



УДК 681.7.063

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАПИСИ СУПЕРПОЗИЦИЙ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

К.А. Коннов^a, Ю.И. Сложеникина^b, А.И. Грибаев^a, С.В. Варжель^a, В.А. Новикова^a, Ю.К. Залеская^a,
А.А. Дмитриев^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b АО «Котлин-Новатор», Санкт-Петербург, 192019, Российская Федерация

Адрес для переписки: kirillkonnov1991@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 06.10.17, принята к печати 31.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Коннов К.А., Сложеникина Ю.И., Грибаев А.И., Варжель С.В., Новикова В.А., Залеская Ю.К., Дмитриев А.А. Исследование и оптимизация процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1004–1010. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы особенности процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга. Проанализированы изменения спектральных характеристик отдельных решеток суперпозиции, возникающие при записи поверх них последующих дифракционных структур. **Метод.** Запись суперпозиций волоконных решеток Брэгга проведена с помощью интерферометра Тальбота. В качестве источника излучения использовалась эксимерная лазерная система Optosystems MOPA CL-7550, работающая на газовой смеси KrF (длина волны генерации – 248 нм). Для амплитудного разделения лазерного пучка в схеме записи использована фазовая маска с периодом 1000 нм. Запись волоконных решеток Брэгга осуществлена в изотропном оптическом волокне с повышенной (до 12 мол.%) концентрацией GeO₂ в световедущей сердцевине. **Основные результаты.** Получены образцы суперпозиций волоконных решеток Брэгга и проведен анализ их спектральных характеристик. Проведено исследование закономерностей изменения коэффициента отражения и центральной длины волны первой решетки суперпозиции от количества дифракционных структур, записанных поверх нее, времени экспозиции при их записи и спектрального интервала между ними. На основании полученных результатов даны рекомендации по оптимизации процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга. **Практическая значимость.** Полученные суперпозиции волоконных решеток Брэгга могут применяться при изготовлении оптических фильтров, датчиков физических величин для одновременного измерения нескольких параметров, а также для мультиплексирования и демultipлексирования сигналов в телекоммуникационном оборудовании.

Ключевые слова

волоконная брэгговская решетка, суперпозиция, фазовая маска, интерферометр Тальбота, эксимерный лазер

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

INSCRIPTION PROCESS RESEARCH AND OPTIMIZATION FOR SUPERIMPOSED FIBER BRAGG GRATINGS

К.А. Konnov^a, Yu.I. Slozhenikina^b, A.I. Gribaev^a, S.V. Varzhel^a, V.A. Novikova^a,
Yu.K. Zalesskaya^a, A.A. Dmitriev^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b JSC "Kotlin-Novator", Saint Petersburg, 192019, Russian Federation

Corresponding author: kirillkonnov1991@gmail.com

Article info

Received 06.10.17, accepted 31.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010

Article in Russian

For citation: Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Novikova V.A., Zalesskaya Yu.K., Dmitriev A.A. Inscription process research and optimization for superimposed fiber Bragg gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1004–1010 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of inscription process distinctive features for superimposed fiber Bragg gratings. We analyzed spectral characteristics changes of superposition segregated gratings that appear during inscription of subsequent diffraction structures over the first ones. **Method.** Superimposed fiber Bragg gratings inscription was carried out by means of Talbot interferometer. Excimer laser system Optosystems MOPA CL-7550 was used as a radiation source. It was operating on gas mixture KrF (radiation wavelength is equal to 248 nm). The phase mask with a 1000 nm period was implemented in the inscription scheme for laser beam amplitude separation. Fiber Bragg gratings were inscribed in anisotropic optical fiber with 12 mol.% of GeO₂ in optical fiber core. **Main Results.** Samples of superimposed fiber Bragg gratings were obtained and their spectral characteristics were analyzed. We have studied the regularities of the change in the reflection coefficient and the central wavelength of the first grating of the superposition from the number of diffraction structures inscribed over it, the exposure time during the inscription, and the spectral interval between them. Based on the results obtained, recommendations are given for optimizing the superimposed fiber Bragg gratings inscription process. **Practical Relevance.** The obtained superimposed fiber Bragg gratings can be used in the manufacture of optical filters, sensors for simultaneous measurement of several parameters, as well as for multiplexing and demultiplexing signals in telecommunications.

Keywords

fiber Bragg grating, superposition, phase mask, Talbot interferometer, excimer laser

Acknowledgements

This work has been performed at ITMO University and supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No.03.G25.31.0245).

Введение

В настоящее время оптическое волокно (ОВ) находит широкое применение в качестве различных функциональных элементов приборов и устройств. Телекоммуникационное оборудование, источники излучения, датчики физических величин, системы мониторинга, гироскопы – это далеко не полный перечень областей применения волоконных световодов в составе оборудования. Одним из широко используемых конструктивных элементов целого ряда волоконно-оптических устройств являются волоконные брэгговские решетки (ВБР) [1–5].

Первая работа по записи волоконных решеток показателя преломления (ПП) датируется 1978 годом [6]. На тот момент ВБР была получена вследствие интерференции пучков излучения, распространяющихся в прямом и обратном направлении в сердцевине ОВ. С развитием волоконной оптики методики и технологии записи решеток ПП претерпели существенные изменения: в настоящее время запись ВБР осуществляется через боковую поверхность волоконного световода [7].

Один из наиболее эффективных и универсальных методов, позволяющих осуществлять запись ВБР, предполагает использование интерферометра Тальбота. Данный метод обеспечивает простую подстройку параметров дифракционных структур, в частности, длины волны брэгговского резонанса, а также позволяет достигать высокую стабильность записи [8–10].

Существует большое количество различных типов ВБР, которые, в зависимости от их особенностей и характеристик, находят свое применение в конструкции различных приборов и устройств. Также в настоящее время активно развивается направление по созданию специальных структур волоконных решеток ПП: суперпозиции ВБР, решетки с фазовым сдвигом, наклонные (дифракционные) структуры и т.д. [7].

Суперпозиция ВБР – две и более решетки ПП с различными длинами волн брэгговского резонанса, записанные в одну область ОВ [11–14]. Данный тип структур обладает синхронизацией отраженного излучения с различными длинами волн по времени. Кроме того, суперпозиции решеток характеризуются малыми габаритными параметрами, что при решении некоторых задач является очень важным фактором.

При создании суперпозиций ВБР возникает ряд трудностей, в основном связанных с падением коэффициента отражения и сдвигом центральной длины волны решеток ПП при записи поверх их новых дифракционных структур.

Суперпозиции ВБР могут быть применены при изготовлении оптических фильтров, датчиков физических величин для одновременного измерения нескольких параметров, а также для мультиплексирования и демультиплексирования сигналов в телекоммуникационном оборудовании [15–17].

В связи с актуальностью вопроса, данное исследование направлено на отработку методики записи суперпозиций ВБР и изучение их спектральных характеристик. Кроме того, даны рекомендации, учитывая которые, можно получать суперпозиции ВБР с требуемыми характеристиками.

Оптическое волокно

В работе для записи ВБР использовалось изотропное ОВ производства НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова». Для повышения фоточувствительности волоконного световода в процессе получения заготовки была увеличена концентрация диоксида германия (GeO₂) в его сердцевине до 12 мол.%. Диаметр световедущей сердцевины ОВ составляет 6 мкм, оболочки – 125 мкм, защитное покрытие волокна – акрилат. Оптические потери в используемых для записи образцах составляют порядка 4 дБ/км.

Экспериментальная установка

Стенд для записи ВБР состоит из следующих основных узлов: эксимерной лазерной системы, оптической системы транспортировки лазерного излучения, интерферометра Тальбота и систем контроля параметров лазерного излучения и положения ОВ [18].

Отличительной особенностью стенда является применение в качестве источника излучения ультрафиолетового диапазона KrF эксимерной лазерной системы с увеличенной временной и пространственной когерентностью, что снижает требования к юстировке интерферометра и позволяет получить интерференционную картину с высоким контрастом на поверхности ОВ. Эксимерный лазер Optosystems MORA CL-7550 является разработкой Центра физического приборостроения ФГБУН «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

Системы контроля позволяют отслеживать спектральную ширину линии лазерного излучения, распределение энергии в лазерном пучке, совмещение интерферирующих лазерных пучков в плоскости ОВ, а также положение световода относительно интерференционной картины. Все это позволяет добиться высокой эффективности и стабильности результатов записи ВБР.

На рис. 1 представлена функциональная схема установки для записи ВБР.

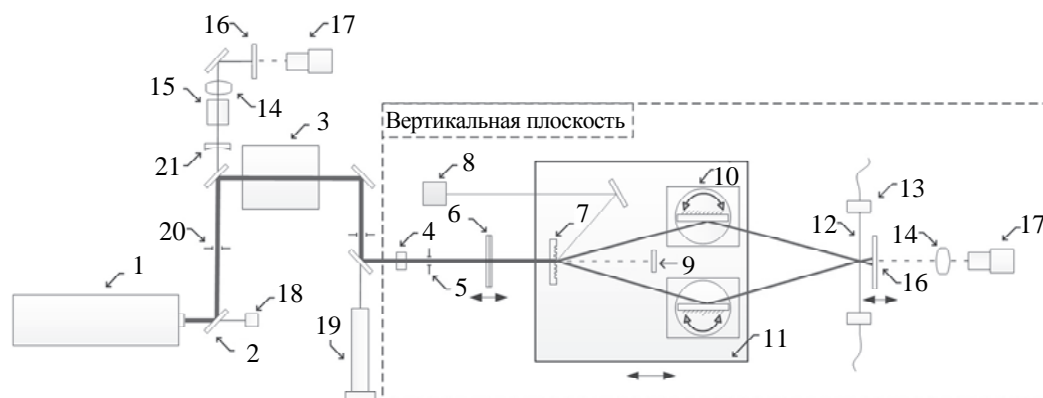


Рис. 1. Функциональная схема установки для записи ВБР: 1 – эксимерная лазерная система; 2 – зеркала с диэлектрическим покрытием (\varnothing 50,8 мм); 3 – аттенюатор; 4 – затвор; 5 – сменная апертурная диафрагма; 6 – цилиндрическая линза; 7 – фазовая маска; 8 – пирозлектрический измеритель энергии; 9 – экран для 0-го порядка дифракции; 10 – зеркала на поворотных подвижках (\varnothing 76,2 мм); 11 – интерферометр Тальбота на линейной подвижке; 12 – оптическое волокно; 13 – магнитные держатели; 14 – положительная линза; 15 – интерферометр Фабри-Перо; 16 – флуоресцентная пластина; 17 – камера; 18 – высокоскоростной фотоприемник; 19 – анализатор профиля; 20 – юстировочная диафрагма; 21 – отрицательная линза

Излучение с длиной волны 248 нм и длительностью импульса 17 нс, генерируемое лазерной системой, падает на фазовую маску с периодом 1000 нм. Фазовая маска оптимизирована под +1 и -1 порядки дифракции. Эти пучки падают на зеркала, закрепленные на поворотных подвижках. После отражения от зеркал излучение сводится в область расположения ОВ, где и образуется интерференционная картина, которая индуцирует в световоде ВБР.

Изменением угла поворота зеркал и перемещением плиты, на которой расположен интерферометр Тальбота, можно осуществлять изменение центральной длины волны брэгговского резонанса записываемых ВБР в диапазоне 1050–1740 нм. Использование зеркал диаметром 76,2 мм позволяет получать решетки длиной до 14 мм.

Результаты

На рис. 2 представлен для примера спектр отражения суперпозиции из четырех ВБР. Коэффициенты отражения (R) для каждой из решеток составляют 44%, 49%, 53% и 63% соответственно от меньших длин волн (λ) к большим, а ширина спектра отражения на полувысоте – около 0,08 нм. Спектральное расстояние между центральными длинами волн брэгговского резонанса составляет 10 нм. Запись ВБР осуществлялась при плотности энергии в импульсе на ОВ около 200 мДж/см² и частоте следования импульсов 10 Гц, время экспозиции при записи каждой отдельной решетки суперпозиции составляло 3 минуты.

При осуществлении записи ВБР в область ОВ, где уже индуцированы одна или более дифракционных структур, происходит снижение коэффициента отражения решеток, записанных ранее. При этом сильнее всего падает коэффициент отражения ВБР, записанной последней [14].

На рис. 3 показано изменение нормированного коэффициента отражения первой решетки суперпозиции из четырех ВБР от количества индуцированных дифракционных структур. Запись проходила в изотропное ОВ с 12 мол.% GeO₂.

Условия записи:

1. для спектрального расстояния между отдельными решетками ($\Delta\lambda$), равного 2 нм (пунктирная линия) – длина ВБР (L) 14 мм, плотность энергии лазерного импульса на ОВ (Q) 185 мДж/см²;
2. для $\Delta\lambda = 10$ нм (штрихпунктирная линия) – $L = 14$ мм, $Q = 192$ мДж/см²;
3. для $\Delta\lambda = 50$ нм (сплошная линия) – $L = 14$ мм, $Q = 195$ мДж/см²; время экспозиции для всех ВБР составило 1 мин (рис. 3, а) и 3 мин (рис. 3, б); R/R_0 – нормированный коэффициент отражения; N – количество ВБР в суперпозиции.

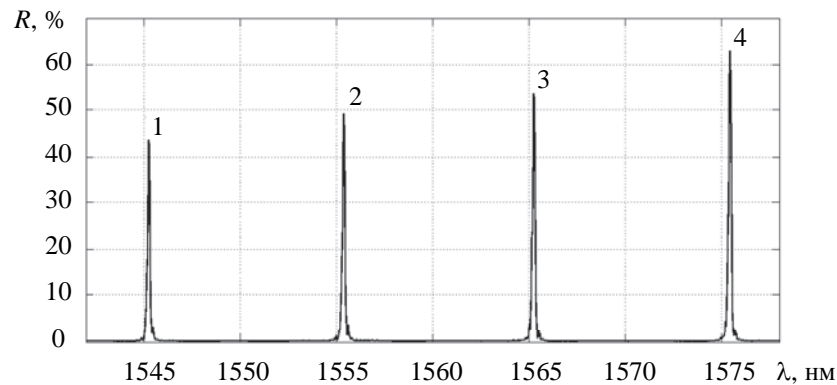


Рис. 2. Спектр суперпозиции из четырех волоконных брэгговских решеток с коэффициентами отражения: 44% (1), 49% (2), 53% (3) и 63% (4)

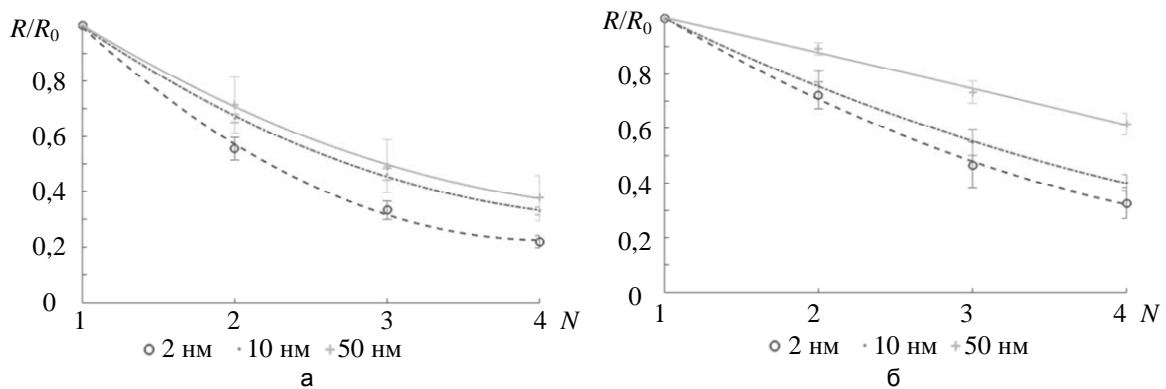


Рис. 3. Изменение нормированного коэффициента отражения первой решетки суперпозиции из четырех волоконных брэгговских решеток от количества индуцированных дифракционных структур с различным спектральным расстоянием между ними. Время экспозиции: 1 мин (а); 3 мин (б)

На рис. 4, а–в, отдельно показано изменение нормированного коэффициента отражения первой решетки суперпозиции из четырех ВБР от количества индуцированных дифракционных структур для каждого спектрального расстояния между решетками. Запись проходила в изотропное ОВ с 12 мол.% GeO₂. Условия записи: $L = 14$ мм, $Q = 192$ мДж/см², $\Delta\lambda = 2$ нм (рис. 4, а), $\Delta\lambda = 10$ нм (рис. 4, б) и $\Delta\lambda = 50$ нм (рис. 4, в), время экспозиции – 1 мин (пунктирная линия) и 3 мин (штрихпунктирная).

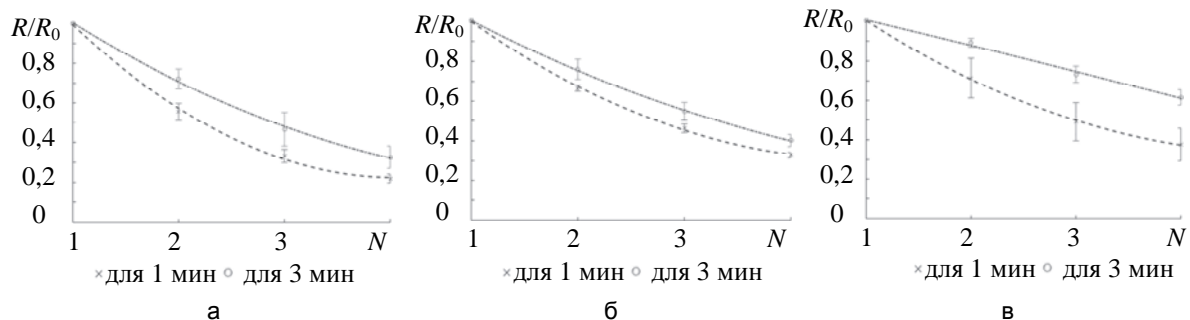


Рис. 4. Изменение нормированного коэффициента отражения первой решетки суперпозиции из четырех волоконных брэгговских решеток от количества индуцированных дифракционных структур с различной экспозицией для спектрального расстояния между ними: 2 нм (а); 10 нм (б); 50 нм (в)

Как видно из представленных выше результатов (рис. 3, а, б), падение коэффициента отражения тем меньше, чем больше спектральное расстояние между соседними ВБР суперпозиции. Кроме того, четко прослеживается тот факт, что увеличение времени экспозиции также уменьшает величину падения коэффициента отражения решеток ПП (рис. 4, а–в).

Кроме падения коэффициента отражения, в процессе записи суперпозиций ВБР происходит смещение центральной длины волны решетки в зависимости от времени экспозиции и спектрального расстояния между центральными длинами волн отдельных решеток. На рис. 5 показано смещение центральной длины волны первой решетки суперпозиции из 4-х ВБР от количества индуцированных дифракционных структур. Запись проходила в изотропное ОВ с 12 мол.% GeO₂.

Условия записи:

1. $\Delta\lambda = 2$ нм (пунктирная линия) – $L = 14$ мм, $Q = 185$ мДж/см²;
2. для $\Delta\lambda = 10$ нм (штрихпунктирная – $L = 14$ мм, $Q = 195$ мДж/см²; время экспозиции для всех ВБР составило 1 мин (рис. 5, а) и 3 мин (рис. 5, б).

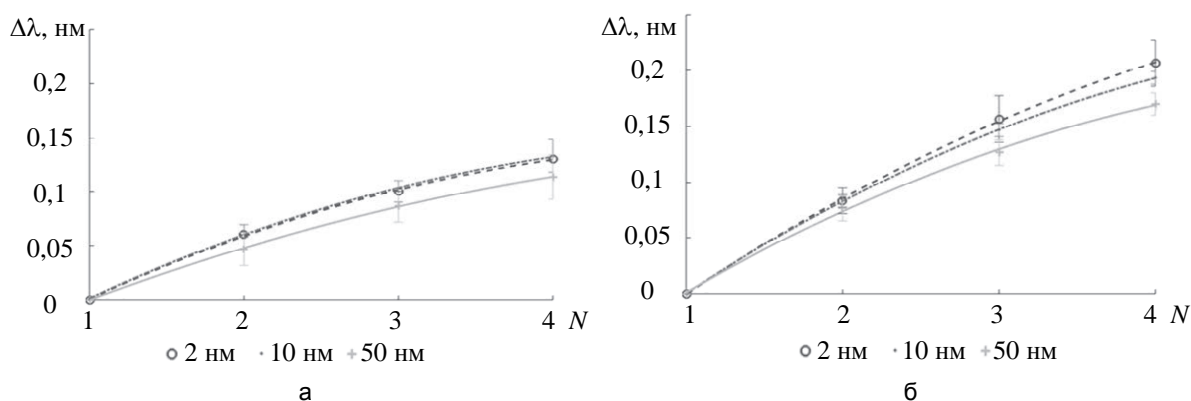


Рис. 5. Смещение центральной длины волны первой решетки суперпозиции из четырех волоконных брэгговских решеток от количества индуцированных дифракционных структур с различным спектральным расстоянием между ними. Время экспозиции: 1 мин (а); 3 мин (б)

Исходя из данных, представленных на рис. 5, можно сделать вывод о том, что сдвиг центральной длины волны первой решетки суперпозиции ВБР зависит как от времени экспозиции каждой из решеток, так и от их количества. В то же время спектральное расстояние между отдельными ВБР на величину сдвига центральной длины волны существенного влияния не оказывает.

На рис. 6, а–в, отдельно показано изменение нормированного коэффициента отражения первой решетки суперпозиции из четырех ВБР от количества индуцированных дифракционных структур для каждого спектрального расстояния между решетками. Запись проходила в изотропное ОВ с 12 мол.% GeO₂. Условия записи: $L = 14$ мм, $Q = 185$ мДж/см², $\Delta\lambda = 2$ нм (рис. 6, а), $\Delta\lambda = 10$ нм (рис. 6, б) и $\Delta\lambda = 50$ нм (рис. 6, в), время экспозиции – 1 мин (пунктирная линия), 3 мин (штрихпунктирная).

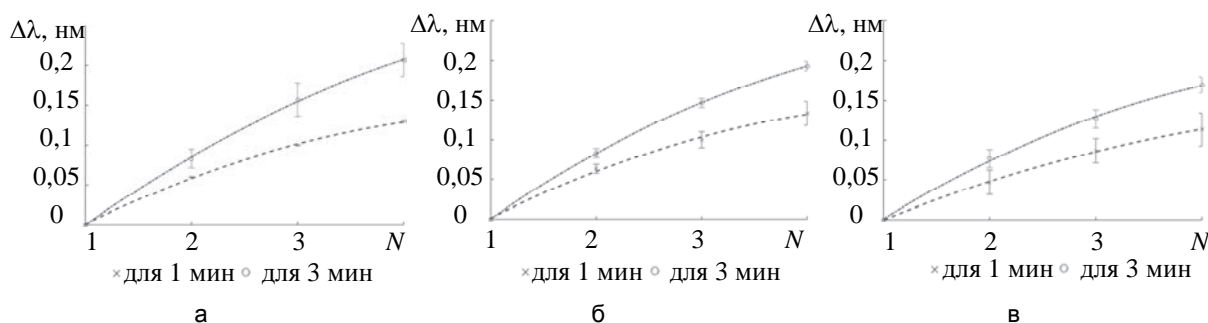


Рис. 6. Смещение центральной длины волны первой решетки суперпозиции из 4-х волоконных брэгговских решеток от количества индуцированных дифракционных структур с различной экспозицией для спектрального расстояния между ними: 2 нм (а); 10 нм (б); 50 нм (в)

Исходя из приведенных выше экспериментальных данных, очевидно, что при большем времени экспозиции, требуемом для записи отдельных решеток суперпозиции, наблюдается больший сдвиг длины волны брэгговского резонанса в длинноволновую область ввиду большего изменения среднего эффективного ПП.

Заключение

В ходе настоящего исследования были получены образцы суперпозиций волоконных решеток Брэгга, записанные с применением интерферометра Тальбота и KrF эксимерной лазерной системы с увеличенной временной и пространственной когерентностью. Проведен анализ спектральных характеристик полученных дифракционных структур. Выявлены закономерности изменения коэффициента отражения и центральной длины волны первой решетки суперпозиции от количества дифракционных структур, записанных поверх нее, времени экспозиции при их записи и спектрального интервала между ними.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. увеличение спектрального расстояния между центральными длинами волн брэгговского резонанса отдельных решеток в суперпозиции приводит к уменьшению падения их коэффициента отражения;
2. увеличение времени экспозиции при записи суперпозиции волоконных решеток Брэгга приводит к уменьшению падения коэффициента отражения решеток, записанных ранее;
3. увеличение времени экспозиции при записи суперпозиции волоконных решеток Брэгга приводит к увеличению сдвига центральных длин волн решеток в длинноволновую область.

Все указанные выше закономерности стоит учитывать в виде рекомендаций по оптимизации процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга, а также при разработке волоконно-оптических приборов и устройств.

Литература

1. Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers // *Laser and Photonics Review*. 2008. V. 2. N 4. P. 275–289. doi: 10.1002/lpor.200810010
2. Pinto J.L. Fiber Bragg grating sensors novel applications // *Latin America Optics and Photonics Conference*. 2012. Paper LS2C.1. doi: 10.1364/LAOP.2012.LS2C.1
3. Roriz P., Carvalho L., Frazao O., Santos J.L., Simoes J.A. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: a review // *Journal of Biomechanics*. 2014. V. 47. N 6. P. 1251–1261. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.054
4. Окося Т. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
5. Yoshino T., Sano Y., Ota D., Fujita K., Ikui T. Fiber-Bragg-grating based single axial mode Fabry-Perot interferometer and its strain and acceleration sensing applications // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. V. 34. N 9. P. 2240–2250. doi: 10.1109/JLT.2016.2521440
6. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication // *Applied Physics Letters*. 1978. V. 32. N 10. P. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
7. 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.
8. Стам А.М., Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Варжель С.В., Коннов К.А., Сложеникина Ю.И. Запись волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота и эксимерной KrF-лазерной системы // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. N 5. С. 466–473. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473
9. Bartelt H., Schuster K., Unger S., Chojetzki C., Rothhardt M., Latka I. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures // *Applied Optics*. 2007. V. 46. N 17. P. 3417–3424. doi: 10.1364/AO.46.003417
10. Tokarev A.V., Anchutkin G.G., Varzhel S.V., Gribaev A.I., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K., Rothhardt M., Elsmann T., Becker M., Bartelt H. UV-transparent fluoropolymer fiber coating for the inscription of chirped Bragg gratings arrays // *Optics and Laser Technology*. 2017. V. 89. P. 173–178. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.10.012
11. 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 // *Optics Letters*. 2002. V. 27. N 15. P. 1306–1308.
12. Magne J., Bolger J., Rochette M., LaRochelle S., Chen L.R., Eggleton B.G., Azana J. Generation of a 4×100 GHz pulse-train from a single-wavelength 10-GHz mode-locked laser using superimposed fiber Bragg gratings and nonlinear conversion //

References

1. Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers. *Laser and Photonics Review*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 275–289. doi: 10.1002/lpor.200810010
2. Pinto J.L. Fiber Bragg grating sensors novel applications. *Latin America Optics and Photonics Conference*, 2012, paper LS2C.1. doi: 10.1364/LAOP.2012.LS2C.1
3. Roriz P., Carvalho L., Frazao O., Santos J.L., Simoes J.A. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: a review. *Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 47, no. 6, pp. 1251–1261. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.054
4. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kuma K., Hatate K. *Fiber-Optic Sensors*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991, 256 p. (In Russian)
5. Yoshino T., Sano Y., Ota D., Fujita K., Ikui T. Fiber-Bragg-grating based single axial mode Fabry-Perot interferometer and its strain and acceleration sensing applications. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 9, pp. 2240–2250. doi: 10.1109/JLT.2016.2521440
6. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 1978, vol. 32, no. 10, pp. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
7. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085–1103. doi: 10.1070/QE2005v03n12ABEH013041
8. Stam A.M., Idrisov R.F., Gribaev A.I., Varzhel' S.V., Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I. Fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer and KrF excimer laser system. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 466–473. (In Russian) doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473
9. Bartelt H., Schuster K., Unger S., Chojetzki C., Rothhardt M., Latka I. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 17, pp. 3417–3424. doi: 10.1364/AO.46.003417
10. Tokarev A.V., Anchutkin G.G., Varzhel S.V., Gribaev A.I., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K., Rothhardt M., Elsmann T., Becker M., Bartelt H. UV-transparent fluoropolymer fiber coating for the inscription of chirped Bragg gratings arrays. *Optics and Laser Technology*, 2017, vol. 89, pp. 173–178. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.10.012
11. 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. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, no. 15, pp. 1306–1308.
12. Magne J., Bolger J., Rochette M., LaRochelle S., Chen L.R., Eggleton B.G., Azana J. Generation of a 4×100 GHz pulse-

- Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. N 5. P. 2091–2099. doi: 10.1109/JLT.2006.872682
13. Othonos A., Lee X., Measures R.M. Superimposed multiple Bragg gratings // *Electronics Letters*. 1994. V. 30. N 23. P. 1972–1974. doi: 10.1049/el:19941359
 14. Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Стам А.М., Варжель С.В., Сложеникина Ю.И., Коннов К.А. Запись суперпозиций волоконных решёток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота // *Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 10. С. 56–60.
 15. Yusuke N., Shinji Y. Realization of various superstructure fiber Bragg gratings for DWDM systems using multiple-phase-shift technique // *Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*. Anaheim, USA, 2002. V. 70. P. 110–111.
 16. Miclos S., Savastru D., Savastru R., Lancranjan I.I. Design of a smart superstructure FBG torsion sensor // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9517. Art. 95172B. doi: 10.1117/12.2188231
 17. Zheng Z., Qian Z., Shou G., Hu. Y. Orthogonal wavelength-division-multiplexing using SSFBGs in passive optical networks // *Proceedings of SPIE*. 2009. V. 7633. Art. 76331O. doi: 10.1117/12.852001
 18. 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. N 12. Art. 540.
- train from a single-wavelength 10-GHz mode-locked laser using superimposed fiber Bragg gratings and nonlinear conversion. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 5, pp. 2091–2099. doi: 10.1109/JLT.2006.872682
13. Othonos A., Lee X., Measures R.M. Superimposed multiple Bragg gratings. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 23, pp. 1972–1974. doi: 10.1049/el:19941359
 14. Idrisov R.F., Gribaev A.I., Stam A.M., Varzhel' S.V., Slozhenikina Yu.I., Konnov K.A. Recording superpositions of fiber Bragg gratings using the Talbot interferometer. *Opticheskii Zhurnal*, 2017, vol. 84, no. 10, pp. 56–60. (In Russian)
 15. Yusuke N., Shinji Y. Realization of various superstructure fiber Bragg gratings for DWDM systems using multiple-phase-shift technique. *Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*. Anaheim, USA, 2002, vol. 70, pp. 110–111.
 16. Miclos S., Savastru D., Savastru R., Lancranjan I.I. Design of a smart superstructure FBG torsion sensor. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9517, art. 95172B. doi: 10.1117/12.2188231
 17. Zheng Z., Qian Z., Shou G., Hu. Y. Orthogonal wavelength-division-multiplexing using SSFBGs in passive optical networks. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7633, art. 76331O. doi: 10.1117/12.852001
 18. 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, vol. 48, no. 12, art. 540.

Авторы

Коннов Кирилл Александрович – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kirillkonnov1991@gmail.com

Сложеникина Юлия Игоревна – инженер, АО «Котлин-Новатор», Санкт-Петербург, 192019, Российская Федерация, yuliaslozhenikina@gmail.com

Грибаев Алексей Иванович – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.gribaev@gmail.ru

Варжель Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vsv187@gmail.ru

Новикова Виктория Александровна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, novivial@mail.ru

Залесская Юлия Константиновна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, jz15@mail.ru

Дмитриев Андрей Анатольевич – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Dmitrieva1994@yandex.ru

Authors

Kirill A. Konnov – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kirillkonnov1991@gmail.com

Yulia I. Slozhenikina – engineer, JSC "Kotlin-Novator", Saint Petersburg, 192019, Russian Federation, yuliaslozhenikina@gmail.com

Alexey I. Gribaev – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.gribaev@gmail.ru

Sergey V. Varzhel – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vsv187@gmail.ru

Victoria A. Novikova – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, novivial@mail.ru

Yulia K. Zalesskaya – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, jz15@mail.ru

Andrey A. Dmitriev – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Dmitrieva1994@yandex.ru