

## ЗАПИСЬ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК В ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ОДИНОЧНЫМ 20-нс ИМПУЛЬСОМ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

© 2012 г. С. В. Варжель, аспирант; А. В. Куликов, аспирант;  
И. К. Мешковский, доктор техн. наук; В. Е. Стригалева, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики  
и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: vsv187@gmail.com; a.kulikov86@gmail.com

Представлены результаты записи брэгговских решеток в двулучепреломляющем оптическом волокне с повышенной фоточувствительностью одиночным 20-нс импульсом эксимерного KrF-лазера. Описаны стенд для записи волоконных брэгговских решеток методом фазовой маски и экспериментально полученные решетки Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой эффективностью более 2% и шириной спектра отражения на полувысоте около 0,1 нм.

*Ключевые слова:* волоконная брэгговская решетка, двулучепреломление, эксимерный лазер.

Коды OCIS: 060.3735, 060.3738, 230.1950

Поступила в редакцию 21.09.2011

### Введение

Датчики различных физических величин помимо требуемых метрологических характеристик должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением при низкой трудоемкости изготовления и сравнительно небольшой стоимости. Этим требованиям в максимальной степени удовлетворяют интерферометрические волоконно-оптические измерительные системы. Применение в таких системах двулучепреломляющих световодов, массивов волоконных брэгговских решеток (ВБР), современных методов мультиплексирования и обработки интерференционных оптических сигналов позволяет создавать протяженные распределенные волоконно-оптические измерительные комплексы. Широко применяемые в настоящее время методы записи ВБР позволяют изготавливать брэгговские решетки с эффективностью 0,1–99,9% и шириной полосы отражения 0,05–10 нм, но при этом накладывают технологические ограничения на запись решеток Брэгга непосредственно в процессе вытяжки оптического волокна (ОВ), что усложняет изготовление массивов ВБР. Следовательно, изготовление массива брэгговских

решеток требует разработки технологии записи ВБР непосредственно в процессе вытяжки ОВ. Для практического применения настоящего метода необходима отработка записи решеток Брэгга одним импульсом, так как в процессе вытяжки ОВ применение методов записи ВБР с многоимпульсной экспозицией принципиально неосуществимо. Запись ВБР одиночным лазерным импульсом требует решения ряда технологических вопросов, связанных с изготовлением ОВ, обладающего повышенной фоточувствительностью<sup>1</sup>, подбором и настройкой лазера, созданием схемы записи ВБР, обеспечивающей изготовление решеток Брэгга с необходимыми параметрами.

### Методика записи ВБР

Известно несколько основных механизмов изменения показателя преломления (ПП) под действием облучения – фоточувствительности германо-силикатных ОВ [1, 2].

При записи брэгговских решеток в стандартном телекоммуникационном волокне SMF-28 возникает проблема, связанная со слабой

<sup>1</sup> Эффект изменения показателя преломления областей световода, подвергнутых облучению, был назван фоточувствительностью.

фоточувствительностью волокна с молярной концентрацией германия 3–5% и низким порогом насыщения, недостаточным для эффективной записи решеток ПП [3].

В литературе предложен ряд методов увеличения фоточувствительности германо-силикатных ОВ [3]. Основной метод заключается в повышении концентрации диоксида германия в сердцевине [4].

Фоточувствительность таких световодов обусловлена наличием в структуре стекла дефектов, образование которых непосредственно связано с ходом процесса формирования заготовки и вытяжки волоконного световода [4–6]. Эти дефекты структуры определяют спектр поглощения германо-силикатного стекла, имеющий три максимума в ультрафиолетовом диапазоне, расположенных вблизи 185, 242, 325 нм [5].

В соответствии со спектром поглощения германо-силикатного стекла была выбрана длина волны излучения лазера. В работе применялся эксимерный лазер *Lambda Physic Compex 102* с центральной длиной волны 248 нм и энергией в импульсе около 150 мДж при использовании газовой смеси KrF. Схема записи ВБР представлена на рис. 1. Аналогичные схемы представлены в статьях [7–10], но они не имели оптического затвора.

Лазер генерирует 20-нс импульсы на длине волны 248 нм с частотой 1 Гц. Затвор позволяет выделить одиночный импульс из их последовательности, когда лазер уже выведен в стационарный режим работы. Щель отфильтровывает не используемую в процессе записи площадь лазерного пучка. Цилиндрическая линза фокусирует лазерный пучок по одной из осей для достижения требуемой плотности энергии.

Одиночный лазерный импульс длительностью 20 нс, проходя через фазовую маску (ФМ) с периодом  $\Lambda_{\text{ФМ}} = 1065,3$  нм и подавлением нулевого порядка дифракции ( $< 3\%$ ) на длине волны 248 нм, дифрагирует на +1 и –1 порядки. Интерференционная картина +1 и –1 порядков осуществляет запись решетки ПП в сердцевине ОВ с периодом  $\Lambda_{\text{ФМ}}/2$ , закрепленного на расстоянии нескольких микрометров от ФМ в магнитном держателе.

В работах [7–10] продемонстрированы результаты записи ВБР в ОВ с повышенной фоточувствительностью как одиночным импульсом, так и при многоимпульсной экспозиции, с использованием аналогичной схемы и методики записи.

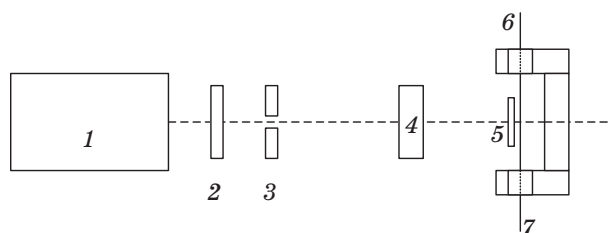


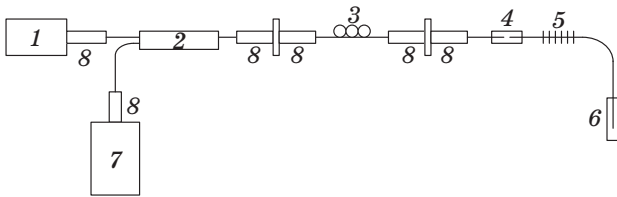
Рис. 1. Схема записи ВБР. 1 – эксимерный лазер, 2 – затвор, 3 – щель, 4 – цилиндрическая линза, 5 – ФМ, 6 – волокно, 7 – держатель волокна.

Отличительной особенностью настоящей работы является то, что для записи решеток Брэгга впервые применялось двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, полученное по технологии, приведенной в работах [11, 12]. Для увеличения фоточувствительности волокна концентрация  $\text{GeO}_2$  в его сердцевине увеличена до 16%. Увеличение фоточувствительности на стадии формирования заготовок в перспективе позволяет осуществлять запись массивов ВБР в процессе вытяжки ОВ. К недостаткам выбранного метода относится увеличение линейных оптических потерь световода. Для используемого в работе двулучепреломляющего волокна с напрягающей эллиптической оболочкой с 16%-содержанием  $\text{GeO}_2$  потери составляют порядка 18 дБ/км на длине волны 1550 нм. При том, что потери в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с 4%-содержанием  $\text{GeO}_2$ , изготовленном по той же технологии [11, 12], не превышают 1 дБ/км на длине волны 1550 нм.

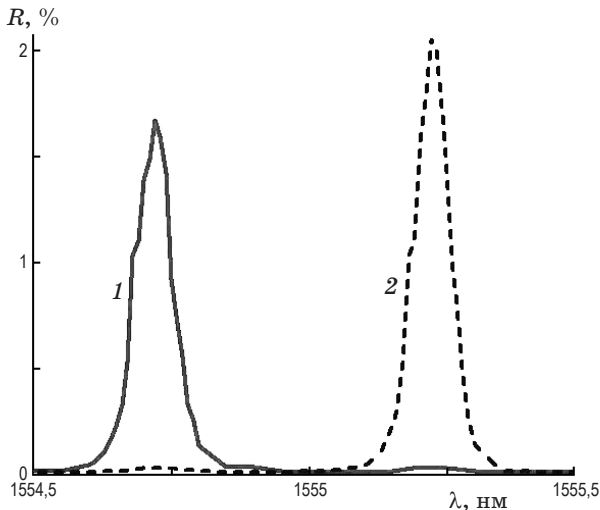
Одноимпульсная запись ВБР в двулучепреломляющее ОВ лежит в основе технологии создания распределенных волоконно-оптических измерительных комплексов на основе фазовых интерферометрических датчиков, требующих использования световодных элементов с сохранением поляризации. Применявшаяся в настоящей работе двулучепреломляющее ОВ с линейными потерями около 18 дБ/км приемлемо для волоконно-оптических измерительных комплексов с длиной чувствительной части не более 1 км.

## Результаты исследования

На рис. 2 приведена схема измерения параметров решеток в отраженном свете с помощью узкополосного перестраиваемого лазе-



**Рис. 2.** Схема измерения параметров решеток. 1 – лазер, 2 – ответвитель 3 дБ, 3 – КП, 4 – *UltraSplice*, 5 – ВБР, 6 – иммерсия, 7 – измеритель оптической мощности, 8 – FC/APC.



**Рис. 3.** Спектры отражения ВБР для двух ортогональных выделенных осей двулучепреломляющего волокна. Пояснения в тексте.

ра THORLABS INTUN TL 1550-B. Этот лазер позволяет осуществлять выбор длины волны в диапазоне 1510–1620 нм с шагом 0,005 нм. Состояние поляризации оптического излучения согласуется с одной из выделенных осей двулучепреломляющего ОВ. Мощность френелевского отражения от сколотого торца волокна принимается за опорный уровень. Измерение уровня сигнала отражения брэгговской решетки проводится при подавлении френелевского отражения за счет терминирования сколотого торца волокна с помощью иммерсии с соответствующим показателем преломления. Экспериментально установленный уровень шума в данной схеме соответствует отражению в 0,01%, что позволяет регистрировать ВБР с точностью до 0,1%.

На рис. 3 представлены спектры отражения ВБР для двух ортогональных выделенных осей двулучепреломляющего волокна, поочередно

выведенных на максимум с помощью контроллера поляризации (КП). Решетка записана с одного импульса в волокно с напрягающей эллиптической оболочкой, содержащей 16% GeO<sub>2</sub>. Приведенная ВБР была записана при плотности энергии 20-нс импульса эксимерного лазера на волокне около 400 мДж/см<sup>2</sup>.

Пик на длине волны 1554,72 нм в спектре отражения ВБР (кривая 1, рис. 3) имеет полную ширину на полувысоте, равную 0,08 нм и эффективность  $R = 1,67\%$ . Пик на длине волны 1555,23 нм (кривая 2, рис. 3) имеет полную ширину на полувысоте, равную 0,09 нм и эффективность  $R = 2,05\%$ . Наличие перекрестной помехи на каждом из графиков рис. 3 обусловлено неточностью ввода поляризованного излучения в выделенную ось двулучепреломляющего волокна. Достигнутый коэффициент отражения ВБР позволяет создавать с их использованием волоконно-оптические интерферометрические датчики различных физических величин, способные лечь в основу распределенных измерительных комплексов.

Расстояние между двумя пиками отражения, соответствующими двум ортогональным поляризациям, составляет 0,51 нм и определяется коэффициентом двулучепреломления анизотропного волокна. Полученное значение центральной длины волны отражения ВБР ( $\lambda_{\text{брэгга}}$ ) и известный период ФМ ( $\Lambda_{\text{ФМ}}$ ) позволяют вычислить, в соответствии с условием Брэгга, эффективный показатель преломления ( $n_{\text{eff}}$ ) для каждой из двух ортогональных осей двулучепреломления

$$n_{\text{eff}} = \lambda_{\text{Брэгга}} / \Lambda_{\text{ФМ}}$$

Расчитанные значения  $n_{\text{eff}}$  для быстрой и медленной осей двулучепреломляющего волокна с эллиптической напрягающей оболочкой, использованного в работе, составили 1,45942 и 1,45989 соответственно.

## Заключение

В ходе настоящей работы был создан лабораторный стенд для записи ВБР одиночным 20-нс импульсом эксимерного лазера с длиной волны излучения 248 нм методом ФМ. Продемонстрирован образец решетки Брэгга в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, полученный на настоящем стенде, с эффективностью более 2% и шириной спектра отражения на полувысоте

около 0,1 нм. Полученные результаты позволяют перейти к разработке технологии записи массивов ВБР в процессе вытяжки ОБ для создания распределенных интерферометрических волоконно-оптических измерительных комплексов.

Авторы выражают благодарность М.А. Ероньяну и К.В. Дукельскому за предоставленные образцы двулучепреломляющего ОБ с эллиптической напрягающей оболочкой, легированного 16% GeO<sub>2</sub>, и полезные обсуждения в ходе выполнения работы.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hill K.O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // J. Lightwave Technol. 1997. V. 15. № 8. P. 1263–1276.
2. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. San Diego, CA: Academic Press, 1999. 478 p.
3. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
4. Dong L., Pinkstone J., Russell P.St.J., Payne D.N. Ultraviolet absorption in modified chemical vapor deposition performs // J. Opt. Soc. Am. B. 1994. V. 11. № 10. P. 2106–2111.
5. Yuen M.J. Ultraviolet absorption studies of germanium silicate glasses // Appl. Opt. 1982. V. 21. № 1. P. 136–140.
6. Jackson J.M., Wells M.E., Kordas G., Kinser D.L., Weeks R.A., Magruder R.H. Preparation effects on the UV optical properties of GeO<sub>2</sub> glasses // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. № 6. P. 2308–2311.
7. Malo B., Johnson D.C., Bilodeau F., Albert J., Hill K.O. Single-excimer-pulse writing of fiber gratings by use of a zero-order nulled phase mask: grating spectral response and visualization of index perturbations // Opt. Lett. 1993. V. 18. № 15. P. 1277–1279.
8. Reekie L., Archambault J.-L., Russell P.St.J. 100% reflectivity fibre gratings produced by a single excimer laser pulse // OSA/OFC. 1993. paper PD14. P. 327–330.
9. Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 10. P. 1035–1037.
10. Askins C.G., Tsai T.-E., Williams G.M., Putnam M.A., Bashkansky M., Friebele E. J. Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse // Opt. Lett. 1992. V. 17. № 11. P. 833–835.
11. Ероньян М.А., Комаров А.В., Кондратьев Ю.Н., Ромашова Е.И., Серков М.М., Хохлов А.В. Тонкие анизотропные одномодовые волоконные световоды с эллиптической напрягающей оболочкой // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 10. С. 104–105.
12. 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 // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 4. С. 85–87.