

УДК 681.7.063

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДАВЛЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОГО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ОСИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В.А. Новикова^а, С.В. Варжель^а, А.А. Дмитриев^а, Ю.К. Залесская^а, Р.Ф. Идрисов^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: novivial@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.05.18, принята к печати 25.06.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Новикова В.А., Варжель С.В., Дмитриев А.А., Залесская Ю.К., Идрисов Р.Ф. Исследование спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом при воздействии давления, направленного перпендикулярно оси оптического волокна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 751–757. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние давления перпендикулярно оси оптического волокна на волоконные брэгговские решетки с фазовым сдвигом. **Метод.** Запись решеток Брэгга производилась с помощью интерферометра Тальбота, а введение фазового сдвига – с помощью электрической дуги сварочного аппарата. В качестве источника излучения использовалась эксимерная лазерная система. Фиксировалось изменение спектров отражения при различных значениях давления на оптическое волокно. **Основные результаты.** Получены волоконные брэгговские решетки с фазовым сдвигом без использования высокоточных приборов на этапе введения фазового сдвига. Представлены результаты экспериментов по выявлению зависимости между приложенной массой и расстоянием между локальными минимумами в спектре отражения волоконной брэгговской решетки с фазовым сдвигом за счет наведенного двулучепреломления. Показано, что изменение спектральных характеристик связано с эффектом двулучепреломления за счет напряжений внутри волокна. Следствием этого является появление второго локального минимума в полосе отражения. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть применены при создании чувствительного элемента волоконно-оптического датчика давления. Выполненное исследование демонстрирует возможности использования решеток Брэгга с фазовым сдвигом в качестве чувствительных элементов в волоконно-оптических датчиках давления.

Ключевые слова

волоконная брэгговская решетка, фазовый сдвиг, интерферометр Тальбота, эксимерный лазер, датчик давления, двулучепреломление

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

SPECTRAL CHARACTERISTICS STUDY OF PHASE-SHIFTED FIBER BRAGG GRATINGS UNDER PRESSURE APPLIED PERPENDICULAR TO FIBER AXIS

V.A. Novikova^а, S.V. Varzhel^а, A.A. Dmitriev^а, Yu.K. Zaleskaya^а, R.F. Idrisov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: novivial@mail.ru

Article info

Received 30.05.18, accepted 25.06.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757

Article in Russian

For citation: Novikova V.A., Varzhel S.V., Dmitriev A.A., Zaleskaya Yu.K., Idrisov R.F. Spectral characteristics study of phase-shifted fiber Bragg gratings under pressure applied perpendicular to fiber axis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 751–757 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-751-757

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of effect that occurs when pressure is applied to the phase-shifted fiber Bragg gratings perpendicular to the fiber axis. **Method.** Fiber Bragg gratings inscription was performed using Talbot interferometer, and the introduction of a phase shift – by means of the electrical discharge of an arc fusion splicer. The excimer laser system was used as a radiation source. The change in the reflection spectra at different pressures on the optical fiber is measured. **Main Results.** Fiber Bragg gratings with a phase shift are obtained by the procedure that excludes the use of high-precision instruments during the phase-shift introduction step. Experiment results are given showing up the distance dependence between the local minima in the reflection spectrum of fiber Bragg grating with a phase shift on the applied mass arising as a result of the induced birefringence. It is shown that the change in spectral characteristics is related to the birefringence effect owing to stresses inside the fiber. As a result, the second local minimum appears in reflectance band. **Practical Relevance.** Research results can be used in creation of a sensing element of a fiber optic pressure sensor. This study demonstrates the application possibilities of Bragg gratings with a phase shift as sensing elements in fiber-optic pressure sensors.

Keywords

fiber Bragg grating, phase shift, Talbot interferometer, excimer laser, pressure sensor, birefringence

Acknowledgements

This work has been performed at ITMO University and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 03.G25.31.0245).

Введение

В настоящее время оптическое волокно (ОВ) находит широкое применение в качестве среды передачи информации в волоконно-оптических линиях связи [1, 2], активной среды лазеров [3, 4], чувствительных элементов датчиков различных физических величин [5, 6] и т.д. Изучение явления фоторефрактивных легированных волокон позволило использовать волокна с измененной структурой в оптических фильтрах, резонаторах, компенсаторах дисперсии, усилителях, датчиках повышенной точности и т.д. Впервые получение стабильных во времени решеток показателя преломления, сформированных в сердцевине германосиликатного волоконного световода, было описано в работе [7]. Позже, в 1989 г. [8], была предложена методика записи решеток Брэгга через боковую поверхность ОВ. Дальнейшие исследования позволили сформировать волоконные дифракционные структуры с различными спектральными откликами для решения множества задач в областях сенсорики, телекоммуникаций и т.д.

Существует несколько особых типов структур волоконных брэгговских решеток (ВБР): чирпированные [9], с наклонными штрихами [10], суперпозиции нескольких ВБР [11, 12] и решетки с фазовым сдвигом [13, 14]. Последние виды дифракционных структур представляют собой ВБР, условно разделенную на две области, суммарные излучения которых находятся в противофазе на длине волны брэгговского резонанса. Такие структуры позволяют наблюдать в полосе отражения узкую область пропускания, порядка нескольких десятков или единиц пикометров.

В литературе описаны различные методики формирования решеток Брэгга с фазовым сдвигом: использование фазовой маски с наведенным фазовым сдвигом, ультрафиолетовая постобработка узкой области в центре сформированной ВБР [15], введение воздушного зазора между двумя сформированными решетками Брэгга [16], повышение показателя преломления одного периода в центре ВБР [17] и т.д. Основные недостатки предложенных методов заключаются в использовании дорогостоящего оборудования на этапе введения фазового сдвига и сложной юстировке применяемых систем, а также в отсутствии возможности подстройки параметров для каждой конкретной задачи. В данном исследовании использована методика, описанная в работе [18], позволяющая формировать волоконные дифракционные структуры с различными характеристиками и исключать дорогостоящее оборудование на этапе внесения фазового сдвига.

Решетки Брэгга с фазовым сдвигом могут использоваться в узкополосных волоконно-оптических фильтрах и датчиках повышенной точности. Помимо стандартных преимуществ использования ВБР, таких как малые вносимые потери и устойчивость к электромагнитным воздействиям, в ВБР с фазовым сдвигом узкая область пропускания в полосе отражения позволяет с более высокой точностью (по сравнению со стандартными ВБР) фиксировать сдвиг длины волны брэгговского резонанса при измерении таких физических величин, как температура, натяжение, давление и т.д.

В одной из работ [19] было исследовано применение решеток Брэгга с фазовым сдвигом, индуцированных в двулучепреломляющем ОВ. В связи с этим возник интерес к исследованию того же эффекта при механическом создании напряжений внутри волокна для ВБР с фазовым сдвигом, записанных в изотропном ОВ. Результаты полученных исследований отражают возможность применения изучаемых структур в волоконно-оптических датчиках давления, основанных на мониторинге изменения спектральных характеристик решеток Брэгга с фазовым сдвигом в зависимости от приложенных масс.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния давления в поперечном направлении по отношению к оси волокна на спектральные характеристики индуцированной в нем решетки Брэгга с фазовым сдвигом.

Методика экспериментов

Для экспериментов использовалось стандартное телекоммуникационное изотропное одномодовое ОВ SMF-28. Повышение фоточувствительности волоконного световода обеспечивалось водородной обработкой ОВ. Условия водородной обработки – такие же, как в работе [20].

В данной работе для записи ВБР использовался интерферометрический метод, а в качестве источника излучения применялась KrF эксимерная лазерная система Optosystems MOPA CL-7550 типа «задающий генератор – усилитель». Такая система генерирует импульсы длительностью 17 нс на полувысоте с длиной волны излучения 248,3 нм и номинальной энергией 250 мДж. Запись решеток Брэгга осуществлялась на интерферометре Тальбота [21], представленном на рис. 1, а. Излучение с шириной пучка h падает на фазовую маску, прохождение которой позволяет получать различные дифракционные порядки (α – угол первого порядка дифракции). Создание интерференционной картины обеспечивается отражением $+1$ и -1 порядков дифракции от зеркал (расстояние между центрами которых равно b), расположенных на поворотной подвижке, при этом излучение падает на ОВ под углом θ . Угол поворота зеркал φ позволяет изменять период решетки, а следовательно, и длину волны брэгговского резонанса.

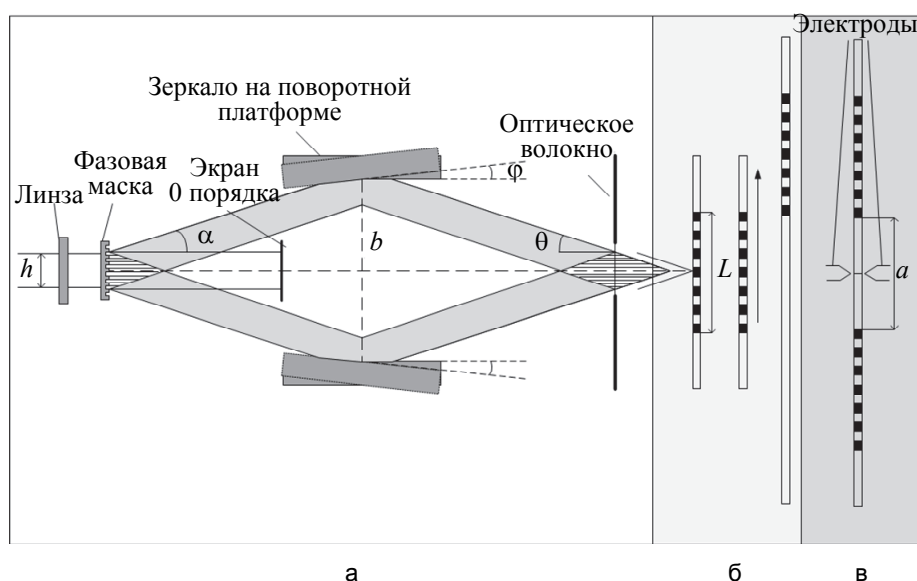


Рис. 1. Схема записи решеток Брэгга с фазовым сдвигом: запись волоконных брэгговских решеток на интерферометре Тальбота (а); стадия сдвига волокна с последующей записью второй волоконной брэгговской решетки (б); этап наведение фазового сдвига с помощью электрической дуги сварочного аппарата (в)

На рис. 1, б, в, представлен этап наведения фазового сдвига, заключающийся в изменении геометрии ОВ с помощью электрической дуги сварочного аппарата. После записи первой ВБР волокно смещается на расстояние, равное сумме длины одной ВБР (L) и расстояния между решетками (a), после чего осуществляется запись второй ВБР (условия записи, а следовательно, и характеристики решеток Брэгга одинаковы). После записи обеих решеток показателя преломления волокно укладывается в сварочный аппарат, и воздействием электрической дуги наводится разность фаз между излучениями, отраженными от обеих решеток. По указанной методике была сформирована волоконная дифракционная структура с фазовым сдвигом, длина которой (с учетом расстояния между решетками – 4 мм) равна 14 мм.

На рис. 2 представлена схема исследования влияния приложенной массы (m) на спектры отражения решетки показателя преломления с фазовым сдвигом. ОВ закреплялось на металлическом диске, после чего основание подставки для шайб помещалось в центре расстояния между решетками. На подставке поочередно устанавливались металлические шайбы массой 50 г, при этом фиксировался спектр отражения с учетом приложенной массы.

Анализ полученных спектральных характеристик осуществлялся по схеме, представленной на рис. 3. Снятие спектров осуществлялось с помощью оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370C с диапазоном измерений 600–1700 нм и разрешающей способностью 20 пм.

Оптическое излучение от широкополосного источника направляется через Y-ответвитель по ОВ со сформированной ВБР с фазовым сдвигом. Далее, отражаясь от ВБР, излучение через Y-ответвитель направляется на оптический спектроанализатор. Оптический изолятор включен в схему для исключения влияния обратных отражений на спектр источника излучения. FC/APC – это тип разъема для соединения оптических кабелей, при котором край сполитрован под углом 8° , что позволяет снизить мощность обратных отражений на соединениях в оптической схеме.

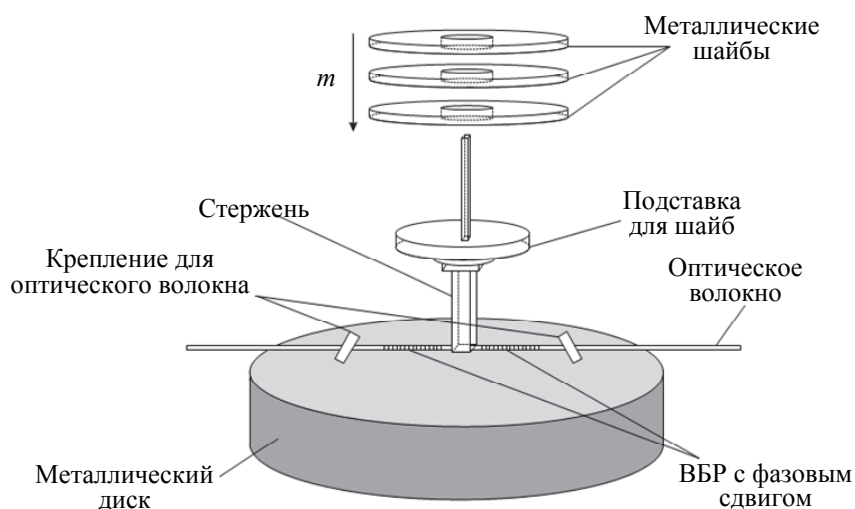


Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения исследований по воздействию приложенного давления на оптическое волокно с волоконной брэгговской решеткой с фазовым сдвигом

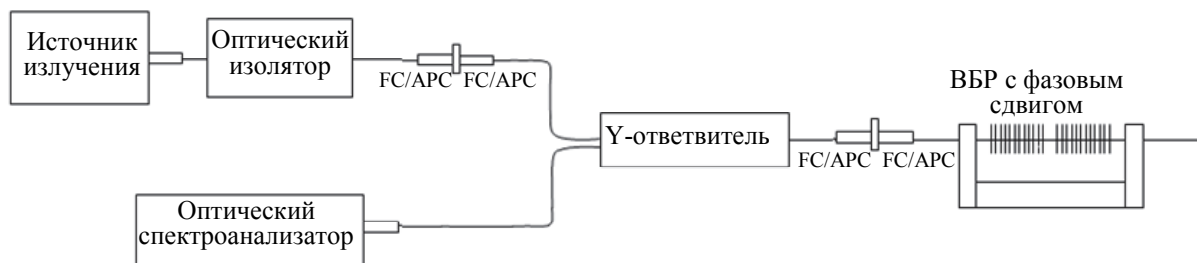


Рис. 3. Структурная схема для снятия спектров отражения волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом

Результаты

На рис. 4 представлены спектры отражения (R – коэффициент отражения в процентах, λ – длина волны, $\Delta\lambda^*$ – расстояния между локальными минимумами), полученные при трех различных значениях приложенных масс. Давление в поперечном направлении по отношению к оси волокна приводит к возникновению напряжений в световоде, следствием которых является двулучепреломление. Анизотропия в области приложения массы между двумя решетками проявляется на спектре отражения в виде возникновения второго локального минимума.

Как известно, приложение механического напряжения на область ОВ в поперечном направлении по отношению к его оси наводит в данной области световода анизотропию, что проявляется в виде растягивающего (T_n^+) и сжимающего (T_n^-) напряжений. Двулучепреломления, индуцированные каждым из напряжений, суммируются, а разность показателей преломления для осей (Δn_b) выражается следующим образом [22, 23]:

$$\begin{aligned} \delta n_x &= -\frac{n^3}{2} (p_{11} - 2\nu p_{12}) \frac{T_n^+}{E} - \frac{n^3}{2} (p_{12} - 2\nu p_{12} - 2\nu p_{11}) \frac{T_n^-}{E}, \\ \delta n_y &= -\frac{n^3}{2} (p_{11} - 2\nu p_{12}) \frac{T_n^-}{E} - \frac{n^3}{2} (p_{12} - 2\nu p_{12} - 2\nu p_{11}) \frac{T_n^+}{E}, \\ \Delta n_b &= \delta n_y - \delta n_x = -\frac{n^3}{2} (p_{12} - p_{11})(1 + \nu) \left(\frac{T_n^+ - T_n^-}{E} \right), \end{aligned}$$

где δn_x и δn_y – изменение показателя преломления вдоль осей xx' и yy' ОВ (рис. 5); n – показатель преломления сердцевины ОВ; E – модуль Юнга; p_{11} и p_{12} – компоненты упруго-оптического тензора; ν – коэффициент Пуассона.

С учетом того, что для стандартного изотропного одномодового ОВ $E = 70$ ГПа, $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ и $n = 1,477$, получаем соотношение

$$\Delta n_b = -0,26 \frac{T_n^+ - T_n^-}{E}.$$

На рис. 5 представлено ОВ, в котором схематично показаны растягивающее и сжимающее напряжения в области сердцевины, возникшие под воздействием массы (m), приложенной перпендикулярно оси световода. Быстрая ось, которой соответствует меньшее значение показателя преломления, проходит вдоль yy' , а медленная ось, которой соответствует большее значение показателя преломления, – xx' .

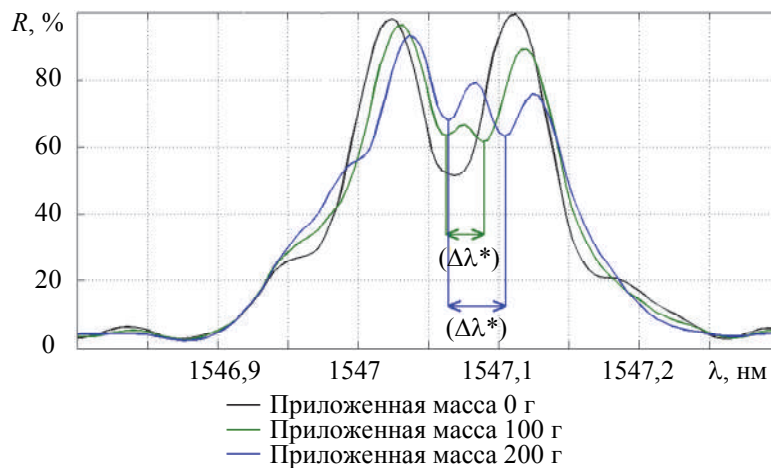


Рис. 4. Спектры отражения волоконной брэгговской решетки с фазовым сдвигом при различных значениях приложенных масс

Таким образом, световод в области приложенного давления становится двулучепреломляющим, соответственно, у него появляются две взаимортогональные оси – быстрая и медленная. Значения показателей преломления различаются для каждой из двух осей двулучепреломления. Расщепление одного локального минимума пропускания в спектре отражения ВБР с фазовым сдвигом на два связано с появлением разницы оптических путей для света, проходящего по быстрой и медленной осям двулучепреломления.

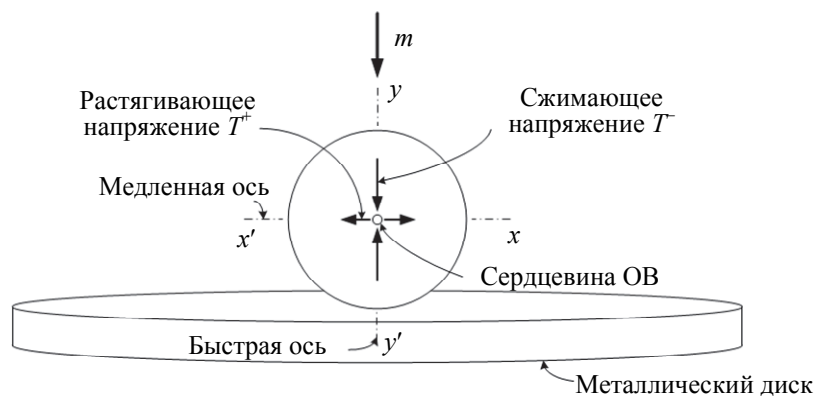


Рис. 5. Оптическое волокно под воздействием давления, направленного перпендикулярно оси световода

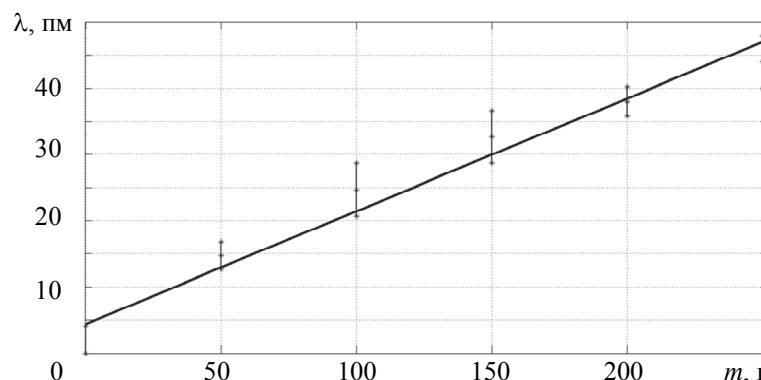


Рис. 6. Зависимость расстояния между локальными минимумами от значений приложенных масс

Увеличение приложенной массы приводит к увеличению расстояния между локальными минимумами, что наглядно продемонстрировано на рис. 4. Фиксирование изменения величины $\Delta\lambda^*$ при различных значениях приложенной массы позволяет создавать чувствительные элементы волоконно-оптических датчиков давления.

На рис. 6 представлена зависимость расстояния между локальными минимумами от приложенной массы (m). По результатам проведения исследований были получены экспериментальные данные, обработка которых была сведена к аппроксимации линейной функцией.

Эксперимент по увеличению и уменьшению массы был проведен 3 раза. Эксперименты проводились при увеличении массы от 0 до 250 г (фиксирование спектров отражения осуществлялось через каждые 50 г). Рис. 6 демонстрирует зависимость расстояния между локальными минимумами от приложенной массы. Выявлено минимальное присутствие гистерезиса, укладываемое в значение разброса, что свидетельствует о сохранении прочностных свойств волокна и начальных характеристик ВБР с фазовым сдвигом, что делает возможным применение исследуемых структур в датчиках давления.

Заключение

В ходе исследования получены волоконные брэгговские решетки с фазовым сдвигом, отличающиеся от стандартных решеток Брэгга наличием области пропускания в полосе отражения. Выбранный способ формирования исследуемых структур позволяет создавать решетки различных длин и изменять расстояния между решетками, при этом на стадии введения фазового сдвига не требуются высокоточные оптические приборы. После записи решеток Брэгга была собрана схема для исследования воздействия приложенного давления на изменение спектров отражения.

В процессе проведения работы и анализа полученных данных была выявлена возможность изменения спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом посредством воздействия приложенных масс перпендикулярно оси волокна. Изменение спектральных характеристик связано с созданием напряжений внутри волокна, приводящих к возникновению эффекта двулучепреломления, следствием которого является появление второго локального минимума в полосе отражения.

Линейный характер зависимости расстояний между возникающими при механических напряжениях локальными минимумами от приложенных масс позволяет сделать вывод о возможности использования решеток Брэгга с фазовым сдвигом в качестве чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков давления.

Литература

1. Spolitis S., Ivanovs G. Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation // *IEEE Swedish Communication Technologies Workshop*. 2011. P. 29–33. doi: 10.1109/swe-ctw.2011.6082484
2. Jiang H., Chen J., Liu T.D., Fu H. Design of an FBG sensor network based on pareto multi-objective optimization // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2013. V. 25. N 15. P. 1450–1453. doi: 10.1109/lpt.2013.2264802
3. Shuo L., Fengping Y., Wanjing P., Ting F., Ze D., Geekung C. Tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser by employing a HB-FBG // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 26. N 18. P. 1809–1812. doi: 10.1109/lpt.2014.2336654
4. Alyshev S.V., Ryumkin K.E., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Gur'yanov A.N., Dianov E.M. Fibre laser based on tellurium-doped active fibre // *Quantum Electronics*. 2014. V. 44. N 2. P. 95–97. doi: 10.1070/qe2014v044n02abeh015367
5. Jiang Qi, Yu M., Zhou X., Guo T.Y., Song J.X. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on fiber vibrating wire // *Proc. 8th Int. Conf. on Sensing Technology*. Liverpool, UK, 2014. P. 529–533.
6. Wang S.L., Wang Y., Hu M.L., Wang J.H., Guo C., Lei H.F. A new style of FBG vibration sensor // *Journal of Basic and Applied Physics*. 2013. V. 2. P. 20–23.
7. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication // *Applied Physics Letters*. 1978. V. 32. N 10. P. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
8. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Optics Letters*. 1989. V. 14. N 15. P. 823–825. doi: 10.1364/OL.14.000823
9. Byron K.C., Sugden K., Bricheno T., Bennion I. Fabrication of chirped bragg gratings in photosensitive fibre // *Electronics Letters*. 1993. V. 29. N 18. P. 1659–1660. doi: 10.1049/el:19931104
10. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. In-fibre Bragg grating tap // *Optical Fiber Communication Conference*. San Francisco, 1990. doi: 10.1364/ofc.1990.tug1
11. Othonos A., Lee X., Measures R.M. Superimposed multiple

References

1. Spolitis S., Ivanovs G. Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation. *IEEE Swedish Communication Technologies Workshop*, 2011, pp. 29–33. doi: 10.1109/swe-ctw.2011.6082484
2. Jiang H., Chen J., Liu T.D., Fu H. Design of an FBG sensor network based on pareto multi-objective optimization. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, vol. 25, no. 15, pp. 1450–1453. doi: 10.1109/lpt.2013.2264802
3. Shuo L., Fengping Y., Wanjing P., Ting F., Ze D., Geekung C. Tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser by employing a HB-FBG. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 18, pp. 1809–1812. doi: 10.1109/lpt.2014.2336654
4. Alyshev S.V., Ryumkin K.E., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Gur'yanov A.N., Dianov E.M. Fibre laser based on tellurium-doped active fibre. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 95–97. doi: 10.1070/qe2014v044n02abeh015367
5. Jiang Qi, Yu M., Zhou X., Guo T.Y., Song J.X. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on fiber vibrating wire. *Proc. 8th Int. Conf. on Sensing Technology*. Liverpool, UK, 2014, pp. 529–533.
6. Wang S.L., Wang Y., Hu M.L., Wang J.H., Guo C., Lei H.F. A new style of FBG vibration sensor. *Journal of Basic and Applied Physics*, 2013, vol. 2, pp. 20–23.
7. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 1978, vol. 32, no. 10, pp. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
8. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 1989, vol. 14, no. 15, pp. 823–825. doi: 10.1364/OL.14.000823
9. Byron K.C., Sugden K., Bricheno T., Bennion I. Fabrication of chirped bragg gratings in photosensitive fibre. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 18, pp. 1659–1660. doi: 10.1049/el:19931104
10. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. In-fibre Bragg grating tap. *Optical Fiber Communication Conference*. San Francisco, 1990. doi: 10.1364/ofc.1990.tug1
11. Othonos A., Lee X., Measures R.M. Superimposed multiple

- Bragg gratings // *Electronics Letters*. 1994. V. 30. N 23. P. 1972–1974. doi: 10.1049/el:19941359
12. Arigiris A., Konstantaki M., Ikiades A., Chronis D., Florias P., Kallimani K., Pagiatakis G. Fabrication of high-reflectivity superimposed multiple-fiber Bragg gratings with unequal wavelength spacing // *Optics Letters*. 2002. V. 27. N 15. P. 1306–1308.
 13. Littler I.C.M., Rochette M., Eggleton B.J. Adjustable bandwidth dispersionless bandpass FBG optical filter // *Optics Express*. 2005. V. 13. N 9. P. 3397–3407. doi: 10.1364/opex.13.003397
 14. Wang H. A Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Based Humidity Sensor. PhD Thesis. Canada, Ontario, 2013. 55 p.
 15. Canning J., Sceats M.G. π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing // *Electronics Letters*. 1994. V. 30. N 16. P. 1344–1345. doi: 10.1049/el:19940920
 16. Yang Y.H., Liu X.J., Jin W. Phase shifted fiber Bragg grating fabrication techniques and their laser applications // *Asia Communications and Photonics Conference*. 2013. doi: 10.1364/acp.2013.ath3d.5
 17. Chehura E., James S.W., Tatam R.P. A simple method for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings with flexible choice of centre wavelength // *Proc. SPIE*. 2009. V. 7503. doi: 10.1117/12.835466
 18. Новикова В.А., Варжель С.В., Грибаев А.И., Архипов С.В., Идрисов Р.Ф., Михнева А.А., Фролов Е.А. Методика изготовления и исследование спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом // X Международная конференция Оптика-2017. Санкт-Петербург, 2017. С. 392–394.
 19. Rosenthal A., Razansky D., Ntziachristos V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating // *Optics Letters*. 2011. V. 36. N 10. P. 1833–1835. doi: 10.1364/ol.36.001833
 20. Варжель С.В., Мунько А.С., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В. Запись решеток Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутом водородной обработке // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. С. 74–78.
 21. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. Art. 540.
 22. Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. N 12. P. 4309–4341.
 23. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 2nd ed. Artech House, 2014. 407 p.
 - Bragg gratings. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 23, pp. 1972–1974. doi: 10.1049/el:19941359
 12. Arigiris A., Konstantaki M., Ikiades A., Chronis D., Florias P., Kallimani K., Pagiatakis G. Fabrication of high-reflectivity superimposed multiple-fiber Bragg gratings with unequal wavelength spacing. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, no. 15, pp. 1306–1308.
 13. Littler I.C.M., Rochette M., Eggleton B.J. Adjustable bandwidth dispersionless bandpass FBG optical filter. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 9, pp. 3397–3407. doi: 10.1364/opex.13.003397
 14. Wang H. *A Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Based Humidity Sensor*. PhD Thesis. Canada, Ontario, 2013, 55 p.
 15. Canning J., Sceats M.G. π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 16, pp. 1344–1345. doi: 10.1049/el:19940920
 16. Yang Y.H., Liu X.J., Jin W. Phase shifted fiber Bragg grating fabrication techniques and their laser applications. *Asia Communications and Photonics Conference*, 2013. doi: 10.1364/acp.2013.ath3d.5
 17. Chehura E., James S.W., Tatam R.P. A simple method for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings with flexible choice of centre wavelength. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7503. doi: 10.1117/12.835466
 18. Novikova V.A., Varzhel' S.V., Gribaev A.I., Arkhipov S.V., Idrisov R.F., Mikhneva A.A., Frolov E.A. Method for fabricating and spectral characteristics analysis of phase-shifted fiber Bragg gratings. *Proc. 10th Int. Conf. on Optics-2017*. St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 392–394. (in Russian)
 19. Rosenthal A., Razansky D., Ntziachristos V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 10, pp. 1833–1835. doi: 10.1364/ol.36.001833
 20. Varzhel S.V., Munko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V. Writing of Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding subjected to hydrogen treatment. *Opticheskii Zhurnal*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 74–78. (In Russian)
 21. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, art. 540.
 22. Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341.
 23. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 2nd ed. Artech House, 2014, 407 p.

Авторы

Новикова Виктория Александровна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-6579-6984, novivial@mail.ru

Варжель Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru

Дмитриев Андрей Анатольевич – студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0674-8381, Dmitrieva1994@yandex.ru

Залеская Юлия Константиновна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3656-3791, jz15@mail.ru

Идрисов Равиль Фиркатович – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9837-8308, r.idrisov@aol.com

Authors

Victoria A. Novikova – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6579-6984, novivial@mail.ru

Sergey V. Varzhel – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru

Andrey A. Dmitriev – student, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0674-8381, Dmitrieva1994@yandex.ru

Yulia K. Zaleskaya – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3656-3791, jz15@mail.ru

Ravil F. Idrisov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9837-8308, r.idrisov@aol.com