

Оптический журнал

Расчет, проектирование и производство оптических систем
Calculation, design and production of optical systems

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-05-14

УДК 681.7.063

Исследование динамики записи суперпозиций чирпированных волоконных брэгговских решеток

Анна Ладимировна Волошина¹✉, Андрей Анатольевич Дмитриев²,
Сергей Владимирович Варжель³, Варвара Александровна Куликова⁴,
Александра Игоревна Козлова⁵, Дарья Владимировна Калязина⁶

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹avoloshina@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>

²aadmitriev@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>

³svvarzhel@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁴kulikova_va@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>

⁵sashakozlova80@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>

⁶zina.kolazina@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7195-435X>

Аннотация

Предмет исследования. Анализ изменения спектральных характеристик чирпированных волоконных брэгговских решеток в составе суперпозиции во время их изготовления. Цель работы. Исследование динамики изменения спектральных характеристик чирпированных волоконных брэгговских решеток в процессе их записи. Метод. С использованием эксимерной лазерной системы на KrF и интерферометра Тальбота в телекоммуникационном одномодовом оптическом волокне стандарта G.657.A2 индуцируется суперпозиция, состоящая из четырех решеток Брэгга с переменным по длине периодом. В процессе изготовления дифракционных структур оценивается изменение спектральных характеристик чирпированных волоконных брэгговских решеток в зависимости от суммарной дозы облучения. **Основные результаты.** Демонстрируются зависимости изменения коэффициента отражения, ширины на полувысоте спектрального отклика и центральной длины волны брэгговского резонанса каждой чирпированной решетки Брэгга в составе суперпозиции от суммарной дозы облучения участка оптического волокна ультрафиолетовой интерференционной картиной. Приводятся численные значения модуляции спектральных характеристик дифракционных структур. **Практическая значимость.** Результаты работы представляют существенную значимость в области волоконной оптики, в частности — в создании волоконно-оптических приборов на основе брэгговских отражателей. Проведенный анализ демонстрирует зависимости изменения спектральных характеристик волоконных структур при их индуцировании в составе суперпозиции. Результаты исследования могут быть полезны в оптимизации процесса изготовления волоконно-оптических устройств на основе суперпозиций чирпированных решеток Брэгга, что позволит с высокой точностью достигать требуемых характеристик дифракционных структур.

Ключевые слова: чирпированная волоконная брэгговская решетка, изготовление решеток Брэгга, интерферометр Тальбота, суперпозиции чирпированных решеток Брэгга, спектральные характеристики

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030» с использованием уникальной научной установки № 506865 «Многофункциональная установка по интерферометрической записи волоконных брэгговских решеток и специальных структур на их основе».

Ссылка для цитирования: Волошина А.Л., Дмитриев А.А., Варжель С.В., Куликова В.А., Козлова А.И., Калязина Д.В. Исследование динамики записи суперпозиций чирпированных волоконных брэгговских решеток // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 5–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-05-14>

Коды OCIS: 060.0060, 060.2310, 060.3735

Inscription study of superimposed chirped fiber Bragg gratings

**ANNA L. VOLOSHINA¹✉, ANDREI A. DMITRIEV², SERGEY V. VARZHEL³,
VARVARA A. KULIKOVA⁴, ALEXANDRA I. KOZLOVA⁵, DARIA V. KALIAZINA⁶**

ITMO University, St. Petersburg, Russia

¹avoloshina@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>

²aadmitiev@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>

³svvarzhel@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁴kulikova_va@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>

⁵sashakozlova80@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>

⁶zina.koliazina@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-7195-435X>

Abstract

Subject of study. The change in the spectral characteristics of superimposed chirped fiber Bragg gratings during their inscription is analyzed. **Aim of study.** Investigation of the dynamics of changes in the spectral characteristics of chirped fiber Bragg gratings during inscription is performed.

Method. Using a KrF excimer laser system and a Talbot interferometer, the diffractive structures consisting of four chirped Bragg gratings with a period variable in length are inscribed in a standard telecommunication single-mode optical fiber (G.657.A2). During the inscription of the fiber structures, the change in the spectral characteristics is estimated depending on the total irradiation dose. **Main results.** The dependences of the change in the reflection coefficient, the full width at half maximum of the spectral response, and the Bragg resonance wavelength of each chirped Bragg grating of the superimposed structure on the total dose of irradiation are demonstrated. Numerical values of the spectral characteristics' modulation are given. **Practical significance.** The results of the work are important in the field of fiber optics, especially in the develop of fiber-optic devices based on Bragg reflectors. The analysis demonstrates the dependences of the change in the spectral characteristics of fiber structures during inscription. The study can be used to optimize the develop of fiber-optic devices based on superimposed chirped Bragg gratings, which allows achieving the required diffractive structures characteristics with high accuracy.

Keywords: chirped fiber Bragg gratings, inscription of fiber Bragg gratings, Talbot interferometer, superimposed fiber Bragg gratings, spectral parameters

Acknowledgment: the work was financially supported by the Priority 2030 program using a unique scientific installation № 506865 "Multifunctional installation for interferometric recording of fiber Bragg gratings and special structures based on them".

For citation: Voloshina A.L., Dmitriev A.A., Varzhel S.V., Kulikova V.A., Kozlova A.I., Kaliazina D.V. Inscription study of superimposed chirped fiber Bragg gratings [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 5–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-05-14>

OCIS codes: 060.0060, 060.2310, 060.3735

ВВЕДЕНИЕ

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) находят применение в качестве резонаторов волоконных лазеров [1], оптических фильтров [2, 3] и датчиков физических величин [4–7].

При изготовлении таких волоконно-оптических приборов необходимо использование ВБР, индуцированных с высокоточным соблюдением требуемых спектральных характеристик. Например, при создании амплитудных воло-

конно-оптических устройств мониторинга температуры и деформации [4, 8] необходимы такие дифракционные решетки, которые будут удовлетворять требованиям конечного устройства к рабочему диапазону и чувствительности измерений. Данные характеристики зависят от центральной длины волны брэгговского резонанса, а также ширины спектра отражения на полувысоте¹ (FWHM) и коэффициента отражения волоконной структуры.

При изготовлении ВБР происходит изменение ее спектральных характеристик, таких как центральная длина волны брэгговского резонанса, FWHM и коэффициент отражения структуры. Приведенные характеристики изменяются в зависимости от суммарной дозы облучения световода: в процессе индуцирования ВБР длина волны брэгговского резонанса смещается в длинноволновую область спектра, а FWHM и коэффициент отражения структуры увеличиваются. В случае записи одиночной решетки Брэгга отследить динамику изменения спектральных параметров достаточно просто. Однако при изготовлении суперпозиции ВБР каждая последующая структура, индуцированная в одну и ту же область оптического волокна (ОВ), оказывает влияние на спектральные характеристики записанной ранее ВБР. Для оптимизации процесса изготовления дифракционных структур в ОВ проводятся исследования динамики записи ВБР [9–10], которые позволяют обеспечить требуемые характеристики дифракционных структур с высокой точностью.

Целью данной работы является исследование изменения спектральных характеристик чирпированных волоконных брэгговских решеток (ЧВБР) в составе суперпозиции при их индуцировании.

В процессе изготовления дифракционных структур оценивается смещение центральной длины волны брэгговского резонанса каждой ЧВБР, увеличение ширины на полувысоте их спектра отражения и изменение коэффициента отражения в зависимости от суммарной дозы облучения ОВ. Проводится численная оценка изменения исследуемых характеристик решеток Брэгга. Результаты анализа несут особую ценность для создания суперпозиций ЧВБР с точными спектральными характеристиками.

Проведенные эксперименты показывают наличие существенных изменений спектральных параметров дифракционных структур, а численные данные позволяют рассчитать модуляцию параметров каждой ЧВБР в составе суперпозиции при их последовательном индуцировании в ОВ. Проведенный анализ позволяет оптимизировать процесс записи суперпозиций ЧВБР и повысить точность их спектральных характеристик.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР

Суперпозиции ЧВБР длиной 5 мм изготовлены с помощью эксимерной лазерной KrF-системы «*Optosystems* MOPA CL-7550» и интерферометра Тальбота (рис. 1) [11–13]. Лазерная система обладает центральной длиной волны излучения 248,3 нм, максимальной энергией в импульсе 250 мДж, длительностью лазерного импульса 20 нс, частотой следования импульсов до 50 Гц и размером пучка на выходном окне 20×6 мм. В процессе изготовления дифракционных структур излучение с энергией в пучке 33,5 мДж и частотой следования импульсов 10 Гц фокусируется с помощью цилиндрической линзы с фокусным расстоянием 500 мм. Далее оно проходит через фазовую маску с периодом 700 нм и чирпингом 1 нм/см, на которой дифрагирует на ±1-е порядки дифракции, которые попадают на зеркала интерферометра Тальбота, установленные на высокопрецизионных моторизованных подвижках «*Thorlabs* NR360SP1/M». Фазовая маска сконструирована таким образом, чтобы максимальная доля излучения распределялась в ±1-е порядки дифракции. Нулевой порядок блокируется в схеме записи экранированием. При повороте зеркал интерферометра ±1-е порядки излучения сходятся в области установки ОВ и образуют интерференционную картину, с помощью которой осуществляется модуляция показателя преломления в его сердцевине. Плотность энергии в импульсе на поверхности ОВ составляет 320 мДж/см².

Изготовление суперпозиции ЧВБР происходит в телекоммуникационном одномодовом ОВ стандарта G.657.A2 производства АО «Оптико-волоконные системы». Дифракционные структуры изготавливаются следующим образом. С участка ОВ длиной 40 мм снимается поли-

¹ Full width at half maximum (FWHM).

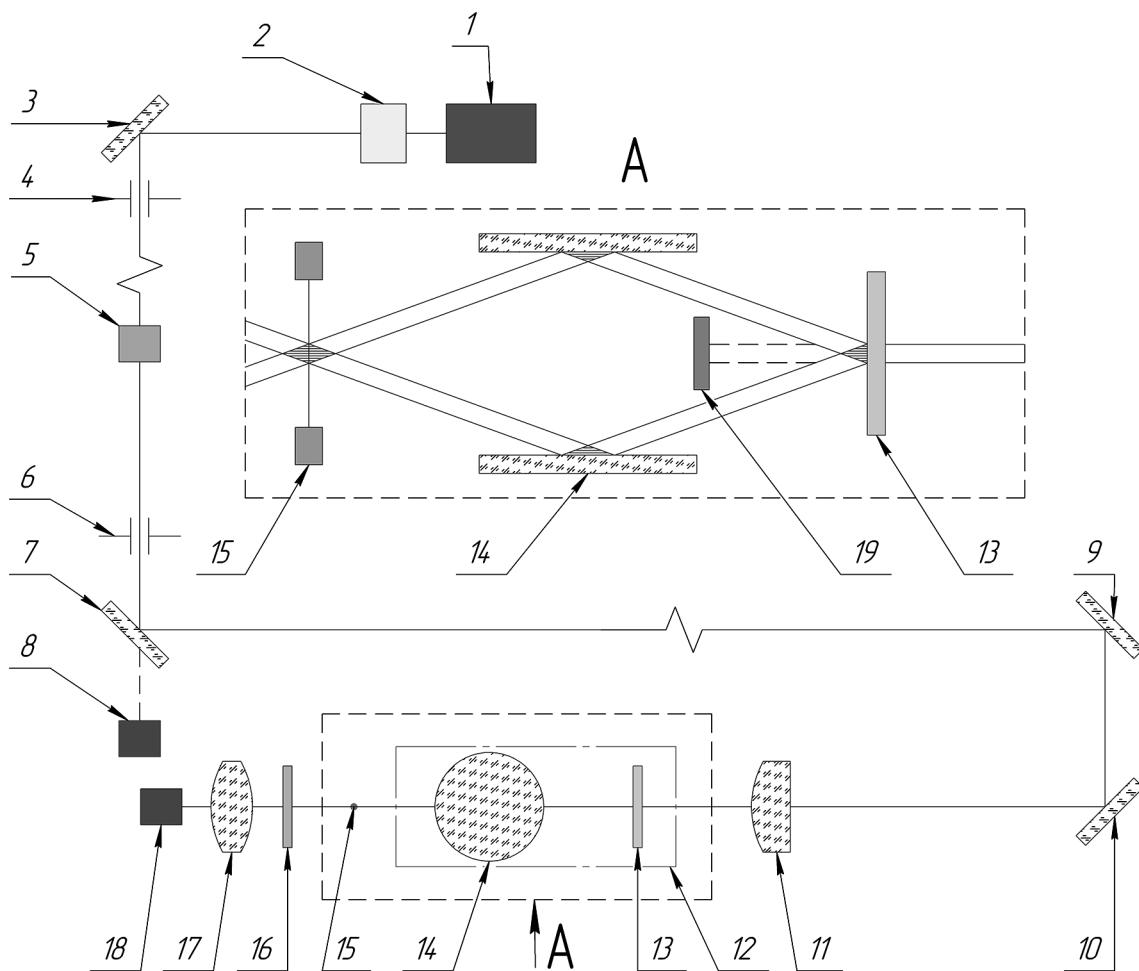


Рис. 1. Схема записи ВБР с использованием интерферометра Тальбота. 1 — KrF-лазер с длиной волны излучения 248,3 нм, 2 — оптомеханический затвор, 3, 7, 9, 10 — зеркала, 4 — ирисовая диафрагма, 5 — аттенюатор, 6 — апертурная диафрагма, 8 — анализатор профиля пучка, 11 — цилиндрическая линза, 12 — интерферометр Тальбота, состоящий из фазовой маски 13 и зеркал Тальбота 14, 15 — ОВ с держателем, 16 — флуоресцентная пластина, 17 — линза, 18 — камера, 19 — экран, поглощающий излучение 0-го порядка дифракции

Fig. 1. Fiber Bragg gratings inscription scheme using the Talbot interferometer. (1) KrF laser with a central emission wavelength of 248.3 nm, (2) optomechanical shutter, (3), (7), (9), (10) are mirrors, (4) iris diaphragm, (5) attenuator, (6) aperture diaphragm, (8) beam profile analyzer, (11) cylindrical lens, (12) Talbot interferometer, consisting of (13) a phase mask and (14) Talbot mirrors, (15) optical fiber with a holder, (16) fluorescent plate, (17) lens, (18) camera, (19) absorbing screen for zero diffraction order

мерная оболочка, что необходимо ввиду того, что защитное покрытие непрозрачно для ультрафиолетового (УФ) излучения. Оптическое волокно закрепляется с помощью магнитного держателя так, чтобы излучение попадало в «зачищенную» область световода. С помощью программного кода рассчитываются угол поворота зеркал Тальбота и положение интерферометра Тальбота относительно оптической оси для длины волны брэгговского резонанса 1570 нм. Юстируется схема: интерферометр

Тальбота транслируется вдоль оптической оси и с помощью поворотных зеркал Тальбота задается требуемый угол. После изготовления первой ЧВБР рассчитываются параметры схемы для следующей ЧВБР. После индуцирования четырех ЧВБР в одну область ОВ запись суперпозиции завершается. Вторая суперпозиция изготавливается аналогично.

В процессе записи дифракционная структура опрашивается с помощью широкополосного источника излучения «Thorlabs S5FC1550P-A2»

с центральной длиной волны излучения 1550 нм и шириной оптического спектра 70 нм и оптического анализатора спектра «Anritsu MS9740B» с разрешением 0,03 нм (рис. 2). Широкополосное излучение проходит через изолятор и Y-ответвитель и попадает на опрашиваемые структуры. Если необходимо на-

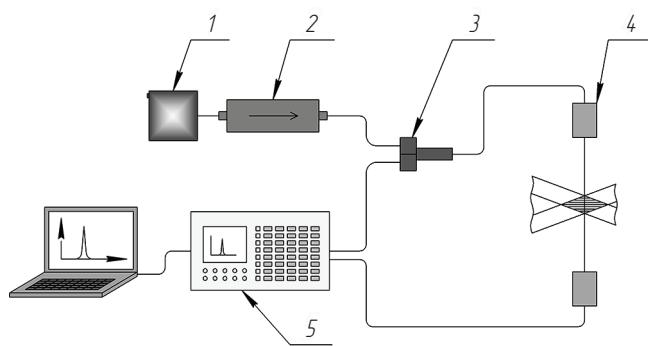


Рис. 2. Опрос ВБР во время записи. 1 — широкополосный источник излучения, 2 — оптический изолятор, 3 — Y-ответвитель, 4 — держатель ОВ, 5 — оптический анализатор спектра
Fig. 2. Fiber Bragg grating interrogation during the inscription. (1) Broadband radiation source, (2) optical isolator, (3) Y-coupler, (4) optical fiber holder, (5) optical spectrum analyzer

блюдать отраженное от дифракционной структуры излучение, то к оптическому анализатору спектра подключают порт Y-ответвителя, который содержит отраженный от структуры сигнал. При наблюдении спектра пропускания подключается патч-корд, содержащий прошедшее от структуры излучение.

Спектральные параметры изготовленных суперпозиций ЧВБР представлены в табл. 1 и 2, а их спектральные характеристики приведены на рис. 3.

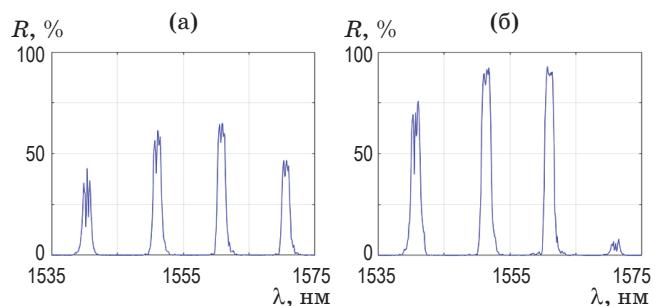


Рис. 3. Спектры отражения (R) первой (а) и второй (б) суперпозиций ЧВБР
Fig. 3. Reflection (R) spectra of the (a) 1st and (b) 2nd superimposed chirped fiber Bragg gratings

Таблица 1. Параметры первой суперпозиции ЧВБР
Table 1. Parameters of the 1st superimposed chirped fiber Bragg gratings

ЧВБР в составе суперпозиции	Центральная длина волны брэгговского резонанса, λ , нм	Ширина на полувысоте, $\Delta\lambda$, нм	Коэффициент отражения, %	Чирпинг, нм/см
1	1570,580	1,284	50	0,879
2	1560,815	1,309	65	0,897
3	1551,055	1,291	55	0,884
4	1540,357	1,271	45	0,871

Таблица 2. Параметры второй суперпозиции ЧВБР
Table 2. Parameters of the 2nd superimposed chirped fiber Bragg gratings

ЧВБР в составе суперпозиции	Центральная длина волны брэгговского резонанса, λ , нм	Ширина на полувысоте, $\Delta\lambda$, нм	Коэффициент отражения, %	Чирпинг, нм/см
1	1561,143	1,507	92	1,032
2	1551,574	1,484	93	1,016
3	1540,857	1,481	80	1,014
4	1571,170	1,286	12	0,881

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализирована динамика изменения спектральных характеристик ЧВБР в составе суперпозиции при индуцировании их в ОВ. Графики зависимости коэффициента отражения каждой ЧВБР во время ее записи от суммарной дозы облучения, а также изменения спектральных характеристик первой ЧВБР при записи всей суперпозиции представлены на рис. 4–7.

При облучении ОВ УФ интерференционной картиной в германо-силикатном световоде

происходит возникновение периодической модуляции показателя преломления, называемой ВБР. Авторы работы [14] отмечают, что больший вклад в создание ВБР оказывает электрострикция. Интерференционная картина фотоионизирует германиевые кислородно-дефицитные центры, создавая неподвижные положительные заряды и свободные электроны. Происходит диффузия частиц, в процессе которой отрицательно заряженные частицы сосредотачиваются в области с меньшей интенсивностью интерференционной картины.

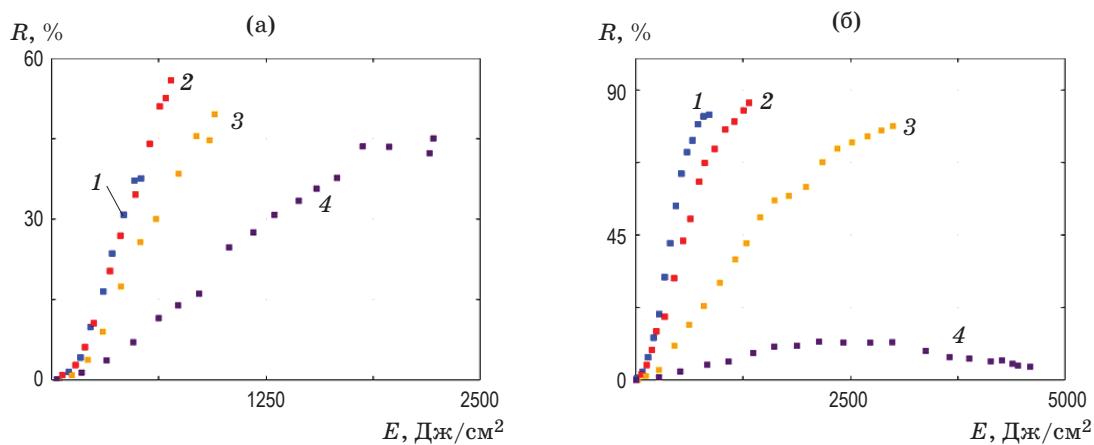


Рис. 4. Изменение коэффициента отражения (R) всех ЧВБР во время записи. Первая ЧВБР (1), вторая ЧВБР (2), третья ЧВБР (3), четвертая ЧВБР (4) в составе первой (а) и второй (б) суперпозиций

Fig. 4. Change in the reflection coefficient (R) of all chirped fiber Bragg gratings (CFBG) during the inscription of (1) the 1st CFBG, (2) the 2nd CFBG, (3) the 3rd CFBG, (4) the 4th CFBG in the composition of (a) the first superimposed structure, (b) the second superimposed structure

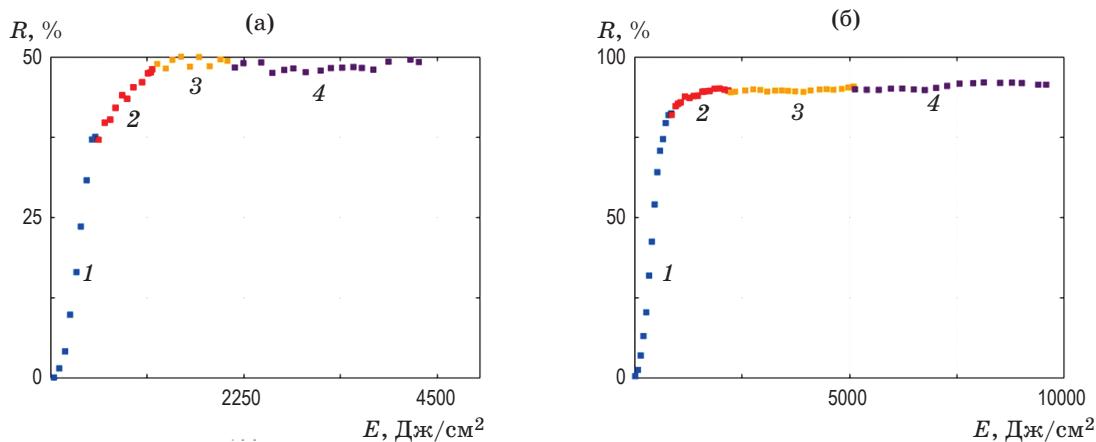


Рис. 5. Изменение коэффициента отражения первой ЧВБР во время записи первой ЧВБР (1), второй ЧВБР (2), третьей ЧВБР (3), четвертой ЧВБР (4) в составе первой (а) и второй (б) суперпозиций

Fig. 5. Change in the reflection coefficient of the first chirped fiber Bragg grating (CFBG) during the inscription of (1) the 1st CFBG, (2) the 2nd CFBG, (3) the 3rd CFBG, (4) the 4th CFBG in the composition of (a) the first superimposed structure, (b) the second superimposed structure

Некоторые электроны не возвращаются на исходные доноры, вследствие этого образуются избыточные отрицательный и положительный заряды. Создается электрическое поле, способствующее растяжению и сжатию сердцевины ОВ. В результате деформации образуется решетка с периодическим показателем преломления.

При изготовлении следующей ВБР в составе суперпозиции, т.е. при повторном облучении

того же участка ОВ, производительность описанного выше процесса снижается. Индуцирование нескольких ЧВБР в один участок ОВ ограничено фоторефрактивностью ОВ. Результаты исследования, которые продемонстрированы на рис. 4, согласуются с теорией: при более длительном облучении ОВ эффективность записи ЧВБР в составе суперпозиции снижается. Заметно, что четвертая ЧВБР в составе суперпозиции с коэффициентами

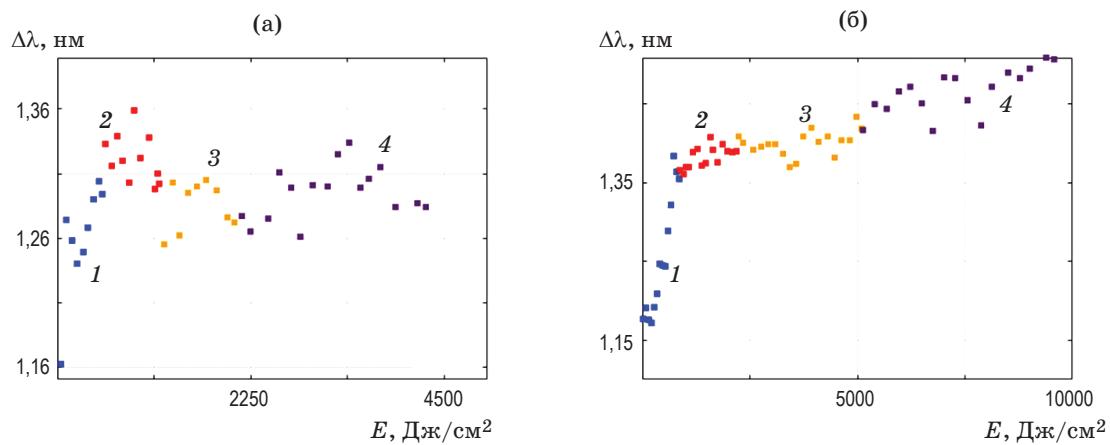


Рис. 6. Изменение ширины на полувысоте спектра отражения первой ЧВБР во время записи первой ЧВБР (1), второй ЧВБР (2), третьей ЧВБР (3), четвертой ЧВБР (4) в составе первой (а) и второй (б) суперпозиций

Fig. 6. Change in the FWHM of the reflection spectrum of the first chirped fiber Bragg grating (CFBG) during the inscription of (1) the 1st CFBG, (2) the 2nd CFBG, (3) the 3rd CFBG, (4) the 4th CFBG in the composition of (a) the first superimposed structure, (b) the second superimposed structure

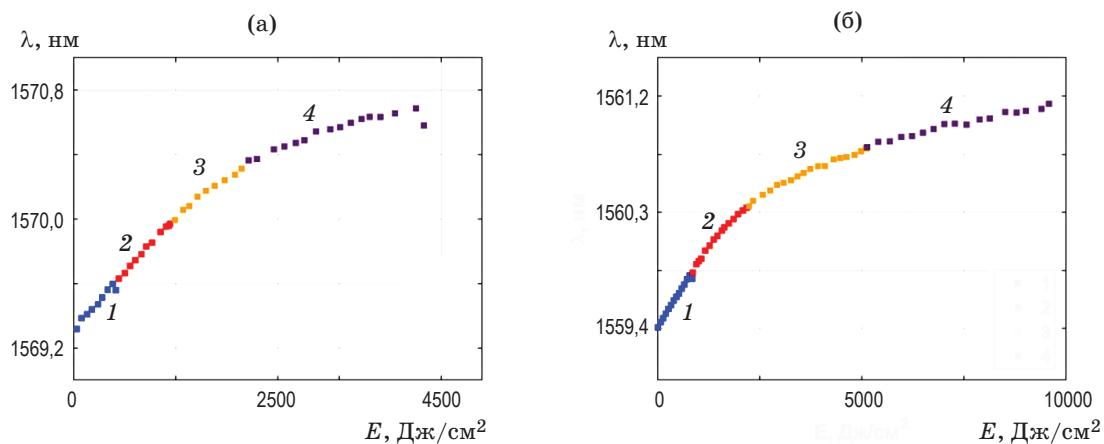


Рис. 7. Изменение центральной длины волны брэгговского резонанса первой ЧВБР во время записи первой ЧВБР (1), второй ЧВБР (2), третьей ЧВБР (3), четвертой ЧВБР (4) в составе первой (а) и второй (б) суперпозиций

Fig. 7. Change in the central wavelength of the Bragg resonance of the first chirped fiber Bragg grating (CFBG) during the inscription of (1) the 1st CFBG, (2) the 2nd CFBG, (3) the 3rd CFBG, (4) the 4th CFBG in the composition of (a) the first superimposed structure, (b) the second superimposed structure

Таблица 3. Изменение спектральных характеристик первой структуры
Table 3. The changes in the spectral characteristics of the 1st structure

Наимено- вание	E, Дж/см ²	Первая ЧВБР			Вторая ЧВБР			Третья ЧВБР			Четвертая ЧВБР		
		FWHM, нм	dR, %	dλ, нм	FWHM, нм	dR, %	dλ, нм	FWHM, нм	dR, %	dλ, нм	FWHM, нм	dR, %	dλ, нм
При записи 1-й ЧВБР	522,5	0,13	37	0,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—
При записи 2-й ЧВБР	696,7	0,00	11	0,34	0,05	57	0,26	—	—	—	—	—	—
При записи 3-ей ЧВБР	951,6	0,02	1	0,32	0,03	5	0,29	0,16	50	0,28	—	—	—
При записи 4-й ЧВБР	2225,7	0,01	1	0,22	0,03	3	0,23	0,00	6	0,21	0,14	45	0,19

Таблица 4. Изменение спектральных характеристик второй структуры
Table 4. The changes in the spectral characteristics of the 2nd structure

Наимено- вание	E, Дж/см ²	Первая ЧВБР			Вторая ЧВБР			Третья ЧВБР			Четвертая ЧВБР		
		FWHM, нм	dR, %	dλ, нм	FWHM, нм	dR, %	dλ, нм	FWHM, нм	dR, %	dλ, нм	FWHM, нм	dR, %	dλ, нм
При записи 1-й ЧВБР	858,0	0,18	82	0,38	—	—	—	—	—	—	—	—	—
При записи 2-й ЧВБР	1328,9	0,02	8	0,50	0,24	87	0,46	—	—	—	—	—	—
При записи 3-ей ЧВБР	2993,4	0,01	2	0,45	0,05	4	0,40	0,29	78	0,51	—	—	—
При записи 4-й ЧВБР	4590,0	0,09	2	0,34	0,02	2	0,33	0,09	3	0,34	0,89	12	0,15

отражения, близкими к 100%, не достигает требуемого значения.

Облучение сердцевины ОВ при изготовлении каждой последующей ЧВБР изменяет спектральные характеристики предыдущей структуры вследствие изменения среднего показателя преломления участка сердцевины ОВ. На рис. 7 демонстрируется сдвиг центральной длины волны брэгговского резонанса первой ЧВБР на протяжении записи суперпозиции.

Значение модуляции показателя преломления сердцевины ОВ влияет на ширину спектра дифракционных структур на полувысоте [15]. При изготовлении суперпозиции ЧВБР, дифракционные эффективности которых близки к 100%, замечается уширение спектра на полувысоте первой ЧВБР в составе суперпо-

зиции при записи последующих волоконных структур (рис. 6).

Облучение во время изготовления второй ЧВБР воздействует на предыдущую ЧВБР, увеличивая коэффициент отражения на 10% (рис. 5). Это связано с малым различием периодов ЧВБР в составе суперпозиции, из-за чего последующая запись ЧВБР оказывает влияние на предыдущие.

В табл. 3 и 4 представлены численные значения изменения спектральных характеристик каждой ЧВБР во время записи суперпозиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования с помощью эксимерной лазерной системы на KrF и интерфероме-

тра Тальбота в сердцевине ОВ были изготовлены суперпозиции ЧВБР длиной 5 мм. При индуцировании каждой волоконной структуры проведена оценка изменения спектральных характеристик каждой ЧВБР в составе суперпозиции.

В ходе работы подтверждено наличие изменения спектральных характеристик дифракционных структур при облучении сердцевины ОВ УФ интерференционной картиной. Оценены сдвиг центральной длины волны брэгговского резонанса, изменение ширины спектра на полувысоте, а также рост коэффициента отражения ЧВБР в зависимости от суммарной дозы облучения участка ОВ. Определены характеристические зависимости модуляции спектраль-

ных параметров и дано физическое обоснование полученным результатам.

Таким образом, проведенное исследование оптимизировало процесс изготовления волоконно-оптических устройств на основе суперпозиций ЧВБР, позволяя с высокой точностью достигать требуемые характеристики структур.

Результаты исследования представляют интерес в сфере создания волоконно-оптических измерительных приборов, оптических фильтров, резонаторов лазеров, так как эти применения требуют изготовления ВБР с точными параметрами. Для создания таких структур необходимо учитывать влияние дозы облучения на параметры участка ОВ с дифракционной структурой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Deng J., Li Y., Shen M., et al. Single-frequency random distributed bragg reflector fiber laser // *J. Lightwave Technol.* 2022. V. 40. № 13. P. 4385–4390. <https://doi.org/10.1109/jlt.2022.3160490>
2. Wang Ch., Li X., Zhang Sh., et al. Wavelength and bandwidth tunable filter and its application in a dissipative soliton fiber laser // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. № 11. P. 2698–2701. <https://doi.org/10.1364/OL.460051>
3. Hunter D.B. and Minasian R.A. Microwave optical filters using in-fiber Bragg grating arrays // *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* 1996. V. 6. № 2. P. 103. <https://doi.org/10.1109/75.482003>
4. Dmitriev A.A., Varzhel S.V., Grebnev K.V., et al. Strain gauge based on n-pairs of chirped fiber Bragg gratings // *Opt. Fiber Technol.* 2022. V. 70. P. 102893. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102893>
5. Дмитриев А.А., Гребнев К.В., Варжель С.В. и др. Волоконнооптический датчик вибрации на основе SMF-MMF-SMF перехода и наклонной решетки Брэгга // Научно-техн. вест. инф. технол., механики и оптики. 2021. Т. 21. № 6. С. 801–807. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807>
6. Moor Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю. и др. Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами // Научно-техн. вест. инф. технол., механики и оптики. 2022. Т. 22. № 3. С. 442–449. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449>
7. Novikova V.A., Varzhel S.V., Tokareva I.D., et al. Liquid flow motion rate measuring method, based on the fiber Bragg gratings // *Opt. and Quant. Electron.* 2020. V. 52. P. 132. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-2257-2>
8. Zhang H., Jiang J., Liu S., et al. Overlap spectrum fiber Bragg grating sensor based on light power demodulation // *Sensors (Switzerland)*. 2018. V. 18. № 5. P. 1597. <https://doi.org/10.3390/s18051597>
9. Михнева А.А., Грибаев А.И., Варжель С.В. и др. Запись и исследование спектральных характеристик чирпированных волоконных решеток Брэгга // Оптический журнал. 2018. Т. 95. № 9. С. 12–16. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-09-12-16>

REFERENCES

1. Deng J., Li Y., Shen M., et al. Single-frequency random distributed bragg reflector fiber laser // *J. Lightwave Technol.* 2022. V. 40. № 13. P. 4385–4390. <https://doi.org/10.1109/jlt.2022.3160490>
2. Wang Ch., Li X., Zhang Sh., et al. Wavelength and bandwidth tunable filter and its application in a dissipative soliton fiber laser // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. № 11. P. 2698–2701. <https://doi.org/10.1364/OL.460051>
3. Hunter D.B. and Minasian R.A. Microwave optical filters using in-fiber Bragg grating arrays // *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* 1996. V. 6. № 2. P. 103. <https://doi.org/10.1109/75.482003>
4. Dmitriev A.A., Varzhel S.V., Grebnev K.V., et al. Strain gauge based on n-pairs of chirped fiber Bragg gratings // *Opt. Fiber Technol.* 2022. V. 70. P. 102893. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102893>
5. Dmitriev A.A., Grebnev K.V., Varzhel S.V., et al. A fiber optic vibration sensor based on SMF-MMF-SMF structure and a tilted fiber Bragg grating [in Russian] // *Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* 2021. V. 21. № 6. P. 801–807. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807>
6. Moor Ia.D., Konnov K.A., Plotnikov M.Yu., et al. High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry–Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures [in Russian] // *Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* 2022. V. 22. № 3. P. 442–449. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449>
7. Novikova V.A., Varzhel S.V., Tokareva I.D., et al. Liquid flow motion rate measuring method, based on the fiber Bragg gratings // *Opt. and Quant. Electron.* 2020. V. 52. P. 132. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-2257-2>
8. Zhang H., Jiang J., Liu S., et al. Overlap spectrum fiber Bragg grating sensor based on light power demodulation // *Sensors (Switzerland)*. 2018. V. 18. № 5. P. 1597. <https://doi.org/10.3390/s18051597>
9. Mikhneva A.A., Gribaev A.I., Varzhel' S.V., et al. In-scription and investigation of the spectral characteristics of chirped fiber Bragg gratings // *J. Opt. Technol.* 2018. V. 85. № 9. P. 531–534. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000531>

10. Коннов К.А., Сложеникина Ю.И., Грибаев А.И. и др. Исследование и оптимизация процесса записи суперпозиций волоконных решеток Брэгга // Научно-техн. вест. инф. технол., механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1004–1010. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010>
11. Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Стам А.М. и др. Запись суперпозиций волоконных решёток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 10. С. 56–60. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473>
12. Dmitriev A.A., Gribaev A.I., Varzhel S.V., et al. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method // Opt. Fiber Technol. 2021. V. 63. P. 102508. <https://doi.org/10.1016/J.YOFTE.2021.102508>
13. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., et al. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // Opt. Quant. Electron. 2016. V. 48. P. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
14. Неуструев В.Б. Электрострикционный механизм образования брэгговской решетки в германосиликатных световодах // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 11. С. 1003–1006. <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n11ABEH002092>
15. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.

АВТОРЫ

Анна Ладимировна Волошина — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57997721200; <https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>; avoloshina@itmo.ru
Андрей Анатольевич Дмитриев — кандидат технических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57215003358; <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>; aadmitriev@itmo.ru

Сергей Владимирович Варжель — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Варвара Александровна Куликова — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57997721300; <https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>; 4kulikova_va@itmo.ru

Александра Игоревна Козлова — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>; sashakozlova80@gmail.com

Дарья Владимировна Кализина — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-7195-435X>; zina.koliazina@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27.02.2023
 Одобрена после рецензирования 24.04.2023
 Принята к печати 29.05.2023

10. Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I., Gribaev A.I., et al. Inscription process research and optimization for superimposed fiber Bragg gratings [in Russian] // Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 2017. V. 17. №. 6. P. 1004–1010. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-6-1004-1010>
11. Idrisov R. F., Gribaev A. I., Stam A. M., et al. A. Inscription of superimposed fiber Bragg gratings using a Talbot interferometer // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 10. P. 694–697. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000694>
12. Dmitriev A.A., Gribaev A.I., Varzhel S.V., et al. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method // Opt. Fiber Technol. 2021. V. 63. P. 102508. <https://doi.org/10.1016/J.YOFTE.2021.102508>
13. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., et al. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // Opt. Quant. Electron. 2016. V. 48. P. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
14. Neustruev V.B. Electrostriction mechanism of Bragg grating formation in germanosilicate fibres // Quant. Electron. 2001. V. 31. № 11. P. 1003. <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n11ABEH002092>
15. Varzhel S.V. Fiber Bragg gratings [in Russian]. St. Petersburg: ITMO University, 2015. 65 p.

AUTHORS

Anna L. Voloshina — Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57997721200; <https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>; avoloshina@itmo.ru

Andrei A. Dmitriev — PhD, Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57215003358; <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>; aadmitriev@itmo.ru

Sergey V. Varzhel — PhD, Associate Professor, Head of the laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Varvara A. Kulikova — Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57997721300; <https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>; 4kulikova_va@itmo.ru

Alexandra I. Kozlova — Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>; sashakozlova80@gmail.com

Daria V. Kaliazina — Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-7195-435X>; zina.koliazina@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 27.02.2023
 Approved after review 24.04.2023
 Accepted for publication 29.05.2023