

И. К. МЕШКОВКИЙ, С. В. ВАРЖЕЛЬ, М. Н. БЕЛИКИН, А. В. КУЛИКОВ, В. С. БРУНОВ

## ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ РЕШЕТОК БРЭГГА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Предложен метод изготовления волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков измерения различных физических величин с помощью термического отжига волоконных брэгговских решеток. Определены оптимальные условия отжига для получения решеток Брэгга с требуемыми спектральными характеристиками.

**Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, термический отжиг, волоконно-оптический фазовый интерферометрический датчик.

В настоящее время одним из актуальных направлений оптической техники является создание волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков (ФИД) измерения различных физических величин на основе брэгговских решеток, которые характеризуются электромагнитной невосприимчивостью, низкой себестоимостью и малыми массогабаритными параметрами. Так, системы акустического мониторинга, использующие волоконно-оптические гидрофоны на брэгговских решетках, способны полностью заменить существующие аналоги на пьезокерамических элементах [1]. Проблема, с которой сталкиваются разработчики ФИД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), связана с записью массивов широкополосных решеток Брэгга с требуемым соотношением коэффициентов отражения.

Один из методов получения высокоэффективных отражательных брэгговских решеток в волноводах из  $\text{GeO}_2\text{:SiO}_2$ -стекла — это облучение оптического волокна сквозь фазовую маску одиночным импульсом эксимерного лазера с плотностью энергии близкой, к порогу разрушения материала ( $\sim 1 \text{ Дж/см}^2$ ) [2]. При такой плотности энергии возникает решетка показателя преломления оптического волокна с глубиной модуляции, достигающей  $6 \times 10^{-3}$ . Такая волноводная структура называется волоконной брэгговской решеткой типа II [3].

ВБР, исследуемые в настоящей статье, были записаны одиночным импульсом эксимерного  $\text{KrF}$ -лазера методом фазовой маски. Схема записи представлена в работе [4].

Чувствительным элементом волоконно-оптического фазового датчика является участок волокна (длиной  $L$ ), заключенный между двумя ВБР (рис. 1). В случае одиночного датчика коэффициенты отражения ВБР<sub>1</sub> и ВБР<sub>2</sub> равны соответственно  $R_1 = 30 \dots 40 \%$  и  $R_2 = 100 \%$ , а ширина спектра отражения на полувысоте  $\Delta\lambda \geq 0,5 \text{ нм}$ .

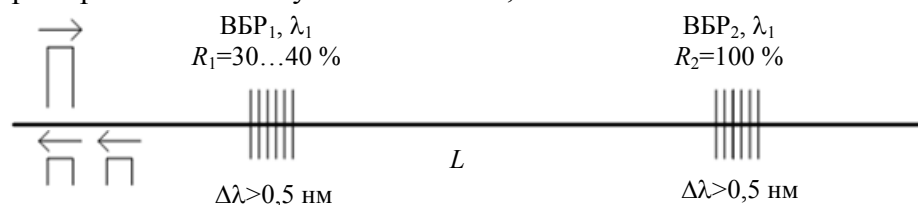


Рис. 1

Известно, что ВБР типа I можно записать практически с любыми значениями  $R$  и  $\Delta\lambda$ , однако это требует использования методов записи с длительной экспозицией (10—20 мин) [5], а также применения специальных методов создания чирпированных ВБР [6], без использования которых значение  $\Delta\lambda$  не превышает 0,1 нм. Применение ВБР типа II позволяет получать высокоэффективные брэгговские зеркала, используя метод одноимпульсной записи и нечирпированные фазовые маски [7]. При этом глубина модуляции показателя преломления

ВБР типа II, индуцированная одиночным импульсом длительностью 20 нс, может превосходить эту величину для ВБР типа I более чем в 100 раз. Это позволяет осуществить технологию одноимпульсной записи брэгговских решеток с коэффициентом отражения, близким к 100 %, и сравнительно большим значением  $\Delta\lambda$  (~ 1 нм).

Недостатком ВБР типа II является резкая зависимость наведенной модуляции показателя преломления оптического волокна от плотности энергии в импульсе длительностью 20 нс, что усложняет контроль коэффициента отражения решетки в процессе записи [3]. Поэтому для создания чувствительного элемента волоконно-оптического ФИД с требуемым соотношением коэффициентов отражения двух решеток авторами был предложен и апробирован метод термического отжига ВБР типа II.

При нагреве ВБР длина волны брэгговского резонанса увеличивается вследствие как термического расширения оптического волокна, а вместе с ним и периода решетки, так и изменения (увеличения) эффективного показателя преломления материала световода. При достижении температуры отжига (~ 900 °C для ВБР типа II) коэффициент отражения решетки плавно уменьшается. Задавая различные интервалы времени, можно добиться различных значений коэффициента отражения. Скорость отжига решетки пропорциональна температуре нагрева. На рис. 2 продемонстрирован график зависимости коэффициента отражения  $R$  от времени отжига  $t$  при различных его температурах  $T$ . Анализ графика показывает, что при увеличении температуры отжига быстрее достигается требуемый коэффициент отражения ВБР.

Спектр решетки Брэгга в процессе отжига приведен на рис. 3. Коэффициент отражения ВБР контролируется оптическим спектроанализатором.

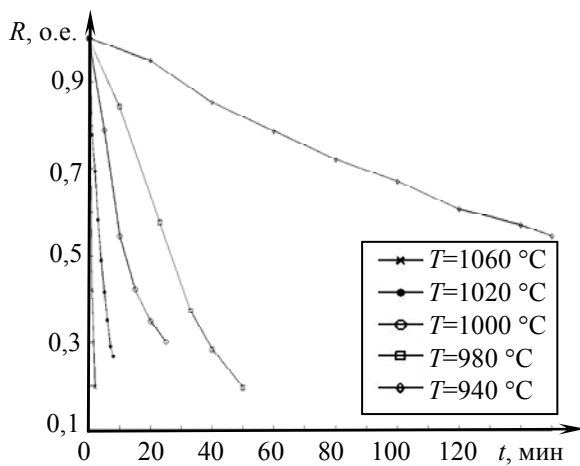


Рис. 2

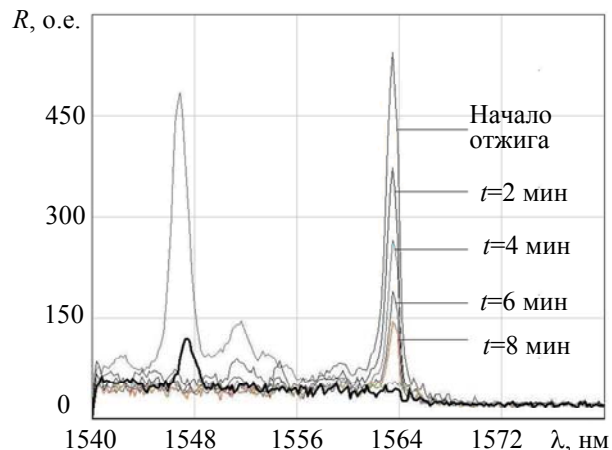


Рис. 3

Как показали экспериментальные данные, во время отжига решеток при постоянной температуре происходит дополнительное смещение пика отражения в сторону больших длин волн. Это смещение прямо пропорционально времени отжига (чем больше время термического воздействия, тем больше смещение), и оно сохраняется и после охлаждения волокна до исходной температуры. Сдвиг, не превышающий 0,2 нм, является приемлемым для создания чувствительных элементов волоконно-оптических ФИД.

Таким образом, в ходе апробации предложенного метода установлено, что при изготовлении чувствительных элементов волоконно-оптических ФИД, например волоконно-оптического гидрофона, необходимо правильно подбирать оптимальные условия термического отжига для получения решеток Брэгга с требуемыми спектральными характеристиками и соотношениями коэффициентов отражения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. *Cusano A., Camporiano S., D'Addio S., Balbi M., Balzarini S., Giordano M., Cutolo A.* Optical fiber hydrophone using polymer-coated fiber Bragg grating // OSA/OFS. 2006. Paper ThE85.
7. *Варжель С. В., Куликов А. В., Брунов В. С., Асеев В. А.* Метод понижения коэффициента отражения волоконных брэгговских решеток с помощью эффекта фотохромизма // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1(77). С. 151—152.
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. *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 // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 5(75). С. 27—30.
10. *Becker M., Bruckner S., Lindner E., Rothhardt M., Unger S., Kobelke J., Schuster K., Bartelt H.* Fiber Bragg grating inscription with UV femtosecond exposure and two beam interference for fiber laser applications // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7750. P. 775015—1.
11. *Bernier M., Sheng Y., Vallée R.* Ultrabroadband fiber Bragg gratings written with a highly chirped phase mask and infrared femtosecond pulses // Optics Express. 2009. Vol. 17, N 5. P. 3285—3290.
12. *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. Vol. 18, N 15. P. 1277—1279.

**Сведения об авторах**

- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Сергей Владимирович Варжель** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: vsv187@gmail.com
- Михаил Николаевич Беликин** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: mbelikin@gmail.com
- Андрей Владимирович Куликов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Вячеслав Сергеевич Брунов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: brunov@oi.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
физики и техники оптической связи

Поступила в редакцию  
14.02.12 г.