

УДК 681.7.063

## ОДНОИМПУЛЬСНАЯ ЗАПИСЬ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА ТИПА II

С.В. Варжель, А.В. Куликов, В.В. Захаров, В.А. Асеев

Представлены результаты записи брэгговских решеток типа II в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой одиночным импульсом КгF эксимерного лазера. Дифракционная эффективность решеток, индуцированных одиночным импульсом, превышает 99,9% при ширине спектра отражения на полувысоте около 1 нм. Изображения волоконных брэгговских решеток типа II получены методами дифференциального интерференционного контраста и светлого поля.

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

### Введение

Тип индуцируемой волоконной брэгговской решетки (ВБР) зависит от того, какой механизм фоточувствительности задействован при ее образовании. Образование ВБР типа I в германо-силикатных оптических волокнах (ОВ) объясняют электрострикционным механизмом [1], для которого характерно монотонное возрастание показателя преломления (ПП) при увеличении дозы облучения [2]. Решетки типа II, образованные термоупругими напряжениями [3], записываются при плотности энергии лазерного импульса, близкой к порогу разрушения кварцевого стекла 1 Дж/см<sup>2</sup> [2].

Для записи ВБР в данной работе применялся эксимерный лазер Lambda Physik Compex 102 с энергией в импульсе 150 мДж при использовании газовой смеси КгF. Схема записи ВБР методом фазовой маски (ФМ) представлена в работе [4]. Плотность энергии записывающего излучения на ОВ регулировалась аттенуатором без изменения параметров фокусировки.

В настоящей работе применялось двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, выполненное по технологии, описанной в работах [5, 6]. Для повышения фоторефрактивности ОВ концентрация диоксида германия (GeO<sub>2</sub>) в его сердцевине увеличена до 16%.

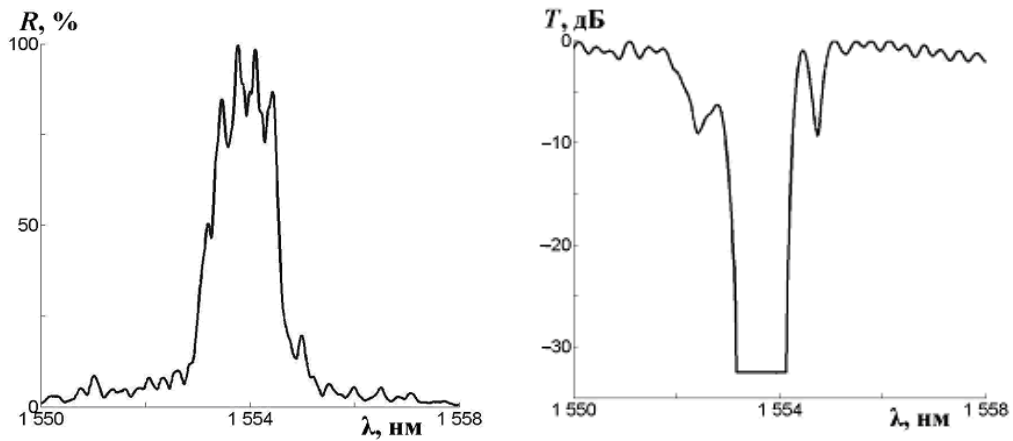
### Результаты записи решеток

В работе [4] были представлены результаты записи ВБР типа I с эффективностью около 10% и шириной спектра отражения на полувысоте около 0,1 нм. Данные ВБР соответствуют электрострикционной модели образования решетки ПП [1]. Аналогичные образцы решеток типа I в ходе настоящей работы были записаны одиночным лазерным импульсом при энергии на выходе с аттенуатора 75,9 мДж.

При несколько большей энергии – 79,3 мДж – была записана решетка типа II, обусловленная термоупругим механизмом [3]. Ее дифракционная эффективность составляет около 100% при ширине спектра на полувысоте около 1 нм. Спектры отражения и пропускания данной ВБР представлены на рис. 1.

Как было сказано выше, в работе использовалось двулучепреломляющее ОВ, а так как эффективные ПП для каждой из выделенных осей анизотропного волокна различны, то и длина волны брэгговского резонанса будет отличаться для света, распространяющегося по быстрой и медленной осям двулучепреломляющего световода. Однако вследствие уширения спектров (рис. 1) произошло слияние пиков отражения двух ортогональных поляризаций. Уширение спектров связано с тем, что ВБР типа I имеет наведенную модуляцию ПП порядка 10<sup>-4</sup> [1], в то время как наведенная модуляция ПП ВБР типа II может достигать 6×10<sup>-3</sup> [7]. Увеличение модуляции ПП ведет к уменьшению рабочей длины решетки, что, в свою очередь, приводит к уширению спектра.

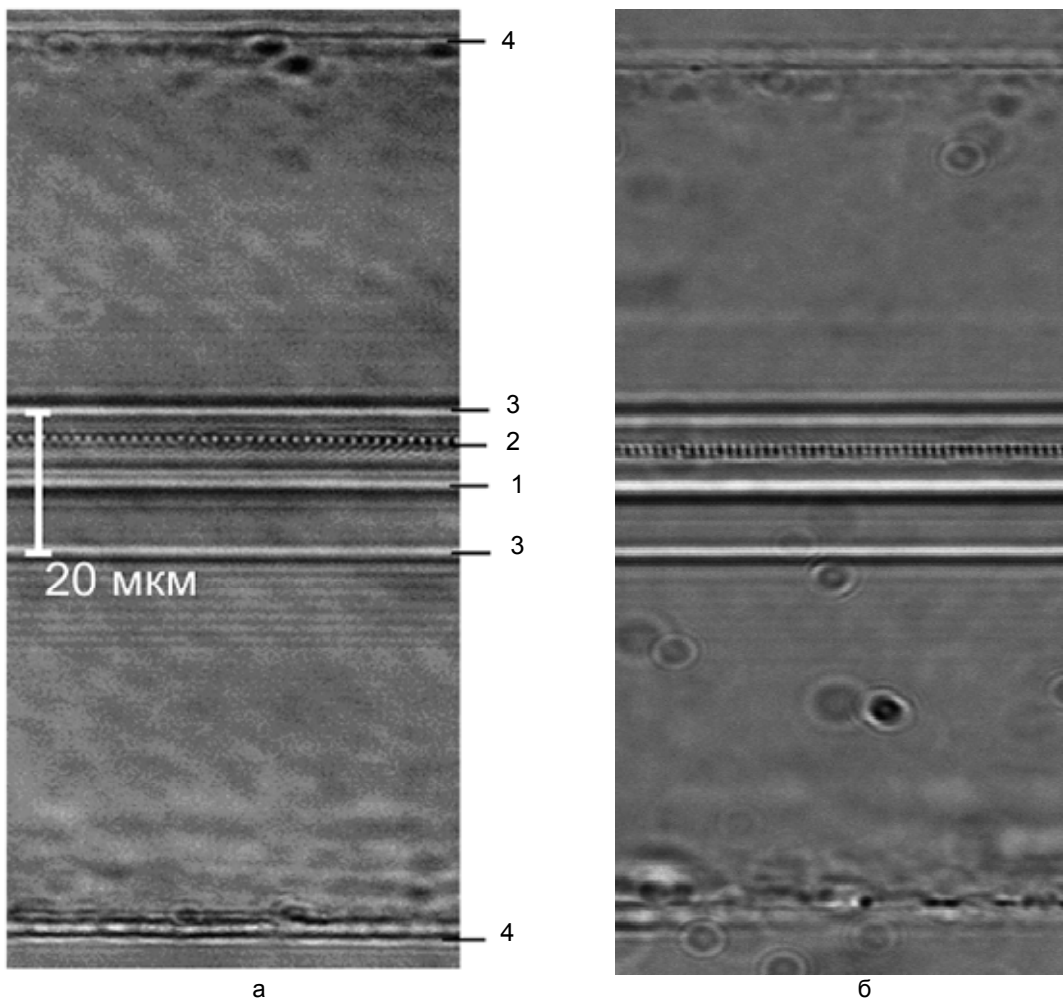
Наблюдаемая зависимость типа индуцируемой решетки от энергии в импульсе согласуется с экспериментальными данными, представленными в работах [7, 8].



а б  
Рис. 1. Спектры ВБР: отражения (а); пропускания (б)

### Визуализация волоконных решеток Брэгга

Большинство опубликованных микроскопических изображений ВБР относится к изотропным ОВ с обычной структурой, включающей сердцевину и окружающую ее оболочку [8–11]. В настоящей работе продемонстрировано изображение решетки Брэгга, записанной в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой.



а б  
Рис. 2. Изображения ВБР, полученные методами ДИК с лазером 405 нм (а), светлого поля с лампой накаливания (б): 1 – сердцевина; 2 – ВБР; 3 – граница между изолирующей и напрягающей оболочками; 4 – внешняя граница волокна

Для получения изображений брэгговских решеток типа II в двулучепреломляющих ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой применен оптический микроскоп Zeiss Axio Imager.Z1 с объективом LD «Plan-Neofluar» 63×/0,75 Corr M27. Объектив обладает увеличенным рабочим расстоянием и корректировочным кольцом, позволяющим уменьшить искажения при наблюдении объектов, находящихся под прозрачным слоем.

Образующая ВБР типа II система микротрещин в ОВ сильно рассеивает свет и поэтому видна на изображениях, полученных при использовании обычной микроскопии светлого поля. Однако метод дифференциального интерференционного контраста (ДИК), предназначенный для визуализации градиентов ПП, позволяет получить более контрастное изображение решетки. На рис. 2 представлены изображения ВБР типа II в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, полученные методами светлого поля и ДИК в свете лампы накаливания и лазера с длиной волны 405 нм. На рисунке хорошо видны внешние границы ОВ диаметром 125 мкм, а также границы между его сердцевинной диаметром около 4 мкм и круговой оболочкой диаметром около 20 мкм, изолирующей сердцевину от борсодержащего стекла напрягающей зоны – эллиптической оболочки, границы которой видны хуже. Это объясняется тем, что напрягающая оболочка, наряду с  $V_2O_5$ , легирована  $GeO_2$  для выравнивания значений ПП оболочек, окружающих сердцевину. Периодическая структура, локализованная вблизи границы между сердцевинной и 20-микронной оболочкой ОВ, отчетливо видна как на изображении, полученном методом ДИК, так и на изображении, полученном традиционным методом светлого поля. Это объясняется тем, что система микротрещин, образующая ВБР типа II, столь сильно рассеивает свет, что она хорошо видна на изображениях, полученных различными методами контрастирования, включая традиционную микроскопию светлого поля.

Измеренный по полученным в настоящей работе изображениям пространственный период решеток составляет 1 мкм, что соответствует периоду ФМ (1065,3 нм), использованной для записи ВБР. Это обстоятельство подтверждает, что записанные ВБР являются решетками типа II, так как решетки типа I имеют вдвое меньший период, чем у используемых для их записи ФМ, оптимизированных под +1/-1 порядок дифракции [8].

### **Заключение**

В работе представлены результаты записи брэгговских решеток типа II в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой одиночным импульсом KrF эксимерного лазера. Дифракционная эффективность решеток, индуцированных одиночным импульсом, превышает 99,9% при ширине спектра отражения на полувысоте около 1 нм. Продемонстрированы микроскопические изображения волоконной брэгговской решетки типа II, индуцированные в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой. Визуализация волоконной брэгговской решетки типа II проведена методами дифференциального интерференционного контраста и светлого поля на оптическом микроскопе Zeiss Axio Imager Z1.

### **Литература**

1. Неуструев В.Б. Электрострикционный механизм образования брэгговской решетки в германосиликатных световодах // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – № 11. – С. 1003–1006.
2. 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 // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085–1103.
3. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Термоупругий и абляционный механизмы лазерного повреждения поверхности прозрачных твердых тел // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 3. – С. 277–281.
4. Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А., Брунов В.С., Калько В.Г., Артеев В.А. Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 27–30.
5. Дукельский К.В., 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. 57. – № 10. – С. 104–106.
6. Буреув 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.
7. 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.

8. 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.
9. Liu H.Y., Liu H.B., Peng G.D., Chu P.L. Observation of type I and type II gratings behavior in polymer optical fiber // Optics Communications. – 2003. – V. 220. – P. 337–343.
10. Dragomir N.M., Baxter G., Collins S.F., Farrell P.M., Stevenson A.J., Garchev D.D., Roberts A. DIC imaging of an optical fiber Bragg grating // OSA Trends in Optics and Photonics. – 2002. – V. 70. – ThGG62.
11. Dragomir N.M., Rollinson C., Wade S.A., Stevenson A.J., Collins S.F., Baxter G.W., Farrell P.M., Roberts A. Nondestructive imaging of a type I optical fiber Bragg grating // Optics Letters. – 2003. – V. 28. – № 10. – P. 789–791.

- Варжель Сергей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com
- Куликов Андрей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, a.kulikov86@gmail.com
- Захаров Виктор Валерьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Viktor-zah@yandex.ru
- Асеев Владимир Анатольевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ нанофотоники и оптоинформатики, научный сотрудник, aseev@oi.ifmo.ru