

УДК 681.586.5

С.Р. Абдуллина, М.И. Скворцов, И.Н. Немов

Институт автоматизации и электростандиметрии СО РАН, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДАТЧИКА
ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО ИЗ ДВУХ
БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК**

Рассмотрена возможность использования волоконного интерферометра Фабри-Перо (ИФП), зеркалами которого являются две волоконные брэгговские решетки (ВБР), в качестве датчика деформаций. Экспериментально продемонстрировано, что растяжение отрезка волокна, включающего в себя одну из решеток и базу интерферометра, при зафиксированной второй решетке приводит к относительному изменению амплитуд боковых пиков в спектре ИФП. Проведено численное моделирование, показывающее, что по изменению соотношения амплитуд пиков величину деформации в диапазоне 1–100 микрострейн можно измерить более точно, чем по сдвигу спектра.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, интерферометр Фабри-Перо, сенсоры.

S.R. Abdullina, M.I. Skvortsov, I.N. NemovInstitute of Automation and Electrometry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation**INVESTIGATION OF ABILITIES OF FIBER FABRY-PEROT
STRAIN SENSOR BASED ON TWO BRAGG GRATINGS**

Opportunity to apply Fabry-Perot interferometer (FPI) consisting of two fiber Bragg gratings (FBG) as a strain sensor is treated. It is experimentally demonstrated that the stretching of fiber piece comprising one FBG and interferometer base when the second FBG is fixed results in the change of relative amplitudes of side peaks in the FPI spectrum. Numerical simulation is performed confirming that the measurement of peak amplitudes ratio allows one to measure strain values in the range 1–100 microstrain more precisely than that by measuring of spectral shift.

Keywords: fiber Bragg gratings, Fabry-Perot interferometer, sensors.

Введение

Волоконно-оптические сенсоры широко используются для измерения различных физических параметров благодаря быстрому отклику, высокой чувствительности, малым габаритам, стабильности и защищенности от воздействия электромагнитных полей [1].

В сенсорах на основе ВБР [1–4] используется чувствительность брэгговской длины волны ВБР к деформациям и температуре. Основной проблемой, определяющей их практическое применение, является разработка методов для измерения малых сдвигов брэгговской длины волны с большой точностью. Простейшим решением является использование широкополосного источника излучения и анализатора оптического спектра. Коммерчески доступные анализаторы спектра обладают разрешением до 1 пм, что в области 1,5 мкм соответствует изменению температуры сенсора на 0,1 °С или растяжению $\sim 10^{-6}$, однако практическое применение таких приборов ограничено в силу их высокой стоимости.

Помимо одиночных ВБР и распределенных сенсорных систем на основе ВБР также большой интерес для сенсорных применений представляют волоконные интерферометры Фабри-Перо (см. [5–8] и цитируемую там литературу). Для формирования зеркал волоконных интерферометров используются различные методики [7, 8], например диэлектрическое напыление, химическое травление, также в качестве зеркала может использоваться стык между двумя волокнами с различными показателями преломления. Большой интерес для сенсорных применений в настоящее время представляют полностью волоконные ИФП, зеркалами которых являются ВБР [9–12].

Как правило, внешнему воздействию подвергается весь интерферометр и величина воздействия определяется по сдвигу спектра и изменению области свободной дисперсии. Нами предложено использовать в качестве датчика деформаций волоконный ИФП из двух ВБР в такой конструкции, что отклик на деформацию выражается в относительном изменении амплитуды пиков в спектре отражения.

1. Эксперимент

В работе рассматривался ИФП, образованный двумя брэгговскими решетками, записанными в схеме с интерферометром Ллойда. Данный метод записи подробно описан в работе [13]. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, использовавшейся нами ранее для записи одиночных ВБР [14]. Пучок УФ-излучения проходит через телескопическую систему 2 и попадает на цилиндрическую линзу 3 с фокусным расстоянием 4 см, а волоконный световод 6 располагается в фокальной плоскости линзы. Телескопическая система сформирована двумя цилиндрическими линзами с фокусными расстояниями

24 и 6 см. Интерференционная картина образуется в интерферометре Ллойда, в котором отраженная от зеркала 4 часть пучка сводится с прошедшей частью под углом θ . Угол интерференции θ задается с помощью программно управляемой угловой подвижки РИ М-036 5 с относительной точностью позиционирования $3 \cdot 10^{-3}$ град. Для записи ВБР использовался источник непрерывного УФ-излучения с $\lambda = 244$ нм – аргоновый лазер с внутриврезонаторным удвоением частоты в нелинейном кристалле ВВО [15]. УФ-пучок имеет гауссов профиль в тангенциальной плоскости резонатора [14, 16, 17], радиус пучка в экспериментах составлял $w = 6 \dots 7$ мм.

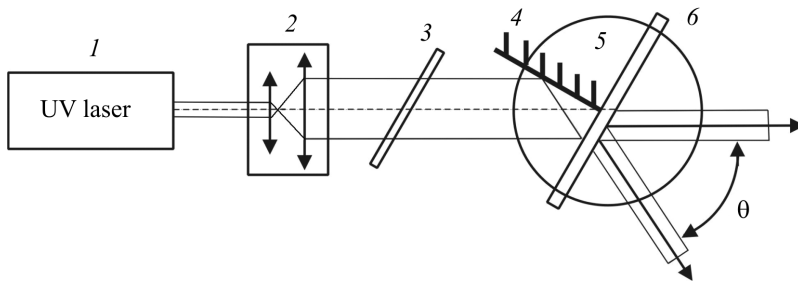


Рис. 1. Схема записи ВБР с интерферометром Ллойда: 1 – УФ-лазер; 2 – телескопическая система; 3 – цилиндрическая линза; 4 – зеркало; 5 – угловая подвижка; 6 – волоконный световод

Для формирования интерферометра Фабри-Перо после записи первой ВБР волокно переворачивалось и записывалась вторая ВБР в смещенном по длине отрезке. Расстояние между границами решеток (~ 4 мм) определялось по относительному положению волокна в схеме записи. Профили наведенного показателя преломления для ВБР, записанных гауссовым пучком в схеме Ллойда, имеют вид [14]:

$$\Delta n_1(z) = \Delta n_{01} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z^2}{w^2}\right) \left(1 + s \cdot \cos\left[\frac{2\pi \cdot z}{\Lambda_1}\right]\right), z < 0;$$

$$\Delta n_2(z) = \Delta n_{02} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot (z-d)^2}{w^2}\right) \left(1 + s \cdot \cos\left[\frac{2\pi \cdot (z-d)}{\Lambda_2}\right]\right), z > d,$$

где d – расстояние между границами решеток, условно называемое здесь базой; w – радиус записывающего пучка; $\Lambda_{1,2}$ – периоды интерференционных структур ($\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_0$ в отсутствие деформации); s – параметр

видности интерференционной картины: Δn_1 и Δn_2 характеризуют величины УФ-засветки первой и второй ВБР. Профиль наведенного показателя преломления двух ВБР, формирующих ИФП, схематически показан на рис. 2. Для записи ВБР использовались волоконные световоды SMF-28. Интегральная засветка составила порядка 50 Дж для каждой решетки (небольшое отличие учитывалось в последующих расчетах).

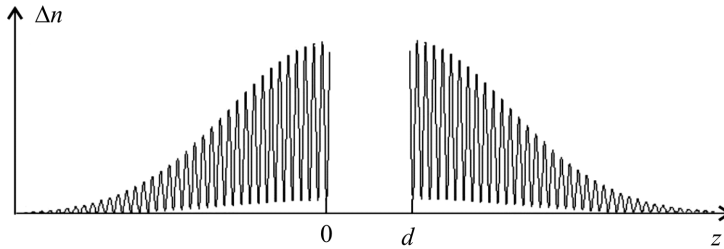


Рис. 2. Схематическое изображение профиля наведенного показателя преломления для ИФП, записанного в схеме с интерферометром Ллойда

Для тестирования сенсорных свойств сначала растягивалось все волокно с записанным ИФП, при этом полученный спектр сдвигался как целое в длинноволновую область пропорционально растяжению с коэффициентом $\sim 0,0015$ нм/микрострэйн. В этом случае основное преимущество использования интерферометра вместо одиночной ВБР заключается в том, что из-за интерференции спектр становится промодулированным с периодом, определяющимся базой ИФП (рис. 3), а более узкие спектральные структуры позволяют точнее определять их сдвиги по частоте и изменения деформации/температуры соответственно [6, 7].

В предложенной новой схеме одна из ВБР интерферометра фиксировалась в канавке с помощью зажимов. Со стороны второй ВБР приваривался дополнительный отрезок волокна, конец которого зажимался в другой канавке, закрепленной на платформе с микровинтом (шаг микровинта 2,5 мкм). Таким образом, растягиванию были подвержены одна из ВБР и база интерферометра. Суммарная длина растягиваемого отрезка волокна с записанным в нем интерферометром составила 5,5 см. Спектр ИФП регистрировался оптическим спектроанализатором YOKOGAWA AQ6370 с разрешением до 0,02 нм. На рис. 3 приведены спектры ИФП в отсутствие деформации и при относительном растяжении $\varepsilon = \Delta L/L \sim 3 \cdot 10^{-5}$. При этом помимо обычного

смещения спектра как целого, наблюдалось относительное изменение амплитуды пиков. Амплитуда центрального пика практически не изменилась, амплитуда левого пика увеличилась, а правого пика – уменьшилась примерно на 10 % от исходных значений. Таким образом, соотношение между амплитудой левого и правого пиков $I_{л}/I_{п}$ изменилось примерно на величину $\sim 0,2$ при очень малой относительной деформации $\sim 3 \cdot 10^{-5}$, т.е. данный способ измерения деформации может быть намного более чувствительным, чем измерения сдвига спектра. Кроме того, измерение отношения амплитуд автоматически устраняет эффекты, связанные с нестабильностью мощности источника излучения. Также было выявлено, что относительное изменение амплитуды боковых пиков линейно растет с увеличением деформации, но только в ограниченном диапазоне.

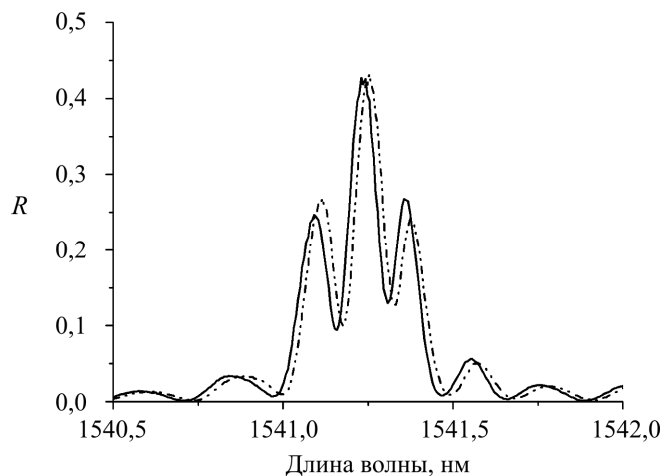


Рис. 3. Экспериментальные спектры ИФП в отсутствие деформации $\varepsilon = 0$ (сплошная линия) и при параметре $\varepsilon \sim 30$ микрострэн (штрихпунктирная линия)

2. Численное моделирование

Для более детального изучения сенсорных свойств предложенной схемы датчика деформаций на основе ИФП проводилось численное моделирование по методике, подробно описанной в работе [17]. Для расчета использовались программы, предоставленные автором работы [18], в которых, в частности, вычислялся квадрат модуля коэффициента отражения для среды с заданным неоднородным распределением показателя преломления. На рис. 4, а приведено моделирование для

случая, когда интерферометр растягивается как целое, при параметрах, близких к экспериментальным: $w = 6$ мм, $d = 3$ мм, $\Delta n_1 = 0,29 \cdot 10^{-3}$, $\Delta n_2 = 0,22 \cdot 10^{-3}$, $s = 0,3$, $\Lambda = 0,52544$ мкм, относительное растяжение $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-5}$. При общей деформации форма спектра ИФП не меняется, происходит его сдвиг. На рис. 4, б приведено моделирование спектров ИФП без деформации и при относительном растяжении $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-5}$ для случая, когда одна из решеток интерферометра зафиксирована. Экспериментальные спектры (см. рис. 3) качественно согласуются с полученными в моделировании.

На рис. 5 показано расчетное соотношение между амплитудами левого и правого пиков спектра ИФП для диапазона значений $\varepsilon = -4 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-4}$. Для данного интерферометра насыщение начинается при параметрах $\varepsilon < -2 \cdot 10^{-5}$ (на сжатие), $\varepsilon > 8 \cdot 10^{-5}$ (на растяжение), т.е. в диапазоне порядка 100 микрострэйн наблюдается зависимость отношения амплитуд пиков от величины относительной деформации, близкая к линейной. При этом центральную точку диапазона можно смещать выбором исходного спектра (недеформированного ИФП), который зависит от разницы параметров двух ВБР, формирующих интерферометр.

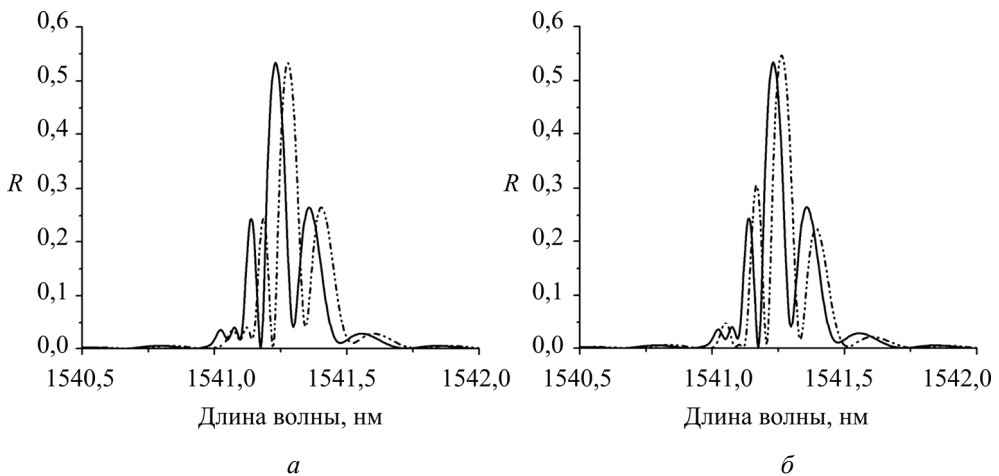


Рис. 4. Численное моделирование спектров ИФП в отсутствие деформации $\varepsilon = 0$ (сплошная линия) и при $\varepsilon = 30$ микрострэйн (штрихпунктирная линия):
 а – при растягивании интерферометра как целого; б – при растягивании одной ВБР и базы

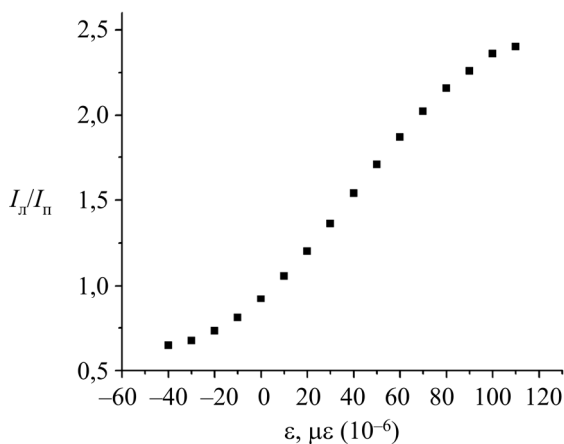


Рис. 5. Отношение амплитуд боковых пиков в зависимости от величины деформации, в микроstrain (10^{-6})

В процессе расчета также выявлено, что для ИФП с разными ВБР эффект зависит от того, какая решетка подвергается деформации, а именно: изменение амплитуд боковых пиков существеннее, когда растягивается либо сжимается решетка с большим наведенным показателем преломления. В случае, когда зеркалами интерферометра являются одинаковые ВБР, изменения амплитуд боковых пиков менее выражены. Расчет также показал, что в конструкции, когда растяжению подвергается только решетка, а база ИФП остается неизменной, отклик на деформацию также проявляется в изменении амплитуд боковых пиков, но выражен менее существенно и имеет другой знак: при растяжении амплитуда левого пика уменьшается, а правого возрастает. Данный эффект требует дополнительного исследования и экспериментального подтверждения.

Заключение

Таким образом, предложенный в работе метод позволяет достаточно точно измерять малые деформации (растяжение/сжатие). Метод заключается в регистрации изменения соотношения между амплитудами боковых пиков в спектре ИФП. При этом деформация порядка 10^{-5} приводит к относительному изменению амплитуд на уровне 10 %, что упрощает регистрацию по сравнению с измерением сдвига пиков спектра ИФП либо одиночной узкополосной ВБР, для чего требуются

анализаторы спектра / устройства опроса с высокой разрешающей способностью. При этом измерение отношения амплитуд автоматически устраняет эффекты, связанные с нестабильностью мощности источника излучения устройства опроса. Кроме того, при точечном закреплении (в двух точках) волокна с ИФП к объекту, изменения температуры окружающей среды будут приводить к сдвигу спектра как целого и не будут сказываться на измерениях деформации по отношению амплитуд пиков. Диапазон линейного отклика отношения амплитуд на деформацию составляет порядка 100 микрострейн (10^{-4}).

В работе получено качественное согласие эксперимента с численным моделированием. Возможность расширения рабочего диапазона ИФП требует дополнительного исследования.

Проект поддержан РФФИ (грант 14-42-08023 p_офи_м) и СО РАН (ПИП N43).

Список литературы

1. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. – San Diego: Academic Press, 1999. – 458 p.
2. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев [и др.] // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.
3. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. – М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
4. Yu F.T.S.Y., Yin S. Fiber optic sensors. – New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. – 495 p.
5. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications / T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh, T. Ose // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1982. – Vol. 30, № 10. – P. 1612–1621.
6. Interferometric fiber optic sensors / B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park, J.B. Eom, M.J. Kim, B.S. Rho, H.Y. Choi // Sensors. – 2012. – Vol. 12, № 3. – P. 2467–2486.
7. In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers / T. Zhu, D. Wu, M. Liu, D.W. Duan // Sensors. – 2012. – Vol. 12, № 8. – P. 10430–10449.

8. Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review / M.R. Islam, M.M. Ali, M.H. Lai, K.S. Lim, H. Ahmad // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14, № 4. – P. 7451–7488.

9. Free spectral range variations of grating-based Fabry-Perot filters photowritten in optical fibers / S. Legoubin, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, S. Boj, E. Delevaque // *Journ. Opt. Soc. Am. A*. – 1995. – Vol. 12, №. 8. – P. 1687–1694.

10. Wan X., Taylor H.F. Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27. – P. 1388–1390.

11. Multiplexed fiber Fabry-Pérot interferometer sensors based on ultrashort Bragg gratings / Z. Wang, F. Shen, L. Song, X. Wang, A. Wang // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2007. – Vol. 19. – P. 622–624.

12. Characteristics of microfiber Fabry-Perot resonators fabricated by UV exposure / J. Li, X. Shen, L.-P. Sun, B.-O. Guan // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21, № 10. – P. 12111–12121.

13. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств. – М., 2004. – 46 с. Препринт НЦВО РАН; № 6.

14. Абдуллина С.Р., Власов А.А., Бабин С.А. Сглаживание спектра волоконных брэгговских решеток в схеме записи с интерферометром Ллойда // *Квантовая электроника*. – 2010. – Т. 40, № 3. – С. 259–263.

15. Внутррезонаторное удвоение частоты генерации в широкоапертурном аргоновом лазере / С.Р. Абдуллина, С.А. Бабин, А.А. Власов, С.И. Каблуков // *Квантовая электроника*. – 2005. – Т. 35, № 9. – С. 857–861.

16. Li E.B., Xi J., Chicharo J.F. Characteristics of a UV beam generated by a Frequency doubled Ar-ion laser // *Opt. Comm.* – 2004. – Vol. 234. – P. 329–335.

17. Особенности записи волоконных брэгговских решеток гауссовым пучком / С.Р. Абдуллина, С.А. Бабин, А.А. Власов, С.И. Каблуков // *Квантовая электроника*. – 2006. – Т. 36, № 10. – С. 966–970.

18. Белай О.В. Методы решения обратной задачи рассеяния для волоконных брэгговских решеток: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2008. – 124 с.

References

1. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. San Diego: Academic Press, 1999. 458 p.
2. Vasil'ev C.A., Medvedkov O. I., Korolev I. G. [et al.] Volokonnye reshetki pokazatelia prelomleniia i ikh primeneniia [Fiber gratings of refraction index and their applications]. *Kvantovaiia elektronika*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103.
3. Kul'chin Iu.N. Raspredelelennye volokonno-opticheskie izmeritel'nye sistemy [Distributed fiber-optical measuring systems]. Moscow: Fizmatlit, 2001. 272 p.
4. Yu F.T.S.Y., Yin S. Fiber optic sensors. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. 495 p.
5. Yoshino T., Kurosawa K., Itoh K., Ose T. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, vol. 30, no. 10, pp. 1612-1621.
6. Lee B.H., Kim Y.H., Park K.S., Eom J.B., Kim M.J., Rho B.S., Choi H.Y. Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 2467-2486.
7. Zhu T., Wu D., Liu M., Duan D.W. In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 10430-10449.
8. Islam M.R., Ali M.M., Lai M.H., Lim K.S., Ahmad H. Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 7451-7488.
9. Legoubin S., Douay M., Bernage P., Niay P., Boj S., Delevaque E. Free spectral range variations of grating-based Fabry-Perot filters photowritten in optical fibers. *Journ. Opt. Soc. Am. A*, 1995, vol. 12, no. 8, pp. 1687-1694.
10. Wan X., Taylor H.F. Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors. *Opt. Lett.*, 2002, vol. 27, pp. 1388-1390.
11. Wang. Z., Shen F., Song L., Wang X., Wang A. Multiplexed fiber Fabry-Pérot interferometer sensors based on ultrashort Bragg gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, vol. 19, pp. 622-624.
12. Li J., Shen X., Sun L.-P., Guan B.-O. Characteristics of microfiber Fabry-Perot resonators fabricated by UV exposure. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, no. 10, pp. 12111-12121.
13. Medvedkov O.I., Korolev I.G., Vasil'ev S.A. Zapis' volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme s interferometrom Lloida i modelirovanie ikh spektral'nykh svoistv [Recording of fiber Bragg gratings in the scheme

with a Lloyd interferometer and modeling their spectral properties]. Moscow, 2004. 46 p.

14. Abdullina S.R., Vlasov A.A., Babin S.A. Sglazhivanie spektra volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme zapisi s interferometrom Lloyda [Smoothing of a spectrum of fiber Bragg gratings in the recording scheme with a Lloyd interferometer]. *Kvantovaia elektronika*, 2010, vol. 40, no. 3, pp. 259-263.

15. Abdullina S.R., Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I. Vnutri-rezonatornoe udvoenie chastoty generatsii v shirokoaperturnom argonovom lazere [Intracavity frequency doubling generation in wide-aperture argon laser]. *Kvantovaia elektronika*, 2005, vol. 35, no. 9, pp. 857-861.

16. Li E.B., Xi J., Chicharo J.F. Characteristics of a UV beam generated by a requery doubled Ar-ion laser. *Opt. Comm.*, 2004, vol. 234, pp. 329-335.

17. Abdullina S.R., Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I. Osobnosti zapisi volokonnykh breggovskikh reshetok gaussovym puchkom [The characteristics of recording of fiber Bragg gratings by a Gaussian beam]. *Kvantovaia elektronika*, 2006, vol. 36, no. 10, pp. 966-970.

18. Belai O.V. Metody resheniia obratnoi zadachi rasseianiia dlia volokonnykh breggovskikh reshetok [Methods for solving the inverse scattering problem for fiber Bragg gratings]. Thesis of Ph.D's degree dissertation, Novosibirsk, 2008. 124 p.

Получено 25.09.2015