

УДК 681.7.063

Запись суперпозиций волоконных решёток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота

© 2017 г. **Р. Ф. Идрисов, АСПИРАНТ; А. И. ГРИБАЕВ, АСПИРАНТ;
А. М. СТАМ, АСПИРАНТ; С. В. ВАРЖЕЛЬ, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК;
Ю. И. СЛОЖЕНИКИНА, СТУДЕНТ; К. А. КОННОВ, АСПИРАНТ**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: r.idrisov@aol.com

Поступила в редакцию 12.04.2017

В настоящей работе представлены результаты по записи суперпозиций решёток Брэгга в различных оптических волокнах, в том числе в специализированных световодах отечественного производства, с использованием схемы записи на основе интерферометра Тальбота. В качестве источника ультрафиолетового излучения в экспериментальном стенде используется KrF эксимерная лазерная система типа «задающий генератор» — усилитель Optosystems CL-7550. Продемонстрированы спектральные характеристики суперпозиций разного количества волоконных решёток Брэгга, выявлены особенности записи нескольких брэгговских решёток в одну область оптического волокна.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решётка, интерферометр Тальбота, суперпозиция, фоточувствительность, эксимерный лазер.

Коды OCIS: 060.3735; 060.3738; 230.1950.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития технологий записи волоконных брэгговских решёток (ВБР) появились работы, в которых были продемонстрированы записи специальных структур ВБР [1]. Частным случаем таких специальных структур является суперпозиция нескольких ВБР с различными длинами волн отражения. Суперпозиция брэгговских решёток представляет собой запись нескольких ВБР с различными резонансными длинами волн в одну область оптического волокна (ОВ) таким образом, что каждая новая решётка суперпозиции записывается поверх уже существующих.

Запись суперпозиций ВБР впервые продемонстрирована в работе [2]. Авторы представили спектр суперпозиции 7 ВБР с коэффициентом отражения каждой отдельной решётки, превышающим 45%. Суперпозиция была записана в ОВ, подвергнутом водородной обработке.

Для эффективной записи суперпозиций ВБР требуется использование ОВ с увеличенной фоточувствительностью, так как фоточувствительность стандартных телекоммуникационных световодов недостаточна для эффективной записи ВБР [1]. Даже при длительном облучении наведённый показатель преломления в стандартном

одномодовом ОВ, легированном 3 мол.% диоксида германия (GeO_2), не превышает 5×10^{-5} [1, 3]. В свою очередь, используемые методы повышения фоторефрактивности, такие как дополнительное легирование сердцевины световода GeO_2 или водородная обработка ОВ, могут увеличить максимально достижимую наведённую модуляцию показателя преломления решётки более, чем на два порядка [3].

Кроме того, запись суперпозиций ВБР предполагает возможность изменения и контроль периода записываемых решёток [4]. Запись решётки поверх существующих понижает коэффициент отражения ВБР, записанных ранее. Несмотря на это, удаётся записывать порядка 10 ВБР с коэффициентом отражения, превышающим 80% и 6 ВБР с коэффициентом отражения более 98% [5] в ОВ, подвергнутых водородной обработке. Компактное исполнение и синхронизация отражений излучения во времени суперпозиций ВБР имеют качественное преимущество по отношению к стандартному массиву ВБР. Рассматриваемые структуры широко применяют в различных вариациях волоконно-оптических датчиков [4], телекоммуникационных линиях связи [6] и волоконных лазерах [7, 8]. В подавляющем количестве опубликованных

работ для записи суперпозиций ВБР использовался метод фазовой маски. В этих работах авторы демонстрируют запись суперпозиций ВБР с различными длинами волн брэгговских резонансов путём использования нескольких фазовых масок с различными периодами [7, 9–11]. Такой метод имеет несколько существенных недостатков, таких как пониженный ресурс дорогостоящей фазовой маски и фиксированные значения периодов ВБР в соответствии с периодами используемых для записи решёток фазовых масок.

В данной работе представлены результаты по записи суперпозиций ВБР с помощью моторизованного интерферометра Тальбота. Интерферометр Тальбота позволяет изменять период интерференционной картины, следовательно, и период ВБР, что, в свою очередь, позволяет изменять длину волны брэгговского резонанса индуцируемой дифракционной структуры в широком диапазоне. Данный метод требует использования только одной фазовой маски для амплитудного разделения лазерного пучка. Кроме того, ОВ в такой схеме находится на расстоянии десятков сантиметров от фазовой маски, что снижает риск её повреждения при фокусировке излучения.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ И СХЕМА ЗАПИСИ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК

В качестве источника излучения в схеме использовалась KrF эксимерная лазерная система типа задающий генератор — усилитель отечественного производства Optosystems CL-7550 [12]. Данная система генерирует излучение на длине волны 248,3 нм и позволяет получить лазерный пучок апертурой $6 \times 20 \text{ мм}^2$ с высокой временной (более 10 мм) и пространственной (более 5 мм) когерентностью. Лазерная система работает на частоте до 50 Гц, энергия в импульсе — до 250 мДж.

Оптическая схема записи ВБР на основе интерферометра Тальбота состоит из фазовой маски,

оптимизированной для $1/-1$ порядков дифракции, и двух зеркал на моторизованных поворотных подвижках, позволяющих изменять угол сведения интерферирующих пучков, следовательно, период интерференционной картины. Точность поворота подвижек позволяет перестраивать длину волны брэгговского резонанса с шагом менее 0,1 нм. Лабораторный стенд позволяет записывать ВБР в широком диапазоне длин волн, покрывающем второе (1310 нм) и третье (1550 нм) окна прозрачности германо-силикатных ОВ [13]. Оптическая схема записи ВБР представлена на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования возможности записи нескольких ВБР в одну область были проведены эксперименты по записи решёток с различными спектральными промежутками.

Для записи ВБР использовалось изотропное ОВ отечественного производства (НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»). Для увеличения фото-рефрактивности ОВ концентрация GeO_2 в его сердцевине была увеличена до 12 мол.% на этапе формирования заготовки.

Для всех ВБР плотность энергии в области записи составила 200 мДж/см^2 . Частота следования лазерных импульсов составила 10 Гц, время экспозиции изменялось в диапазоне от 30 до 90 с в зависимости от требуемого коэффициента отражения решётки.

Для демонстрации возможностей лабораторного стенда на рис. 2 представлены суперпозиции ВБР со спектральными промежутками 1 нм (а) и 40 нм (б) между решётками.

На рис. 2а все 4 ВБР суперпозиции имеют коэффициент отражения около 11%, а ширина на полувысоте около 0,08 нм.

На рис. 2б 3 ВБР суперпозиции имеют коэффициент отражения около 80%, ширина на полувысоте около 0,08 нм.

Показанный интервал длин волн брэгговского резонанса (рис. 2б) в данном случае ограничен шириной спектра источника излучения, используемого в работе. Спектральный интервал между резонансами ВБР представленной суперпозиции (рис. 2б) соответствует требованиям систем со спектральным уплотнением (WDM) [2]. На рис. 3 представлены спектрограммы суперпозиций из 4 (а) и 8 (б) ВБР, позволяющие оценить возможность получения суперпозиции нескольких ВБР со спектральным расстоянием 0,4 нм, используемым в DWDM системах [14].

В процессе экспериментальных исследований были обнаружены некоторые особенности записи суперпозиций ВБР, согласующиеся с результатами экспериментов, представленных в работах [2, 9].

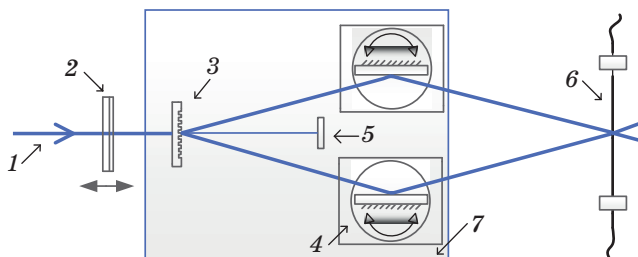


Рис. 1. Функциональная схема интерферометра Тальбота: 1 — УФ излучение, 2 — цилиндрическая линза, 3 — фазовая маска, 4 — зеркало на поворотной подвижке, 5 — экран 0-го порядка дифракции, 6 — оптическое волокно, 7 — интерферометр Тальбота на линейной подвижке.

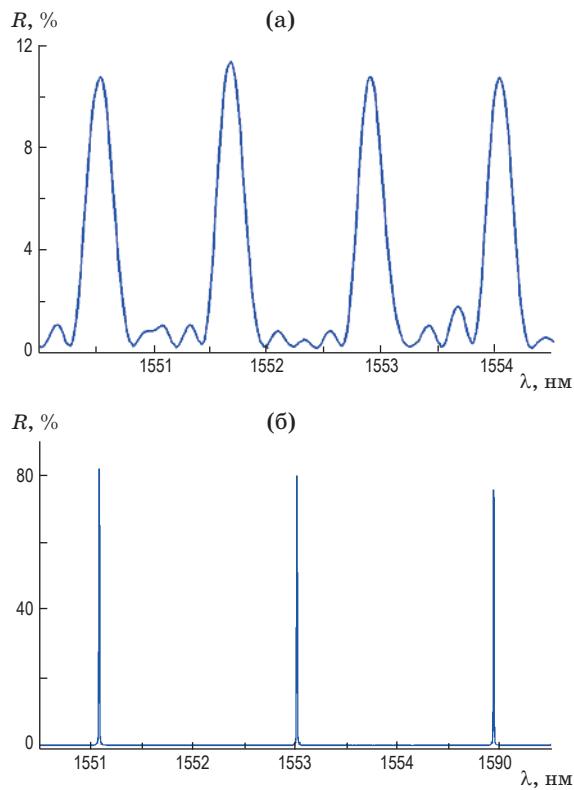


Рис. 2. Спектры суперпозиций ВБР с длинами волн отражения брэгговского резонанса, отличающимися на 1 нм (а) и 40 нм (б).

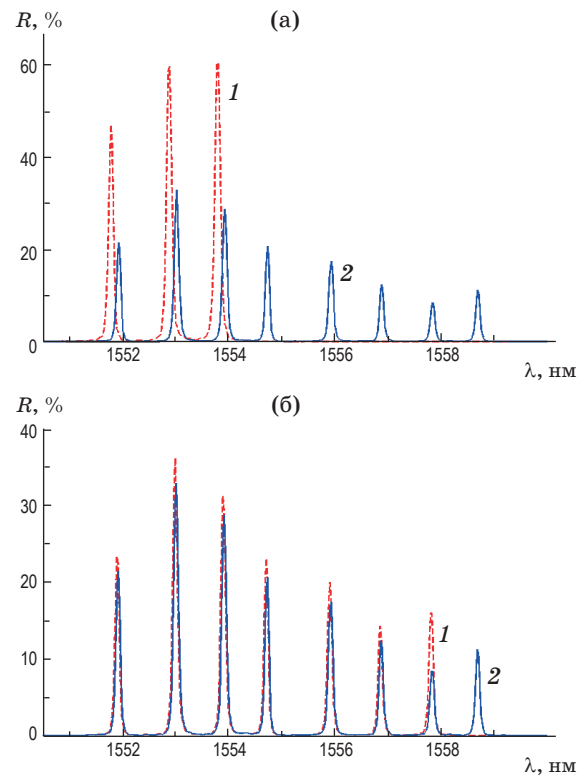


Рис. 4. Динамика изменения спектрограммы суперпозиции ВБР после записи 3 (1) и 8 (2) ВБР (а) и после записи 7 (1) и 8 (2) ВБР (б).

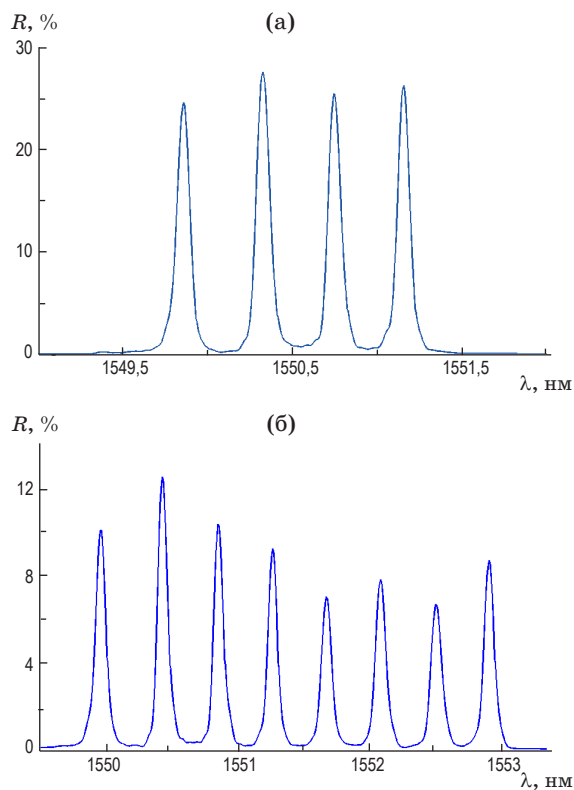


Рис. 3. Спектры суперпозиций ВБР с длинами волн отражения брэгговского резонанса, отличающимися на 0,4 нм из 4 ВБР (а) и из 8 ВБР (б).

Прежде всего, запись ВБР поверх существующих снижает коэффициент отражения ранее полученных решёток. При этом, сильнее всего снижается коэффициент отражения ВБР, записанной последней. Однако это условие справедливо лишь для решёток, имеющих приблизительно равный коэффициент отражения. Решётки, записанные при более длительной экспозиции, в меньшей степени подвержены снижению коэффициента отражения.

На рис. 4 представлена динамика изменения спектрограммы суперпозиции ВБР после записи 3 и 8 ВБР (а) и после записи 7 и 8 ВБР (б). Вторая ВБР суперпозиции была подвержена деградации менее всего, так как время экспозиции этой решётки превысило время записи других ВБР. На рис. 4а можно наблюдать смещение спектров решёток, являющееся следствием увеличения среднего эффективного показателя преломления на облучаемом участке ОВ, приводящее к смещению центральной длины волны отражения ВБР в соответствии с условием Брэгга. Для первой ВБР суперпозиции это смещение составило 0,2 нм, что соответствует локальному изменению среднего эффективного показателя преломления на 2×10^{-4} при суммарной дозе УФ облучения участка ОВ с записанной суперпозицией из 8 ВБР около 1 кДж/см².

Для записи суперпозиций ВБР с большими коэффициентами отражения отдельных решёток

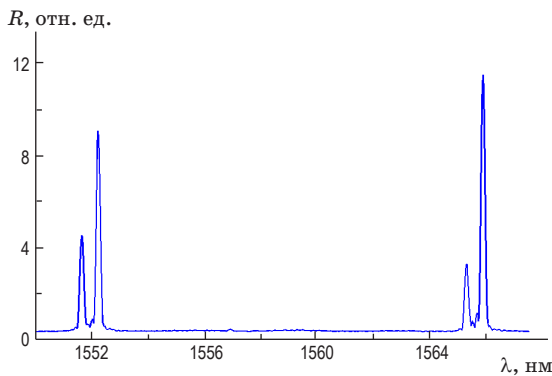


Рис. 5. Суперпозиция двух ВБР, индуцированных в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой.

можно увеличить фоторефрактивность ОВ, например, с помощью метода низкотемпературной водородной обработки ОВ [3, 15].

Для проверки возможности использования суперпозиций ВБР в качестве чувствительных элементов фазовых интерферометрических датчиков [16] была проведена запись нескольких ВБР в одну область двулучепреломляющего ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, выполненного по технологии, представленной в работах [17, 18]. Для увеличения фоторефрактивности ОВ концентрация GeO_2 в его сердцевине была увеличена до 12 мол.% на этапе формирования заготовки. Благодаря своим уникальным свойствам [19] ОВ такого типа используется при создании прецизионных интерферометрических датчиков, таких как волоконно-оптический гироскоп [20]. На рис. 5 представлена спектрограмма суперпозиции двух ВБР в исследуемом анизотропном свето-

воде. Коэффициент отражения каждой ВБР суперпозиции составил примерно 15%.

Наличие двух пиков в спектрах отражения ВБР (рис. 5), записанных в двулучепреломляющем ОВ, обусловлено различием эффективных показателей преломления для быстрой и медленной оси анизотропного волоконного световода [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по записи суперпозиции нескольких ВБР в анизотропных и изотропных ОВ с повышенной концентрацией GeO_2 . Записанные периодические структуры применимы для создания волоконно-оптических интерферометрических датчиков, WDM- и DWDM-технологий. Реализованная запись проводилась с помощью KrF эксимерной лазерной системы типа задающий генератор–усилитель и интерферометра Тальбота. Представлены спектральные характеристики полученных суперпозиций ВБР и особенности изменения спектральных характеристик решёток в процессе их записи. Показано, что запись последующих ВБР суперпозиции понижает коэффициент отражения решёток, записанных ранее. Также продемонстрировано увеличение среднего эффективного показателя преломления ОВ в области записи суперпозиции ВБР и связанное с этим увеличение резонансных длин волн отражения отдельных решёток, записанных первыми.

Настоящая работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57815X0109, Соглашение № 14.578.21.0109).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Othonos A., Lee X., Measures R.M. Superimposed multiple Bragg gratings // Electronics Letters. 1994. V. 30. № 23. P. 1972–1974.
3. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. High pressure H_2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO_2 doped optical fibres // Electronics Letters. 1993. V. 29. № 13. P. 1191–1193.
4. Dennison C.R., Wild P.M. Superstructured fiber-optic contact force sensor with minimal cosensitivity to temperature and axial strain // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 9. P. 1188–1197.
5. Arigiris A., Konstantaki M., Ikiades A., Chronis D., Florias P., Kallimani K., Pagiatakis G. Fabrication of high-reflectivity superimposed multiple-fiber Bragg gratings with unequal wavelength spacing // Opt. Lett. 2002. V. 27. № 15. P. 1306–1308.
6. Teh P.C., Ibsen M., Lee J.H., Petropoulos P., Richardson D.J. A 4-channel WDM/OCDMA system incorporating 255-chip, 320 Gchip/s quaternary phase coding and decoding gratings // Optical Fiber Communication Conference and International Conference on Quantum Information. OSA Technical Digest Series. 2001. Paper PD37.D.
7. Brochu G., LaRochelle S., Slavik R. Modeling and experimental demonstration of ultracompact multiwavelength distributed Fabry–Pérot fiber lasers // J. Lightwave Technol. 2005. V. 23. № 1. P. 44–53.
8. García-Muñoz V., Preciado M.A., Muriel M.A. Simultaneous ultrafast optical pulse train bursts generation and shaping based on Fourier series developments using superimposed fiber Bragg gratings // Opt. Express. 2007. V. 15. № 17. P. 10878–10889.

9. Abe I., Kalinowski H.J., Frazao O., Santos J.L., Nogueira R.N., Pinto J.L. Superimposed Bragg gratings in high-birefringence fibre optics: three-parameter simultaneous measurements // *Meas. Sci. Technol.* 2004. V. 15. P. 1453–1457.
10. Garcia-Muñoz V., Caucheteur C., Bette S., Wuilpart M., Muriel M.A., Mégret P. Reduction of polarization related effects in superimposed fiber Bragg gratings // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. № 9. P. 1635–1641.
11. Dong X., Shum P., Ngo N.Q., Chan C.C. Multiwavelength Raman fiber laser with a continuously-tunable spacing // *Opt. Express*. 2006. V. 14. № 8. P. 3288–3293.
12. Амежев В.В., Варпанетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З. Эксиммерный лазер с высокой когерентностью // *Квантовая электроника*. 2003. Т. 33. № 8. С. 689–694.
13. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48(12). № 540. P. 1–7.
14. Xu L., Wang T., Chowdhury A., Yu J., Chang G., Fukuchi K., Ito T. Spectral efficient transmission of 40Gbps per channel over 50 GHz spaced DWDM systems using optical carrier suppression, separation and optical duobinary modulation // *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*. OSA Technical Digest. 2006. Paper NTuC2.
15. Варжель С.В., Мунько А.С., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В. Запись решёток Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутом водородной обработке // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 10. С. 74–78.
16. Ефимов М.Е., Плотников М.Ю., Куликов А.В. Моделирование и экспериментальное исследование чувствительного элемента волоконно-оптического гидрофона // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. Т. 14. № 5. С. 158–163.
17. Ероньян М.А. Способ изготовления волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения // *Патент Российской Федерации* № 2155359. 2000.
18. 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.
19. Bureev S.V., Meshkovskii I.K., Utkin E.Yu., Dukel'ski 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. V. 79. № 7. P. 433–436.
20. 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. V. 2. № 4. P. 208–213.
21. Meshkovskiy I.K., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Varzhel' S.V. Bragg gratings induced in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // *Journal of Photonics*. 2013. Article ID 936036. 4 p.