

УДК 681.2.08

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА С МАССИВОМ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Д.А. Егорова^а, А.В. Куликов^а

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

Адрес для переписки: dashaegorova18@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.06.18, принята к печати 21.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-901-904

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Егорова Д.А., Куликов А.В. Результаты экспериментального исследования и моделирования многосердцевинного волоконного световода с массивом волоконных брэгговских решеток // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 901–904. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-901-904

Аннотация

Предмет исследования. В работе рассмотрен один из актуальных вопросов разработки и создания измерительной системы для определения и контроля расположения, изгибов протяженных объектов в пространстве. Авторами предложен вариант создания чувствительной части волоконно-оптического измерительного устройства на основе чирпированных волоконных брэгговских решеток, записанных в многосердцевинном волокне. **Метод.** Сущность метода сводится к установке зависимости изменения периода решетки в каждой сердцевине от радиуса изгиба волокна, что позволяет удаленно восстановить траекторию укладки волоконного световода в пространстве. **Основные результаты.** Представлены результаты эксперимента с односердцевинным одномодовым волокном с массивом чирпированных волоконных брэгговских решеток. Приведены оптическая схема эксперимента и спектры отражения до и после изгиба односердцевинного волоконного световода. Представлена геометрия многосердцевинного волокна и компьютерная модель участка изогнутого световода с заданным радиусом. **Практическая значимость.** В отличие от существующих волоконно-оптических измерительных систем система с многосердцевинным оптическим волокном с массивом чирпированных волоконных брэгговских решеток позволит определить траекторию укладки волоконного световода в пространстве без использования методов частотной оптической рефлектометрии.

Ключевые слова

волоконный световод, массив чирпированных волоконных брэгговских решеток, многосердцевинное оптическое волокно, волоконно-оптическая измерительная система

Благодарности

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

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND SIMULATION OF MULTI-CORE FIBER WAVEGUIDE WITH FIBER BRAGG GRATINGS ARRAY

D.A. Egorova^а, A.V. Kulikov^а

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

Corresponding author: dashaegorova18@gmail.com

Article info

Received 13.06.18, accepted 21.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-901-904

Article in Russian

For citation: Egorova D.A., Kulikov A.V. Results of experimental research and simulation of multi-core fiber waveguide with fiber Bragg gratings array. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 901–904 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-901-904

Abstract

Subject of Research. The development and creation of a measurement system for determination and monitoring of the location and bends of extended objects in space are actual at the moment. We propose the creation of a sensitive part of fiber-

optic measurement system based on chirped fiber Bragg gratings (FBGs) inscribed in a multi-core fiber. **Method.** The method essence lies in dependence determination of the grating period change in each core on the bending radius of the fiber, that gives the possibility to reconstruct remotely the trajectory of the optical fiber laying in space. **Main Results.** The paper presents experiment results with a single-mode fiber with an array of chirped FBGs. The experimental optical scheme and the reflection spectra before and after the single-core optical fiber bending are shown. The geometry and computer model of multi-core fiber section with a given radius bend are described. **Practical Relevance.** Unlike the other existing fiber-optic measurement systems, a system with multi-core optical fiber with chirped FBGs array makes it possible to determine the trajectory of fiber-optic light guide laying in space without using methods of optical frequency domain reflectometry, which determine the location of the Bragg gratings along the optical fiber length.

Keywords

fiber-optic light guide, chirped fiber Bragg gratings array, multi-core optical fiber, fiber-optic measurement system

Acknowledgements

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

Волоконно-оптические измерительные системы в настоящее время нашли широкое применение в различных отраслях [1]. Актуальными на данный момент является разработка и создание волоконно-оптической измерительной системы для определения и контроля расположения и изгибов протяженных объектов в пространстве. Данная система, позволяющая определить форму объекта, включая длинные гибкие тела, находит применение в медицине (контроль положения малоинвазивных хирургических устройств и инструментов, введенных в организм человека) [2, 3], аэрокосмической отрасли (мониторинг разворачиваемых конструкций во время полета), энергетике (измерение формы лопасти на ветровых турбинах для управления ими в реальном времени) и др.

Волоконно-оптические измерительные системы для определения и контроля расположения и изгибов протяженных объектов в пространстве реализуются на основе волоконных решеток Брэгга, записанных по всей длине многосердцевинного волоконного световода [4]. Датчики на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) широко используются для динамической структурной деформации в различных инженерных сооружениях, включая мониторинг трубопроводов, нефтяных скважин, мониторинг состояния зданий и сооружений. ВБР представляет собой модуляцию показателя преломления в сердцевине оптического волокна, которая приводит к отражению света, распространяющегося по волокну в узком диапазоне длин волн, для которых выполняется условие Брэгга, связывающее длину волны и период решетки. Анализируя спектры отражения от ВБР на одном участке волокна, можно определить относительные уровни деформации волоконного световода [5, 6]. Это связано с тем, что решетка на внутренней стороне изгиба волокна будет испытывать сжатие, что приводит к уменьшению периода решетки, в то время как на внешней – растяжение и, соответственно, увеличение периода. Дальнейшая обработка результатов позволяет удаленно восстановить форму оптического волокна, повторяющего расположение протяженных объектов в пространстве, в трехмерной системе координат [7, 8].

В настоящей работе объектом экспериментальных исследований является участок одномодового оптического волокна длиной 173 мм с массивом чирпированных волоконных брэгговских решеток, записанных в оптическое волокно с помощью интерферометра Тальбота [9]. В волокне было записано двенадцать 10 мм решеток. Положение решетки по длине волокна отмечалось после записи. В процессе записи каждой последующей решетки изменялся период интерференционной картины посредством поворота зеркал, а, следовательно, и центральная длина волны отражения ВБР, таким образом, каждой решетке соответствует свой спектр отражения. На рис. 1 представлена оптическая схема эксперимента.

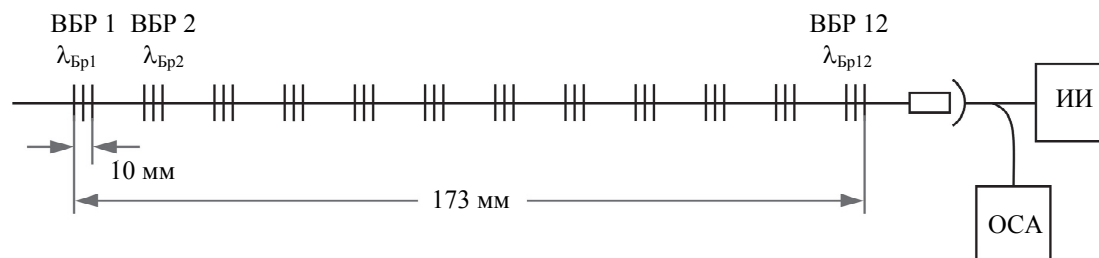


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента

Оптическое волокно с массивом решеток (ВБР n) с определенной центральной длиной волны Брэгга ($\lambda_{\text{Бр}n}$) для каждой решетки (n – номер решетки) подключалось с помощью ответвителя к источнику излучения (ИИ) и оптическому спектроанализатору (ОСА), далее укладывалось по схеме, изображенной на рис. 2, а, б, с радиусом изгиба 20 мм. Пунктирной линией отмечено расположение волокна. Регистрация спектров отражения массива ВБР производилась с помощью спектроанализатора до изгиба волокна и после. Полученные спектры отражения представлены на рис. 2, в. На графике отмечены сдвиги центральной длины волны Брэгга ($\Delta\lambda_{\text{Бр}1}$ и $\Delta\lambda_{\text{Бр}2}$) на разных участках спектра до и после изгиба оптического

волокна. Дальнейшая математическая обработка позволяет определить радиус изгиба волоконного световода, учитывая зависимость изменения длины волны брэгговского резонанса от деформации.

Результаты экспериментального исследования показали возможность применения оптического волокна с массивом чирпированных ВБР для регистрации деформации вдоль оси оптического волокна. Для построения волоконно-оптической измерительной системы определения траектории укладки в пространстве необходимо использовать многосердцевинное волокно.

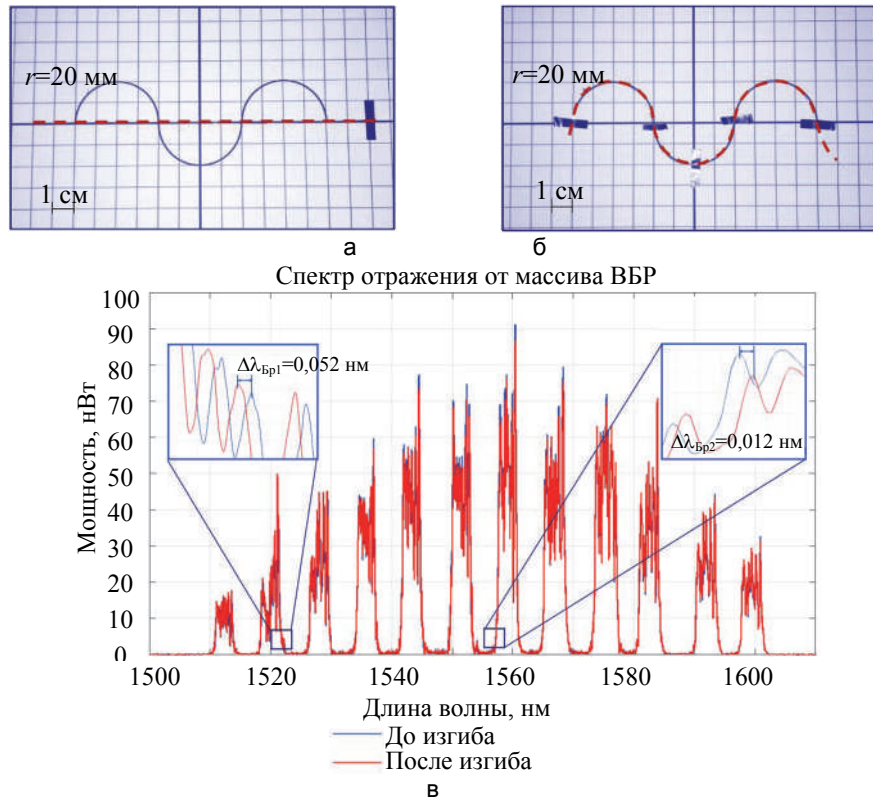


Рис. 2. Экспериментальное исследование с одномодовым оптическим волокном: начальное положение волокна (а); укладка волокна с изгибом (б); спектры отражения от массива чирпированных волоконных брэгговских решеток до и после изгиба волокна (в)

За основу построения модели были взяты параметры записанных в ходе эксперимента массивов чирпированных волоконных решеток Брэгга в односердцевинном одномодовом волокне. Компьютерная модель многосердцевинного волокна была построена в среде COMSOL Multiphysics. Многосердцевинное волокно представляет собой волоконный световод с внешним диаметром 125 мкм. Волокно состоит из семи одинаковых сердцевин с диаметром 5 мкм, которые имеют гексагональное расположение. Расстояние между сердцевинами составляет 35 мкм. На рис. 3, а, показана геометрия настоящего волокна. Выбор многосердцевинного волокна представленной конструкции обусловлен необходимостью определения положения волоконного световода в трехмерном пространстве. Для регистрации деформации по трем координатам требуется не менее трех жестко скрепленных односердцевинных волокон (или в данном случае сердцевин в многосердцевинном световоде). В представленной геометрии волокна центральная сердцевина будет использоваться как опорная для остальных шести. Регистрация сдвига центральной длины волны Брэгга в каждой отдельной сердцевине на одном участке волокна в зависимости от сжатия или растяжения при изгибе позволит однозначно определить траекторию укладки световода в пространстве и увеличить точность измерения.

Модель представляет собой участок волокна длиной 10 мм с параметрическими кривыми, расположенными в центре каждой сердцевин. В каждой параметрической кривой создано распределение точек в соответствии с периодом чирпированной решетки, записанной в односердцевинное волокно во время эксперимента. Задавая радиус изгиба волокна (рис. 3, б), можно определить смещение каждой точки кривой относительно начального положения, тем самым установить зависимость изменения периода решетки в каждой сердцевине от величины изгиба, и, следовательно, сдвига длины волны Брэгга в спектре отражения, что позволит восстановить траекторию укладки волоконного световода в пространстве.

С целью построения волоконно-оптической измерительной системы для определения расположения и изгибов протяженных объектов в пространстве требуется провести ряд экспериментов по записи массива чирпированных ВБР в многосердцевинном волокне.

Многосердцевинное оптическое волокно с массивом чирпированных ВБР позволит определить траекторию укладки волоконного световода в пространстве без использования методов частотной оптической рефлектометрии [3].

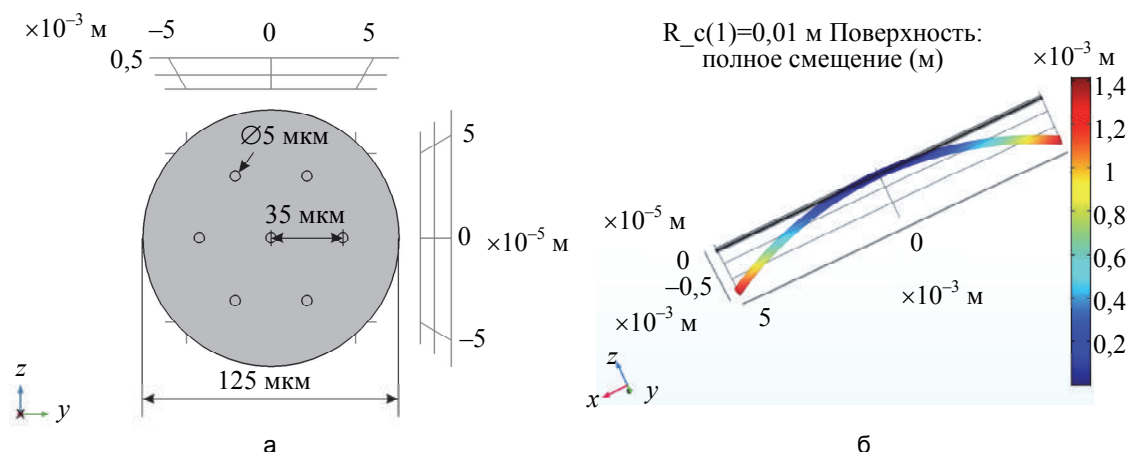


Рис. 3. Моделирование многосердцевинного волокна: геометрия волокна (а); модель волокна с радиусом изгиба 10 мм в COMSOL Multiphysics (б)

Литература

1. Yin Sh., Ruffin P.B., Francis T.S.Yu. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, 2008. 477 p.
2. Zhang L., Qian J., Zhang Y., Shen L. On SDM/WDM FBG sensor net for shape detection of endoscope // *IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation*. 2005. V. 4. P. 1986–1991. doi: 10.1109/ICMA.2005.1626867
3. Parent F., Loranger S., Mandal K.K. et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers // *Biomedical Optics Express*. 2017. V. 8. N 4. P. 2210–2221. doi:10.1364/BOE.8.002210
4. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. 2nd ed. Academic Press, 2010. 632 p.
5. Duncan R.G., Froggatt M.E., Kreger S.T., Seeley R.J., Gifford D.K., Sang A.K., Wolfe M.S. High-accuracy fiber-optic shape sensing // *Proc. SPIE*. 2007. V. 6530. doi: 10.1117/12.720914
6. Moore J.P., Rogge M.D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions // *Optics Express*. 2012. V. 20. N 3. P. 2967–2973. doi: 10.1364/oe.20.002967
7. Yi J., Zhu X., Zhang H., Shen L., Qia X. Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array // *Mechatronics*. 2012. V. 22. N 6. P. 679–687. doi: 10.1016/j.mechatronics.2011.10.005
8. Ledermann Ch., Pauer H., Weede O., Woern H. Simulation tool for 3D shape sensors based on Fiber Bragg gratings and optimization of measurement points // *Proc. 6th IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics*. Manila, Philippines, 2013. P. 195–200. doi: 10.1109/ram.2013.6758583
9. 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. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3

Авторы

Егорова Дарья Андреевна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57200964358, ORCID ID: 0000-0001-5136-1779, dashaegorova18@gmail.com

Куликов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7103154362, ORCID ID: 0000-0001-8882-7253, a.kulikov86@gmail.com

References

1. Yin Sh., Ruffin P.B., Francis T.S.Yu. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, 2008. 477 p.
2. Zhang L., Qian J., Zhang Y., Shen L. On SDM/WDM FBG sensor net for shape detection of endoscope. *IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation*, 2005, vol. 4, pp. 1986–1991. doi: 10.1109/ICMA.2005.1626867
3. Parent F., Loranger S., Mandal K.K. et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers. *Biomedical Optics Express*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 2210–2221. doi:10.1364/BOE.8.002210
4. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. 2nd ed. Academic Press, 2010. 632 p.
5. Duncan R.G., Froggatt M.E., Kreger S.T., Seeley R.J., Gifford D.K., Sang A.K., Wolfe M.S. High-accuracy fiber-optic shape sensing. *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6530. doi: 10.1117/12.720914
6. Moore J.P., Rogge M.D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 2967–2973. doi: 10.1364/oe.20.002967
7. Yi J., Zhu X., Zhang H., Shen L., Qia X. Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array. *Mechatronics*, 2012, vol. 22, no. 6, pp. 679–687. doi: 10.1016/j.mechatronics.2011.10.005
8. Ledermann Ch., Pauer H., Weede O., Woern H. Simulation tool for 3D shape sensors based on Fiber Bragg gratings and optimization of measurement points. *Proc. 6th IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics*. Manila, Philippines, 2013, pp. 195–200. doi: 10.1109/ram.2013.6758583
9. 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. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3

Authors

Daria A. Egorova – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57200964358, ORCID ID: 0000-0001-5136-1779, dashaegorova18@gmail.com

Andrey V. Kulikov – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Head of laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7103154362, ORCID ID: 0000-0001-8882-7253, a.kulikov86@gmail.com