

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА КАК ДАТЧИКОВ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Нуреев И.И.¹

¹ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», Казань, Россия (420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10), e-mail: n2i2@mail.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с анализом спектральных характеристик волоконно-оптических брэгговских решеток с фазовым сдвигом, разрабатываемых и предназначенных для использования в сенсорных системах в качестве датчиков температуры, равномерного и изгибного натяжения. Проанализирована зависимость ширины полученного в результате формирования π -сдвига окна прозрачности решетки на полувысоте от коэффициента модуляции. Показана возможность получения как сверхузких окон прозрачности, так и достаточно широких, способных регистрировать изменения температуры в пределах 5–10°C, при чувствительности решеток от 1 до 10 пм на 1°C, что вполне достаточно для построения систем автоматического регулирования. Проанализированы зависимости изменения спектральных характеристики фазированных решеток при приложении к ним равномерного и изгибного натяжения. Проведенные исследования показали, что окно прозрачности уширяется с сохранением градиента крутизны общего уширения решетки. При отсутствии воздействия ширина окна прозрачности составляла 0,01 нм, при кривизне изгиба решетки $\kappa=5 \text{ м}^{-1} \sim 0,16 \text{ нм}$.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, фазовый сдвиг, датчик, разрешающая способность, температура, равномерное и изгибное натяжение

SPECTRAL CHARACTERISTICS SIMULATION OF PHASED FIBER BRAGG GRATINGS AS SENSORS OF MEASURING SYSTEMS

Nureev I.I.¹

¹Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (10, Karl Marks street, Kazan, 420111, Russia), e-mail: n2i2@mail.ru

The problems associated with the analysis of the spectral characteristics of optical fiber Bragg gratings with a phase shift, designed and intended for use in measuring systems as temperature, uniform and bending tension sensors. The dependence of the width at half-maximum of the grating transparency window formed as a result of π -shift from the modulation factor is carried out. It is shown the possibility of obtaining as high-brightness windows transparency and rather wide, capable of recording temperature changes within 5-10°C, with a sensitivity of grating from 1 to 10 pm on 1°C, which is sufficient for the construction of automatic control systems. The dependences of the changes in the spectral characteristics of phased grating when subjected to uniform and bending tension are described. Studies have shown that the transparency window is broadened while maintaining the gradient steepness general broadening of the grating. In the absence of exposure of the transparency window width was 0,01 nm, when bend curvature $\kappa = 5 \text{ m}^{-1} \sim 0,16 \text{ nm}$.

Keywords: fiber Bragg grating, phase shift, sensor, resolution, temperature, uniform and bending tension

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) с фазовым сдвигом привлекают все большее внимание разработчиков сенсорных систем [1, 6-7, 10], поскольку могут быть изготовлены с помощью простых фазовых масок с минимальными требованиями, предъявляемыми к параметрам модуляции коэффициента преломления и равномерности характеристик его профиля [5]. Реально достижимая полуширина резонансного спектра ВБР в конфигурации интерферометра Фабри-Перо составляет по данным [8] 0,025 нм, а для классической ВБР – 0,5 нм. Это значит, что разрешающая способность ИФП сенсора в 20 раз лучше, чем у датчика на ВБР. Развивая данный подход, можно использовать для создания сенсоров ВБР с фазовым π -сдвигом, которая представляет собой простейший ИФП с длиной резонатора, не

превышающей длину волны Брэгга λ_B . Полуширина резонансного пика такой решетки может достигать 0,005 нм [9], что свидетельствует о возможном увеличении разрешающей способности измерений в 10–50 раз по сравнению с датчиком на ВБР.

Как показано на рисунке 1, ВБР с фазовым π -сдвигом характеризуется неоднородностью с размером π , расположенным в определенном месте ее структуры по длине (показано для середины решетки).

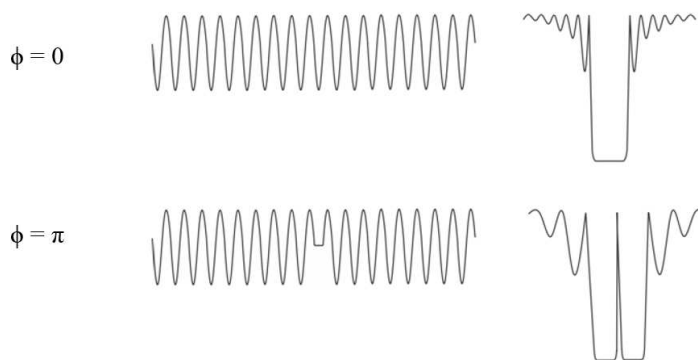


Рис. 1. Модуляция коэффициента преломления и спектральная характеристика ВБР (без фазового сдвига $\phi=0$ и с фазовым сдвигом $\phi=\pi$)

Для математического моделирования спектральных характеристик ВБР применяются различные методы, включая метод матриц передачи, метод матриц Джонса, метод связанных мод. Получение наиболее точных спектральных характеристик ВБР с фазовым сдвигом при их равномерном растяжении/сжатии возможно при использовании метода связанных мод [10]. Наибольшее приближение к реальным характеристикам ВБР, подверженных изгибному натяжению, получают с помощью метода матриц передачи для отрезков до и после изгиба и с учетом линейного изменения этих отрезков по градиенту изгиба [9].

Моделирование спектральных характеристик ВБР с фазовым π -сдвигом при равномерном растяжении/сжатии. Модуляция коэффициента преломления равномерной ВБР представляет собой синусоидальный процесс с постоянной амплитудой, который может быть записан следующим образом:

$$n(z) = n_{\text{ср}} + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z)\right), \quad (1)$$

а для $\phi(z)=\pi$ примет вид:

$$n(z) = \begin{cases} n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \frac{\pi}{2}\right), & z < 0 \\ n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z - \frac{\pi}{2}\right), & z \geq 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Рассмотрим две встречные волны A_i и B_i , распространяющиеся в волокне через ВБР $[0, z_2]$ с длиной волны λ , где $i = 1, 2$ зависит от участка распространения волны (до или после фазового сдвига с координатой z_1)

$$\begin{cases} \phi(z) = 0 & \text{if } 0 \leq z < z_1 \\ \phi(z) = \Delta\phi & \text{if } z_1 \leq z \leq z_2 \end{cases} \quad (3)$$

как показано на рисунке 2.

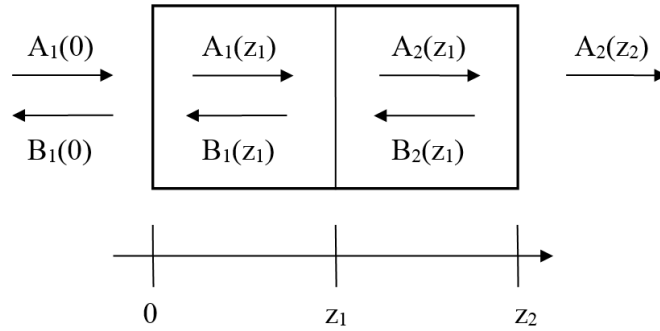


Рис. 2. Распространение встречных волн в ВБР с фазовым сдвигом

Распространение таких волн может быть описано связанными дифференциальными уравнениями, в которых для дальнейшего анализа необходимо вставить значение фазового сдвига:

$$\frac{dA_i}{dz} = -i\kappa B_i \exp\{i[2\Delta\beta z + \phi(z)]\}, \quad (4)$$

$$\frac{dB_i}{dz} = i\kappa A_i \exp\{-i[2\Delta\beta z + \phi(z)]\}, \quad (5)$$

где коэффициент связи $\kappa = \pi\Delta n\eta/\lambda$ (η – коэффициент локализации мод); $2\Delta\beta = \beta - \pi/\lambda$ – параметр расстройки, который представляет собой разность между постоянными распространения $\beta = 2\pi n_{co}/\lambda$ и волновым числом решетки $K = 2\pi/\Lambda$.

Данные уравнения могут быть представлены общим уравнением вида:

$$\frac{\partial^2 B_i}{\partial z^2} - i\left[2\Delta\beta + \frac{d\phi(z)}{dz}\right] \frac{\partial B_i}{\partial z} - \kappa^2 B_i = 0, \quad (6)$$

которое имеет решения для обеих половин решетки.

Введем граничные условия:

$$A_1(0) = 1, A_1(z_1) = A_2(z_1), B_2(z_2) = 0, B_1(z_1) = B_2(z_1),$$

и получим:

$$B_2(z) = C \exp(\Gamma_1 z) + D \exp(\Gamma_2 z), \quad (7)$$

$$A_2(z) = \left| -\frac{C}{\kappa} \Gamma_1 \exp(\Gamma_1 z) - \frac{D}{\kappa} \Gamma_2 \exp(\Gamma_2 z) \right| \exp[i(2\Delta\beta z - \Delta\phi)], \quad (8)$$

где

$$\Gamma_1 = i\Delta\beta - \gamma, \Gamma_2 = i\Delta\beta + \gamma \text{ и } \gamma^2 = \kappa^2 - \Delta\beta^2.$$

Определим параметры окна прозрачности ВБР с фазовым сдвигом

$$T(z) = \left| \frac{A_2(z_2)}{A_0(0)} \right|^2 = |A_2(z_2)|^2. \quad (9)$$

С использованием предыдущего выражения получим:

$$T(z) = \frac{1}{\kappa^2} |\Gamma_1 C \exp(\Gamma_1 z_2) + \Gamma_2 D \exp(\Gamma_2 z_2)|^2. \quad (10)$$

После определения С и D из граничных условий получим для окна прозрачности:

$$T(\lambda) = \gamma^4 / (\Gamma^2 + (E - \Gamma)\{E - \Gamma[1 - 2 \cos(\Delta\phi)]\} + F[F - 2\Gamma \sin(\Delta\phi)]), \quad (11)$$

где

$$\Gamma = \kappa^2 \sin h(\gamma l_1) \sin h(\gamma l_2), \quad \gamma^2 = \kappa^2 - \Delta\beta^2$$

$$E = \gamma^2 \cosh(\gamma L), \quad F = \Delta\beta \gamma \sin h(\gamma L)$$

$$\Delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\lambda}, \quad \kappa = \frac{\pi \Delta n \eta}{\lambda}$$

Для $\Delta\phi = \pi$ получим:

$$T(\lambda) = \gamma^4 / (\Delta\beta^2 [\Delta\beta^2 \cosh^2(\gamma L) + \gamma^2 \sinh^2(\gamma L) - 2\kappa^2 \cosh(\gamma L) + \kappa^4]). \quad (12)$$

На рисунке 3 показана зависимость полученной ширины окна прозрачности на полувысоте от коэффициента модуляции. Из анализа рисунка 3 видно, что возможно получение как сверхузких окон прозрачности, так и достаточно широких, способных регистрировать изменения температуры в пределах 5–10°С при чувствительности решеток от 1 до 10 пм на 1°С, что вполне достаточно для построения систем автоматического регулирования.

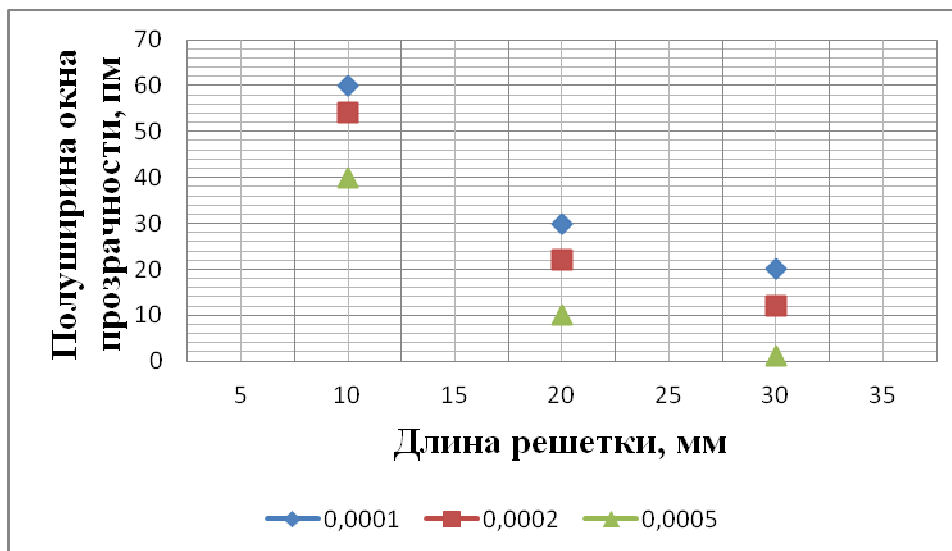


Рис. 3. Зависимость ширины окна прозрачности решетки на полувысоте от ее длины и глубины коэффициента модуляции

При равномерном растяжении/сжатии ВБР с фазовым π -сдвигом соответствуют по характеристическому отклику классическим ВБР [10]. На рисунке 4,а показан рассчитанный отклик ВБР с фазовым π -сдвигом на изменение температуры, на рисунке 4,б – натяжения. Полученные значения трендов показали, что чувствительность измерений ВБР с фазовым π -сдвигом от температуры составила ~ 10 пм/°С, а от натяжения ~ 1 пм/мкε по центру окна прозрачности решетки. Полученные данные были использованы в системных разработках сенсорных систем различного назначения [2, 4-5].

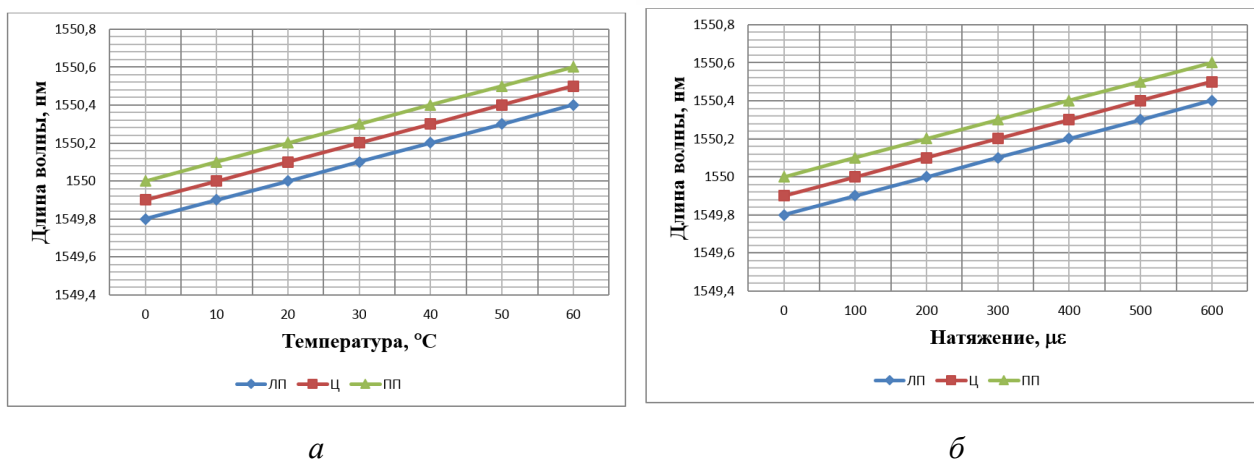


Рис. 4. Зависимость сдвига центральной длины волны окна прозрачности ВБР с фазовым π -сдвигом от температуры (а) и натяжения (б): ЛП – левый пик, Ц – центр, ПП – правый пик решетки (см. рис. 1)

Моделирование спектральных характеристик ВБР с фазовым π -сдвигом при изгибном натяжении. ВБР с фазовым π -сдвигом в случае приложенных к ней изгибных сил могут быть численно описаны комплексным методом, основанным на методах связанных мод и матриц передачи, которые известны как точные и эффективные методы численного моделирования.

Характеристики ВБР описываются произведением матриц 2×2 каждого однородного элемента решетки, что позволяет в итоге получить полную матрицу передачи ВБР. ВБР разбивается на N однородных секций, для которых определяются коэффициенты отражения R_i и пропускания S_i как амплитуды распространяющихся вперед и назад мод после прохождения i -ой секции:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где матрица передачи каждой секции описывается следующим образом

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - j \frac{\sigma}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B \Delta z) & -j \frac{k}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B \Delta z) \\ j \frac{k}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + j \frac{\sigma}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где Δz – длина i -ой секции; j – квадратный корень из -1 ; $\hat{\sigma}$ – общий «постоянный» коэффициент связи мод; k – общий «переменный» коэффициент связи мод для секции

$$\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}. \quad (15)$$

После определения матриц для каждой секции можно записать:

$$\begin{bmatrix} R_N \\ S_N \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

$$F = F_N \cdot F_{N-1} \cdot \dots \cdot F_i \cdot \dots \cdot F_1. \quad (17)$$

Для обеспечения фазового π -сдвига введем матрицу F_π между матрицами F_i и F_{i+1} в (17), которая определяется как:

$$F_\pi = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-j\phi_i}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{j\phi_i}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $\phi_i = \pi$.

Начальные условия для матрицы передачи определим как:

$$\begin{bmatrix} R(-l/2) \\ S(-l/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_N \\ S_N \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R(l/2) \\ S(l/2) \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

а коэффициенты отражения и пропускания как:

$$R = |S(-l/2)/R(-l/2)|^2 = |F_{21}/F_{11}|^2, \quad (20)$$

$$T = |1/R(-l/2)|^2 = |1/F_{11}|^2. \quad (21)$$

Проведенные по методике [9] исследования показали, что провал в ВБР, вызванный фазовым сдвигом, уширяется с сохранением градиента крутизны общего уширения ВБР.

На рисунке 5 показана спектральная характеристика ВБР до (А) и при (Б) воздействии. При отсутствии воздействия ширина провала составляла 0,01 нм, при $k=5 \text{ м}^{-1} \sim 0,16 \text{ нм}$. Использовался пакет прикладных программ Optigrating 4.2.

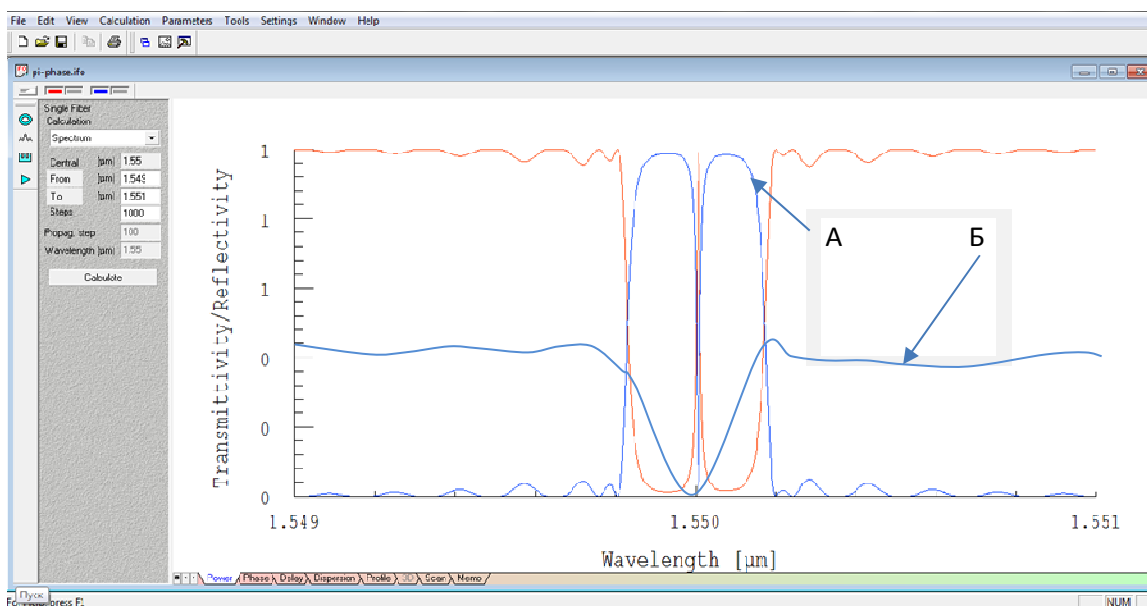


Рис. 5. Спектральная структура ВБР с фазовым π -сдвигом и ширина окна прозрачности до (А) и при (Б) воздействии

Таким образом, если для измерения ширины решетки необходимо использовать сложное спектральное оборудование, то для измерения ширины провала может быть использована методика маломодового двух- или четырехчастотного зондирования без перестройки частоты лазера с двумя неравными разностными частотами. Процедура определения резонансной длины волны ВБР, ее высоты и ширины окна прозрачности на полувысоте, предложенная нами, получила название «метод вариации разностной частоты» и подробно описана в [3]. Исходя из ширины провала разностные частоты должны лежать в диапазоне 1–10 ГГц для работы в диапазоне k от 0 до 5 м^{-1} .

Заключение. По результатам анализа температурных, барических и изгибных эффектов в комплексе с исследованием оптомеханики ВБР с фазовым π -сдвигом, методами математического моделирования показана возможность получения как сверхузких окон прозрачности, так и достаточно широких, способных регистрировать изменения температуры в пределах $5\text{--}10^\circ\text{C}$ при чувствительности решеток от 1 до 10 пм на 1°C , что вполне достаточно для построения систем автоматического регулирования. Проанализированы зависимости изменения спектральных характеристики фазированных решеток при приложении к ним равномерного и изгибного натяжения. Проведенные исследования показали, что окно прозрачности уширяется с сохранением градиента крутизны общего уширения решетки. При отсутствии воздействия ширина окна прозрачности составляла 0,01 нм, при кривизне изгиба решетки $k=5 \text{ м}^{-1} \sim 0,16 \text{ нм}$. Использование ВБР с фазовым π -сдвигом позволит повысить разрешающую способность измерений температуры, линейного и изгибного натяжения в 10–50 раз, чувствительность – в 1,7–3,2 раза по сравнению с гомодинными методами измерений, использующими классические ВБР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания, выполняемого КНИТУ-КАИ на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Радиофотоника», 3.1962.2014/К).

Список литературы

1. Алюшина С.Г., Денисенко П.Е., Морозов О.Г., Садыков И.Р., Степущенко О.А. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах // *Нелинейный мир*. 2011. Т. 9. № 8. С. 522–528.
2. Касимова Д.И., Кузнецов А.А., Крыницкий П.П., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Кучев С.М., Петров А.В. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2(18). С. 73–79.
3. Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Денисенко П.Е., Веденькин Д.А., Талипов А.А., Василец А.А., Насыбуллин А.Р. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 4. С. 322–325.
4. Куприянов В.Г., Степущенко О.А., Куревин В.В., Морозов О.Г., Садыков И.Р. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13 (34). № 4(4). С. 1087–1091.
5. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Феофилактов С.В., Черепанов Д.А. Вопросы применения концепции программно-определяемых сетей для систем внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии // *Нелинейный мир*. 2014. Т. 12. № 10. С. 83–90.
6. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2010. № 3. С. 3–13.
7. Садыков И.Р., Морозов О.Г., Садеев Т.С., Степущенко О.А., Кокурина О.Е., Арбузова Е.Ю. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик // *Труды МАИ*. 2012. № 61. С. 18.
8. Agraval G.P., Radic S. Phase-shifted fibre Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing // *IEEE Photonic Technology Letters*. 1994. V. 6. № 8. P. 995–997.
9. Dong X. Bend measurement with chirp of fiber Bragg grating // *Smart materials and structures*. 2001. V. 10. P. 1111-1113.

10. Oliveira Silva S.F. de. Fiber Bragg grating based structures for sensing and filtering. Porto University, 2007. 157 p.

Рецензенты:

Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Казань;

Анфиногентов В.И., д.т.н., профессор, профессор Казанского филиала Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Казань.