

ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ГИПЕРСВЯЗАННЫМ ФТОРПОЛИМЕРОМ

Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Марсиньяк М., Рябцев В.Н.

Цель. Оптимизация параметров волноводных микрокольцевых резонаторов для достижения максимальной чувствительности оптических детекторов ионизирующего излучения.

Методы. Методы численного моделирования распределения полей и определения эффективного показателя преломления мод изогнутых щелевых волноводов, алгоритмы расчета на основе метода линий.

Результаты. Представлена структура и принципы работы оптического детектора ионизирующего излучения. Чувствительный элемент детектора представляет собой микрокольцевой резонатор на основе щелевых волноводов, заполненных гиперсвязанным фторполимером. Проведена оптимизация параметров щелевого волновода для получения максимальной чувствительности детектора. Показано, что чувствительность детектора на основе микрокольцевого резонатора из волновода с двумя щелями с оптимальными параметрами и радиусом резонатора 67,8 мкм достигает 103,5 мкА/кГр при измерительном диапазоне 85 кГр и разрешении 0,2 Гр.

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

Ключевые слова: микрокольцевой резонатор, щелевой волновод, гиперсвязанный фторполимер, детектор ионизирующего излучения.

(Поступила в редакцию 17 апреля 2025 г.)

Введение

Измерение доз ионизирующего излучения (ИИ) необходимо в атомной энергетике, например, для контроля обстановки в реакторном зале атомных электростанций и технологических каналах ядерных реакторов, радиационной безопасности, медицине и целом ряде других областей. К сенсорным элементам традиционных дозиметров необходимо подавать электрическое питание. В результате аварий линии передачи электроэнергии могут быть нарушены [1; 2]. Оптические дозиметры на основе волноводных структур обладают высокой надежностью, поскольку устойчивы к электромагнитным, химическим и механическим воздействиям. Они не требуют электрического питания сенсорных элементов, поэтому могут продолжать работу при полном отключении электроснабжения. При этом полностью устраняется возможность искрения и возгорания. Оптические волноводные дозиметры позволяют проводить удаленные измерения в режиме реального времени. Их сенсорные элементы могут быть расположены в сотнях метров от фотоэлектрических преобразующих устройств [3; 4].

В технических устройствах, работающих в условиях жесткого излучения, например, на космических аппаратах или в активной зоне ядерных реакторов, используются датчики различных физических величин на основе волноводных резонансных структур (резонаторов Фабри – Перо, микрокольцевых резонаторов) [5]. Под воздействием ИИ происходит деградация материала волноводов из-за образования дефектов и эффекта ионизации [6; 7]. Дефекты приводят к изменению оптических свойств материала из-за образования зон поглощения и центров окраски [8–10]. К тому же под влиянием ИИ изменяется показатель преломления и оптическая длина резонатора, что вызывает сдвиг резонансной длины волны или интерференционных полос. Таким образом, с помощью данных структур можно измерять дозу ИИ с большой точностью [11].

Основная часть

Принцип работы детектора. В работе [12] рассмотрено влияние больших доз гамма-излучения на кольцевые резонаторы на основе двух типов волноводов из аморфного кремния ($a\text{-Si}$), имеющих одинаковые размеры. Оболочка одного из волноводов выполнена из термического оксида кремния SiO_2 . В качестве оболочки другого волновода использован слой гиперсвязанного фторполимера (ЭП-полимер).

Сдвиг резонансной длины волны резонатора на основе волновода, покрытого SiO_2 , после воздействия гамма-излучения с общей дозой 150 кГр не наблюдался. Воздействие ионизирующего излучения на кольцевой резонатор на основе волновода с покрытием из ЭП-полимера приводит к сдвигу его резонансной длины волны на 21 пм в область меньших длин волн. Такой сдвиг соответствует изменению эффективного показателя преломления моды волновода примерно на $-4,8 \times 10^{-5}$. Поскольку все материалы волновода, за исключением покрытия, такие же, как и в первом случае, можно заключить, что сдвиг резонансной длины волны происходит из-за изменений показателя преломления покрывающего волновод ЭП-полимера. Таким образом, представляется возможным определить зависимость показателя преломления гиперсвязанного фторполимера от поглощенной дозы гамма-излучения.

Для этого был проведен расчет изменений эффективного показателя преломления моды изогнутого с радиусом изгиба 67,8 мкм полоскового волновода с покрытием из ЭП-полимера, исследованного в работе [12], в зависимости от дозы ИИ. Расчет проводился с помощью метода линий [13; 14], модифицированного для исследуемой структуры. Показатель преломления ЭП-полимера при отсутствии воздействия ИИ равен 1,38. Для этой величины был рассчитан эффективный показатель преломления волноводной моды. Далее мы изменяли показатель преломления ЭП-полимера и оценивали смещение эффективного показателя преломления моды вплоть до величины $4,8 \times 10^{-5}$. Значение показателя преломления ЭП-полимера, при котором получилось такое смещение, уменьшилось на $4,742 \times 10^{-4}$. Это значение было принято за величину показателя преломления ЭП-полимера после воздействия дозы ИИ, равной 150 кГр. На основании этих расчетов мы получили выражение, описывающее зависимость показателя преломления ЭП-полимера от поглощенной дозы ИИ, в предположении, что эта зависимость линейна.

Используя полученную зависимость, мы рассчитали функцию пропускания микрокольцевого резонатора на основе волноводов с одной и двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными ЭП-полимером.

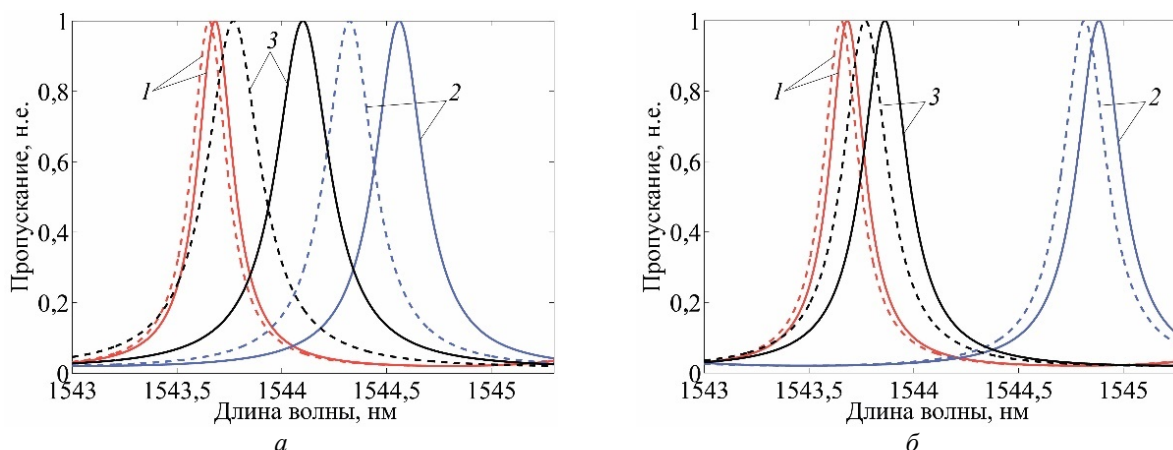


Рисунок 1. – Нормализованные функции пропускания кольцевых микрорезонаторов на основе полоскового волновода (кривые 1) и волноводов с вертикальными (а) и горизонтальными (б) щелями до (сплошные линии) и после (штриховые линии) облучения гамма-излучением дозой 150 кГр. Кривые 2 и 3 соответствуют волноводам с одной и двумя щелями

Как видно из рисунка 1, использование щелевых волноводов приводит к существенному увеличению смещения резонансной длины волны. Так, сдвиг резонансной длины волны микрорезонатора на основе волновода с одной вертикальной или горизонтальной щелью при поглощенной дозе гамма-излучения 150 кГр составляет соответственно 237 и 127 пм. Для волноводов с двумя вертикальными и горизонтальными щелями сдвиг равен соответственно 331 и 151 пм. Таким образом, наиболее чувствительными к воздействию ИИ являются волноводы с двумя щелями. При использовании микрорезонаторов на основе волноводов с двумя вертикальными щелями чувствительность детектора ИИ можно повысить более чем в 10 раз.

Оценка чувствительности детектора. Для оценки чувствительности детектора ИИ проанализирована зависимость интенсивности оптического сигнала на выходе резонатора на основе волноводов с двумя щелями, заполненными ЭП-полимером, от поглощенной дозы гамма-излучения при различных параметрах резонатора. Исследуемая структура представлена на рисунке 2. В качестве начальных параметров оптического излучения использовались

параметры полупроводникового лазера FU-68PDF-V510M с выходной оптической мощностью 15 мВт на длине волны 1550 нм. Оптическое излучение на выходе из кольцевого резонатора преобразовывалось в электрический сигнал р-и-п фотодиодом ФД-161 на основе соединения InGaAs. Точковая чувствительность фотодиода на рабочей длине волны 1550 нм – не менее 0,8 А/Вт, темновой ток – не более 20 нА [15].

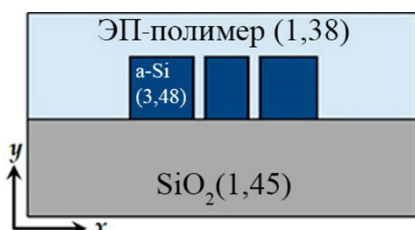


Рисунок 2. – Поперечное сечение волновода с двумя вертикальными щелями, заполненными ЭП-полимером

Чувствительность и измерительный диапазон детектора ИИ зависят от размеров щелей, заполненных ЭП-полимером, их разнесения (расстояния между щелями) и геометрических размеров волновода. Мы провели расчет сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волноводов с двумя вертикальными щелями с заполнением ЭП-полимером при различных его геометрических параметрах от поглощенной дозы гамма-излучения. На основе полученных результатов была проведена оптимизация параметров волновода для оценки максимальной чувствительности детектора ИИ.

На рисунке 3 приведено сравнение интенсивности сигналов на выходе микрокольцевого резонатора в зависимости от поглощенной дозы ИИ для волноводов со щелями различной ширины. Наклон кривых, описывающих зависимость выходного сигнала от дозы ИИ, характеризует чувствительность детектора. Штриховая линия соответствует резонатору на основе полоскового волновода. Как показано на рисунке 3а, наибольшей чувствительностью обладает резонатор на основе волноводов со щелями шириной 75 нм.

Это может быть объяснено следующим образом. Как следует из рисунка 3б, моды волноводов с узкими щелями имеют наибольшую интенсивность электрического поля в области щелей. Однако количество ЭП-полимера в узких щелях мало, что приводит к слабому взаимодействию поля моды с ЭП-полимером. Поскольку ИИ воздействует в основном на ЭП-полимер, влияние ИИ на направляющие свойства таких волноводов мало. В волноводах с широкими щелями количество ЭП-полимера значительно. Однако интенсивность поля моды в области щелей мала. Это также приводит к слабому влиянию ИИ на направляющие свойства волновода. В волноводе с шириной щели 75 нм достигается оптимальное соотношение между интенсивностью поля моды и количеством ЭП-полимера. В этом случае и достигается наибольшая чувствительность направляющих свойств волновода к влиянию ИИ.

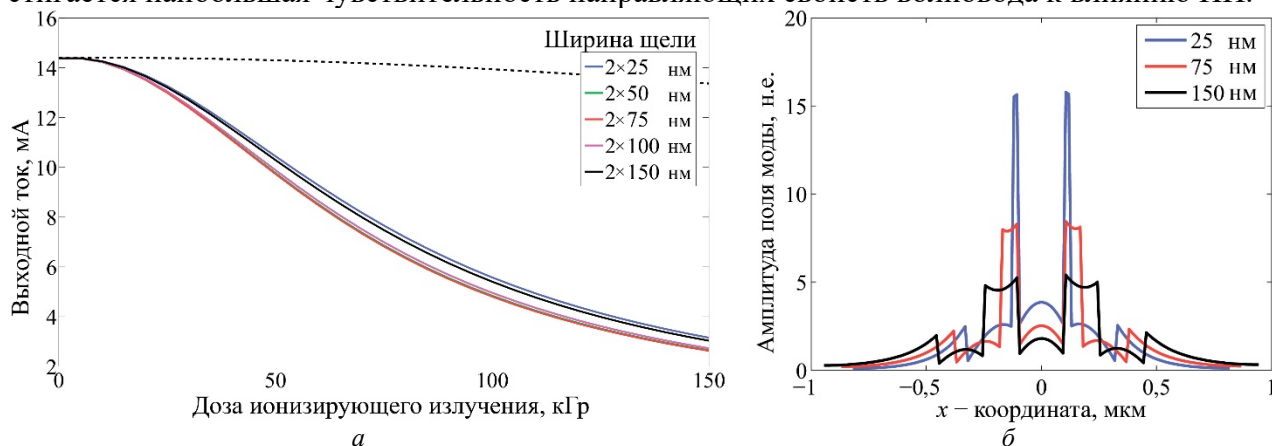


Рисунок 3. – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волноводов с двумя вертикальными щелями с заполнением ЭП-полимером от поглощенной дозы гамма-излучения (а) и поперечное распределение электрических полей мод таких волноводов (б) при разной ширине щелей. Штриховая кривая относится к полосковому волноводу. Ширина волноводов 600 нм, расстояние между щелями 200 нм

На рисунке 4 показано сравнение чувствительности сигнала на выходе микрорезонатора от поглощенной дозы ИИ для волноводов с различной шириной и оптимальными размерами щелей (2×75 нм). Расстояние между щелями равно одной третьей общей ширины волновода. Как следует из рисунка 4а, наибольшей чувствительностью к ИИ обладает микрокольцевой резонатор на основе волновода с шириной 570 нм.

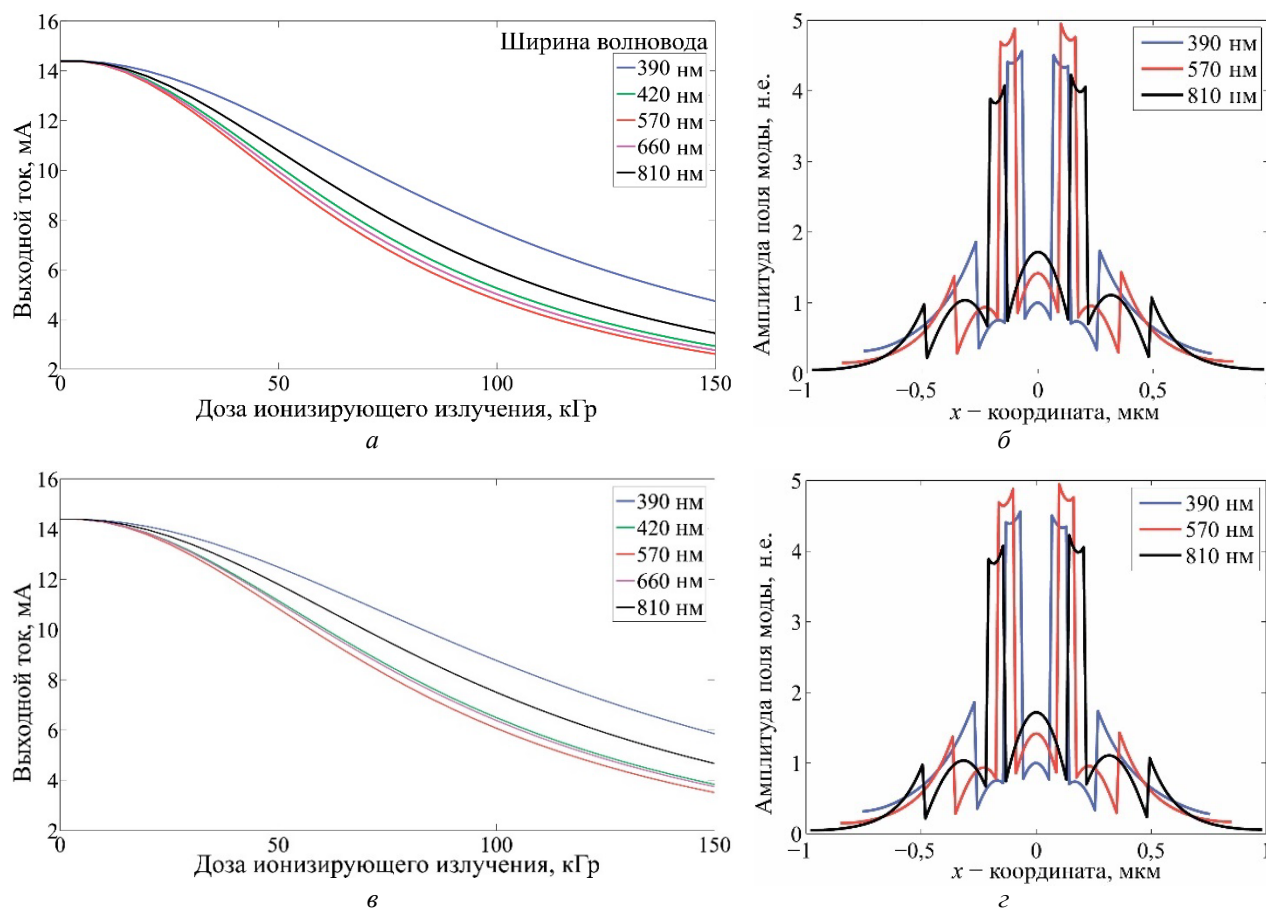


Рисунок 4. – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волноводов с двумя вертикальными щелями шириной 75 нм с заполнением ЭП-полимером от поглощенной дозы гамма-излучения (а, в) и поперечное распределение электрических полей мод таких волноводов (б, з) при разной ширине волновода, (а, б) соответствуют волноводам с верхним покрытием из ЭП-полимера, (в, з) – волноводам с верхней оболочкой из SiO₂

Увеличение ширины волновода приводит также к увеличению количества ЭП-полимера, образующего верхнее покрытие волновода. Это может оказывать влияние на оптимальную с точки зрения максимальной чувствительности ширину волновода. Для того чтобы проверить это предположение, мы рассчитали чувствительность детектора на основе такого же волновода с двумя щелями с заполнением ЭП-полимером, но с верхним покрытием из SiO₂ вместо ЭП-полимера. Как видно из рисунка 4в, чувствительность такого детектора немного ниже, чем устройства на основе волновода с верхним покрытием из ЭП-полимера. Однако по-прежнему наибольшей чувствительностью обладает микрокольцевой резонатор на основе волновода с шириной 570 нм.

Наличие оптимальной ширины волновода, обеспечивающей наибольшую чувствительность, можно объяснить с помощью поперечного распределения поля волноводной моды, представленного на рисунках 4 б, з. Энергия моды волновода распределена по всему его поперечному сечению. В более широком волноводе энергия моды распределена по большей площади, и амплитуда поля моды в области щели мала. В более узких волноводах энергия моды концентрируется в основном в области полосок волновода. Это также приводит к малой энергии моды в области щелей. Наибольшая амплитуда поля моды наблюдается для волноводов с шириной 570 нм с верхним покрытием как из ЭП-полимером, так и SiO₂. Поскольку количество ЭП-полимера в области щелей для волноводов с различной шириной оставалось одинаковым, чувствительность детектора зависит в основном от энергии моды

в областях, заполненных ЭП-полимером. Таким образом, максимальная чувствительность к влиянию ИИ была получена для волноводов с шириной 570 нм.

Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волноводов с оптимальной шириной 570 нм с двумя вертикальными щелями с оптимальной шириной 2×75 нм, заполненными ЭП-полимером, от поглощенной дозы гамма-излучения при различных расстояниях между щелями представлена на рисунке 5. Как видно из рисунка, наибольшей чувствительностью к ИИ обладают волноводы с разнесением щелей, примерно равным одной третьей ширины волновода (все три полосы волновода имеют одинаковую ширину).

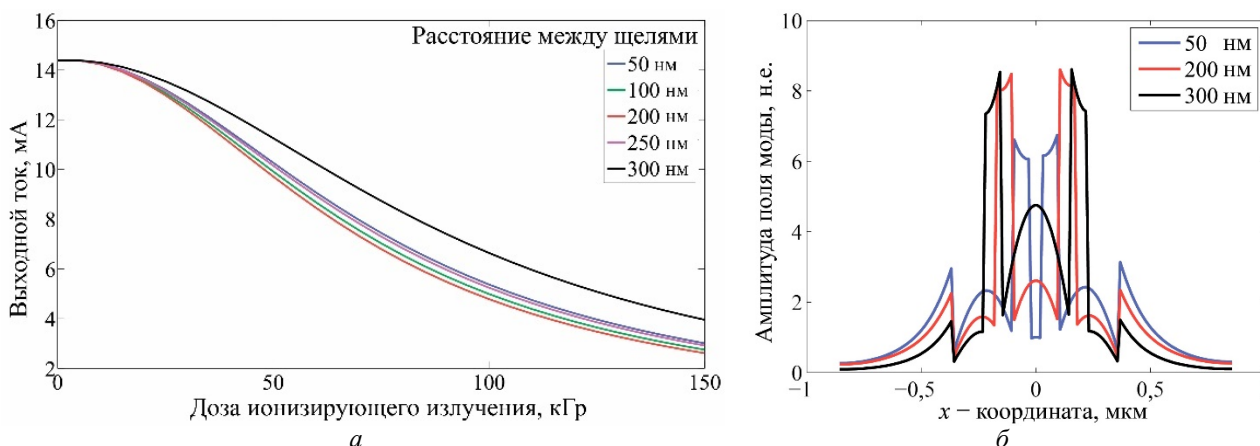


Рисунок 5. – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волноводов шириной 570 нм с двумя вертикальными щелями 2×75 нм с заполнением ЭП-полимером от поглощенной дозы гамма-излучения (а) и поперечное распределение электрических полей мод таких волноводов (б) при разном расстоянии между щелями

При малом разнесении щелей распределение электрического поля моды соответствует полю супермоды двух связанных волноводов. При этом интенсивность поля моды в области щелей мала (синяя кривая). Распределение поля моды в волноводе с большим расстоянием между щелями подобно полю моды обычного полоскового волновода (черная кривая), роль которого выполняет центральная полоска волновода с двумя щелями. Таким образом, поле моды в основном концентрируется в центральной полоске волновода, а в области щелей с ЭП-полимером интенсивность поля моды незначительна. При оптимальном расстоянии между щелями распределение поля моды подобно полю супермоды трех связанных волноводов. При этом интенсивность поля моды в области щелей значительна (красная кривая). Это приводит к наибольшим изменениям эффективного показателя преломления моды волновода из-за вариаций показателя преломления ЭП-полимера под воздействием ИИ и обеспечивает максимальную чувствительность датчика на основе такого волновода.

Как показали расчеты, чувствительность детектора на основе волноводов с двумя щелями с оптимальными параметрами может достигать 103,5 мкА/кГр при диапазоне измерений 85 кГр. В качестве диапазона измерений мы рассматривали линейную часть расчетной зависимости выходного тока фотодетектора от дозы ИИ (от 25 до 110 кГр). Поскольку темновой ток фотодетектора порядка 20 нА, очевидно, что детектор позволяет отслеживать изменения поглощенной дозы гамма-излучения с шагом не менее 0,2 Гр.

Все расчеты проводились для микрокольцевых резонаторов с радиусом 67,8 мкм, таким же, как в работе [12]. Дополнительные вариации чувствительности детектора можно получить, изменяя радиус резонатора (радиус изгиба волновода). Как следует из рисунка 6, увеличение радиуса изгиба волновода позволяет увеличить чувствительность детектора (61,7 мкА/кГр для радиуса изгиба 35,0 мкм, 103,5 мкА/кГр для радиуса изгиба 67,8 мкм и 182,1 мкА/кГр для радиуса изгиба 100,0 мкм). Разрешение детектора соответственно равно 0,33, 0,20 и 0,11 Гр. Однако это приводит также к уменьшению измерительного диапазона: 35, 85 и более 100 кГр для радиусов изгиба соответственно 100,0, 67,8 и 35,0 мкм. Это объясняется разным наклоном кривых, описывающих функцию пропускания микрокольцевых резонаторов с различными радиусами.

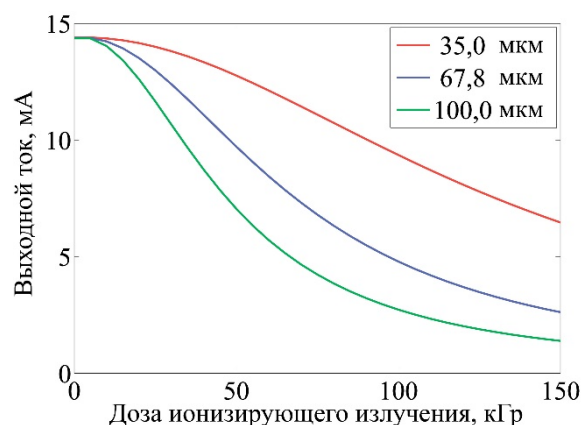


Рисунок 6. – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волноводов шириной 570 нм с двумя вертикальными щелями 2×75 нм с заполнением ЭП-полимером с разнесением щелей 200 нм от поглощенной дозы гамма-излучения при различных радиусах микрокольцевого резонатора

Заключение

Показана возможность использования микрокольцевых резонаторов на основе щелевых волноводов для измерения поглощенной дозы ИИ. Для увеличения чувствительности направляющих свойств волновода к влиянию ИИ щели волновода заполнены гиперсвязанным фторполимером. Проведена оптимизация параметров щелевого волновода для достижения максимальной чувствительности детектора к воздействию ИИ. Как показали расчеты, наибольшей чувствительностью к воздействию ИИ обладают микрокольцевые резонаторы на основе волноводов с двумя вертикальными щелями, в которых ширина трех диэлектрических полосок приблизительно одинакова. В этом случае распределение полей мод подобно полям трех связанных волноводов. Для волноводов, выполненных из аморфного кварца с верхним покрытием и заполнением щелей из ЭП-полимера, оптимальная ширина составляет 570 нм, а ширина щелей – 2×75 нм.

Чувствительность детектора на основе микрокольцевого резонатора из волновода с двумя щелями с оптимальными параметрами и радиусом резонатора 67,8 мкм достигает 103,5 мкА/кГр при измерительном диапазоне 85 кГр и разрешении 0,2 Гр.

На точность измерения детектора могут влиять вариации температуры и флуктуации интенсивности источника излучения [16; 17]. Для того чтобы исключить влияние этих воздействий, можно использовать чувствительный элемент с двумя микрокольцевыми резонаторами. Одним из резонаторов является рассмотренное устройство, заполненное ЭП-полимером. Этот резонатор реагирует как на воздействие ИИ, так и на вариации температуры. Второй резонатор имеет такую же структуру, но без заполнения ЭП-полимером. Это устройство реагирует только на изменения температуры. Разностный сигнал от этих двух резонаторов зависит только от влияния ИИ.

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. 3421–3428. – 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. Kase, K.R. The dosimetry of ionizing radiation / K.R. Kase, B.E. Bjärngard, F.H. Attix. – New York: Academic Press, 1987. – Vol. 2. – 384 p. – DOI: 10.1016/C2013-0-10940-3.
4. Andreo, P. Fundamentals of ionizing radiation dosimetry / P. Andreo, D.T. Burns, A.E. Nahum [et al.]. – Weinheim: Wiley-VCH, 2017. – 857 p. – ISBN 978-3-527-40921-1.
5. Rana, S. Numerical analysis of radiation effects on fiber optic sensors / S. Rana, H. Subbaraman, A. Fleming, N. Kandadai // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, No. 12. – P. 4111–4127. – DOI: 10.3390/s21124111.
6. Summers, G.P. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G.P. Summers, E.A. Burke, P. Shapiro [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1993. – Vol. 40, No. 6. – P. 1372–1379. – DOI: 10.1109/23.273529.
7. Johnston, A.H. Radiation effects in optoelectronic device / A.H. Johnston // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2013. – Vol. 60, No. 3. – P. 2054–2073. – DOI: 10.1109/TNS.2013.2259504.

8. West, R.H. Effects related to dose deposition profiles in integrated optics structures / R.H. West, S. Dowling // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1996. – Vol. 43, No. 3. – P. 1044–1049. – DOI: 10.1109/radecs.1995.509831.
9. Girard, S. 14-MeV neutron, γ -ray, and pulsed X-ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers / S. Girard, J. Baggio, J. Bisutti // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2006. – Vol. 53, No. 6. – P. 3750–3757. – DOI: 10.1109/TNS.2006.886222.
10. Berghmans, F. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors / F. Berghmans, B. Brichard, A.F. Fernandez [et al.] // *Optical Waveguide Sensing and Imaging. NATO Science for Peace and Security Series*. – Springer, Netherlands, 2008. – P. 127–165. – DOI: 10.1007/978-1-4020-6952-9_6.
11. Гончаренко, И.А. Измерение поглощенной дозы ионизирующего излучения с помощью оптических волноводных кольцевых резонаторов / И.А. Гончаренко, А.В. Ильюшенок, В.Н. Рябцев // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2023. – Т. 7, № 1. – С. 5–12. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.5. – EDN: ATBOQQ.
12. Grillanda, S. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda, V. Singh, V. Raghunathan [et al.] // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, No. 13. – P. 3053–3056. – DOI: 10.1364/OL.41.003053.
13. Pregla, R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends / R. Pregla // *Journal of Lightwave Technology*. – 1996. – Vol. 14, No. 4. – P. 634–639. – DOI: 10.1109/50.491403.
14. Goncharenko, I.A. Radiation loss and mode field distribution in curved holey fibers / I.A. Goncharenko, S.F. Helfert, R. Pregla // *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. – 2005. – Vol. 59, No. 3. – P. 185–191. – DOI: 10.1016/j.aeue.2004.11.012.
15. 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.
16. Karnutsch, C. Temperature stabilization of optofluidic photonic crystal cavities / C. Karnutsch, C.L.C. Smith, A. Graham [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 94, No. 23. – Article 231114. – 3 p. – DOI: 10.1063/1.3152998.
17. Zhao, Y. Electric field sensor based on photonic crystal cavity with liquid crystal infiltration / Y. Zhao, Y.-N. Zhang, R.-Q. Lv, J. Li // *Journal of Lightwave Technology*. – 2017. – Vol. 35, No. 16. – P. 3440–3446. – DOI: 10.1109/JLT.2016.2576500.

Детекторы ионизирующего излучения на основе волноводных кольцевых резонаторов с гиперсвязанным фторполимером

Detectors of ionizing radiation on the base of waveguide ring resonators with hyperlinked fluoropolymer

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: igor02@tut.by

SPIN-код: 7194-0240

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: igor02@tut.by

ORCID: 0000-0002-8063-8068

Ильюшенок 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

SPIN-код: 7209-8335

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

Марсиньяк Мариан

доктор технических наук, профессор
Национальный институт телекоммуникаций,
отдел оптической связи, начальник отдела

Адрес: ул. Шахова, 1,
04-894, г. Варшава, Польша

Email: M.Marciniak@il-pib.pl

Marian Marciniak

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
National Institute of Telecommunications,
Department of Optical Telecommunications,
Head of the Department

Address: Szachowa str., 1,
04-894, Warsaw, Poland

Email: M.Marciniak@il-pib.pl

ORCID: 0000-0001-9494-9097

Рябцев Виталий Николаевич

кандидат технических наук, доцент

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

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

Email: v.reabtsev@ucp.by

SPIN-код: 9218-7854

Vitaly N. Ryabtsev

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

DETECTORS OF IONIZING RADIATION ON THE BASE OF WAVEGUIDE RING RESONATORS WITH HYPERLINKED FLUOROPOLYMER

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

Purpose. Optimization of the parameters of waveguide microring resonators in order to achieve the maximal sensitivity of optical detectors of ionizing radiation.

Methods. Methods of numerical calculation of the field distribution and effective index of the mode of bent slot waveguides, algorithms of calculation on the base of the method of lines.

Findings. The structure and operation principles of optical detector of ionizing radiation are presented. The sensor element of the detector is the microring resonator based on the slot waveguide filled with hyperlinked fluoropolymer. The optimization of the slot waveguide parameters in order to achieve the maximal detector sensitivity has been carried out. It is shown that the sensitivity of the detector on the base of microring resonator from double slot waveguides with optimized parameters and resonator radius equal to 67.8 μm could be as high as 103.5 $\mu\text{A/kGy}$ at measuring range equal to 85 kGy and detector resolution equal to 0.2 Gy.

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 high sensitivity.

Keywords: microring resonator, slot waveguide, hyperlinked fluoropolymer, detector of ionizing radiation.

(The date of submitting: April 17, 2025)

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. 3421–3428. 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. Kase K.R., Bjärngard B.E., Attix F.H. *The dosimetry of ionizing radiation*. New York: Academic Press, 1987. Vol. 2. 384 p. DOI: 10.1016/C2013-0-10940-3.
4. Andreo P., Burns D.T., Nahum A.E., Seuntjens J., Attix F.H. *Fundamentals of ionizing radiation dosimetry*. Weinheim: Wiley-VCH, 2017. 857 p. ISBN 978-3-527-40921-1.
5. Rana S., Subbaraman H., Fleming A., Kandadai N. Numerical analysis of radiation effects on fiber optic sensors. *Sensors*, 2021. Vol. 21, No. 12. Pp. 4111–4127. DOI: 10.3390/s21124111.
6. Summers G.P., Burke E.A., Shapiro P., Messenger S.R., Walters R.J. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1993. Vol. 40, No. 6. Pp. 1372–1379. DOI: 10.1109/23.273529.
7. Johnston A.H. Radiation effects in optoelectronic device. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013. Vol. 60, No. 3. Pp. 2054–2073. DOI: 10.1109/TNS.2013.2259504.
8. West R.H., Dowling S. Effects related to dose deposition profiles in integrated optics structures. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996. Vol. 43, No. 3. Pp. 1044–1049. DOI: 10.1109/radecs.1995.509831.
9. Girard S., Baggio J., Bisutti J. 14-MeV neutron, γ -ray, and pulsed X-ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006. Vol. 53, No. 6. Pp. 3750–3757. DOI: 10.1109/TNS.2006.886222.
10. Berghmans F., Brichard B., Fernandez A.F., Gusarov A., Uffelen M.V., Girard S. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors. In: *Optical Waveguide Sensing and Imaging. NATO Science for Peace and Security Series*. Springer, Netherlands, 2008. Pp. 127–165. DOI: 10.1007/978-1-4020-6952-9_6.
11. Goncharenko I.A., Il'yushonok A.V., Ryabtsev V.N. Izmerenie pogloshchennoy dozy ioniziruyushchego izlucheniya s pomoshch'yu opticheskikh volnovodnykh kol'tsevykh rezonatorov [Measurement of absorbed dose of ionizing radiation by means of optical waveguide ring resonators]. *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 1. Pp. 5–12. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.5. EDN: ATBOQQ.
12. Grillanda S., Singh V., Raghunathan V., Morichetti F., Melloni A., Kimerling L., Agarwal A.M. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides. *Optics Letters*, 2016. Vol. 41, No. 13. Pp. 3053–3056. DOI: 10.1364/OL.41.003053.

13. Pregla R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends. *Journal of Lightwave Technology*, 1996. Vol. 14, No. 4. Pp. 634–639. DOI: 10.1109/50.491403.
14. Goncharenko I.A., Helfert S.F., Pregla R. Radiation loss and mode field distribution in curved holey fibers. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 2005. Vol. 59, No. 3. Pp. 185–191. DOI: 10.1016/j.aeue.2004.11.012.
15. 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.
16. Karnutsch C., Smith C.L.C., Graham A., Tomljenovic-Hanic S., McPhedran R., Eggleton B.J. [et al.]. Temperature stabilization of optofluidic photonic crystal cavities. *Applied Physics Letters*, 2009. Vol. 94, No. 23. Article 231114. 3 p. DOI: 10.1063/1.3152998.
17. Zhao Y., Zhang Y.-N., Lv R.-Q., Li J. Electric field sensor based on photonic crystal cavity with liquid crystal infiltration. *Journal of Lightwave Technology*, 2017. Vol. 35, No. 16. Pp. 3440–3446. DOI: 10.1109/JLT.2016.2576500.

Copyright © 2025 Goncharenko I.A., Il'yushonok A.V., Marciniak M., Reabtsev V.N.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.