут располагаться в космическом пространстве или вблизи источников ИИ. Воздействие ИИ приводит к увеличению потерь и изменению показателя преломления материала волновода [7].

Наведенные излучением потери зависят от состава облучаемых волноводов. Так, в работе [2] показано, что наведенные потери оптического сигнала при малых и умеренных дозах облучения могут быть весьма значительны для некоторых волоконных волноводов (например, легированных бором или фосфором) и достигать величин на несколько порядков больших, чем собственные потери (менее 1 дБ/км) в обычных волокнах, используемых в системах оптической связи. Волокна, легированные германием, более устойчивы к воздействию ионизирующего излучения.

В работе [8] рассмотрено влияние ионизирующего излучения на кварцевые оптические волокна. Описан механизм, включающий микро- и макроскопические изменения под воздействием облучения: наведенное излучением поглощение (НИП), наведенное излучением испускание (НИИ) и наведенное излучением сжатие (НИС). Проанализирована возможность использования результатов исследования для создания датчиков ИИ.

Для дозиметрии ИИ с использованием НИП предложен ряд волокон на основе различных легирующих добавок, например одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной с добавлением TiO_2 и $GeO_2 + TiO_2$ [9], с совместным легированием Ge/Al [10], многомодовые волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, легированные P_2O_5 [11]. НИП в таких волокнах измерялось для оптического излучения с длинами волн $\lambda = 980, 1310$ и 1530 нм [9, 10] или $502, 540$ и 560 нм [11]. При измерениях использовались малые дозы (мощность дозы $0,01-1$ Гр/ч, суммарная доза до 1 Гр) [11], умеренные (мощность дозы $5-10$ Гр/ч, суммарная доза $10-100$ Гр) [9] или большие дозы (мощность дозы $2, 4$ или 6 Гр/мин, максимальная суммарная доза 13 кГр) [10].

Результаты этих исследований послужили основой для разработки оптических волноводных детекторов ионизирующего излучения на основе наведенных излучением потерь. В работе [12] описана конструкция волоконно-оптического дозиметра на основе волокна, легированного элементами, которые под действием ионизирующего излучения образуют долгоживущие центры окраски. Это приводит к ослаблению оптического сигнала в радиационно-чувствительном волокне. Величина ослабления пропорциональна поглощенной дозе. В устройство входит оптический рефлектометр, который строит распределение величины затухания оптического сигнала вдоль радиационно-чувствительного волокна, что позволяет определить пространственное распределение дозы ИИ.

В работе [6] рассмотрено воздействие ИИ на наборный оптический волновод на основе кремния с подложкой из двуокиси кремния. Вблизи и на границе раздела волновод / подложка под воздействием ИИ накапливаются свободные носители заряда, что сопровождается генерацией свободных состояний. В результате увеличиваются потери оптического сигнала в волноводе.

Для определения зависимости потерь на распространение оптического сигнала в волноводе от поглощенной дозы ИИ наборные волноводы облучались с пошаговым увеличением дозы. При этом потери на распространение измерялись после полного поглощения дозы образцом. Результаты измерений показаны на рисунке 1, откуда следует, что после первоначального скачка потерь под воздействием доз от 0 до 100 Гр дальнейшее ухудшение прозрачности материала волновода при дозах от 100 Гр до 10 кГр значительно меньше. Общая чувствительность кварцевых волноводов к воздействию ИИ мала при величине поглощенной дозы порядка 100 Гр.

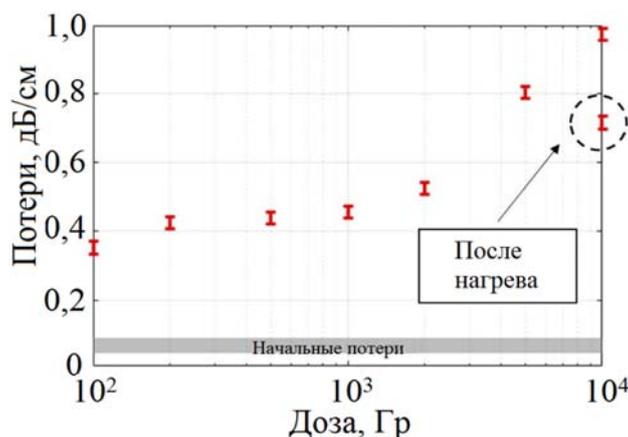


Рисунок 1. – Измеренные потери на распространение основной ТЕ моды наборного гребенчатого волновода при различных значениях поглощенной дозы ИИ

НИП могут быть уменьшены с помощью последующего термического воздействия на волновод, в результате которого наведенные изменения нейтрализуются и плотность поверхностных состояний уменьшается.

В работе [13] представлена конструкция волоконно-оптического дозиметра, определяющего дозу ИИ по разности наведенного излучением поглощения оптического сигнала $\Delta\alpha$, измеренного в легированном фосфором волокне на длинах волн 413 и 470 нм. Представлены тестовые результаты для доз гамма-излучения (мощности доз 0,00064 и 0,0066 Гр/с, максимальная доза ~ 2 Гр). Как показали измерения, НИП на отдельных длинах волн зависит не только от полученной волокном суммарной дозы, но и от мощности дозы. В то же время $\Delta\alpha$ зависит только от суммарной дозы и спадает на незначительную величину при прекращении облучения. Таким образом, подобные дозиметры более перспективны для определения суммарной дозы ИИ.

В ряде работ исследуется влияние ИИ на механические свойства оптических волокон. В работах [14; 15] рассмотрены наведенные ИИ изменения в частотном сдвиге обратного рассеяния Бриллюэна, которые зависят как от показателя преломления, так и от скорости дилатационных акустических волн в сердцевине оптического волокна. Оптические волокна могут также подвергаться механическим повреждениям под воздействием ИИ на слои покрытия. В работе [16] показано, что прочность на растяжение оптических волокон, покрытых буферным слоем из этилентетрафторэтиленового полимера, деградировала под воздействием гамма-излучения. Величина ослабления зависит от отклика фтористого водорода в буферном слое, который разрушается, ослабляя кварцевое волокно.

В работе [5] рассмотрено воздействие ИИ на оптико-механические свойства стандартных одномодовых волокон, покрытых тонким слоем фторакрилового полимера.

Под воздействием оптического сигнала в волокне возникают акустические волны. Пакет акустических волн многократно частично отражается от поверхности между кварцевой оболочкой и полимерным покрытием и на внешней границе покрытия. Величина отражения зависит от механического импеданса слоя покрытия. Отраженный сигнал образует серию запаздывающих эхо пакета акустических волн в поперечном сечении сердцевины оптического волокна. Время прохода радиальных акустических волн по покрытию определяется с помощью измерения величины вынужденного рассеяния Бриллюэна. Как следует из рисунка 2, время прохода акустической волны через слой покрытия монотонно уменьшается при увеличении суммарной дозы гамма-излучения от 0,17 до 1,8 МГр. Изменения времени прохода достигают 0,9 нс (15 % от базовой величины наибольшей дозы, использованной в эксперименте). Минимальная доза, способная вызвать отслеживаемые изменения в оптико-механических свойствах волокон, составляет порядка 100 кГр. Результаты показывают потенциальную возможность определения дозы ИИ на основе изменения упругих характеристик слоя покрытия, а не оптических свойств самого волокна.

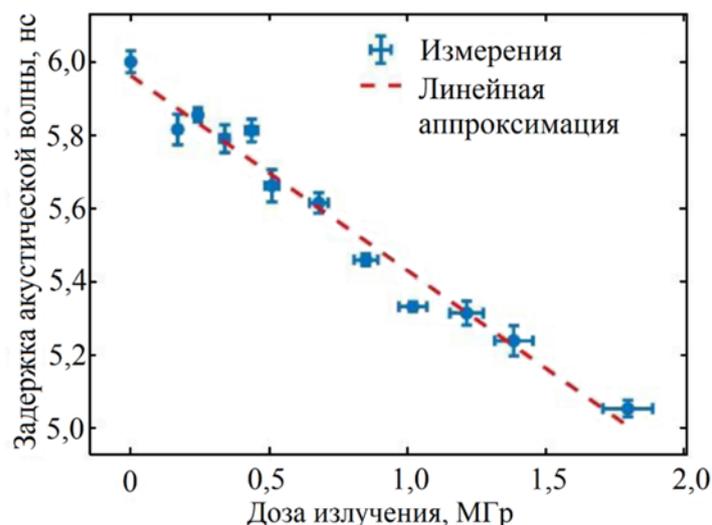


Рисунок 2. – Измеренное время прохода акустической волны по слою покрытия как функция суммарной дозы гамма-излучения

Датчики на основе волоконных брэгговских решеток. Для определения поглощенной дозы ИИ возможно использование волоконно-оптических брэгговских решеток (ВБР). Влияние ионизирующего излучения на ВБР исследовано в ряде работ [17; 18]. Воздействие ИИ приводит к наведенному излучением поглощению, а также изменению показателя преломления и длины периода ВБР. Изменение показателя преломления и длины периода ВБР приводит к смещению полосы пропускания решеток (брэгговской длины волны) пропорционально поглощенной дозе. Это смещение фиксируется спектроанализатором. НИП приводит к уменьшению интенсивности отраженного сигнала.

В большинстве случаев изменения брэгговской длины волны относительно небольшие. Например, в решетках, записанных на стандартных волокнах для оптической связи SMF28™, наблюдалось увеличение брэгговской длины волны от 10 до 34 пм с последующим насыщением при облучении дозой ИИ 0,54 МГр. В ВБР, записанных на волокнах, легированных В/Ge, наблюдалось уменьшение брэгговской длины волны от 30 до 60 пм. После облучения имело место уменьшение коэффициента отражения решеток [19]. Таким образом, при соответствующем подборе параметров решеток и технологий их записи представляется возможным использовать ВБР в качестве датчиков дозы ИИ [11; 20].

В работе [7] измерено влияние гамма-излучения с дозами порядка МГр на параметры ВБР на основе оптических волокон, легированных различными добавками. В эксперименте использовалось 6 типов решеток. Решетки S1, S2 и K1, K2 с брэгговской длиной волны 1546 нм записаны на телекоммуникационных волокнах SMF1528 и Kabelrheydt E9.3/F3.5, соответственно, легированных германием и с низким содержанием фосфора. Решетка N1 записана на легированном азотом волокне. Брэгговская длина волны решетки 1511 нм. Решетка G1 записана на фоточувствительном кварцевом волокне, легированном германием (10 молярных процентов). Как видно из рисунка 3, для всех типов решеток, за исключением G1, наблюдалось изменение величины отражения под воздействием гамма-излучения. Это объясняется тем, что участки сердцевин волокон, получившие различные дозы ультрафиолетового излучения при записи решеток, имеют разную чувствительность к гамма-излучению.

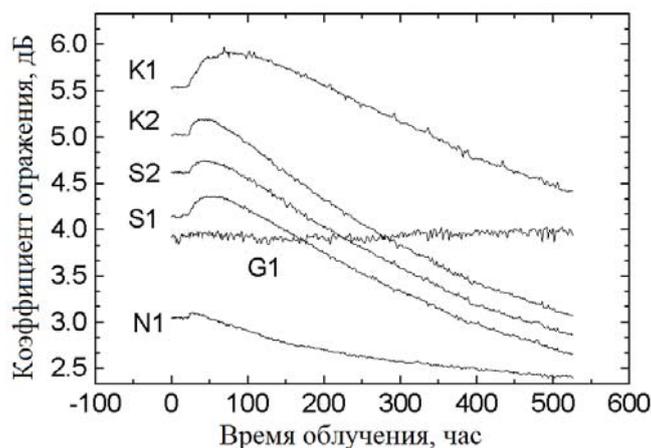


Рисунок 3. – Изменение амплитуды функции отражения ВБР под воздействием гамма-излучения

В работе [21] измерен сдвиг брэгговской длины волны и полосы отражения ВБР под воздействием гамма-излучения дозой до 100 кГр на различных длинах волн оптического сигнала. В экспериментах использовались ВБР с брэгговскими длинами волн λ_B 818,820, 1284,585 и 1515,795 нм, записанные на волокнах Corning HI 1060 FLEX с длиной волны отсечки первой высшей моды 930 ± 40 нм и решетки с λ_B 657,191 и 819,077 нм, записанные на волокнах Corning HI 780 с длиной волны отсечки первой высшей моды 720 ± 50 нм. Результаты показывают, что чувствительность ВБР к излучению возрастает при использовании оптических сигналов на длинах волн от 657 до 1516 нм. Таким образом, ВБР с большей брэгговской длиной волны, например 1550 нм, являются более перспективными для измерения больших доз ИИ, поскольку в них не наблюдалось насыщения вплоть до доз 100 кГр, а сдвиг брэгговской длины волны не зависит от мощности дозы. Эти изменения представлены на рисунке 4 для двух исследованных типов решеток.

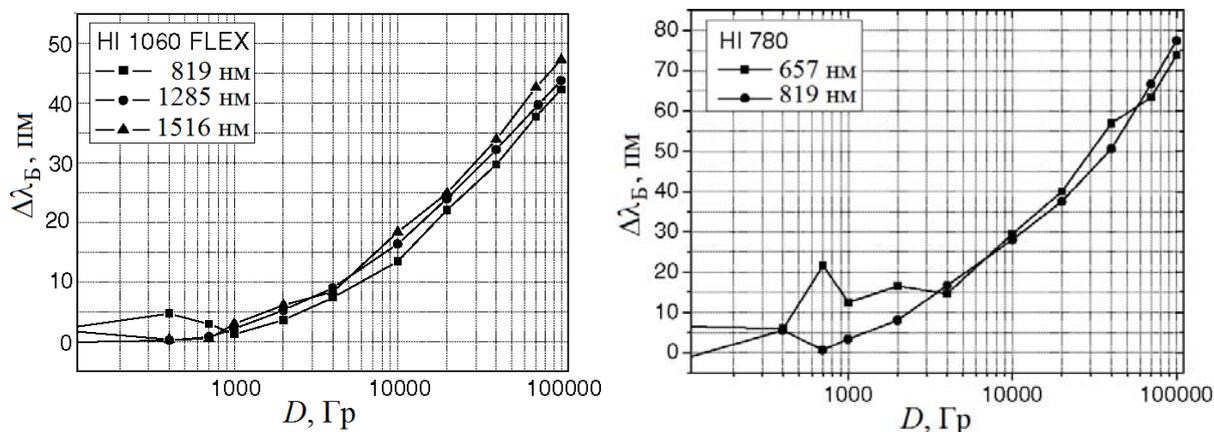


Рисунок 4. – Сравнение наведенного излучением сдвига брэгговской длины волны для решеток на основе двух волокон Corning

Зависимость брэгговской длины волны λ_B от дозы облучения D :

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dD} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial D} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial D}, \quad (1)$$

где $\lambda_B = 2n\Lambda$ – брэгговская длина волны;
 Λ – период ВБР.

Первое слагаемое в (1) показывает наведенные излучением изменения показателя преломления n ; второе слагаемое – изменение периода решетки, т.е. коэффициент линейного растяжения волокна под воздействием ИИ. Для волокон из кварца этот коэффициент имеет малое значение (10^{-7} Гр^{-1}), им можно пренебречь. Тогда (1) можно записать как:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n}{n}. \quad (2)$$

Используя это соотношение и величину показателя преломления для соответствующей длины волны, можно рассчитать наведенные излучением изменения показателя преломления.

В работе [22] показано возрастание брэгговской длины волны ВБР под воздействием ИИ. На рисунке 5 представлена зависимость пропускания ВБР от длины волны оптического сигнала при различных дозах гамма-излучения. Сдвиг брэгговской длины волны имеет логарифмическую зависимость от суммарной дозы ИИ (рис. 6). После облучения наблюдается релаксация брэгговского сдвига. Из результатов работы также следует, что ВБР перспективны для использования в качестве детекторов, особенно для измерения больших суммарных доз ИИ (порядка сотен кГр).

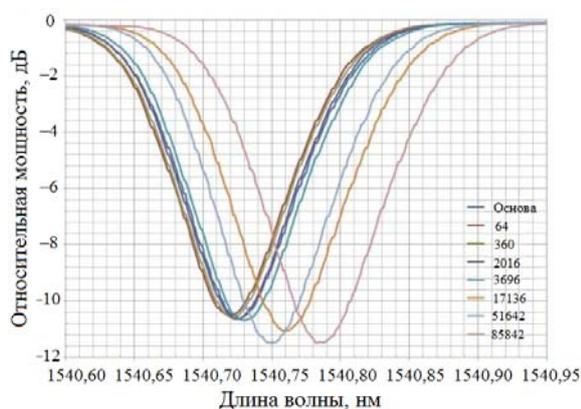


Рисунок 5. – Нормализованная функция пропускания ВБР в зависимости от суммарной дозы гамма-излучения

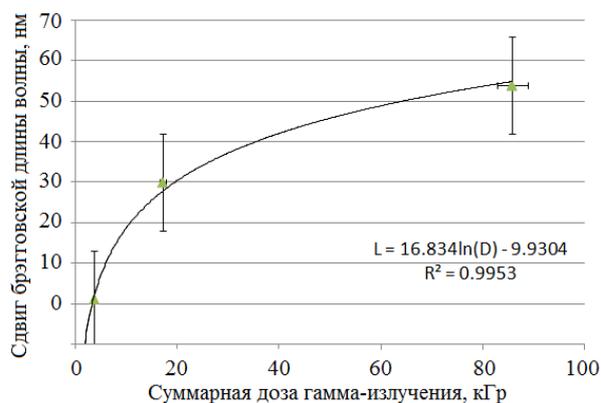


Рисунок 6. – Сдвиг брэгговской длины волны в зависимости от суммарной дозы гамма-излучения

В работе [23] численно исследовано воздействие НИС и НИП на оптоволоконные датчики на основе ВБР и длиннопериодных решеток. Показано, что наведенные излучением изменения показателя преломления и периода решеток влияют на их спектр отражения при дозах ИИ до 1540 кГр.

В работе [20] исследовано влияние гамма-излучения на брэгговскую длину волны и амплитуду функции пропускания различных типов брэгговских решеток, для того чтобы определить наиболее чувствительные ВБР для использования в дозиметрии. Для решетки типа IA, записанной на фоточувствительном волокне Fiberscore PS-1250/1500, при облучении дозой ИИ 116 кГр наблюдался брэгговский сдвиг 190 пм (рис. 7). Решетки типа IA (регенерированные решетки) записываются в нагруженных водородом волокнах при облучении ультрафиолетовым излучением более длительном, чем при записи стандартных решеток типов I или IIА. Таким образом, ВБР типа IA весьма перспективны для использования в дозиметрии. Погружение в водород и передержка волокна в УФ при записи решетки приводит к комбинации эффектов, возникающих под воздействием ИИ, что и объясняет наблюдаемый брэгговский сдвиг. Следует отметить, что облучение ВБР ИИ проводилось при стабилизированной температуре 35 °С. Изменения температуры в реальных условиях и термический отжиг также могут оказывать влияние на смещение брэгговской длины волны, что приведет к ошибкам в измерении дозы. Для исключения влияния температурных вариаций на результаты измерений можно использовать дополнительную ВБР, устойчивую к ИИ, например записанную на волокне из чистого кварца. Кинетика отжига решеток типа IA после облучения отличается от решеток типа I и IIА. Применение ВБР с различной кинетикой может быть использовано для определения мощности дозы ИИ.

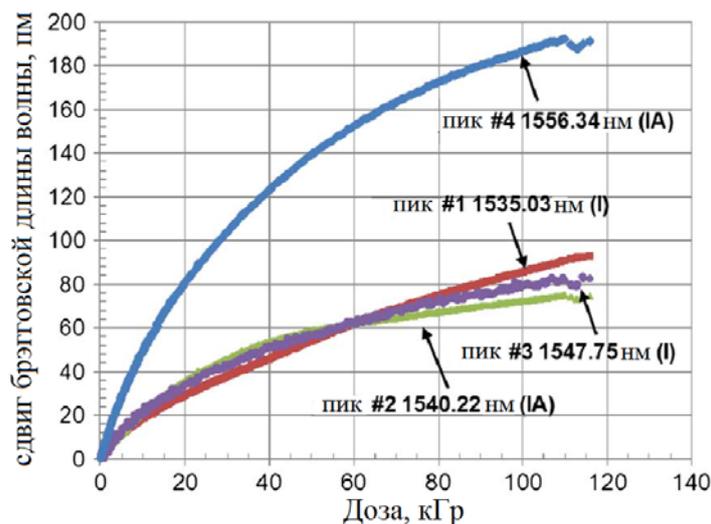


Рисунок 7. – Кинетика сдвига брэгговской длины волны ВБР различных типов при облучении в зависимости от суммарной дозы ИИ

Датчики на основе резонансных волноводных структур. В технических устройствах, функционирующих в условиях жесткого излучения, например на спутниках или в ядерных реакторах, применяются датчики различных физических величин на основе волноводных резонансных структур (резонаторы Фабри – Перо, микрокольцевые резонаторы). Изменение показателя преломления и геометрической длины резонатора под воздействием ИИ вызывает смещение резонансной длины волны или полос интерференционной картины. Использование резонансных структур позволяет с большой точностью измерять малые дозы ИИ.

В работе [24] рассмотрен отклик кварцевого кольцевого резонатора на основе полосковых волноводов на воздействие гамма-излучения. Кольцевой резонатор обладает набором резонансных длин волн, которые зависят от его оптической длины:

$$\lambda_p = \frac{L \cdot n}{m}, \quad (3)$$

где L – длина кольцевого волновода;
 n – эффективный показатель преломления его моды;
 m – целое число.

Если длина волны оптического сигнала в подводящем волноводе соответствует резонансной длине волны, такой сигнал селективно проходит в кольцевой волновод. Любые изменения кольцевого волновода, вызывающие изменения эффективного показателя преломления его моды, например из-за окисления кварцевого кольца, приведут к сдвигу резонансной длины волны.

В кольцевых резонаторах из непассивированного материала, не имеющего естественных окислов, наблюдался сдвиг резонансной длины волны в область коротких длин волн («синюю» область) при возрастании общей дозы ИИ. Это обусловлено окислением поверхности, процесс которого ускоряется под воздействием больших доз ИИ. Как видно из рисунка 8, воздействие гамма-излучения дозой 1,47 кГр (энергия гамма-квантов 662 кЭв, облучение в течение 4 ч) приводит к «синему» сдвигу резонансной длины волны на 0,4 нм. Изменения величины функции пропускания частично связаны с вариациями коэффициента связи подводящего и кольцевого волноводов. Для кольцевых резонаторов на основе волноводов из пассивированных материалов изменений функции пропускания под воздействием ИИ не наблюдалось.

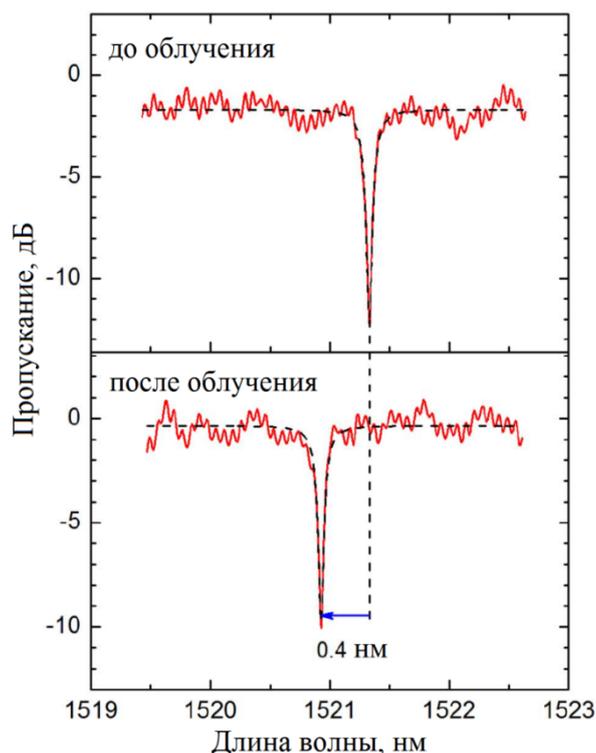


Рисунок 8. – Функция пропускания неpassивированного кварцевого кольцевого резонатора до и после воздействия гамма-излучения

В работе [25] экспериментально исследовано влияние гамма-излучения с высокой энергией (1,17 МэВ, 1,33 МэВ) и большой дозой (до 150 кГр) на оптические волноводы из аморфного кремния (a-Si), образующие кольцевой резонатор. Рассмотрены два типа структур: волновод, покрытый двуокисью кремния (SiO_2), и волновод с покрытием из фторполимера (ЭП-полимер) толщиной 3 мкм.

На рисунке 9 а–б представлены поперечные сечения облучаемых структур. Длина кольцевого волновода 426 мкм. Коэффициент экстинкции кольцевого резонатора на основе волновода, покрытого SiO_2 , равен 14 дБ в резонансе, ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ – около 154 пм (19,7 ГГц), добротность резонатора – $9,9 \times 10^3$. Коэффициент экстинкции кольцевого резонатора из волновода с полимерным покрытием – 12 дБ, ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ – около 94 пм (11,9 ГГц), добротность резонатора – $1,6 \times 10^4$, область дисперсии 1,582 нм (199,5 ГГц).

Синие линии на рисунке 9 в–г показывают нормализованные функции пропускания микрокольцевых резонаторов на основе рассматриваемых структур до облучения, красные – после облучения гамма-излучением дозой 150 кГр. Как видно из рисунка 9в, для резонатора на основе волновода с покрытием из двуокиси кремния сдвига резонансной длины волны под воздействием ИИ не наблюдалось, что указывает на отсутствие значительных изменений эффективного показателя преломления моды кольцевого волновода. Также не наблюдалось заметного изменения ширины полосы пропускания и коэффициента экстинкции, т.е. добротность резонатора не изменялась под воздействием ИИ. Таким образом, после облучения гамма-излучением общей дозой 150 кГр в волноводах на основе аморфного кремния с покрытием SiO_2 показатель преломления, потери на распространение и потери на рассеяние не изменяются.

Как следует из рисунка 9г, после облучения кольцевого резонатора на основе волновода с полимерным покрытием наблюдался сдвиг его резонансной длины волны около 21 пм (3,4 ГГц) в «синюю» область, что соответствует изменению эффективного показателя преломления моды волновода примерно на $-4,8 \times 10^{-5}$. На основе сравнения с результатами, полученными для волнопроводов с покрытием из SiO_2 , можно утверждать, что этот резо-

нансный сдвиг происходит только из-за изменений показателя преломления полимера покрытия, поскольку остальные материалы волновода (аморфный кремний и SiO_2) остаются неизменными после облучения. Кроме того, после гамма-облучения ширина полосы пропускания микрокольцевого резонатора возросла до 124 пм (15,7 ГГц), что приводит к уменьшению добротности резонатора до $1,2 \times 10^4$ (на 33 %). В то же время область дисперсии микрокольцевого резонатора уменьшилась после облучения только на 0,3 ГГц (около 0,1 %). Таким образом, соответствующее увеличение волноводного группового показателя преломления ($5,3 \times 10^{-3}$) не может быть причиной увеличения ширины полосы пропускания. Это увеличение определяется только изменениями потерь на распространение в волноводе или коэффициента связи кольцевого и подводящего волноводов.

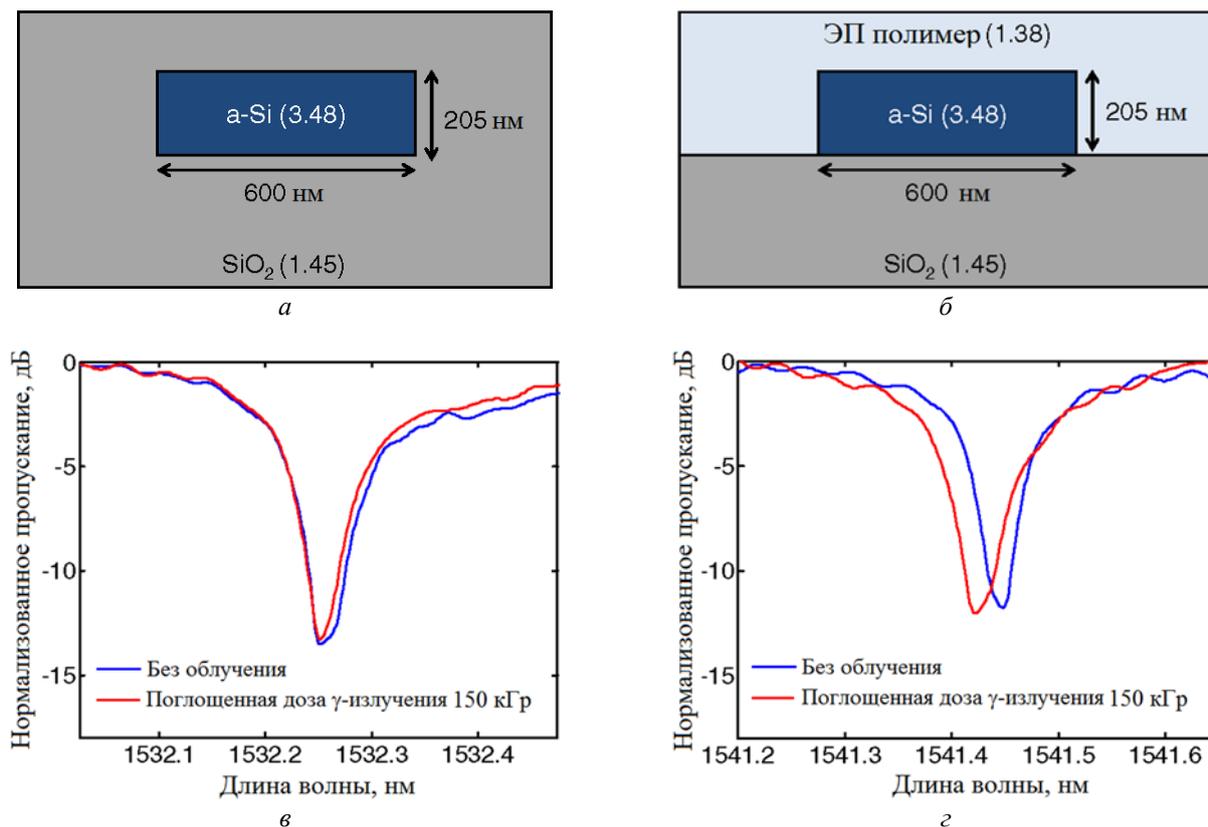


Рисунок 9. – Поперечное сечение a-Si-волноводов с покрытиями из SiO_2 (а) и ЭП-полимера (б). Сравнение функции пропускания микрокольцевых резонаторов на основе волноводов с покрытиями из SiO_2 (в) и ЭП-полимера (г) до (синие линии) и после (красные линии) облучения гамма-излучением

В работе [26] представлено исследование влияния гамма-излучения на волноводы, изготовленные из аморфного кремния (a-Si) и нитрида кремния (SiN_x). Кольцевые волноводы на основе этих материалов облучались ИИ, и изменение показателя преломления определялось по изменению характеристик резонатора. Для определения непосредственного влияния гамма-излучения на показатель преломления волноводов, устройства облучались в инертной среде (аргон). Как показали измерения, показатели преломления как a-Si, так и SiN_x возрастали линейно при увеличении дозы ИИ. Поскольку возможность наведенной излучением кристаллизации исключена, это увеличение объясняется уплотнением или сжатием аморфной структуры. Эффективный показатель преломления мод волноводов увеличивается примерно на 4×10^{-3} для аморфного кремния и 5×10^{-4} для нитрида кремния при дозе 100 кГр. Для обоих материалов значительного изменения оптических потерь не наблюдалось. Для сравнения было проведено облучение волноводов в воздушной среде. При этом заметного увеличения показателей преломления не наблюдалось. Поскольку двуокись кремния имеет более низкий показатель преломления ($n_{\text{SiO}_2} = 1,45$), чем a-Si

($n_{a-Si} = 3,6$) и SiN_x ($n_{SiN_x} = 2,1$), этот эффект объясняется поверхностным окислением, которое препятствует увеличению показателя преломления из-за уплотнения.

Таким образом, ионизирующее излучение увеличивает показатель преломления материала волновода в составе микрокольцевого резонатора. Это приводит к смещению резонансной длины волны резонатора пропорционально поглощенной дозе. Наибольшее смещение достигается в резонаторах на основе кремниевых волноводов с покрытием из фторполимера или облучаемых в инертной среде, чтобы исключить поверхностное окисление материалов. Подобные устройства могут быть использованы в качестве блоков детектирования волноводных оптических дозиметров с высокой чувствительностью. При этом для увеличения чувствительности в кольцевых резонаторах можно использовать волноводы с горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными полимером, показатель преломления которого изменяется под воздействием ИИ.

Сцинтилляционные волоконно-оптические дозиметры. Возможны варианты волноводных детекторов ИИ, в которых роль чувствительного элемента выполняет сцинтилляционный материал. Сцинтилляционный материал подвергается воздействию ионизирующего излучения, в результате чего возникает оптический сигнал люминесценции. Для передачи возникающего люминесцентного излучения на удаленный фотоприемник используется оптическое волокно.

К настоящему времени предложен ряд дозиметров с использованием сцинтилляционных материалов, закрепленных на торце оптического волокна. Оптический сигнал люминесценции передается по волокну на приемное устройство, расположенное удаленно от зоны воздействия ИИ. Основным недостатком таких устройств являются дополнительные потери оптического сигнала при его вводе в волокно. Для повышения эффективности оптического соединения сцинтилляционного материала с волокном используются специальные устройства.

В работе [27] в качестве сцинтилляционного материала использован легированный тербием оксисульфид гадолиния ($Gd_2O_2S:Tb$), излучающий под воздействием ИИ видимый свет на длине волны 545 нм. Для передачи оптического излучения используется полимерное волокно на основе полиметилметакрилата, которое хорошо подходит для данной длины волны. Мощность дозы воздействующего на сцинтилляционный материал ионизирующего излучения анализируется на основе интенсивности оптического сигнала, поступающего через волокно на многопиксельный счетчик фотонов. Для увеличения отношения сигнал – шум сцинтилляционный материал расположен в отверстии в торце волокна. Преимущество данной структуры детектора видно из рисунка 10. В детекторе обычной конструкции сцинтилляционный материал покрывает торец и оболочку волокна, поэтому условия локализации излучения в сердцевину волокна удовлетворяются только для части излучения люминесценции (рис. 10а). В предложенном устройстве (рис. 10б) сцинтилляционный материал расположен в сердцевине волокна, поэтому оптическое излучение практически полностью локализуется волокном.

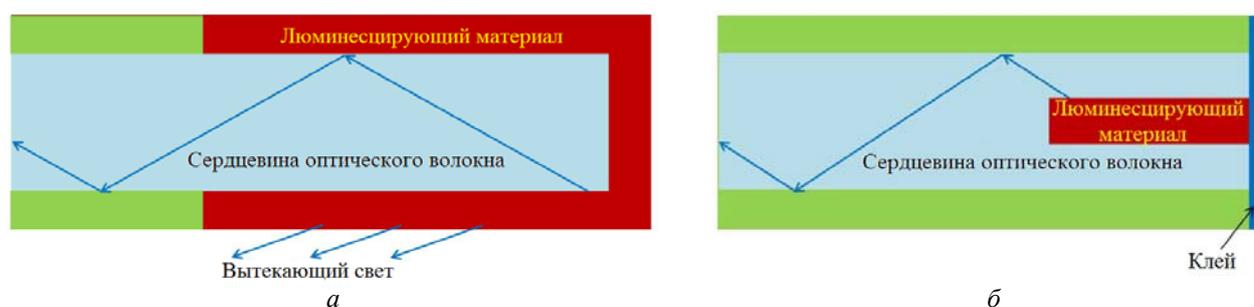


Рисунок 10. – Конструкции дозиметров традиционного типа (а) и предлагаемой структуры (б)

Похожую структуру имеет детектор, описанный в работе [28]. В качестве материала сцинтиллятора также использован оксисульфид гадолиния, но легированный европием ($Gd_2O_2S:Eu$), излучающий оптический сигнал на длине волны 625 нм. Спектр излучения $Gd_2O_2S:Eu$ представлен на рисунке 11.

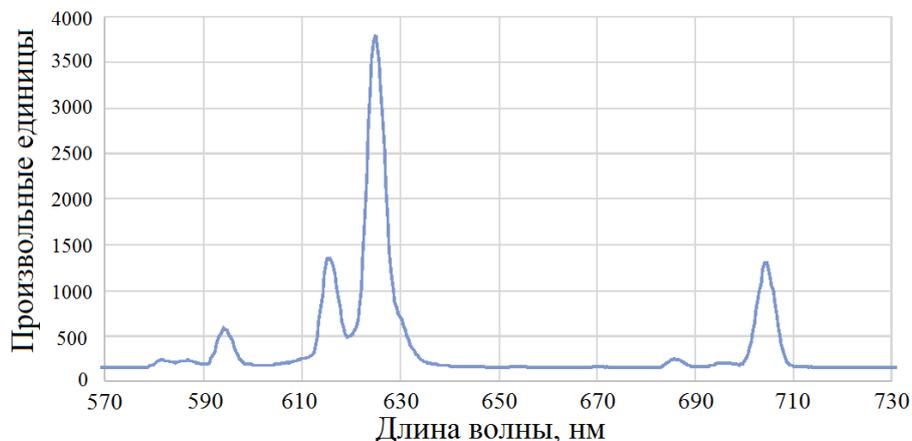


Рисунок 11. – Спектр излучения легированного европием сероокись-гадолиниевого порошка ($Gd_2O_2S:Eu$), используемого в качестве сцинтилляционного материала

Контроль поглощенной дозы осуществляется с помощью однопиксельного счетчика фотонов. Для уменьшения потерь на рассеяние оптического излучения между волокном и сцинтиллятором используется специальный наконечник, работающий по принципу оптической антенны вытекающих волн, установленный на торце оптического волокна с внешним диаметром 125 мкм.

В работе [29] рассмотрен конический волоконно-оптический датчик радиации (КВДР), где в качестве сцинтилляционного материала использован кристалл итрий-алюминиевого граната, легированный одновременно церием и тербием ($Ce/Tb:YAG$). Использование двух легирующих материалов позволяет достичь высокой эффективности радиолуминесценции. Под воздействием мощного ионизирующего излучения в КВДР наблюдалась сильная радиолуминесценция ионов Tb^{3+} . Излучение сцинтилляции вводится через конусообразную область в передающее оптическое волокно с эффективностью 74,3 %. Потери на распространение в передающем волокне составляют 0,14 дБ/см, что на порядок меньше потерь в кристалле YAG (1,59 дБ/см). Оптическое излучение регистрируется однофотонным фотоприемником, состоящим из фотоумножителя и счетчика.

При изменении мощности дозы от 0,1 до 2,06 мГр/с интенсивность сцинтилляции изменяется линейно в зависимости от мощности при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,98$ (рис. 12).

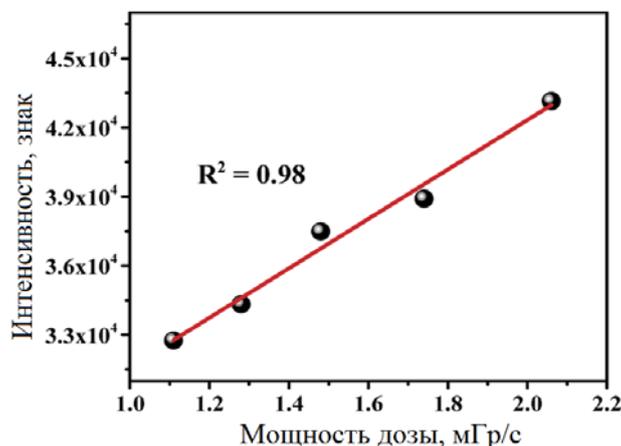


Рисунок 12. – Зависимость радиолуминесцентного отклика КВДР от мощности дозы гамма-излучения

Дополнительных потерь на ввод/вывод оптического излучения можно избежать, если использовать в качестве детектора дозиметра одно или несколько сцинтилляционных волокон, легированных соответствующими добавками. Так, в работе [30] описан дозиметр, основой детектора которого является полимерное многомодовое сцинтилляционное волокно Saint-Gobain Cristalls BSF-60. Его сцинтиллирующая сердцевина диаметром 0,25 мм содержит комбинацию флуоресцентных легирующих добавок, выбранных для получения желаемого спектра свечения. Сцинтилляционная эффективность является основным свойством данных волокон. Типичное ее значение около 2,5 %, что соответствует приблизительно 8000 фотонов на МэВ энергии минимально ионизирующей частицы. Однако волокном захватывается не более 4 % всех произведенных фотонов. Стандартным материалом оболочки является полиметилметакрилат $C_5H_8O_2$. Его плотность 1,2 г/см³, а показатель преломления – 1,49. Типичная толщина оболочки – около 3 % от диаметра. Для увеличения доли оптической мощности, поступающей на выходной торец сцинтилляционного волокна, на его второй торец нанесено зеркальное отражающее покрытие. Диапазон измеряемой активности ИИ от 1 до 50 Ки. Сцинтилляционные волокна могут быть распределены в трехмерном пространстве, и их продольные оси могут быть ориентированы в различных направлениях относительно оси падающего ИИ.

Заключение

Как следует из проведенного анализа, оптические волноводы могут эффективно использоваться для измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения. Наибольшей чувствительностью обладают детекторы на основе резонансных волноводных структур. Весьма перспективными с точки зрения высокой чувствительности являются оптические дозиметры на базе кольцевых волноводных резонаторов с полимерным покрытием. Использование волноводов с горизонтальными и вертикальными щелями, заполненными веществом, чувствительным к воздействию ИИ, позволит значительно увеличить чувствительность датчиков [31].

ЛИТЕРАТУРА

1. Friebele, E.J. Defect centers in a germanium-doped silica core optical fiber / E.J. Friebele, D.L. Griscom, G.H. Sigel // *Journal of Applied Physics*. – 1974. – Vol. 45, No. 8. – P. 3424–3428. – DOI: 10.1063/1.1663795.
2. Friebele, E.J. Radiation damage of optical fiber waveguides at long wavelengths / E.J. Friebele, M.E. Gingerich, K.J. Long // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21, No. 3. – P. 547–553. – DOI: 10.1364/AO.21.000547.
3. *The Dosimetry of Ionizing Radiation* / ed.: K.R. Kase, B.E. Bjärngard, F.H. Attix. – Academic Press, 1987. – Vol. 2. – 384 p.
4. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry* / P. Andreo [et al.]. – Wiley, 2017. – 957 p.
5. London, Y. Opto-Mechanical Fiber Sensing of Gamma Radiation / Y. London [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2021. – Vol. 39, No. 20. – P. 6637–6645.
6. Boynton, N. Gamma radiation effects on passive silicon photonic waveguides using phase sensitive methods / N. Boynton [et al.] // *Optics Express*. – 2020. – Vol. 28, No. 23. – P. 35192–35201. – DOI: 10.1364/OE.401299.
7. Gusarov, A.I. Behaviour of fibre Bragg gratings under high total dose gamma radiation / A.I. Gusarov [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2000. – Vol. 47, Iss. 3. – P. 688–692. – DOI: 10.1109/23.856499.
8. Girard, S. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges / S. Girard [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2013. – Vol. 60, No. 3. – P. 2015–2036. – DOI: 10.1109/TNS.2012.2235464.
9. Paul, M.C. Gamma ray radiation induced absorption in Ti doped single mode optical fibres at low dose levels / M.C. Paul [et al.] // *Optical Materials*. – 2007. – Vol. 29, No. 6. – P. 738–745. – DOI: 10.1016/j.optmat.2005.12.004.

10. Paul, M.C. Radiation response behaviour of Al codoped germano-silicate SM fiber at high radiation dose / Paul M.C. [et al.] // *Optics Communications*. – 2009. – Vol. 282. – P. 872–878. – DOI: 10.1016/j.optcom.2008.11.052.
11. Paul, M.C. Radiation response behavior of high phosphorous doped step-index multimode optical fibers under low dose gamma irradiation / Paul M.C. [et al.] // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2009. – Vol. 355. – P. 1496–1507. – DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.05.017.
12. Томашук, А.Л. Волоконно-оптические дозиметры / А.Л. Томашук // *Фотон-Экспресс*. – 2005. – № 7. – С. 53–55.
13. Tomashuk, A.L. Fiber-optic dosimeter based on radiation-induced attenuation in P-doped fiber: suppression of post-irradiation fading by using two working wavelengths in visible range / A.L. Tomashuk [et al.] // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, No. 14. – P. 16778–16783. – DOI: 10.1364/OE.22.016778.
14. Alasia, D. The effects of gamma-radiation on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibres / D. Alasia [et al.] // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17, No. 5. – P. 1091–1094. – DOI: 10.1088/0957-0233/17/5/S25.
15. Phéron, X. High γ -ray dose radiation effects on the performances of Brillouin scattering based optical fiber sensors / X. Pheron [et al.] // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, No. 24. – P. 26978–26985. – DOI: 10.1364/OE.20.026978.
16. Stolov, A.A. Effects of sterilization on optical and mechanical reliability of specialty optical fibers and terminations / A.A. Stolov [et al.] // *Proceedings of the SPIE of Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment and Environmental Applications XIV, United States, California, San Francisco, 2014*. – Vol. 8938. – P. 893806. DOI: 10.1117/12.2036864.
17. Butov, O.V. Fiber Bragg gratings in the radiation environment: Change under the influence of radiolytic hydrogen / O.V. Butov [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – Vol. 118. – P. 074502. – DOI: 10.1063/1.4928966.
18. Fernandez, A.F. Dose-rate dependencies in gamma-irradiated fiber Bragg grating filters / A.F. Fernandez [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2002. – Vol. 49, No. 6. – P. 2874–2878. – DOI: 10.1109/TNS.2002.805985.
19. Maier, R.R.J. Fibre Bragg gratings of type I in SMF-28 and B/Ge fibre and type IIA B/Ge fibre under gamma radiation up to 0,54 MGy / R.R.J. Maier [et al.] // *Proceedings of SPIE 17th International Conference on Optical Fibre Sensors*. – 2005. – Vol. 5855. – P. 511–514. – DOI: 10.1117/12.624037.
20. Faustov, A. Highly radiation sensitive type IA FBGs for future dosimetry applications / A. Faustov [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2012. – Vol. 59, No. 4. – P. 1180–1185. – DOI: 10.1109/TNS.2012.2202247.
21. Krebber, K. Fibre Bragg gratings as high dose radiation sensors? / K. Krebber, H. Henschel, U. Weinand // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17, No. 5. – P. 1095–1102. – DOI: 10.1088/0957-0233/17/5/S26.
22. Baccini, D.J. Gamma irradiation in fibre Bragg gratings / D.J. Baccini [et al.] // *Proceedings of 20th Australian Institute of Physics Congress, Australia, Sydney, 2012*. – Engineers Australia, 2012. – P. 1–4.
23. Rana, S. Numerical analysis of radiation effects on fiber optic sensors / S. Rana [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 4111-1–4111-17. – DOI: 10.3390/s21124111.
24. Bhandaru, S. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators / S. Bhandaru [et al.] // *IEEE Transactions on nuclear science*. – 2015. – Vol. 62, No. 1. – P. 323–328. – DOI: 10.1109/TNS.2014.2387772.
25. Grillanda, S. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, No. 13. – P. 3053–3056. – DOI: 10.1364/OL.41.003053.
26. Du, Q. Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices / Q. Du [et al.] // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42, No. 3. – P. 587–590. – DOI: 10.1364/OL.42.000587.
27. Zhuang, Q. Embedded structure fiber-optic radiation dosimeter for radiotherapy applications / Q. Zhuang [et al.] // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, No. 5. – P. 5172–5185. – DOI: 10.1364/OE.24.005172.
28. Suarez, M.A. Miniaturized fiber dosimeter of medical ionizing radiations on a narrow optical fiber / M.A. Suarez [et al.] // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, No. 24. – P. 35588–35599. – DOI: 10.1364/OE.27.035588.
29. Jia, M. Tapered fiber radiation sensor based on Ce/Tb:YAG crystals for remote γ -ray dosimetry / M. Jia [et al.] // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29, No. 2. – P. 1210–1220. – DOI: 10.1364/OE.413822.

30. Новиков, С.Г. Оптоволоконная дозиметрическая система на базе сцинтилляционного оптического волокна / С.Г. Новиков, А.А. Черторийский, А.В. Беринцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 1017–1023.
31. Goncharenko, I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, No. 27. – P. 7629–7635. – DOI: 10.1364/AO.56.007629.

**Измерение поглощенной дозы ионизирующего излучения с помощью
оптических волноводных структур**

**Measurement of absorbed dose of ionizing radiation by means
of optical waveguide structures**

Гончаренко Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Ihar02@list.ru

ORCID: 0000-0002-8063-8068

Igor A. Goncharenko

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Chair
of Natural Sciences, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Ihar02@list.ru

ORCID: 0000-0002-8063-8068

Ильюшонок Александр Васильевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, заведующий кафедрой

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: ilyushonak@ucp.by

ORCID: 0000-0001-7523-4483

Alexandr V. Ilyushonok

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Chair
of Natural Sciences, Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: ilyushonak@ucp.by

ORCID: 0000-0001-7523-4483

Рябцев Виталий Николаевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
начальник кафедрой

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: v.reabtsev@ucp.by

ORCID: 0000-0002-2830-591X

Vitaly N. Reabtsev

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: v.reabtsev@ucp.by

ORCID: 0000-0002-2830-591X

MEASUREMENT OF ABSORBED DOSE OF IONIZING RADIATION BY MEANS OF OPTICAL WAVEGUIDE STRUCTURES

Goncharenko I.A., Il'yushonok A.V., Reabtsev V.N.

Purpose. Analysis of the measuring methods and structures of the sensors of absorbed dose of ionizing radiation on the base of optical waveguides.

Methods. The general methodology of the work included the use of theoretical research methods (analysis, synthesis, comparison).

Findings. The measurement methods and structures of the sensors of absorbed dose of ionizing radiation on the base of optical waveguides are analyzed. The physical effects underlying the methods are considered. It's shown that the sensors comprising microring resonators on the base of silicon waveguides coated with fluoropolymer are the most prospective due to the higher sensitivity.

Application field of research. The results of review and analysis of the information about the methods of measurement of absorbed dose of ionizing radiation can serve as a basis for creating effective optical waveguide dosimeters with higher sensitivity.

Keywords: optical waveguide, ionizing radiation, radiation dose, scintillator, Bragg grating, ring microresonator.

(The date of submitting: April 13, 2022)

REFERENCES

1. Friebele E.J., Griscom D.L., Sigel G.H. Defect centers in a germanium-doped silica core optical fiber. *Journal of Applied Physics*, 1974. Vol. 45, No. 8. Pp. 3424–3428. DOI: 10.1063/1.1663795.
2. Friebele E.J. Gingerich M.E., Long K.J. Radiation damage of optical fiber waveguides at long wavelengths. *Applied Optics*, 1982. Vol. 21, No. 3. Pp. 547–553. DOI: 10.1364/AO.21.000547.
3. *The Dosimetry of Ionizing Radiation*. Ed. by K.R. Kase, B.E. Bjärngard, F.H. Attix. Academic Press, 1987. Vol. 2. 384 p.
4. Andreo P., Burns D.T., Nahum A.E., Seuntjens J., Attix F.H. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*. Wiley, 2017. 957 p.
5. London Y. [et al.] Opto-Mechanical Fiber Sensing of Gamma Radiation. *Journal of Lightwave Technology*, 2021. Vol. 39, No. 20. Pp. 6637–6645.
6. Boynton N., Gehl M., Dallo C. [et al.] Gamma radiation effects on passive silicon photonic waveguides using phase sensitive methods. *Optics Express*, 2020. Vol. 28, No. 23. Pp. 35192–35201. DOI: 10.1364/OE.401299.
7. Gusarov A.I., Berghmans F., Fernandez A.F. [et al.] Behaviour of fibre Bragg gratings under high total dose gamma radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000. Vol. 47, Iss. 3. Pp. 688–692. DOI: 10.1109/23.856499.
8. Girard S., Kuhnenn J., Gusarov A. [et al.] Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013. Vol. 60, No. 3. Pp. 2015–2036. DOI: 10.1109/TNS.2012.2235464.
9. Paul M.C., Sen R., Bhadra S.K. [et al.] Gamma ray radiation induced absorption in Ti doped single mode optical fibres at low dose levels. *Optical Materials*, 2007. Vol. 29, No. 6. Pp. 738–745. DOI: 10.1016/j.optmat.2005.12.004.
10. Paul M.C., Sen R., Bhadra S.K., Dasgupta K. Radiation response behaviour of Al codoped germano-silicate SM fiber at high radiation dose. *Optics Communications*, 2009. Vol. 282. Pp. 872–878. DOI: 10.1016/j.optcom.2008.11.052.
11. Paul M.C., Bohra D., Dhar A. [et al.] Radiation response behavior of high phosphorous doped step-index multimode optical fibers under low dose gamma irradiation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009. Vol. 355. Pp. 1496–1507. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.05.017.
12. Tomashuk A.L. Volokonno-opticheskie dozimetriy [Fiber Optic Dosimeters]. *Foton-Ekspress*, 2005. No. 7. Pp. 53–55. (rus)
13. Tomashuk A.L., Grekov M.V., Vasiliev S.A., Svetukhin V.V. Fiber-optic dosimeter based on radiation-induced attenuation in P-doped fiber: suppression of post-irradiation fading by using two working

- wavelengths in visible range. *Optics Express*, 2014. Vol. 22, No. 14. Pp. 16778–16783. DOI: 10.1364/OE.22.016778.
14. Alasia D., Fernández A., Abrardi L., Brichard B., Thévenaz L. The effects of gamma-radiation on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibres. *Measurement Science and Technology*, 2006. Vol. 17, No. 5. Pp. 1091–1094. DOI: 10.1088/0957-0233/17/5/S25.
 15. Phéron X., Girard S., Boukenter A. [et al.] High γ -ray dose radiation effects on the performances of Brillouin scattering based optical fiber sensors. *Optics Express*, 2012. Vol. 20, No. 24. Pp. 26978–26985. DOI: 10.1364/OE.20.026978.
 16. Stolov A.A., Warych E.T., Smith W.P. [et al.] Effects of sterilization on optical and mechanical reliability of specialty optical fibers and terminations. *Proc. of the SPIE of Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment and Environmental Applications XIV, United States, California, San Francisco, 2014*. Vol. 8938. Pp. 893806. DOI: 10.1117/12.2036864.
 17. 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. *Journal of Applied Physics*, 2015. Vol. 118. Pp. 074502. DOI: 10.1063/1.4928966.
 18. Fernandez A.F., Brichard B., Berghmans F., Decreton M. Dose-rate dependencies in gamma-irradiated fiber Bragg grating filters. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002. Vol. 49, No. 6. Pp. 2874–2878. DOI: 10.1109/TNS.2002.805985.
 19. Maier R.R.J., MacPherson W.N., Barton J.S. [et al.] Fibre Bragg gratings of type I in SMF-28 and B/Ge fibre and type IIA B/Ge fibre under gamma radiation up to 0,54 MGy. *Proc. of SPIE 17th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2005. Vol. 5855. Pp. 511–514. DOI: 10.1117/12.624037.
 20. Faustov A., Saffari P., Koutsides C. [et al.] Highly radiation sensitive type IA FBGs for future dosimetry applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012. Vol. 59, No. 4. Pp. 1180–1185. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202247.
 21. Krebber K., Henschel H., Weinand U. Fibre Bragg gratings as high dose radiation sensors? *Measurement Science and Technology*, 2006. Vol. 17, No. 5. Pp. 1095–1102. DOI: 10.1088/0957-0233/17/5/S26.
 22. Baccini D.J., Hinckley S., Wild G., Banos C., Davies J. Gamma irradiation in fibre Bragg gratings. *Proc. of 20th Australian Institute of Physics Congress, Australia, Sydney, 2012*. Engineers Australia, 2012. Pp. 1–4.
 23. Rana S., Subbaraman H., Fleming A., Kandadai N. Numerical analysis of radiation effects on fiber optic sensors. *Sensors*, 2021. Vol. 21. Pp. 4111-1–4111-17. DOI: 10.3390/s21124111.
 24. Bhandaru S., Hu S., Fleetwood D.M., Weiss S.M. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2015. Vol. 62, No. 1. Pp. 323–328. DOI: 10.1109/TNS.2014.2387772.
 25. Grillanda S., Singh V., Raghunathan V. [et al.] Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides. *Optics Letters*, 2016. Vol. 41, No. 13. Pp. 3053–3056. DOI: 10.1364/OL.41.003053.
 26. Du Q., Huang Y., Ogbuu O. [et al.] Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices. *Optics Letters*, 2017. Vol. 42, No. 3. Pp. 587–590. DOI: 10.1364/OL.42.000587.
 27. Zhuang Q., Yaosheng H., Yu M. [et al.] Embedded structure fiber-optic radiation dosimeter for radiotherapy applications. *Optics Express*, 2016. Vol. 24, No. 5. Pp. 5172–5185. DOI: 10.1364/OE.24.005172.
 28. Suarez M.A., Lim T., Robillot L. [et al.] Miniaturized fiber dosimeter of medical ionizing radiations on a narrow optical fiber. *Optics Express*, 2019. Vol. 27, No. 24. Pp. 35588–35599. DOI: 10.1364/OE.27.035588.
 29. Jia M., Wen J., Pan X. [et al.] Tapered fiber radiation sensor based on Ce/Tb:YAG crystals for remote γ -ray dosimetry. *Optics Express*, 2021. Vol. 29, No. 2. Pp. 1210–1220. DOI: 10.1364/OE.413822.
 30. Novikov S.G., Chertoriyskiy A.A., Berintsev A.V. Optovolokonnaya dozimetricheskaya sistema na baze stintillyatsionnogo opticheskogo volokna [Fiber optic dosimetry system based on scintillation optical fiber]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2013. T. 15, No. 4. Pp. 1017–1023. (rus)
 31. Goncharenko I., Marciniak M., Reabtsev V. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators. *Applied Optics*, 2017. Vol. 56, No. 27. Pp. 7629–7635. DOI: 10.1364/AO.56.007629.