

поведенческий профиль, который может использоваться для предупреждения группы кибербезопасности о том, что что-то не так.

Искусственный интеллект также может быть чрезвычайно полезен для предотвращения фишинговых атак на пользователей в определенной сети. Фишинговые атаки чрезвычайно распространены во многих компаниях, где сотрудникам рассылаются мошеннические электронные письма с целью получения конфиденциальной информации их компании, такой как пароли компании, их банковские данные и данные кредитной карты и т. д. Могут использоваться методы искусственного интеллекта, такие как обработка естественного языка. Отслеживать электронные письма сотрудников в их корпоративных учетных записях и проверять, нет ли чего-либо подозрительного, например шаблонов и фраз, которые могут указывать на то, что электронная почта является попыткой фишинга.

Применение и внедрение ИИ в последние годы увеличилось в геометрической прогрессии, исследователи, лаборатории и технологические

компании имеют бесчисленное множество применений ИИ во всех сферах жизни, запланированных на будущее.

ИИ способствует прогрессу во всех технологических областях, обеспечивает значительный прогресс в области кибербезопасности, поддерживает средства управления информационной безопасностью в продвинутом и интеллектуальном мире.

#### Литература

1. Гольдберг, Й. Нейросетевые методы в обработке естественного языка : руководство / Й. Гольдберг; перевод с английского А. А. Слинкина. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 282 с.
2. Бенджамин, Бенгфорт. Прикладной анализ текстовых данных на Python. Машинное обучение и создание приложений обработки естественного языка / Бенджамин Бенгфорт, Ребекка Билбро, Тони Охеда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=365298>.
3. Ганегедара, Т. Обработка естественного языка с TensorFlow : руководство / Т. Ганегедара ; перевод с английского В. С. Яценкова. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 382 с.

УДК 539.1.074.3

### ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

*Университет гражданской защиты МЧС Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Проведен анализ воздействия ионизирующего излучения на волноводные микрокольцевые резонаторы и оценка возможности их использования в качестве датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения. Показано, что с точки зрения чувствительности перспективными являются датчики на основе микрокольцевых резонаторов на базе кремниевых волноводов, покрытых фторполимером.

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

### APPLICATION OF OPTICAL WAVEGUIDE RING RESONATORS FOR MEASUREMENT OF ABSORBED DOSE OF IONIZING RADIATION

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

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** 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.

**Key words:** optical waveguide, ionizing radiation, radiation dose, microring resonator, slot waveguide.

*Адрес для переписки: Рябцев В.Н., ул. Машиностроителей, 25, Минск 220118, Республика Беларусь  
e-mail: v.reabtsev@ucp.by*

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 резона-

торы) [1]. 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, изменение показателя преломления и геометрической длины резонатора под воздействием ионизирующего излучения вызывает смещение резонансной длины волны или полос интерференционной картины, что 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.

В работе [7] исследовано влияние поверхностной пассивации на изменение функции пропускания микрокольцевого резонатора на основе кремниевых полосковых волноводов под воздействием гамма-излучения. 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, что обусловлено ускорением роста природных окислов. При этом величина функции пропускания уменьшается более чем на 10 дБ. 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 ионизирующего излучения не наблюдалось.

В работе [8] экспериментально исследовано влияние больших доз (до 150 кГр) гамма-излучения на оптические волноводы из аморфного кремния ( $a\text{-Si}$ ), образующие кольцевой резонатор. Для резонатора на основе волновода с покрытием из двуоксида кремния сдвига резонансной длины волны под воздействием ионизирующего излучения не наблюдалось, что указывает на отсутствие значительных изменений эффективного показателя преломления моды кольцевого волновода. Таким образом, после облучения гамма-излучением общей дозой 150 кГр в волноводах на основе аморфного кремния с покрытием  $\text{SiO}_2$  показатель преломления, потери на распространение и потери на рассеяние не изменяются.

После облучения кольцевого резонатора на основе волновода с покрытием из фторполимера наблюдается сдвиг его резонансной длины волны порядка 21 пм (3,4 ГГц) в область коротких длин волн, что соответствует изменению эффективного показателя преломления моды волновода примерно на  $-4,8 \cdot 10^{-5}$ . На основе сравнения с результатами, полученными для волноводов с покрытием из  $\text{SiO}_2$ , можно утверждать, что этот резонансный сдвиг происходит только из-за изменений показателя преломления полимера, покрывающего волновод, поскольку остальные материалы волновода (аморфный кремний и  $\text{SiO}_2$ ) остаются неизменными после облучения.

В работе [9] исследовано влияние гамма-излучения на волноводы, изготовленные из аморфного кремния ( $a\text{-Si}$ ) и нитрида кремния ( $\text{SiN}_x$ ). Микрокольцевые резонаторы на основе волноводов из этих материалов облучались ионизирующим излучением, 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).

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.

Показатели преломления как  $a\text{-Si}$ , так и  $\text{SiN}_x$  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]. Эффективный показатель преломления мод волноводов увеличивается примерно на  $4 \cdot 10^{-3}$  для аморфного кремния и  $5 \cdot 10^{-4}$  для нитрида кремния под воздействием ионизирующего излучения дозой 100 кГр.

Для сравнения проведено облучение волноводов в воздушной среде. При облучении материалов в воздухе увеличение показателя преломления замедляется и для  $a\text{-Si}$  достигает примерно постоянного значения при дозах свыше 60 кГр. Показатель преломления волноводов на основе  $\text{SiN}_x$  слегка уменьшается после начальной дозы 20 кГр. Поскольку двуокись кремния имеет более низкий показатель преломления ( $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$ ), чем  $a\text{-Si}$  ( $n_{a\text{-Si}} = 3,6$ ) и  $\text{SiN}_x$  ( $n_{\text{SiN}_x} = 2,1$ ), этот эффект связан с поверхностным окислением, которое препятствует увеличению показателя преломления, вызванного уплотнением аморфной структуры.

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.

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.

#### 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 A. – 1987. – Vol. 253, № 3. – P. 453–459.
2. Johnston, A. H. Radiation effects in optoelectronic device / A. H. Johnston // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2013. – Vol. 60, № 3. – P. 2054–2073.
3. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G. P. Summers [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Vol. 40, № 6. – P. 1372–1379.
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, № 3. – P. 1044–1049.
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, № 6. – P. 3750–3757.
6. 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.
7. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators / S. Bhandaru [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. – 2015. – Vol. 62, № 1. – P. 323–328.
8. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, № 13. – P. 3053–3056.
9. Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices / Q. Du [et al.] // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42, № 3. – P. 587–590.
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, № 1–3. – P. 61–71.

УДК 621.391.63;535.361

### МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ МЕЖЭЛЕМЕНТНОГО КОНТРАСТА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ДЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрен новый метод повышения лазерно-локационного распознавания объектов с квазинулевым оптическим контрастом поверхности. Получены зависимости разрешающей способности распознавания по глубине рельефа поверхности объектов с квазинулевым оптическим контрастом. Показаны преимущества метода по сравнению с методами распознавания по оптическому контрасту.

**Ключевые слова:** обнаружение, распознавание объектов с квазинулевым оптическим контрастом.

### METHOD OF INCREASING THE INTERELEMENT CONTRAST OF THE SURFACE OF OBJECTS WITH QUASI-ZERO OPTICAL CONTRAST FOR THEIR EFFECTIVE LASER-LOCATION RECOGNITION

Ivanov V., Ivanov N.

Institute for nuclear problems of BSU  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** A new method of increasing laser-location recognition of objects with quasi-zero optical surface contrast is considered. The dependences of the recognition resolution on the depth of the surface relief of objects with quasi-zero optical contrast are obtained. The advantages of the method in comparison with optical contrast recognition methods are shown.

**Key words:** detection, recognition of objects with quasi-zero optical contrast.

Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Бобруйская, 11, Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: ivanov.inp@gmail.com

Обнаружение и распознавание объектов локационными лазерными системами видения (ЛЛСВ) резко ухудшается с уменьшением оптического контраста объекта  $k_0$  [1, 2] и становится невозможным при

$$k_0 < k_N, \quad (1)$$

где  $k_N = 0,02$  – пороговый контраст визуального зрения (контраст на экране видеорегистратора или на входе ЛЛСВ) [2]

Нормированный межэлементный (дифференциальный) оптический контраст поверхности объекта  $k_0$  можно представить уравнением