



УДК 681.7.063

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАПИСИ В НЕМ ЧИРПИРОВАННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА ИЗЛУЧЕНИЕМ KrF ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

С.В. Варжель^a, М. Ротард^b, А.В. Куликов^a, Х. Бартельт^b^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b Институт фотонных технологий, Йена, 07702, Германия

Автор для переписки: vsv187@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.09.16, принята к печати 28.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1018-1022

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Варжель С.В., Ротард М., Куликов А.В., Бартельт Х. Влияние водородной обработки оптического волокна на эффективность записи в нем чирпированных решеток Брэгга излучением KrF эксимерного лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1018–1022. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1018-1022

Аннотация

Предмет исследования. Представлены сравнительные результаты исследования эффективности записи чирпированных решеток Брэгга в оптическом волокне отечественного производства, подвергнутом и не подвергнутому низкотемпературной водородной обработке. **Метод.** Запись чирпированных волоконных решеток показателя преломления производилась с помощью интерферометра Тальбота, в котором для амплитудного разделения лазерного пучка использовалась чирпированная фазовая маска с изменением периода по длине 2,3 нм/см. В качестве источника излучения использовалась эксимерная лазерная система Coherent COMPexPro 150T, работающая на газовой смеси KrF (248 нм). Для увеличения фоторефрактивности оптическое волокно помещалось в камеру с водородом под давлением 10 МПа и выдерживалось в течение 14 суток при температуре 40 °С. **Основные результаты.** Использование чирпированной фазовой маски в схеме интерферометра Тальбота позволило получить ширину спектра отражения решетки Брэгга на полувысоте около 3,5 нм при длине индуцируемой дифракционной структуры 5 мм. Благодаря предварительной водородной обработке оптического волокна удалось записать уширенные по спектру волоконные решетки Брэгга с коэффициентом отражения, близким к 100%. **Практическая значимость.** Полученные чирпированные волоконные брэгговские решетки могут использоваться как компенсаторы дисперсии в волоконно-оптической связи, а также как отражательные элементы распределенных волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков.

Ключевые слова

волоконная брэгговская решетка, чирпинг, фазовая маска, водородная обработка, интерферометр Тальбота, эксимерный лазер

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57815X0109, Соглашение №14.578.21.0109).

EFFECT OF OPTICAL FIBER HYDROGEN LOADING ON THE INSCRIPTION EFFICIENCY OF CHIRPED BRAGG GRATINGS BY MEANS OF KrF EXCIMER LASER RADIATION

S.V. Varzhel^a, M. Rothhardt^b, A.V. Kulikov^a, H. Bartelt^b^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^b Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, 07702, Germany

Corresponding author: vsv187@gmail.com

Article info

Received 05.09.16, accepted 28.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1018-1022

Article in Russian

For citation: Varzhel S.V., Rothhardt M., Kulikov A.V., Bartelt H. Effect of optical fiber hydrogen loading on the inscription efficiency of chirped Bragg gratings by means of KrF excimer laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1018–1022. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1018-1022

Abstract

Subject of Research. We present comparative results of the chirped Bragg gratings inscription efficiency in optical fiber of domestic production with and without low-temperature hydrogen loading. **Method.** Chirped fiber Bragg gratings inscription

was made by the Talbot interferometer with chirped phase mask having a chirp rate of 2.3 nm/cm used for the laser beam amplitude separation. The excimer laser system Coherent COMPexPro 150T, working with the gas mixture KrF (248 nm), was used as the radiation source. In order to increase the UV photosensitivity, the optical fiber was placed in a chamber with hydrogen under a pressure of 10 MPa and kept there for 14 days at 40 °C. **Main Results.** The usage of the chirped phase mask in a Talbot interferometer scheme has made it possible to get a full width at half-maximum of the fiber Bragg grating reflection spectrum of 3.5 nm with induced diffraction structure length of 5 mm. By preliminary hydrogen loading of optical fiber the broad reflection spectrum fiber Bragg gratings with a reflectivity close to 100% has been inscribed. **Practical Relevance.** The resulting chirped fiber Bragg gratings can be used as dispersion compensators in optical fiber communications, as well as the reflective elements of distributed fiber-optic phase interferometric sensors.

Keywords

fiber Bragg grating, chirping, phase mask, hydrogen loading, Talbot interferometer, excimer laser

Acknowledgements

This work has been executed at ITMO University and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Unique identifier of the project: RFMEFI57815X0109, Contract No.14.578.21.0109).

Введение

Первая волоконная брэгговская решетка (ВБР) была получена в 1978 году [1]. Примерно 10 лет спустя впервые ВБР была записана через боковую поверхность оптического волокна (ОВ) [2]. С тех пор решетки находят все более широкое применение в различных устройствах волоконной оптики [3–5].

Для компенсации временной дисперсии световых импульсов в современных волоконно-оптических линиях связи значительный интерес представляют решетки, резонансная длина волны которых заданным образом меняется вдоль их длины непрерывно или ступенчато [6]. Такие чирпированные решетки могут иметь широкий спектр отражения/пропускания (свыше 100 нм) или большую дисперсию (более 1000 пс/нм). Запись решеток этого типа производится при изменении периода модуляции наведенного показателя преломления (ПП) или эффективного ПП основной моды по длине решетки [7]. Подобные структуры могут найти широкое применение не только в волоконно-оптических системах связи [6], но и при создании чувствительных элементов волоконно-оптических измерительных комплексов. Технология создания распределенных волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков (ФИД) на основе решеток Брэгга требует записи массивов ВБР с заданными коэффициентами отражения и относительно большой шириной спектра отражения на полувысоте [8–12].

При записи ВБР даже с постоянным по длине периодом в стандартные типы ОВ возникают трудности с достижением высокой дифракционной эффективности решеток, связанные со слабой фоточувствительностью материала волоконного световода. Тем более, запись чирпированных ВБР с высокими коэффициентами отражения в такие ОВ не реализуема. Волоконные световоды с повышенной фоторефрактивностью позволяют решить эту задачу. Один из наиболее распространенных методов увеличения фоточувствительности изготовленных ОВ без существенного изменения их собственных характеристик – низкотемпературная водородная обработка [7]. Насыщение изготовленных оптических волокон водородом при низких температурах и высоком давлении существенно увеличивает их фоторефрактивность, что позволяет осуществлять запись решеток Брэгга с глубиной модуляции показателя преломления до 6×10^{-3} [13] в ОВ со стандартной концентрацией диоксида германия (GeO_2).

При ультрафиолетовом облучении или нагреве (в пламени горелки или излучением CO_2 -лазера) волоконного световода, подвергнутого водородной обработке, внедренный водород способен изменять структуру кварца [13]. Так, для ОВ, допированных GeO_2 , авторы работы [13] предлагают следующую модель: молекулы водорода вступают во взаимодействие с Si-O-Ge группами с образованием Si-OH и германиевых кислородно-дефицитных центров, которые и способствуют наблюдаемому изменению ПП.

Ввиду вышесказанного была проведена оценка влияния водородной обработки ОВ отечественного производства на эффективность записи в нем чирпированных ВБР типа I [14]. Такие решетки, не повреждая структуру кварцевого стекла и практически не понижая механическую прочность волоконного световода, могут быть использованы для создания чувствительного элемента волоконно-оптического ФИД с требуемым соотношением коэффициентов отражения пар решеток и достаточной шириной спектра на полувысоте.

Оптическое волокно

Для записи ВБР использовалось изотропное ОВ отечественного производства (НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»). Исследование свойств таких волокон и создание на их основе измерительных комплексов соответствует современным тенденциям на импортозамещение и делает настоящую работу актуальной.

Образец ОВ, который мы использовали, был легирован 10 мол.% GeO_2 в сердцевине и имел оптические потери около 1,7 дБ/км на длине волны 1550 нм. Для увеличения фоторефрактивности ОВ помещалось в среду водорода [15]. Для реализации водородной обработки ОВ производилась его намотка на катушку диаметром 100 мм, которая помещалась в камеру с молярной долей водорода 99,99% под давлением 10 МПа и выдерживалась в течение 14 суток при температуре 40 °C.

Экспериментальная установка

В качестве источника излучения для записи chirпированных ВБР применялся КгF эксимерный лазер Coherent COMpexPro 150T и интерферометр Тальбота [16]. Схема записи ВБР представлена на рис. 1.

Лазер генерирует 25 нс импульсы на длине волны 248 нм с частотой от 1 до 50 Гц. Атенуатор со встроенным затвором позволяет выделить одиночный импульс или любое заданное количество импульсов из их последовательности, когда лазер уже выведен в стационарный режим работы. Цилиндрическая линза фокусирует лазерный пучок по одной из осей для достижения требуемой плотности энергии. Щель позволяет менять размер облучаемой области волокна, тем самым позволяя варьировать длину ВБР, а следовательно, и ее ширину спектра, и коэффициент отражения.

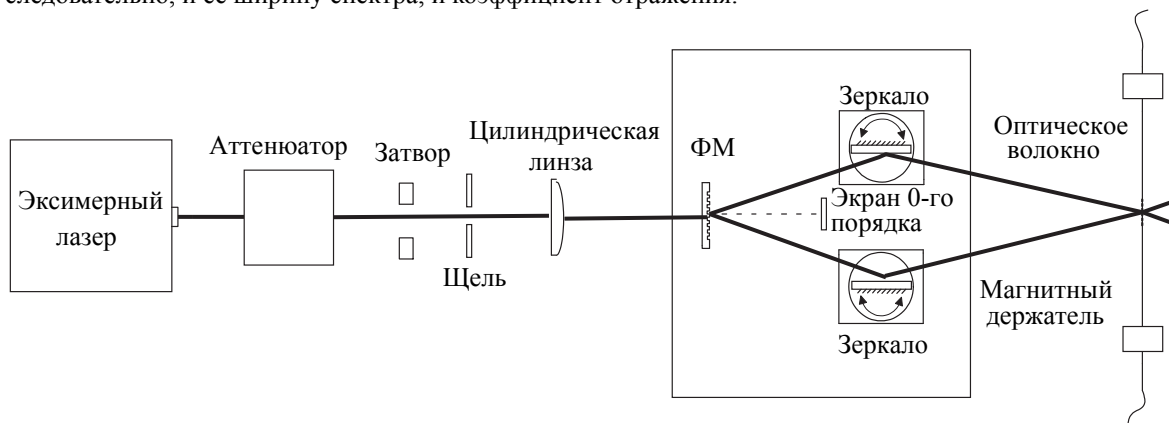


Рис. 1. Схема записи волоконных брэгговских решеток

Лазерный импульс проходит через chirпированную фазовую маску (ФМ) с центральным периодом 706,5 нм и изменением периода по длине 2,3 нм/см. При этом осуществляется подавление нулевого порядка дифракции (менее 3%), а пучки, дифрагируемые на +1 и -1 порядки, попадают на зеркала, установленные на поворотных позиционерах. Интерференционная картина с переменным периодом, образованная на пересечении лазерных пучков, распространяющихся в двух плечах интерферометра Тальбота, осуществляет запись chirпированной решетки ПП в сердцевине ОВ.

Результаты

Использование chirпированной фазовой маски в схеме интерферометра Тальбота с изменением периода по длине 2,3 нм/см позволяет получить ширину спектра отражения решетки Брэгга на полувысоте ($\Delta\lambda$) около 3,5 нм при длине индуцируемой дифракционной структуры 5 мм. Запись ВБР в ОВ, подвергнутое водородной обработке, проводилась при плотности энергии в лазерном импульсе примерно 70 мДж/см², частота работы лазера составляла 10 Гц, время экспозиции зависело от требуемого коэффициента отражения ВБР, при этом за 300 с удавалось достичь эффективности решетки, близкой к 100%.

Спектр отражения chirпированной ВБР, индуцированной в ОВ, подвергнутое водородной обработке, представлен на рис. 2, где R/R_{Fr} – отношение (выраженное в децибелах) коэффициента отражения ВБР к френелевскому отражению в 3,5% от торца ОВ, взятому за опорный уровень. Ширина спектра отражения решетки Брэгга на полувысоте составила 3,6 нм, коэффициент отражения – 98%.

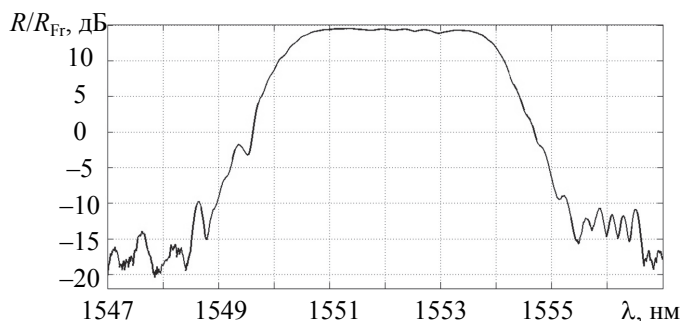


Рис. 2. Спектр отражения chirпированной волоконной брэгговской решетки

На рис. 3 представлена зависимость отношения (выраженного в децибелах) коэффициента отражения chirпированной ВБР к френелевскому отражению R/R_{Fr} от длительности экспозиции для ОВ, подвергнутого водородной обработке (•) и не подвергнутого водородной обработке (+) при плотности энергии лазерного импульса 70 мДж/см², а также ОВ, не подвергнутого водородной обработке (◇) при плотности энергии лазерного импульса 500 мДж/см². За 300 с экспозиции на частоте 10 Гц при записи chirпированной ВБР в ОВ без водородной обработки удается достичь коэффициент отражения только около

4,5%, а с водородной обработкой – более 98%. Даже увеличение плотности энергии в импульсе с 70 до 500 мДж/см² позволяет за такое же время экспозиции записать решетку с коэффициентом отражения только 18% в ОВ без водородной обработки (рис. 3). Стоит отметить, что плотность энергии в 500 мДж/см², хотя и достаточно далека от порога разрушения германо-силикатного ОВ, равного 1 Дж/см², уже может негативно сказаться на его прочности.

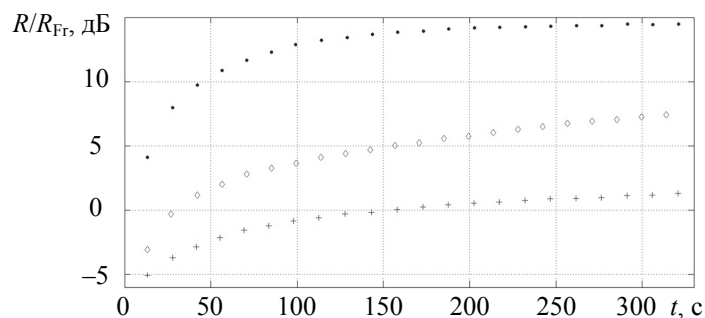


Рис. 3. Зависимость $R/R_{Гр}$ от длительности экспозиции для оптического волокна, подвергнутого водородной обработке (•) и не подвергнутого водородной обработке (+), при плотности энергии лазерного импульса 70 мДж/см², а также оптического волокна, не подвергнутого водородной обработке (◊), при плотности энергии лазерного импульса 500 мДж/см²

Из рис. 3 видно, что водородная обработка является эффективным способом увеличения фоторефрактивности ОВ и позволяет проводить запись уширенных по спектру ВБР с высоким коэффициентом отражения.

Заключение

Использованный в работе метод низкотемпературной водородной обработки оптического волокна эффективен для увеличения фоторефрактивности волоконного световода и дальнейшей записи в него высокоэффективных уширенных по спектру волоконных брэгговских решеток. Ширина спектра отражения чирпированных решеток Брэгга, индуцированных в используемое в работе оптическое волокно, составила 3,6 нм, а коэффициент отражения 98%. Достигнутая ширина спектра и коэффициент отражения чирпированных волоконных дифракционных структур позволяет эффективно использовать их в технологии создания распределенных волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков на основе решеток Брэгга.

Литература

- 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
- 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
- Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers // *Laser and Photonics Review*. 2008. V. 2. N 4. P. 275–289. doi: 10.1002/lpor.200810010
- Pinto J.L. Fiber Bragg grating sensors novel applications // *Proc. of Latin America Optics and Photonics Conference*. San Sebastiano, Brazil, 2012. Art. LS2C.1. doi: 10.1364/LAOP.2012.LS2C.1
- Roriz P., Carvalho L., Frazao O., Santos J.L., Simoes J.A. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: a review // *Journal of Biomechanics*. 2014. V. 47. N 6. P. 1251–1261. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.054
- Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. N 12. P. 4309–4341.
- Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
- Мешковкий И.К., Варжель С.В., Беликин М.Н., Куликов А.В., Брунов В.С. Термический отжиг решеток Брэгга при изготовлении волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 5.

References

- 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
- 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
- Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers. *Laser and Photonics Review*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 275–289. doi: 10.1002/lpor.200810010
- Pinto J.L. Fiber Bragg grating sensors novel applications. *Proc. of Latin America Optics and Photonics Conference*. San Sebastiano, Brazil, 2012, art. LS2C.1. doi: 10.1364/LAOP.2012.LS2C.1
- Roriz P., Carvalho L., Frazao O., Santos J.L., Simoes J.A. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: a review. *Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 47, no. 6, pp. 1251–1261. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.054
- Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341.
- Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085–1103. doi: 10.1070/QE2005v035n12ABEH013041
- Meshkovsky I.K., Varzhel S.V., Belikin M.N., Kulikov A.V., Brunov V.S. Thermal annealing of Bragg grating on manufacturing of fiber-optic phase sensor. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 91–93. (In Russian)
- Takahashi N., Hirose A., Takahashi S. Underwater acoustic

- C. 91–93.
9. Takahashi N., Hirose A., Takahashi S. Underwater acoustic sensor with fiber Bragg grating // *Optical Review*. 1997. V. 4. N 6. P. 691–694.
 10. Okawara Ch., Saijyou K. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing // *Acoustical Science and Technology*. 2008. V. 29. N 3. P. 232–234. doi: 10.1250/ast.29.232
 11. Campopiano St., Cutolo A., Cusano A., Giordano M., Parente G., Lanza G., Laudati A. Underwater acoustic sensors based on fiber Bragg gratings // *Sensors*. 2009. V. 9. N 6. P. 4446–4454. doi: 10.3390/s90604446
 12. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В., Забиякин А.Н. Защитные покрытия волоконной решетки Брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 241–246. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245
 13. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres // *Electronics Letters*. 1993. V. 29. N 13. P. 1191–1193.
 14. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego: Academic Press, 1999. 478 p.
 15. Варжель С.В., Мунько А.С., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В. Запись решёток Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутом водородной обработке // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 10. С. 74–78.
 16. Idrisov R.F., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K., Rothhardt M., Becker M., Schuster K., Bartelt H. Spectral characteristics of draw-tower step-chirped fiber Bragg gratings // *Optics and Laser Technology*. 2016. V. 80. P. 112–115. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.01.007
 - sensor with fiber Bragg grating. *Optical Review*, 1997, vol. 4, no. 6, pp. 691–694.
 10. Okawara Ch., Saijyou K. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing. *Acoustical Science and Technology*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 232–234. doi: 10.1250/ast.29.232
 11. Campopiano St., Cutolo A., Cusano A., Giordano M., Parente G., Lanza G., Laudati A. Underwater acoustic sensors based on fiber Bragg gratings. *Sensors*, 2009, vol. 9, no. 6, pp. 4446–4454. doi: 10.3390/s90604446
 12. Munko A.S., Varzhel S.V., Arkhipov S.V., Zabyakin A.N. Protective coatings of fiber Bragg grating for minimizing of mechanical impact on its wavelength characteristics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 241–245. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245
 13. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 13, pp. 1191–1193.
 14. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, Academic Press, 1999, 478 p.
 15. 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)
 16. Idrisov R.F., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K., Rothhardt M., Becker M., Schuster K., Bartelt H. Spectral characteristics of draw-tower step-chirped fiber Bragg gratings. *Optics and Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 112–115. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.01.007

Авторы

Варжель Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vsv187@gmail.com

Ротард Манфред – дипломированный физик, руководитель рабочей группы, Институт фотонных технологий, Йена, 07702, Германия, manfred.rothhardt@leibniz-ipht.de

Куликов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.kulikov86@gmail.com

Бартельт Хартмут – доктор наук, профессор, заведующий отделом, Институт фотонных технологий, Йена, 07702, Германия, hartmut.bartelt@leibniz-ipht.de

Authors

Sergey V. Varzhel – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vsv187@gmail.com

Manfred Rothhardt – Dipl.-Phys., Head of work group, Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, 07702, Germany, manfred.rothhardt@leibniz-ipht.de

Andrey V. Kulikov – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.kulikov86@gmail.com

Hartmut Bartelt – D.Sc., Professor, Head of department, Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, 07702, Germany, hartmut.bartelt@leibniz-ipht.de