

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАПИСИ РЕШЕТОК БРЭГГА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЭКСИМЕРНОГО ArF-ЛАЗЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРИЕНТАЦИИ ОСИ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Ю. Д. СМИРНОВА, С. В. ВАРЖЕЛЬ, А. А. ПЕТРОВ, С. В. АРХИПОВ,  
Н. С. КОНДАКОВА, Д. А. ПАЛАНДЖЯН, А. С. МУНЬКО

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vsv187@gmail.com*

Рассматривается схема записи волоконных брэгговских решеток излучением эксимерного ArF-лазера с использованием метода фазовой маски с возможностью предварительной ориентации оси двулучепреломления анизотропного оптического волокна. Представлены сравнительные результаты одноимпульсной записи волоконных брэгговских решеток типа II в анизотропном оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой с повышенной концентрацией диоксида германия при различной ориентации оси двулучепреломления. Показано, что эффективность записи решеток Брэгга типа II в одноимпульсном режиме выше при позиционировании медленной оси двулучепреломления данного типа световодов перпендикулярно распространению излучения эксимерного лазера; кроме того, предварительная ориентация оси двулучепреломления позволяет уменьшить величину поляризационных преобразований излучения, вызванных взаимодействием с решеткой.

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

**Введение.** Возможность изменения оптического показателя преломления (ПП) материала излучением широко используется в производстве различных элементов, в том числе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Из теории связанных мод известно, что коэффициент отражения брэгговской решетки зависит от глубины наведенной модуляции ПП внутри световода [1], которая, в свою очередь, пропорциональна плотности энергии в пучке излучения лазера.

Результаты исследований оптического волокна (ОВ) произвели революцию в области телекоммуникаций, сделав возможным создание высококачественных, высокочастотных, дальнедистанционных телекоммуникационных сетей, волоконных усилителей и лазеров, сенсорно-волновых приборов [2]. Волоконные решетки Брэгга заняли широкую нишу в разработке высокоточных измерительных систем, контролирующих параметры окружающей среды, такие как температура, влажность, давление, концентрация отдельных компонентов в воздухе [3]. Отработка технологии записи распределенных в световоде брэгговских решеток является ключевым звеном в создании нового поколения измерительных комплексов.

Для повышения точности таких измерительных комплексов необходимо использовать анизотропные одномодовые волоконные световоды (АОВС), сохраняющие поляризацию излучения, сердцевина которых характеризуется высоким уровнем двулучепреломления [4, 5]. В настоящей статье рассматриваются решетки Брэгга, записанные в АОВС российского производства. Исследование таких волокон и создание на их основе измерительных комплексов соответствует современным тенденциям, обеспечивая актуальность данной работы.

Некоторые свойства ОВ, например поглощение излучения материалом, влияют на эффективность записи ВРБ в анизотропные волокна. Следовательно, положение оси двулуче-

преломления (ОД) волокна необходимо учитывать при записи ВБР. На данный момент известно несколько методов контроля положения ОД в ОВ: приложение растягивающего напряжения на участок волокна с последующим анализом изменения картины на выходе световода [6]; освещение боковой поверхности ОВ источником белого света и обработка изображения торца, визуализация которого осуществляется с помощью видеокамеры [7].

В работе [8] описан метод, заключающийся в наблюдении интерференционной картины рассеяния вперед при освещении боковой поверхности волокна излучением когерентного источника. Этот метод позволяет точно определить необходимое положение ОД для записи ВБР на любом расстоянии от торца ОВ, но при этом является довольно трудоемким. В ходе исследований, описываемых в настоящей статье, контроль положения ОД осуществлялся при анализе сколотого или отполированного торца ОВ с помощью микроскопа. Такая методика является более простым для реализации способом контроля позиционирования ОД.

**Экспериментальная установка.** Для записи ВБР методом фазовой маски (ФМ) использовался эксимерный ArF-лазер Optosystems Ltd CL7020, излучающий на длине волны  $\lambda = 193$  нм, с длительностью импульса 17 нс и средней мощностью 5 Вт [9]. Фокусировка излучения производится цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 100 мм.

Схема записи ВБР представлена на рис. 1, где 1 — эксимерный ArF-лазер; 2 — полупрозрачная пластинка; 3 — измеритель энергии; 4 — зеркало; 5 — цилиндрическая линза; 6 — фазовая маска; 7 — исследуемый образец ОВ; 8 — поворотный магнитный держатель ОВ; 9 — 1-й микроскоп; 10 — 2-й микроскоп; 11 — лампа белого света; 12 — оптический спектроанализатор; 13 — источник излучения.

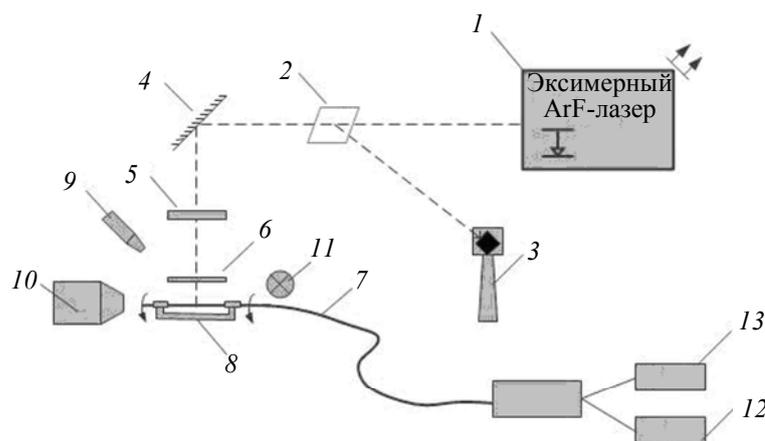


Рис. 1

Импульс эксимерного лазера проходит через ФМ с периодом 1057,5 нм, оптимизированную для излучения, и дифрагирует на +1-й и -1-й порядки. Интерференционной картиной +1-го и -1-го порядков модулируется ПП в волокне, закрепленном на малом расстоянии от ФМ (рис. 2).

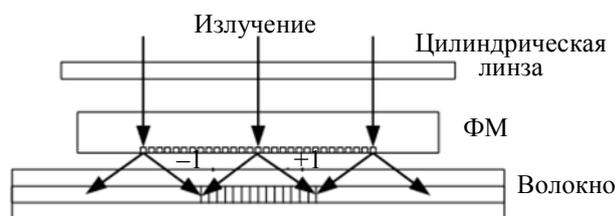


Рис. 2

С учетом положения оси двулучепреломления ВБР записывались в анизотропном ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, в сердцевине которой концентрация  $\text{GeO}_2$  составляет 18 %. В волокне данной конструкции медленная ОД совпадает с длинной осью эллипса.

Экспериментальная установка для записи ВБР была дополнена схемой контроля и позиционирования положения ОД, представленной на рис. 3, а. Для определения положения ОД световод 3 закрепляется в поворотном магнитном держателе 2, с помощью которого осуществляется выбор положения ОД световода, лампа белого света 4 используется в качестве дополнительного освещения. Оптический микроскоп 1 фокусируется на торец ОВ, в результате по изображению поперечного сечения волокна (рис. 3, б) осуществляется контроль положения ОД.

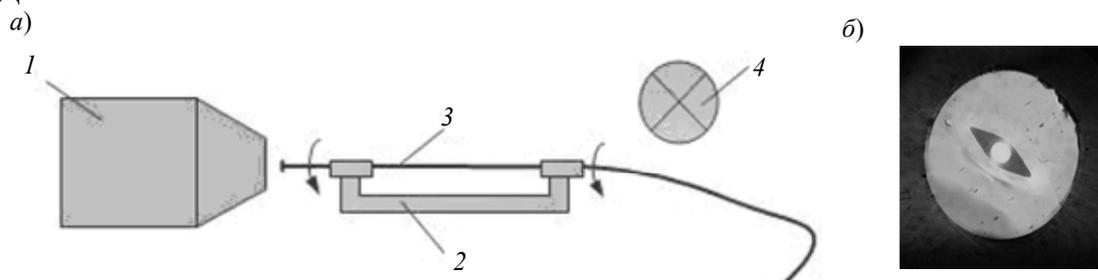


Рис. 3

**Результаты записи решеток.** Запись ВБР типа II осуществлялась в одноимпульсном режиме, при энергии в импульсе 50, 60 и 70 мДж, что с учетом условий фокусировки цилиндрической линзой соответствовало плотностям энергии излучения лазерного импульса ( $U$ ) в области записи примерно 330, 400 и 470 мДж/см<sup>2</sup>. Запись производилась при двух положениях медленной ОД ОВ — ориентированной перпендикулярно (рис. 4, а) и параллельно (рис. 4, б) направлению распространения излучения эксимерного лазера.

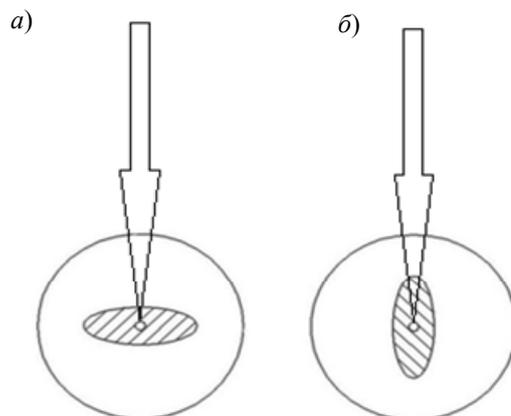


Рис. 4

На рис. 5, а—в представлены спектры отражения  $R(\lambda)$  ВБР, записанных одиночным импульсом при плотности энергии  $U \approx 330, 400, 470$  мДж/см<sup>2</sup> соответственно, где сплошной линией показано расположение медленной оси параллельно направлению распространения излучения эксимерного лазера, а штриховой линией — перпендикулярно.

Как было сказано выше, в работе использовалось двулучепреломляющее ОВ, а так как эффективные ПП для быстрой и медленной осей анизотропного волокна различны, то и длина волны брэгговского резонанса будет различной для распространяющегося по ним света [10, 11]. Однако вследствие уширения спектров произошло слияние пиков отражения двух ортогональных поляризаций (см. рис. 5, а). Уширение спектров связано с тем, что глубина наведенной модуляции ПП ВБР типа II может достигать  $6 \times 10^{-3}$  [12].

Графики спектра отражения показывают, что с увеличением значения  $U$  от 330 до 400 и 470 мДж/см<sup>2</sup> (см. рис. 5, б и в) плотность энергии в сердцевине ОВ достаточная, чтобы преодолеть порог записи ВБР типа II вне зависимости от положения ОД. Однако вследствие лучшей эффективности записи при положении медленной оси перпендикулярно излучению эк-

симмерного лазера наблюдается более эффективная ВБР. Такие решетки имеют дифракционную эффективность до 100 % при ширине спектра на полувысоте около 1 нм.

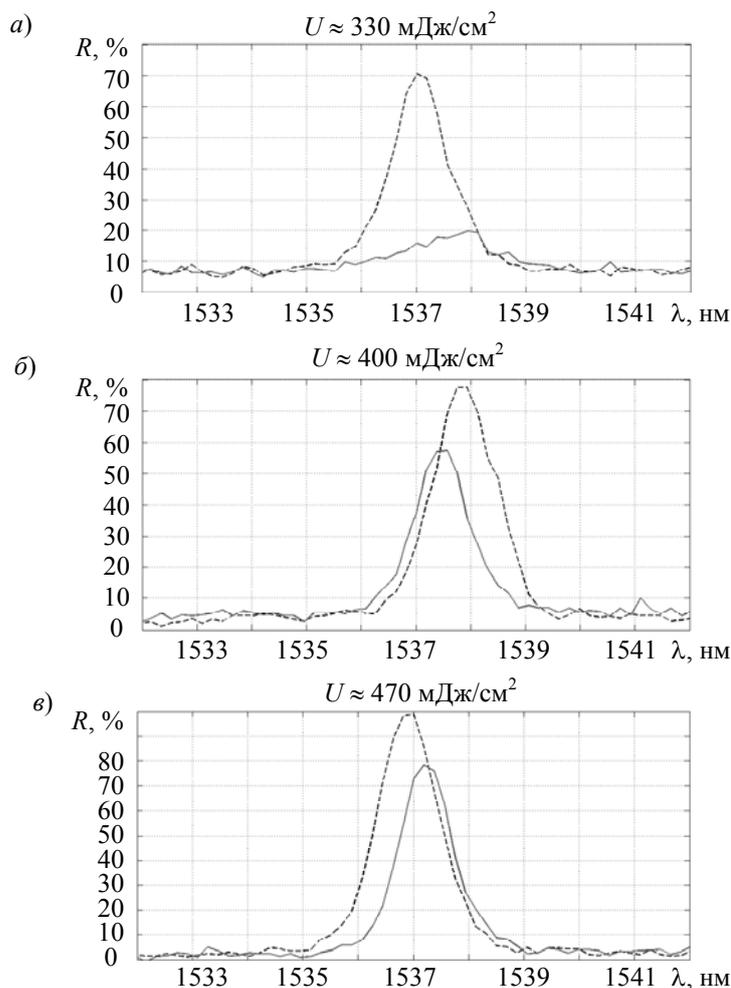


Рис. 5

Таким образом, экспериментальные результаты показали, что запись ВБР типа II в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой эффективнее при позиционировании медленной ОД перпендикулярно излучению эксимерного лазера, что противоположно результатам записи ВБР типа I в таком же волоконном световоде [8], где для более эффективной записи следует располагать медленную ОД параллельно излучению эксимерного лазера. Можно предположить, что при записи ВБР типа I, где используются существенно меньшие плотности энергии, излучение, падающее со стороны длинной оси эллипса (медленная ОД), дополнительно фокусируется вследствие меньшего радиуса кривизны по сравнению с фокусировкой при падении излучения со стороны короткой оси эллипса. В свою очередь, при записи ВБР типа II, где используются существенно большие плотности энергии, а, кроме того, решетки локализуются на границе раздела сердцевина—оболочка [13], преобладающим эффектом является более значительное поглощение излучения напрягающей оболочкой по сравнению с конструктивной оболочкой только из диоксида кремния [5].

**Заключение.** Реализована схема записи ВБР с возможностью предварительной ориентации оси двулучепреломления оптического волокна. Представлены результаты записи брэгговских решеток типа II в анизотропных ОВ одиночным импульсом эксимерного ArF-лазера с использованием метода фазовой маски.

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы. На эффективность записи ВБР влияет положение ОД. В одноимпульсном режиме запись ВБР типа II в анизотропном ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой эффективнее при позиционировании медленной

оси световода перпендикулярно направлению излучения эксимерного лазера. Такая предварительная ориентация ОД анизотропного волоконного световода при записи ВБР позволяет снизить поляризационные преобразования излучения на решетке [14].

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57815X0109, соглашение № 14.578.21.0109), а также при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-12-00351); оборудование для выполнения исследований предоставлено при поддержке гранта для ведущих университетов РФ (субсидия 074-U01).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kashyap R.* Fiber Bragg Gratings. San Diego, CA: Academic Press, 1999. P. 478.
2. *Othonos A.* Fiber Bragg gratings // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. Vol. 68, N 12, P. 4309—4341.
3. *Othonos A., Kalli K.* Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Boston: Artech House, 1999.
4. Пат. 2155359 РФ. Способ изготовления волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения / *М. А. Ероньян.* 2000.
5. *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.
6. *Carrara S. L. A., Kim B. Y., Shaw H. J.* Elasto optic alignment of birefringent axes in polarization holding optical fiber // *Opt. Lett.* 1986. Vol. 11, N 7. P. 470—472.
7. Fujikura Ltd. Product Bulletin #88112000 on the FSM-20 PM. 1990. P. 2.
8. *Архинов С. В., Стригалева В. Е., Солдатова Н. С., Варжель С. В., Мунько А. С., Смирнова Ю. Д.* Зависимость эффективности записи брэгговских решеток в двулучепреломляющих оптических волокнах от ориентации напрягающей эллиптической оболочки // *Оптич. журн.* 2016. Т. 83, № 11. С. 79—82.
9. *Петров А. А., Варжель С. В., Куликов А. В., Паланджян Д. А., Грибаев А. И., Коннов К. А.* Запись решеток Брэгга в анизотропном оптическом волокне излучением эксимерного ArF-лазера // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2014. Т. 57, № 6. С. 31—36.
10. *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—89.
11. *Варжель С. В., Куликов А. В., Захаров В. В., Асеев В. А.* Одноимпульсная запись и визуализация волоконных решеток Брэгга типа II // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2012. Т. 81, № 5. С. 25—28.
12. *Reekie L., Archambault J.-L., Russell P. St. J.* 100 % reflectivity fibre gratings produced by a single excimer laser pulse // *OSA/OFC.* 1993. PD14. P. 327—330.
13. *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 // *Оптика и спектроскопия.* 2013. Т. 114, № 1. С. 129—132.
14. *Zhao Y., Sun B., Liu Y., Ren J., Zhang J., Yang J., Canning J., Peng G. D., Yuan L.* Polarization mode coupling and related effects in fiber Bragg grating inscribed in polarization maintaining fiber // *Opt. Express.* 2016. Vol. 24, N 1. P. 611—619.

#### Сведения об авторах

- Юлия Денисовна Смирнова** — студентка; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: yuliasmirnova93@gmail.com
- Сергей Владимирович Варжель** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники; E-mail: vsv187@gmail.com
- Андрей Анатольевич Петров** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: petrovandrey79@gmail.com

- Сергей Владимирович Архипов** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники; E-mail: thinkingcreature@yandex.ru
- Надежда Сергеевна Кондакова** — студентка; Университет ИТМО, кафедра световодной фотоники; E-mail: soldatovans@yandex.ru
- Давид Ашотович Паланджян** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: okamirue@gmail.com
- Анна Сергеевна Мунько** — студентка; Университет ИТМО; кафедра световодной фотоники; E-mail: qveenanna-93@mail.ru

Рекомендована кафедрой световодной фотоники

Поступила в редакцию 25.01.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Смирнова Ю. Д., Варжель С. В., Петров А. А., Архипов С. В., Кондакова Н. С., Паланджян Д. А., Мунько А. С. Эффективность записи решеток Брэгга излучением эксимерного ArF-лазера в зависимости от ориентации оси двулучепреломления анизотропного оптического волокна // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 5. С. 460—465.

#### EFFICIENCY OF BRAGG GRATING INSCRIPTION BY ArF EXCIMER LASER RADIATION DEPENDING ON ORIENTATION OF BIREFRINGENCE AXIS OF ANISOTROPIC OPTICAL FIBER

Yu. D. Smirnova, S. V. Varzhel, A. A. Petrov, S. V. Arkhipov, N. S. Kondakova, D. A. Palanjyan, A. S. Munko

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: vsv187@gmail.com

Recording of fiber Bragg grating by ArF excimer laser radiation is investigated. The record schematic under consideration uses of phase mask method and the possibility of pre-orientation of the birefringence axes of the anisotropic optical fiber. Results of type II fiber Bragg gratings inscription by a single ArF excimer laser pulse in an anisotropic optical fiber with elliptical stress cladding at enhanced concentration of germanium dioxide concentration in the fiber core are obtained at various orientation of birefringence axis. Comparative analysis of the results demonstrates that type II Bragg grating inscription is more effective at the fiber with elliptical stress cladding slow birefringence axis positioning perpendicularly to the laser beam propagation direction. Besides, pre-orientation of the birefringence axes of the anisotropic optical fiber before the fiber Bragg grating inscription is an effective way to reduce the polarization extinction ratio on the induced optical fiber diffraction structure.

**Keywords:** fiber Bragg grating, birefringence, anisotropy, excimer laser, phase mask

#### Data on authors

- Yulia D. Smirnova** — Student; ITMO University, Department of Laser Systems and Technologies; E-mail: yuliasmirnova93@gmail.com
- Sergey V. Varzhel** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: vsv187@gmail.com
- Andrey A. Petrov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Laser Systems and Technologies; E-mail: petrovandrey79@gmail.com
- Sergey V. Arkhipov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: thinkingcreature@yandex.ru
- Nadezhda S. Kondakova** — Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: soldatovans@yandex.ru
- David A. Palanjyan** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Laser Systems and Technologies; E-mail: okamirue@gmail.com
- Anna S. Munko** — Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: qveenanna-93@mail.ru

**For citation:** Smirnova Yu. D., Varzhel S. V., Petrov A. A., Arkhipov S. V., Kondakova N. S., Palanjyan D. A., Munko A. S. Efficiency of Bragg grating inscription by ArF excimer laser radiation depending on orientation of birefringence axis of anisotropic optical fiber // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 5. P. 460—465 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-460-465