

162. Sa B., Zhou J., Sun Z., Tominaga J., Ahuja R. Topological insulating in GeTe/Sb₂Te₃ phase-change superlattice // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109, N 9. P. 096802.
163. Hasan M. Z., Kane C. L. Colloquium: Topological insulators // Rev. Mod. Phys. 2010. Vol. 82, N 4. P. 3045—3067.
164. Moore J. E. The birth of topological insulators // Nature. 2010. Vol. 464, N 7286. P. 194.
165. Raoux S., Wuttig M. Phase Change Materials: Science and Applications. Springer, 2008.
166. Kolobov A. V., Tominaga J. Chalcogenides: Metastability and Phase Change Phenomena. Springer, 2012.

Сведения об авторах

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург; заведующий кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Эдуард Игоревич Агеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург; E-mail: ageeved@gmail.com
- Александр Владимирович Колобов** — д-р физ.-мат. наук; Объединенный НИИ промышленных наук и технологий (AIST), Институт нанозлектроники, Япония; главный научный сотрудник; E-mail: akolobov@aist.go.jp
- Джунджи Томинага** — Ph.D., профессор; Объединенный НИИ промышленных наук и технологий (AIST), Институт нанозлектроники, Япония; главный научный сотрудник

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.

УДК 681.7.063

А. А. ПЕТРОВ, С. В. ВАРЖЕЛЬ, А. В. КУЛИКОВ,
Д. А. ПАЛАНДЖЯН, А. И. ГРИБАЕВ, К. А. КОННОВ

ЗАПИСЬ РЕШЕТОК БРЭГГА В АНИЗОТРОПНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЭКСИМЕРНОГО ArF ЛАЗЕРА

Продемонстрированы результаты записи решеток Брэгга одиночным импульсом (длительностью 17 нс) ArF эксимерного лазера в анизотропное оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой. Представлены результаты экспериментов по визуализации волоконных брэгговских решеток, индуцированных в двулучепреломляющий волоконный световод такого типа.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, эксимерный лазер, двулучепреломление, фазовая маска.

Введение. Первая волоконная брэгговская решетка (ВБР) была получена в 1978 г. [1], 10 лет спустя впервые ВБР была записана в оптическом волокне (ОВ) через боковую поверхность [2]. В настоящее время ВБР широко применяются в различных устройствах волоконной оптики.

Использование ВБР совместно с двулучепреломляющими ОВ позволяет создавать наиболее точные фазовые интерферометрические датчики [3] для измерения различных физических величин. На сегодняшний день ВБР были записаны в двулучепреломляющие ОВ различных типов: с эллиптической сердцевинной [4], „галстук-бабочка“ [5], PANDA [6]. В настоящей работе приведены результаты одноимпульсной записи ВБР ArF эксимерным лазером в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой [7, 8]. Благодаря

своим уникальным свойствам [9] ОВ такого типа используется для создания прецизионных интерферометрических датчиков, таких как волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) [10]. В ВОГ класса точности до $0,01$ °/ч используется специальная квадрупольная намотка для компенсации температурных дрейфов внутри волоконного контура, которые являются основным источником фазовых шумов. Для создания ВОГ более высокого класса точности требуется разработать активную систему компенсации температурных градиентов внутри волоконного контура.

Волоконные решетки показателя преломления (ПП) широко используются в температурных датчиках [11—13], с их помощью можно измерять температурные градиенты внутри волоконного контура гироскопа, используя массивы ВБР.

Для создания массивов ВБР было выбрано полученное по технологии, представленной в работах [7, 8], двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, со сложной структурой [9], которая включает в себя сердцевину, круговую изолирующую, эллиптическую напрягающую и круговую внешнюю оболочки. С целью увеличения фоточувствительности ОВ молярная концентрация GeO_2 в его сердцевине увеличена до 13,3 и 18 % для различных образцов. Повышение фоточувствительности на стадии формирования заготовок позволяет осуществлять запись массивов ВБР в процессе вытяжки ОВ.

Однако при использовании этого метода увеличиваются линейные оптические потери световода. Для используемого в работе двулучепреломляющего ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с 18 % GeO_2 потери составляют $\sim 4,5$ дБ/км на длине волны 1550 нм; с 13,3 % GeO_2 — 3,5 дБ/км. При этом потери в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой со стандартной концентрацией GeO_2 4 %, изготовленном по технологии [7, 8], не превышают 1 дБ/км на длине волны 1550 нм.

Схема записи ВБР. В работе применялся эксимерный лазер Optosystems Ltd 7020 с энергией в импульсе ~ 350 мДж, использована газовая смесь ArF . Схема записи ВБР представлена на рис. 1 [14].

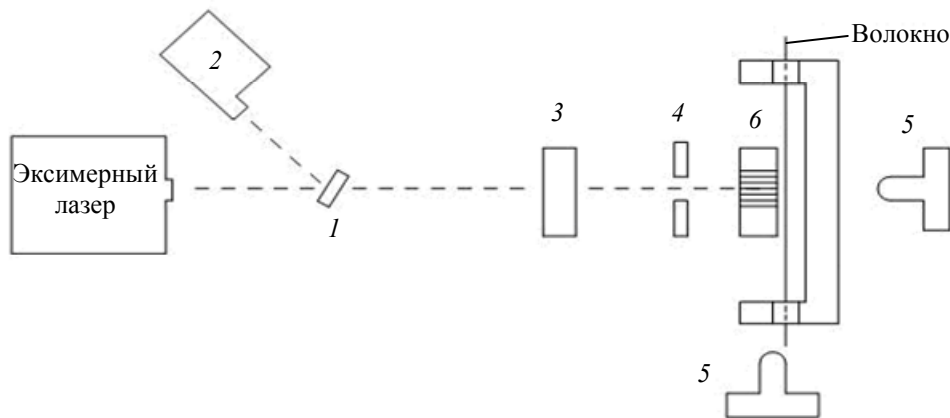


Рис. 1

Лазер генерирует импульсы длительностью 17 нс на длине волны 193 нм с частотой от 1 до 20 Гц. Делитель пучка 1 отклоняет известную долю излучения на измеритель 2. Цилиндрическая линза 3 фокусирует лазерный пучок по одной из осей для достижения требуемой плотности энергии. Щель 4 позволяет изменять длину решетки. Два микроскопа 5 используются для точной установки волокна по отношению к фазовой маске (ФМ) 6.

Одиночный лазерный импульс длительностью 17 нс, проходя через фазовую маску (период ФМ 1057,5 нм) с подавлением нулевого порядка дифракции (< 3 %) на длине волны 193 нм, дифрагирует на +1 и -1 порядки. Интерферирующее излучение порядков +1 и -1 записывает решетку ПП в ОВ, закрепленное вплотную к ФМ в магнитном держателе.

Результаты. На рис. 2, *a* продемонстрирован спектр отражения (R) ВБР, записанной одиночным импульсом в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с концентрацией GeO_2 18 %. ВБР была записана при средней плотности энергии в импульсе на ОВ около 450 мДж/см^2 , коэффициент отражения решетки $\sim 40\%$.

Наличие двух пиков отражения на рис. 2, *a* обусловлено тем, что решетка индуцирована в двулучепреломляющее ОВ. Так как эффективный ПП для каждой из выделенных осей анизотропного волокна различен, то и длина волны брэгговского резонанса будет различаться для лучей, распространяющихся по быстрой и медленной оси двулучепреломляющего световода.

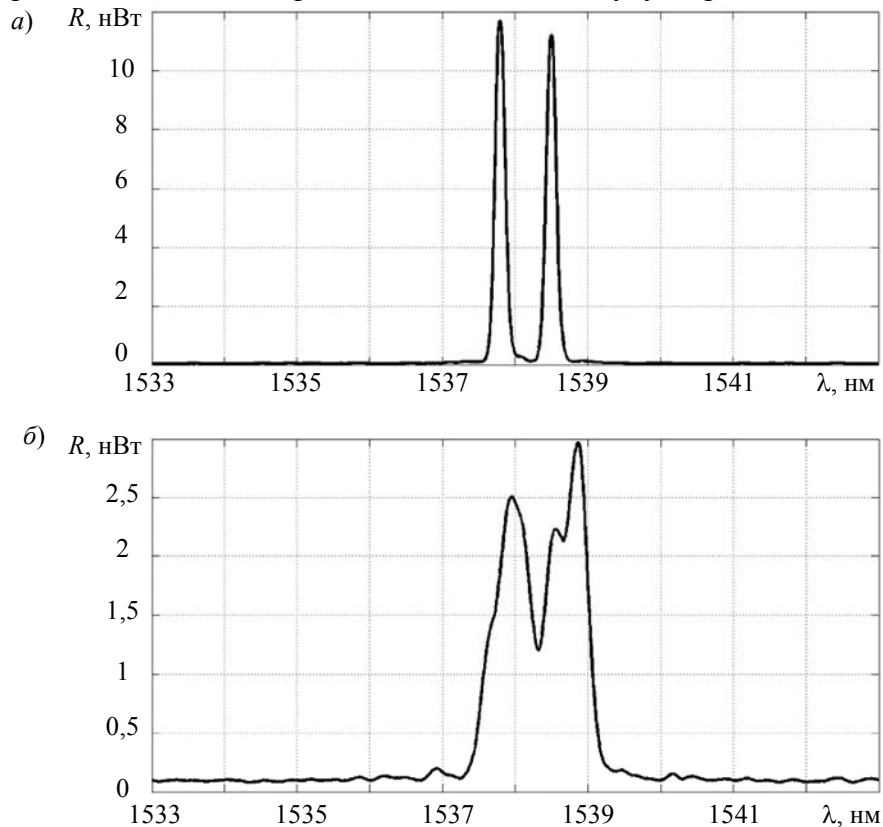


Рис. 2

После повышения средней плотности энергии на ОВ до $\sim 500 \text{ мДж/см}^2$ ВБР с коэффициентом отражения около 80% (рис. 2, *б*) была записана в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с $18\% \text{ GeO}_2$.

Наведенная модуляция ПП ВБР на рис. 2, *a* составляет порядка $3,6 \cdot 10^{-5}$, в то время как на рис. 2, *б* может достигать 10^{-4} . Увеличение модуляции ПП ведет к уменьшению рабочей длины решетки, что, в свою очередь, приводит к уширению спектра. Из-за этого уширения пики отражения двух ортогональных поляризаций перекрываются (рис. 2, *б*).

Визуализация ВБР, индуцированных в двулучепреломляющее ОВ, впервые была представлена в работе [5], в которой использовалось волокно типа „галстук-бабочка“. Экспериментальные результаты по визуализации ВБР типа II, индуцированных в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой при GeO_2 12 и 18 % одиночным импульсом KrF эксимерного лазера, были представлены в работе [15]. В настоящей статье визуализируются ВБР, индуцированные в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой (GeO_2 13,3 и 18 %) одиночным импульсом ArF эксимерного лазера.

Изображения решеток были получены на оптическом микроскопе Zeiss Axio Imager.A1. Одноимпульсная запись ВБР создает в оптическом волокне структуру, пространственный период которой соответствует периоду ФМ, оптимизированной под +1 и -1 дифракционные порядки.

На рис. 3, а представлена ВБР, индуцированная в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой при GeO_2 18 %. Видно, что решетка локализована вблизи границы между эллиптической и 20-микронной оболочкой. На рис. 3, б приведена ВБР, индуцированная в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой при 13,3 % GeO_2 . Видно, что решетка расположена гораздо дальше от сердцевины ОВ, судя по всему — на границе эллиптической оболочки, которая слабо видна. Плохая видимость границы объясняется выравниванием значений ПП с соседними оболочками [15].

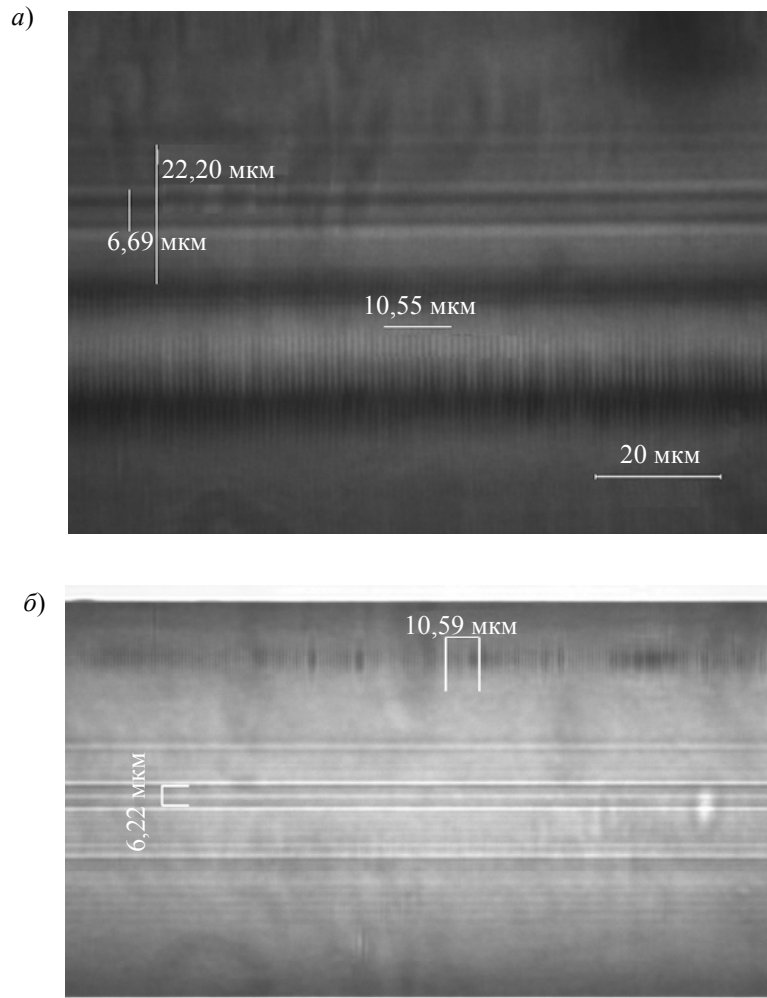


Рис. 3

Наличие в этом двулучепреломляющем ОВ нескольких границ раздела двух сред с различным ПП [9], на которых происходит локализация ВБР [16], может обеспечить запись поляризационно-селективных решеток, воздействующих на быструю или медленную ось анизотропного ОВ. Это может быть использовано в фазовых интерферометрических датчиках.

Заключение. В настоящей работе впервые для записи ВБР одиночным импульсом ArF эксимерного лазера было использовано двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, полученное по технологии [7, 8]. В одноимпульсном режиме записаны решетки с эффективностью до 100 % и низкими вносимыми потерями до 0,5 дБ на решетку.

Экспериментальные результаты по визуализации ВБР, индуцированных в двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с концентрацией GeO_2 13,3 и 18 %, показывают, что периодическая структура локализуется вблизи границ раздела двух сред с различным ПП.

Полученные ВБР могут использоваться как в температурных датчиках, так и в измерительных системах нового поколения, таких как волоконно-оптический гидрофон или система мониторинга протяженных объектов (трубопроводы, железные дороги, границы).

Работа поддержана грантом Президента РФ НШ-1364.2014.2, грантами РФФИ 13-02-00033 и 13-02-00971; при государственной финансовой поддержке ведущих университетов РФ (субсидия 074-U01), а также при поддержке Министерства образования Минобрнауки РФ, проект 02.G25.31.0044.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., Kawasaki B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // *Appl. Phys. Lett.* 1978. Vol. 32, N 10. P. 647—649.
2. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // *Opt. Lett.* 1989. Vol. 14, N 15. P. 823—825.
3. 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 // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2013. Т. 56, № 5. С. 91—93.
4. Meltz G., Morey W. W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity // *Proc. of SPIE.* 1991. Vol. 1516. P. 185—199.
5. Hill P. C., Atkins G. R., Canning J., Cox G. C., Sceats M. G. Writing and visualization of low-threshold type II Bragg gratings in stressed optical fibers // *Appl. Opt.* 1995. Vol. 34, N 33. P. 7689—7694.
6. Abe I., Góes R. E., Fabris J. L., Kalinowski H. J., Müller M., Fugihara M. C., Falate R., Diesel D. W., Kamikawachi R. C., Barbosa C. L. Production and characterization of refractive index gratings in high-birefringence fibre optics // *Optics and Lasers in Engineering.* 2003. Vol. 39. P. 537—548.
7. Патент № 2 155 359 РФ. Способ изготовления волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения / М. А. Ероньян. 2000.
8. Буреев С. В., Дукельский К. В., Ероньян М. А., Злобин П. А., Комаров А. В., Левит Л. Г., Страхов В. И., Хохлов А. В. Технология крупногабаритных заготовок анизотропных одномодовых световодов с эллиптической оболочкой // *Оптич. журн.* 2007. Т. 74, № 4. С. 85—87.
9. Bureev S. V., Meshkovskii I. K., Utkin E. Yu., Dukel'skii K. V., Eron'yan M. A., Komarov A. V., Romashova E. I., Serkov M. M., Bisyarin M. A. Minimizing the optical losses in anisotropic single-mode lightguides with elliptical boron germanosilicate cladding // *J. Opt. Technol.* 2012. Vol. 79, N 7. P. 433—436.
10. Meshkovskii I. K., Strigalev V. Ye., Deineka G. B., Peshekhonov V. G., Volynskii D. V., Untilov A. A. Three Axis Fiber Optic Gyroscope: Development and Test Results // *Gyroscopy and Navigation.* 2011. Vol. 2, N 4. P. 208—213.
11. Bartelt H., Schuster K., Unger S., Chojetzki C., Rothhardt M., Latka I. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures // *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46, N 17. P. 3417—3424.
12. Yong Zh., Zhan Ch., Lee J., Yin Sh., Ruffin P. Multiple parameter vector bending and high-temperature sensors based on asymmetric multimode fiber Bragg gratings inscribed by an infrared femtosecond laser // *Opt. Lett.* 2006. Vol. 31, N 12. P. 1794—1796.
13. Zhan Y., Wu H., Yang Q., Xiang Sh., He H. Fiber grating sensors for high-temperature measurement // *Optics and Lasers in Engineering.* 2008. Vol. 46. P. 349—354.
14. Варжель С. В., Куликов А. В., Мешковский И. К., Стригалева В. Е. Запись брэгговских решеток в двулучепреломляющем оптическом волокне одиночным 20-нс импульсом эксимерного лазера // *Оптич. журн.* 2012. Т. 79, № 4. С. 85—88.
15. Варжель С. В., Захаров В. В., Виноградова Г. Н., Вениаминов А. В., Стригалева В. Е. Визуализация волоконных решеток Брэгга типа II, индуцированных в двулучепреломляющем волокне с эллиптической напрягающей оболочкой // *Опт. и спектр.* 2013. Т. 114, № 1. С. 129—132.

16. Кукушкин С. А., Осипов А. В., Шлягин М. Г. Образование микропор в оптическом волокне под воздействием импульсного УФ света высокой интенсивности // Журн. техн. физ. 2006. Т. 76, № 8. С. 73—84.

Сведения об авторах

- Андрей Анатольевич Петров** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург; E-mail: petrovandrey79@gmail.com
- Сергей Владимирович Варжель** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра физики и техники оптической связи, Санкт-Петербург; E-mail: vsv187@gmail.com
- Андрей Владимирович Куликов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра физики и техники оптической связи, Санкт-Петербург; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Давид Ашотович Паланджян** — магистрант; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург; E-mail: okamirue@gmail.com
- Алексей Иванович Грибаев** — магистрант; Университет ИТМО, кафедра физики и техники оптической связи, Санкт-Петербург; E-mail: digolu@rambler.ru
- Кирилл Александрович Коннов** — магистрант; Университет ИТМО, кафедра физики и техники оптической связи, Санкт-Петербург; E-mail: kirill-konnov@rambler.ru

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.

УДК 544.032.65, 537.9

А. А. ПЕТРОВ, В. А. КОЧЕТОВА, А. Д. КОЧЕТОВ,
Д. А. СИНЕВ, А. А. ЯКУШЕВА

ЛАЗЕРНАЯ ВЫТЯЖКА СТЕКЛЯННЫХ ВОЛОКОН НАНО- И СУБМИКРОННОГО РАЗМЕРА

Рассмотрен процесс формирования волокон субмикронной толщины на поверхности стеклообразного материала при обработке его сфокусированным излучением волоконного импульсного иттербиевого лазера. Определен химический состав полученных волокон, выявлена природа их возникновения, оценено значение их диаметров (от единиц микрометров до десятков нанометров).

Ключевые слова: лазерная вытяжка, субмикронные волокна, нановолокна, стеклообразные материалы.

Введение. Активное развитие технологии формирования наноразмерных структур вызывает рост интереса к получению субмикронных волокон из стеклообразных материалов для различных областей применения. Такие волокна, изготовленные из биоактивных материалов, могут служить каркасной структурой для зубных и костных протезов, позволяя улучшать их приживаемость и способствовать наращиванию костной ткани [1]. Вытяжка волокон из стеклообразных материалов под действием сфокусированного лазерного луча считается наиболее перспективной технологией получения протяженных микро- и наноструктур из стеклянных композитов. Авторами работ [2, 3] была предложена схема получения волокон, включающая обработку образцов излучением CO₂-лазера мощностью $P \leq 2$ кВт с одновременной высокоскоростной подачей струи аргона, в настоящей работе данные получены с использованием метода, обеспечивающего меньшие