# Повышение чувствительности оптического детектора ионизирующего излучения за счет использования щелевых волноводов

## И. А. Гончаренко, А. В. Ильюшонок, В. Н. Рябцев

Университет гражданской защиты, Минск, Беларусь, e-mail: <u>v.reabtsev@ucp.by</u>

В работе показана возможность использования микрокольцевых резонаторов на основе волноводов с двумя вертикальными щелями, заполненными гиперсвязанным фторполимером, в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения. Проведен анализ изменения направляющих свойств таких волноводов под воздействием ионизирующего излучения, а также оптимизация параметров кольцевых резонаторов на их базе с точки зрения достижения максимальной чувствительности.

*Ключевые слова:* микрокольцевой резонатор; щелевой волновод; гиперсвязанный фторполимер; детектор; ионизирующее излучение; поглощенная доза; метод линий.

# Increasing the sensitivity of optical detector of ionizing radiation by the use of slot waveguides

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

#### University of Civil Protection, Minsk, Belarus, e-mail: <u>v.reabtsev@ucp.by</u>

We demonstrated the possibility to use the microring resonators based on of the waveguide with two vertical slots filled with hyperlinked fluoropolymer as sensitive element of the detectors of absorbed dose of ionizing radiation. The analysis of influence of ionizing radiation on guiding properties of such waveguides and optimization of the parameters of ring resonators on that base in order to achieve the maximal sensitivity has been carried out.

*Keywords:* microring resonator; slot waveguide; hyperlinked fluoropolymer; detector; ionizing radiation; absorbed dose; Method of Lines.

## Введение

Измерения доз ионизирующего излучения (ИИ) 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

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

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 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) [5]. Воздействие ИИ вызывает деградацию материала волновода из-за образования дефектов и эффекта ионизации [6,7]. Дефекты приводят к изменению оптических свойств материала в результате возникновения полос поглощения и центров окраски [8–10]. С другой стороны, под воздействием ИИ изменяется показатель преломления и геометрическая длина резонатора, что приводит к смещению резонансной длины волны или полос интерференционной картины. Это позволяет использовать такие структуры для измерения доз ИИ с большой точностью [11].

## 1. Оптимизация чувствительного элемента детектора

Воздействие ИИ на функцию пропускания микрорезонаторов на основе кольцевых волноводов рассмотрено в работах [12–14].

В частности, в работе [13] экспериментально исследовано влияние больших доз гамма-излучения на кольцевые резонаторы на основе двух типов волноводов из аморфного кремния (*a*-Si). Первый волновод представляет собой слой *a*-Si толщиной 205 нм, расположенный на кремниевой подложке и с поверхностным покрытием из термического окисла SiO<sub>2</sub> толщиной 3 мкм. Второй волновод имеет такие размеры и изготовлен из таких же материалов, как и первый волновод, за исключением покрытия, которое в этом случае представляет собой слой гиперсвязанного фторполимера (ЭП полимера) также толщиной 3 мкм. Длина кольцевого волновода в обоих случаях одинакова и равна 426 мкм.

Сдвиг резонансной длины волны резонатора на основе волновода, покрытого SiO<sub>2</sub>, под воздействием ИИ не происходит. Таким образом, эффективный показатель преломления моды кольцевого волновода практически не меняется. Следовательно, показатель преломления, потери на распространение и рассеяние волноводов на основе аморфного кремния с покрытием SiO<sub>2</sub> после облучения гамма-излучением общей дозой 150 кГр не изменяются.

Воздействие ИИ на кольцевой резонатор на базе волновода с полимерным покрытием 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 (аморфный кремний и SiO<sub>2</sub>), за исключением покрытия, после облучения остаются неизменными по сравнению с первым случаем, то можно заключить, что сдвиг резонансной длины волны происходит из-за изменений показателя преломления покрывающего волновод полимера.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

Таким образом, представляется возможным определить зависимость показателя преломления ЭП полимера от поглощенной дозы гамма-излучения. Для этого нами проведены расчеты изменения эффективного показателя преломления моды полоскового волновода с покрытием из ЭП полимера, исследованного в работе [13], в зависимости от дозы ИИ. Расчет проводился с помощью метода линий [15, 16], модифицированного для исследуемой структуры. Зависимость показателя преломления ЭП полимера от поглощенной дозы ИИ предполагалась линейной.

Микрокольцевой резонатор может быть создан на базе щелевого волновода. Щелевой волновод состоит из полосок материала с высоким показателем преломления, разделенных областью материала с низким показателем преломления (щелью). Размеры щели меньше длины волны распространяющегося по волноводу оптического излучения. Такие щели могут располагаться вертикально [17, 18] либо горизонтально [19, 20] в виде слоистой структуры. Поле моды в области щели относительно велико. Если ЭП полимер расположить в области щели, то изменения его показателя преломления существенно повлияют на направляющие свойства всего волновода. Это приведет к значительно бо́льшим смещениям резонансной длины волны микрорезонатора, что позволит повысить чувствительность датчика.

Используя полученную зависимость показателя преломления ЭП полимера от поглощенной дозы ИИ, мы рассчитали функцию пропускания микрокольцевого резонатора на основе волноводов с одной и двумя вертикальными или горизонтальными щелями.



*Рис. 1.* Нормализованные функции пропускания кольцевых микрорезонаторов на базе полоскового волновода и волноводов с вертикальными (*a*) и горизонтальными (*б*) щелями до (сплошные линии) и после облучения (штриховые линии) гамма-излучением дозой 150 кГр. Кривые *1, 2 и 3* относятся соответственно к полосковому волноводу, волноводам с одной и двумя щелями

Как видно из рис. 1, использование щелевых волноводов приводит к существенному увеличению смещения резонансной длины волны. Так сдвиг резонансной длины волны микрорезонатора на базе волновода с одной вертикальной и горизонтальной щелями при поглощенной дозе гамма-излучения 150 кГр составляет 237 и 69 пм соответственно. Для волноводов с двумя вертикальными и горизонтальными щелями сдвиг равен соответственно 331 и 94 пм. Таким образом, наиболее чув-

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

ствительными являются волноводы с двумя щелями [21–25]. При использовании микрорезонаторов на основе волноводов с двумя вертикальными щелями чувствительность детектора ИИ можно повысить более чем в 10 раз.

Для оценки чувствительности детектора ИИ проанализирована зависимость интенсивности сигнала на выходе резонатора от поглощенной дозы гамма-излучения при различных параметрах резонатора. Чувствительность и измерительный диапазон детектора ИИ зависит от ширины щелей, заполненных ЭП полимером, их разнесения (расстояния между щелями) и ширины волновода. Для каждой ширины щелей мы определили оптимальную с точки зрения максимальной чувствительности ширину волновода. Оптимальное расстояние между щелями в каждом случае составляло около трети от ширины волновода. Кривые, описывающие зависимость сигналов на выходе резонатора от поглощенной дозы ИИ при различных значениях ширины щелей и оптимальных размерах волновода, представлены на рис. 2. Чувствительность датчика характеризуется наклоном кривых. Как видно из рисунка, наибольшей чувствительностью обладает детектор ИИ на основе волновода шириной 480 нм и двумя щелями шириной по 50 нм (2×50 нм).



Рис. 2. Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе полоскового волновода (кривая 1) и волноводов с двумя вертикальными щелями с заполнением ЭП полимером (кривые 2–7) от поглощенной дозы гамма-излучения:
2 – ширина волновода 420 нм, ширина щелей 2×25 нм, 3 – ширина волновода 480 нм, ширина щелей 2×50 нм, 3 – ширина волновода 570 нм, ширина щелей 2×75 нм, 5 – ширина волновода 630 нм, ширина шелей 2×100 нм, 6 – ширина волновода 645 нм, ширина щелей 2×125 нм, 7 – ширина волновода 675 нм, ширина щелей 2×150 нм

## Библиографические ссылки

- 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, iss. 8. P. 3424–3428.
- 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, iss. 3. P. 547–553.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

- 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. *Van Lint V. A. J.* The physics of radiation damage in particle detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1987. Vol. 253, iss. 3. P. 453–459.
- 6. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G. P. Summers [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1993. Vol. 40, iss. 6. P. 1372–1379.
- 7. Johnston A. H. Radiation effects in optoelectronic device // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. Vol. 60, iss. 3. P. 2054–2073.
- 8. *West R. H., Dowling S.* Effects related to dose deposition profiles in integrated optics structures // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 43, iss. 3. P. 1044–1049.
- Girard S. 14-MeV neutron, gamma-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, iss. 6. P. 3750–3757.
- 10. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors / F. Berghmans [et al.] // Optical Waveguide Sensing and Imaging. 1 ed. Netherlands: Springer, 2008. P. 127–165.
- 11. Гончаренко И. А. Измерение поглощенной дозы ионизирующего излучения с помощью оптических волноводных кольцевых резонаторов / И. А. Гончаренко, А. В. Ильюшонок, В. Н. Рябцев // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7, № 1. С. 5–12.
- 12. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators / S. Bhandaru [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. 2015. Vol. 62, iss. 1. P. 323–328.
- 13. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // Optics Letters. 2016. Vol. 41, iss. 13. P. 3053–3056.
- 14. Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices / Q. Du [et al.] // Optics Letters. 2017. Vol. 42, iss. 3. P. 587–590.
- 15. *Pregla R*. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends // Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14, iss. 4. P. 634–639.
- 16. Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Метод расчета изогнутых микроструктурированных волноводов с несколькими сердцевинами // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-мат. навук. 2015. № 4. С.87–95.
- 17. Guiding and confining light in void nanostructure / V. R. Almeida [et al.] // Optics Letters. 2004. Vol. 29, iss. 11. P. 1209–1211.
- 18. Guided-wave optical biosensors / V. M. N. Passaro [et al.] // Sensors. 2007. Vol. 7. P. 508–536.
- 19. Horizontal slot waveguides for polarization branching control / N. C. Cheng [et al.] // Applied Optics. 2015. Vol. 54, iss. 3. P. 436–443.
- 20. Optimization of a horizontal slot waveguide biosensor to detect DNA hybridization / C. Viphavakit [et al.] // Applied Optics. 2015. Vol. 54, iss. 15. P. 4881–4888.
- 21. *Feng N. N.* Optical field concentration in low-index waveguides / N. N. Feng, J. Michel, L. C. Kimerling // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2006. Vol. 42, iss. 9. P. 883–888.
- Iqbal M. Light confinement in low contrast slot waveguide structures investigated / M. Iqbal, Z. Zheng, J. Liu / International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. Vol. 2. P. 878–881.
- 23. Vertical multiple-slot waveguide ring resonators in silicon nitride / L. Vivien [et al.] // Optics Express. 2008. Vol. 16, iss. 22. P. 17237–17242.
- 24. Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе оптических волноводов с двумя щелями, заполненными электрооптическим полимером // Квантовая электроника. 2021. Т. 51, № 11. С. 1044–1050.
- 25. Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Измерение напряжённости высокочастотных электрических полей: применение кольцевого волновода с двумя заполненными электрооптическим полимером щелями // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 56–61.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.