

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

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

*Цель.* Анализ методов измерения и конструкций датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе оптических волноводных кольцевых резонаторов.

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

*Результаты.* Проведен анализ воздействия ионизирующего излучения на волноводные микрокольцевые резонаторы и оценка возможности их использования в качестве датчиков поглощенной дозы. Показано, что с точки зрения чувствительности перспективными являются датчики 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 дозиметров с высокой чувствительностью на основе оптических волноводных кольцевых резонаторов.

*Ключевые слова:* оптический волновод, ионизирующее излучение, доза излучения, микрокольцевой резонатор, целевой волновод.

(Поступила в редакцию 2 ноября 2022 г.)

### Введение

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) [1]. С одной стороны, воздействие ионизирующего излучения вызывает деградацию материала волновода из-за образования дефектов и эффекта ионизации [2; 3]. Дефекты приводят к изменению оптических свойств материала в результате возникновения полос поглощения и центров окраски [4–6]. С другой стороны, под воздействием ионизирующего излучения 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 ионизирующего излучения с большой точностью.

В данной работе проведен анализ воздействия ионизирующего излучения на волноводные микрокольцевые резонаторы и оценка возможности их использования в качестве датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения.

### Основная часть

В работе [7] исследовано влияние поверхностной пассивации на изменение функции пропускания микрокольцевого резонатора на основе кремниевых полосковых волноводов под воздействием гамма-излучения.

Микрокольцевые резонаторы на основе непассивированного и пассивированного слоев природного окисла кремниевых волноводов подвергались воздействию гамма-излучения средней мощностью 6 Гр/мин от источника с энергией 662 кэВ в течение 240 мин при общей дозе излучения 1,47 кГр.

Как следует из рисунка 1а, воздействие гамма-излучения на резонатор на непассивированном волноводе приводит к сдвигу резонансной длины волны на 0,4 нм в область меньших длин волн, что примерно в шесть раз превышает полуширину резонансного пика. Это обусловлено ускорением роста природных окислов. При этом величина функции

пропускания уменьшается более чем на 10 дБ. Это уменьшение объясняется вариациями коэффициентов связи подводящих и кольцевого волноводов.

Резонансная длина волны кольцевого резонатора на основе пассивированного волновода (рис. 1б) после облучения практически не изменилась (сдвиг менее 0,016 нм). Это показывает, что после насыщения поверхности кремния природным окислом воздействие ионизирующего излучения не вызывает дополнительного роста окисла из-за ограничения диффузии разных видов окислителей. Изменений функции пропускания резонатора также не наблюдалось.

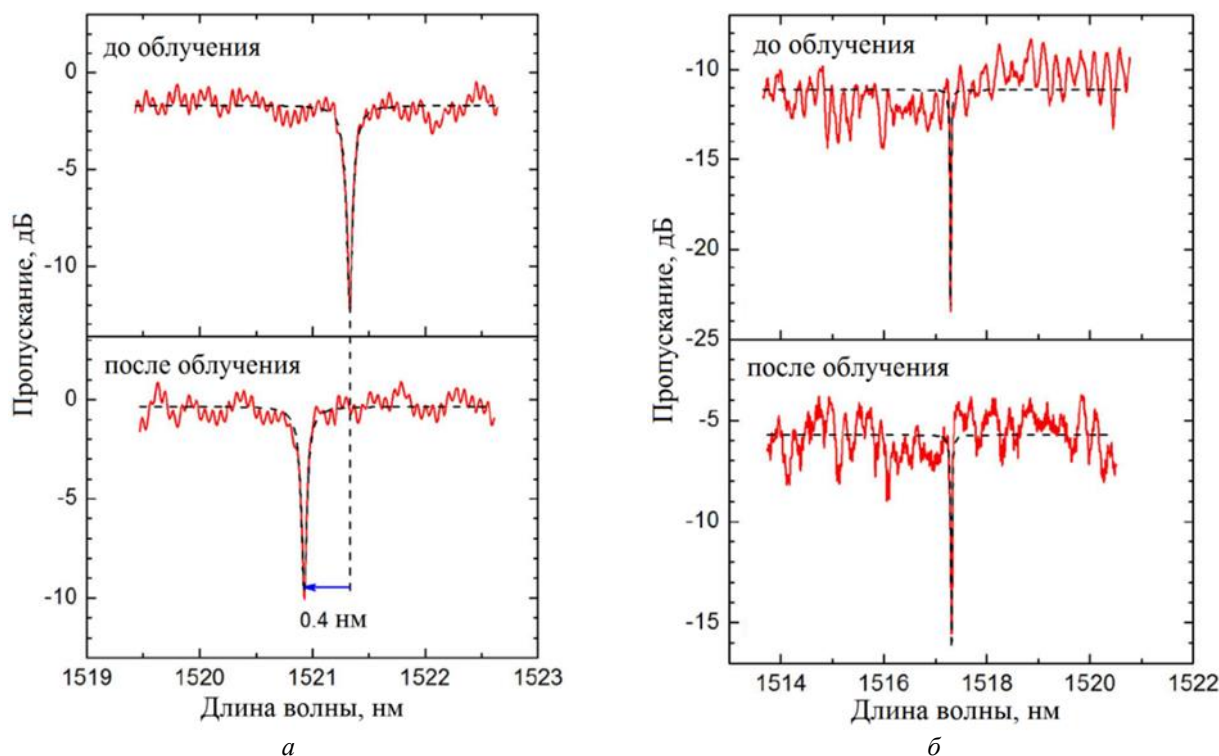


Рисунок 1. – Функция пропускания кварцевого кольцевого резонатора на основе непассивированного (а) и пассивированного (б) волноводов до и после воздействия гамма-излучения [7]

Влияние больших доз гамма-излучения (до 150 кГр) на кольцевые резонаторы на основе двух типов волноводов из аморфного кремния (*a*-Si) экспериментально исследовано в работе [8]. Поперечные сечения волноводов представлены на рисунке 2.

Первый волновод представляет собой слой *a*-Si (показатель преломления  $n = 3,48$ ) толщиной 205 нм, расположенный на кремниевой подложке и с поверхностным покрытием из термического окисла SiO<sub>2</sub> ( $n = 1,45$ ) толщиной 3 мкм. Второй волновод имеет такие же 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,  $n = 1,38$ ) также толщиной 3 мкм. Использование покрытия из фторполимера позволяет исключить влияние флуктуаций температуры на выходные параметры резонатора в большом диапазоне длин волн, в отличие от резонатора с покрытием из SiO<sub>2</sub>. Термооптический коэффициент полимера отрицательный ( $-2,65 \times 10^{-4} \text{ } 1^\circ\text{C}$ ), в то время как *a*-Si, из которого изготовлена сердцевина волновода, имеет положительный термооптический коэффициент ( $2,3 \times 10^{-4} \text{ } 1^\circ\text{C}$ ). Поскольку около 27 % основной ТН моды волновода сосредоточено в полимерном покрытии, это и обеспечивает атермический режим работы устройства.

Длина кольцевого волновода в обоих случаях одинакова и равна 426 мкм. Добротность кольцевого резонатора на основе волновода, покрытого SiO<sub>2</sub>, составила  $9,9 \times 10^3$ , ширина полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ равна 154 пм, коэффициент экстинкции – 14 дБ в резонансе. Добротность кольцевого резонатора из волновода с полимерным покрытием

резонатора составила  $1,6 \times 10^4$ , ширина полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ равна 94 пм, коэффициент экстинкции – 12 дБ, область дисперсии 1,582 нм.

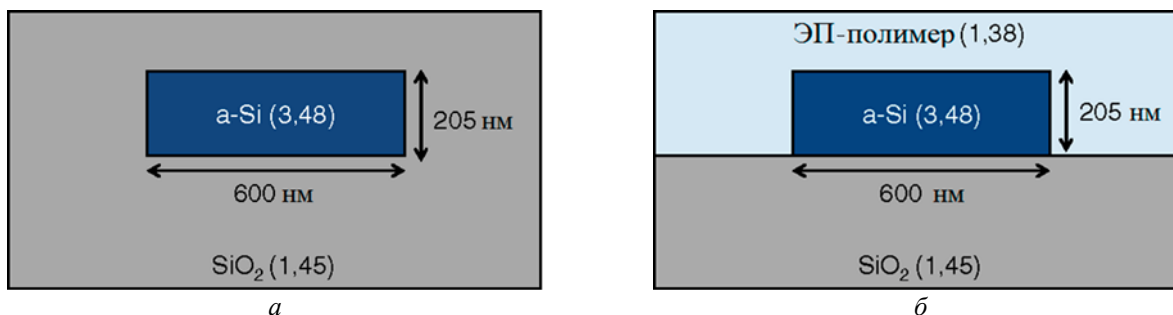


Рисунок 2. – Поперечное сечение a-Si волноводов с покрытиями из SiO<sub>2</sub> (а) и ЭП-полимера (б)

На рисунке 3 представлено сравнение функций пропускания кольцевых микрорезонаторов на основе волноводов с покрытиями из двуокиси кремния и ЭП-полимера [8] до (синие линии) и после (красные линии) облучения гамма-излучением дозой 150 кГр.

Как следует из рисунка 3а, сдвиг резонансной длины волны резонатора на основе волновода, покрытого SiO<sub>2</sub>, под воздействием ионизирующего излучения не происходит. Таким образом, эффективный показатель преломления моды кольцевого волновода практически не меняется. Воздействие ионизирующего излучения также не приводит к изменению коэффициента экстинкции и ширины полосы пропускания, т.е. добротность резонатора 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.

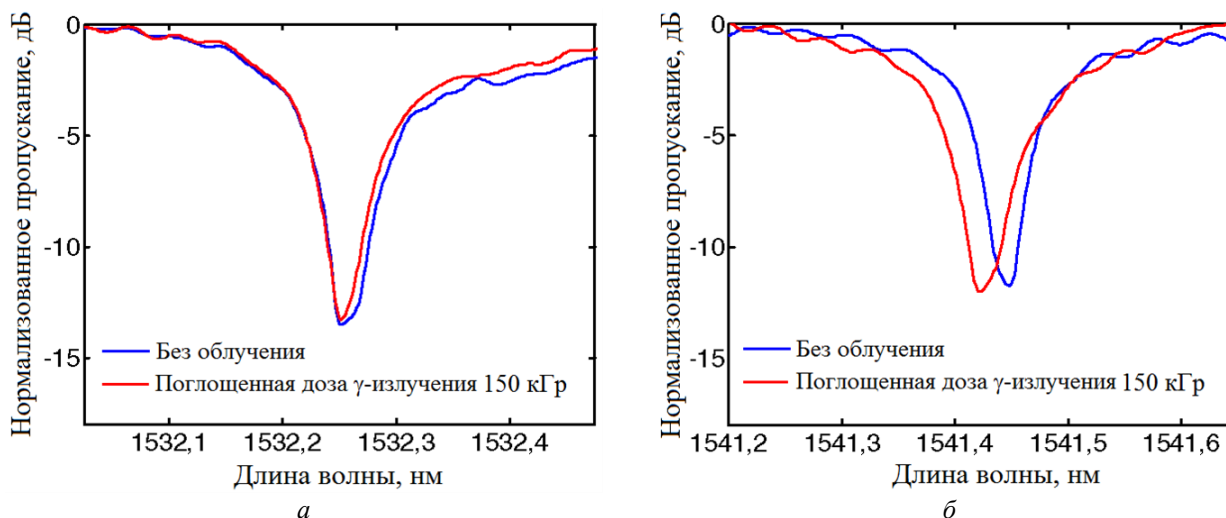


Рисунок 3. – Нормализованные функции пропускания кольцевых микрорезонаторов на базе волноводов с покрытиями из SiO<sub>2</sub> (а) и ЭП-полимера (б) до (синие линии) и после (красные линии) облучения гамма-излучением [8]

Воздействие ионизирующего излучения на кольцевой резонатор на базе волновода с полимерным покрытием приводит к сдвигу его резонансной длины волны на 21 пм в область меньших длин волн (рис. 3б). 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 (рис. 3а), можно заключить, что сдвиг резонансной длины волны происходит из-за изменений показателя преломления покрывающего волновод полимера.

Ширина полосы пропускания кольцевого микрорезонатора после гамма-облучения возросла до 124 пм, что вызывает уменьшение добротности резонатора на 33 % (до

$1,2 \times 10^4$ ). При этом область дисперсии резонатора уменьшается только на 0,1 % (0,3 ГГц). Следовательно, увеличение ширины полосы пропускания определяется не увеличением волноводного группового показателя преломления, а изменениями потерь на распространение в волноводе или коэффициентов связи кольцевого и подводящих волноводов.

Влияние ионизирующего излучения на волноводы на основе аморфного кремния ( $a$ -Si) и нитрида кремния ( $\text{SiN}_x$ ) рассмотрено в работе [9]. Воздействие гамма-излучения приводит к изменению характеристик кольцевого микрорезонатора на базе волноводов из этих материалов, на основе чего определяется изменение их показателя преломления. Облучение устройства производилось в инертной среде (аргон) для определения непосредственного влияния гамма-излучения на показатель преломления материалов волноводов.

В эксперименте использовались по два устройства из каждого материала. Одно из устройств (пробное) подвергалось воздействию гамма-излучения, второе (базовое) – не облучалось, но находилось в одинаковых с пробным резонатором условиях, т.е. при той же влажности, температуре, освещении.

Наведенный ионизирующим излучением сдвиг резонансной длины волны можно рассчитать по формуле:

$$\Delta\lambda = (\lambda_0 - \lambda_{r,0}) - (\lambda_i - \lambda_{r,i}), \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_i$  – резонансные длины волн пробного резонатора до и после облучения, мкм;

$\lambda_{r,0}$  и  $\lambda_{r,i}$  – резонансные длины волн базового резонатора, измеренные при тех же условиях, мкм.

Измеренные спектры пропускания пробного резонатора на основе волновода из  $a$ -Si представлены на рисунке 4. Использование базового резонатора позволяет исключить влияние изменения внешних условий на результат эксперимента.

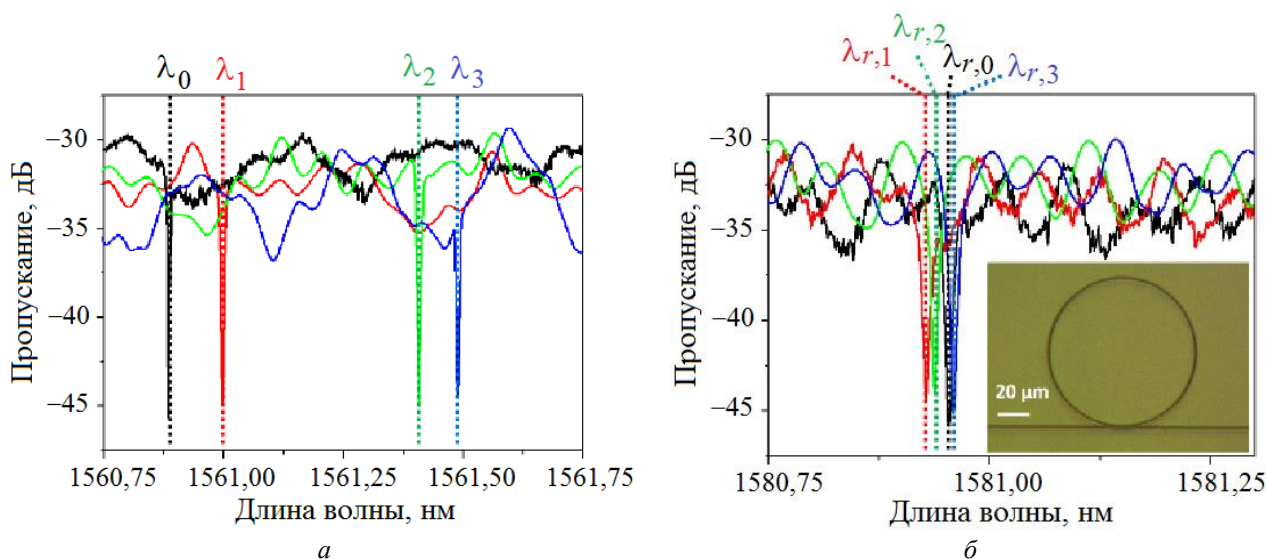


Рисунок 4. – Спектр пропускания пробного резонатора на основе волновода из  $a$ -Si (а) до облучения (черные линии) и после облучения ионизирующим излучением с дозой 40 кГр (красные линии), 80 кГр (зеленые линии) и 100 кГр (синие линии) и базового резонатора (б) при тех же внешних условиях. На вставке показан вид сверху резонатора на основе  $a$ -Si [9]

Как видно из рисунка, коэффициент экстинкции и добротность резонатора после облучения гамма-излучением практически не меняются, что указывает на минимальное увеличение оптических потерь. Увеличение дозы ионизирующего излучения с шагом 20 кГр вплоть до дозы 100 кГр проводилось для того, чтобы оценить влияние поверхностного окисления на сдвиг резонансной длины волны. Пропускание резонатора оценивалось до и после каждого сеанса облучения. Наведенный ионизирующим излучением сдвиг резонансной длины волны, рассчитанный с помощью уравнения (1), определялся для двух наборов образцов, каждый из которых включал 5 устройств. Для определения изменений эффективного

показателя преломления моды волновода использовалось среднее значение сдвига резонансной длины волны:

$$\Delta n_{\text{эф}} = \frac{n_{\text{гр}} \Delta \lambda}{\lambda_{\text{рез}}}, \quad (2)$$

где  $\overline{\Delta \lambda}$  – среднее значение сдвига резонансной длины волны, мкм;

$\lambda_{\text{рез}}$  – резонансная длина волны, мкм;

$n_{\text{гр}}$  – групповой показатель преломления моды;

$\Delta n_{\text{эф}}$  – изменение эффективного показателя преломления моды волновода. Групповой показатель преломления связан с областью дисперсии (определяется как разнесение между двумя соседними резонансными пиками):

$$n_{\text{гр}} = \frac{\lambda_{\text{рев}}^2}{\text{ОД} \cdot L}. \quad (3)$$

где  $L$  – геометрическая длина резонатора, мкм;

ОД – область дисперсии, мкм.

Измеренные с помощью этого метода, наведенные ионизирующим излучением изменения показателя преломления волнопроводов из  $a$ -Si и SiN<sub>x</sub> представлены на рисунке 5. Интервалы погрешностей на рисунке определены с учетом неопределенности при эксперименте как флуктуаций температуры, так и изменений от образца к образцу. На рисунке 5б интервалы погрешностей малы (менее 10<sup>-5</sup>) и неразличимы на графике. Показатели преломления как  $a$ -Si, так и SiN<sub>x</sub> при облучении их в аргоновой среде монотонно возрастают при увеличении дозы ионизирующего излучения. При этом зависимость показателя преломления для обоих материалов от суммарной дозы ионизирующего излучения примерно линейная. Поскольку возможность наведенной ионизирующим излучением кристаллизации исключена, увеличение показателя преломления наиболее вероятно вызвано уплотнением или сжатием аморфной атомной структуры [10]. Воздействие ионизирующего излучения общей дозой 100 кГр приводит к увеличению эффективного показателя преломления мод волнопроводов примерно на 4×10<sup>-3</sup> для аморфного кремния и 5×10<sup>-4</sup> для нитрида кремния.

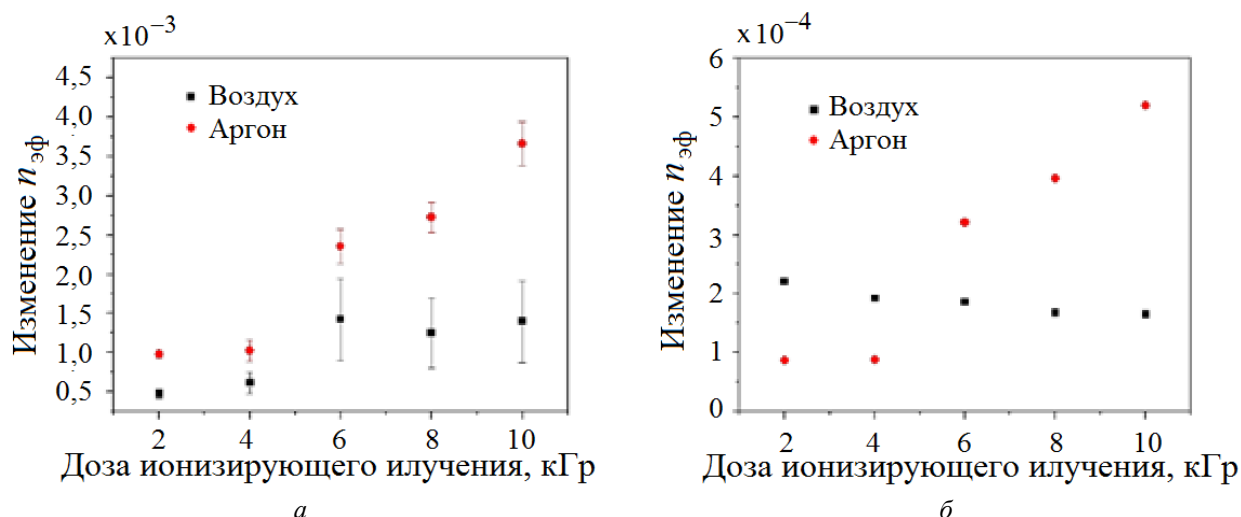


Рисунок 5. – Зависимость изменения эффективного показателя преломления резонаторов на основе волнопроводов из  $a$ -Si (а) и SiN<sub>x</sub> (б) от суммарной дозы гамма-излучения [9]

При облучении материалов в воздушной среде увеличение показателя преломления замедляется и для  $a$ -Si достигает постоянного значения при дозах свыше 60 кГр. Показатель преломления волнопроводов на основе SiN<sub>x</sub> слегка уменьшается после начальной дозы 20 кГр. Этот эффект связан с поверхностным окислением, которое препятствует увеличе-

нию показателя преломления, вызванного уплотнением аморфной структуры, поскольку показатель преломления двуокиси кремния имеет более низкое значение, чем  $a\text{-Si}$  и  $\text{SiN}_x$  ( $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$ ;  $n_{a\text{-Si}} = 3,6$ ;  $n_{\text{SiN}_x} = 2,1$ ).

### Заключение

Таким образом, показатель преломления материала волновода кольцевого микрорезонатора увеличивается под воздействием ионизирующего излучения. В результате происходит смещение резонансной длины волны резонатора пропорционально поглощенной дозе. Наибольшее смещение резонансной длины волны достигается в резонаторах на базе кремниевых волноводов с покрытием из фторполимера или волноводов на основе аморфного кремния и нитрида кремния, облучаемых в инертной среде, для исключения поверхностного окисления материалов. Микрорезонаторы на основе таких волноводов могут быть использованы в качестве сенсорных элементов волноводных оптических дозиметров высокой чувствительности.

Наиболее перспективными с точки зрения достижения высокой чувствительности являются оптические датчики поглощенной дозы ионизирующего излучения на базе кольцевых волноводных резонаторов с полимерным покрытием. При этом для увеличения чувствительности в кольцевых резонаторах можно использовать волноводы с горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными полимером, показатель преломления которого изменяется под воздействием ионизирующего излучения [11].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Van Lint, V.A.J. The physics of radiation damage in particle detectors / V.A.J. Van Lint // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1987. – Vol. 253, No. 3. – P. 453–459. – DOI: 10.1016/0168-9002(87)90532-8.
2. 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.
3. Summers, G.P. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G.P. Summers [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Vol. 40, No. 6. – P. 1372–1379. – DOI: 10.1109/23.273529.
4. 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: 10.1109/23.510753.
5. 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, No. 6. – P. 3750–3757. – DOI: 10.1109/TNS.2006.886222.
6. Berghmans, F. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors / F. Berghmans [et al.] // Optical Waveguide Sensing and Imaging. NATO Science for Peace and Security Series / W.J. Bock, I. Gannot, S. Tanev (editors). – Netherlands, Dordrecht: Springer, 2008. – P. 127–165. – DOI: 10.1007/978-1-4020-6952-9\_6.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Piao, F. The mechanism of radiation-induced compaction in vitreous silica / F. Piao, W.G. Oldham, E.E. Haller // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2000. – Vol. 276, No. 1–3. – P. 61–71. DOI: 10.1016/S0022-3093(00)00263-5.
11. 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 кольцевых резонаторов**

**Measurement of absorbed dose of ionizing radiation by means  
of optical waveguide ring resonators**

***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. Il'yushonok***

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 кафедры

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

Email: v.reabtsev@ucp.by

ORCID: 0000-0002-2830-591X

***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

## MEASUREMENT OF ABSORBED DOSE OF IONIZING RADIATION BY MEANS OF OPTICAL WAVEGUIDE RING RESONATORS

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

*Purpose.* Analysis of the measuring methods and structures of the sensors of absorbed dose of ionizing radiation on the base of optical waveguide ring resonators.

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

*Findings.* The effect of ionizing radiation on waveguide microring resonators are analysed. The possibility of its application as sensor of absorbed dose of ionizing radiation is estimated. 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 with the use of optical waveguide ring resonators.

*Keywords:* optical waveguide, ionizing radiation, radiation dose, ring microresonator, slot waveguide.

(The date of submitting: November 2, 2022)

### REFERENCES

1. Van Lint V.A.J. The physics of radiation damage in particle detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1987. Vol. 253, No. 3. Pp. 453–459. DOI: 10.1016/0168-9002(87)90532-8.
2. 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.
3. 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.
4. 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: 10.1109/23.510753.
5. Girard S., Baggio J., Bisutti J. 14-MeV neutron, gamma-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.
6. 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: Bock W.J., Gannot I., Tanev S. (editors) *Optical Waveguide Sensing and Imaging. NATO Science for Peace and Security Series*. Netherlands, Dordrecht: Springer, 2008. Pp. 127–165. DOI: 10.1007/978-1-4020-6952-9\_6.
7. 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.
8. 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.
9. Du Q., Huang Y., Ogbuu O., Zhang W., Li J., Singh V., Agarwal A., Hu J. 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.
10. Piao F., Oldham W.G., Haller E.E. The mechanism of radiation-induced compaction in vitreous silica. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000. Vol. 276, No. 1–3. Pp. 61–71. DOI: 10.1016/S0022-3093(00)00263-5.
11. 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.