УДК 681.586.5

В.Г. Беспрозванных, С.В. ЗыряновПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ
АПОДИЗАЦИИ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК**

Предложено повысить эффективность записи аподизированных волоконных брэгговских решеток путем сочетания программных и аппаратных средств. Представлена разработка новой конструкции амплитудных масок, основанных на выборе наиболее адекватных решаемой задаче функций аподизации, с проведением математического моделирования и серии экспериментов по исследованию влияния различных физических факторов на процессы записи и эксплуатации аподизированных решеток. Показана целесообразность применения модифицированной оптической схемы записи аподизированных решеток с дополнительной фокусировкой лазерного луча в плоскости за оптическим волокном и установкой соответствующих амплитудных масок. Результаты и программные продукты могут быть использованы для эффективного подавления боковых резонансов в спектре отражения волоконных брэгговских решеток, а также для прогнозирования и оптимизации спектральных характеристик аподизированных и других типов неоднородных решеток.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, аподизация, моделирование спектральных характеристик, амплитудная маска, боковые резонансы, программные и аппаратные средства.

V.G. Besprozvannykh, S.V. Zyrianov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE EFFICIENCY INCREASE
OF FIBER BRAGG GRATINGS APODIZATION
TECHNOLOGY**

In this paper we propose the efficiency increase of apodized fiber Bragg gratings recording by means of software and hardware environment combination. We present a new design of the amplitude masks, based on choosing the most adequate apodization functions, with maintenance by mathematical modeling and experiment series about different physical factors influence upon the processes of apodized gratings recording and operation. It is expedient to apply the modified optical scheme of apodized gratings recording with additional laser beam focusing and appropriate amplitude masks installing. The results and software products can be used for effective suppressing of lateral peaks in reflection spectrum of fiber Bragg gratings and for predicting and optimizing the spectral characteristics of apodized and other types of non-uniform gratings.

Keywords: fiber Bragg grating, apodization, modeling the spectral characteristics, amplitude mask, lateral peaks, software and hardware environment.

Введение

В настоящее время волоконные брэгговские решетки (ВБР) являются одним из ключевых элементов различных устройств волоконной оптики. Их востребованность обусловлена уникальными спектральными свойствами, полностью волоконным исполнением, малыми вносимыми потерями. ВБР, в частности, применяются в качестве компенсаторов дисперсии, фильтров для разделения каналов и составных частей мультиплексоров и демультиплексоров в волоконно-оптических линиях связи, зеркал резонаторов волоконных и полупроводниковых лазеров, чувствительных элементов точечных волоконно-оптических датчиков физических величин и др. Фактически разработка и производство ВБР различных типов представляет собой одно из инновационных направлений развития фотоники и волоконной оптики [1, 2].

Конкретные применения ВБР предъявляют определенные требования к форме спектра отражения, которая зависит от профиля показателя преломления решетки. В спектрах записанных однородных решеток у каждого края полосы блокирования обычно наблюдаются боковые резонансы, положение которых определяется длиной ВБР (рис. 1) [3]. Эти боковые резонансы возникают в результате суммирования по фазе слабых отражений, возникающих на двух концах решетки, где коэффициент преломления резко изменяется относительно своего значения за пределами решетки.

Рис. 1. Спектр отражения $R(\lambda)$ (сплошная кривая) и групповая задержка $\tau(\lambda)$ (штриховая кривая) однородной ВБР [3]

Наличие боковых резонансов является негативным эффектом для ВБР как оптического фильтра, приводящим к расщеплению спектра отражения, деформации полосы блокирования решетки, изменению ее чувствительности к различным режимам работы. В связи с этим од-

ним из общих требований к ВБР является подавление боковых резонансов в спектре.

Для этой цели применяется технология *аподизации* ВБР (т.е. «отсекание лепестков»). В данной работе предлагается проводить процедуру записи аподизированных решеток в два этапа: на первом этапе создается периодическая отражающая структура с неоднородной по длине решетки амплитудой, на втором – выравнивается средний эффективный показатель преломления по длине решетки.

В табл. 1 представлена классификация ВБР для некоторых основных типов спектров отражения.

Таблица 1

Классификация ВБР по форме спектров отражения

№ п/п	Тип ВБР и профиль показателя преломления сердцевины	Спектр отражения
1	Однородная
2	Аподизированная: – с различным по длине решетки средним значением показателя преломления (гауссовый профиль); – с постоянным по длине решетки средним значением показателя преломления

Окончание табл. 1

№ п/п	Тип ВБР и профиль показателя преломления сердцевины	Спектр отражения
3	Чирпированная
4	С фазовым сдвигом

Для стандартных ВБР в процессе записи наблюдается увеличение наведенного показателя преломления, и, как следствие, брэгговская длина волны λ_B приобретает красное смещение. Эти решетки могут быть стерты при температуре порядка $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Они наиболее часто используются в телекоммуникационных сетях и волоконно-оптических датчиках в диапазоне температур от -40 до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

В работе [5] описаны некоторые методы, применяемые при изготовлении аподизированных решеток:

1. Метод сканирования по длине решетки: может применяться как для импульсных, так и для непрерывных лазеров с любым распределением интенсивности пучка. Его применение нерационально в том случае, если физическая длина требуемой ВБР не превышает ширины фазовой маски и размера пучка лазера.

2. Запись гауссовым пучком лазера: позволяет без внесения дополнительных оптических элементов осуществлять запись ВБР на оптическом волокне с заданным профилем показателя преломления с высокой точностью. Требуется наличие УФ-лазера с естественным распределением интенсивности пучка по кривой Гаусса [6].

3. Применение амплитудных масок: подходит для всех УФ-лазеров, требует фокусировки луча лазера в сердцевине волокна. Крайне простая реализация в виде металлической щели, пропускающей только часть лазерного пучка определенной формы. Метод отличается очень низкой ценой изготовления амплитудных масок, простотой в обращении с ними, долговечностью [7].

4. Применение маски с переменной степенью пропускания (полупропускающей маски), которая представляет собой диэлектрическую пластинку с переменным коэффициентом пропускания. Функция степени пропускания по длине маски может быть любой. В данном методе отсутствует требование фокусировки луча в сердцевине волоконного световода [8].

Весьма актуальными являются разработка оптимальных конструкций амплитудных масок для записи аподизированных ВБР и совершенствование соответствующих программных и аппаратных средств.

Активно применяется метод поточечного изготовления ВБР [9], при этом запись «штрихов» происходит индивидуальными импульсами фемтосекундного ИК-лазера, сфокусированными в области сердцевинного волоконного световода. В данном методе можно получить необходимый профиль показателя преломления по длине волокна с помощью либо контроля мощности лазерных импульсов, либо перемещения точки фокусировки импульсов по сечению волоконного световода.

Рассмотренные методы позволяют добиться специальной формы наведенного профиля показателя преломления, возможные варианты которых описаны в работе [10].

В публикациях [11–13] представлена реализация технически несложных голографических методов записи, обеспечивающих подавление боковых резонансов в спектре отражения ВБР без использования сканирования.

Данная работа посвящена расчетно-экспериментальному исследованию спектральных характеристик аподизированных ВБР в процессе их записи с разработкой специальных комбинированных амплитудных масок для повышения эффективности технологии аподизации.

1. Постановка задачи исследования

В основе исследования лежит практическая задача, решаемая на производственной площадке ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь), – необходимость получения с помощью станции записи FBGMW аподи-

зированных решеток показателя преломления с подавлением боковых пиков до уровня -40 дБ одновременно с достижением величины коэффициента отражения не менее 90 % при физической длине решетки не более 6 мм. Следует заметить, что на данной станции используется метод записи брэгговских решеток через фазовые маски.

Для изготовления решеток использовалось оптическое волокно производства компании Sumitomo Electric Industries Ltd., с минимальным пиком поглощения воды PureBand и отвечающее стандарту ITU-TG.652D. Для данного волокна производителем заявлен показатель преломления для длин волн в области 1550 нм, равный 1,4670. Для увеличения фоточувствительности волокно проходило водородную обработку, что увеличивает показатель преломления сердцевины, поэтому следует учесть вносимую водородом поправку к величине показателя преломления в размере 0,0013.

Наиболее распространенной формой профиля показателя преломления аподизированных ВБР является кривая Гаусса (см. табл. 1). Известно, что при одних и тех же степени облучения и физической длине решетки, но при различных формах кривой аподизации получаются различные максимальные коэффициенты отражения. Данная проблема относительно аподизации по кривой Гаусса описывается в работе [14]. Фактические параметры решеток, полученные на установке FBGMW для аналогичного случая, соответствуют коэффициентам отражения примерно 73 % и подавлению боковых резонансов до уровня -35 дБ.

Исходя из решаемой задачи и приведенных данных, можно заключить, что следует проанализировать и другие, помимо гауссовой кривой, подобные ей формы профилей наведенного показателя преломления для аподизации ВБР, а также провести математическое моделирование. Наиболее распространенные кривые аподизации описаны в работе [14]. Кроме того, для достижения требуемых значений коэффициента отражения и уровней подавления боковых пиков необходимо исследовать возможность применения аппаратных средств, в частности специальных амплитудных масок, соответствующих выбранным профилям аподизации. Данная стратегия будет описана далее.

2. Математическое моделирование и анализ результатов

Для нахождения максимально возможного наведенного показателя преломления и последующего математического моделирования проводился ряд предварительных экспериментов, направленных на оп-

ределение красного сдвига ВБР в процессе записи с последующим пересчетом в величину наведенного показателя преломления.

Брэгговская длина волны может быть рассчитана по формуле

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda,$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления оптического волокна; Λ – период решетки.

В процессе записи ВБР по мере увеличения коэффициента отражения брэгговская длина волны приобретает красный сдвиг вследствие увеличения среднего эффективного показателя преломления по длине ВБР, равного половине величины наведенного показателя преломления Δn , что соответствует следующему соотношению:

$$\frac{\lambda_{B_1}}{\lambda_{B_2}} = \frac{n_{eff}}{n_{eff} + 0,5\Delta n},$$

где λ_{B_1} и λ_{B_2} – брэгговские длины волн до и после записи соответственно.

Отсюда получаем формулу для Δn :

$$\Delta n = 2 \left(n_{eff} \frac{\lambda_{B_2}}{\lambda_{B_1}} - n_{eff} \right). \quad (1)$$

Проведенные предварительные эксперименты с номинальным показателем преломления сердцевины, равным 1,4683, и одинаковым временем засветки показали, что вычисленное по формуле (1) значение Δn соответствует значению 0,00065. В дальнейшем будем использовать среднее значение наведенного показателя преломления, равное 0,00065.

Для расчета оптических характеристик ВБР использовалась программа, разработанная автором диссертации [15], осуществляющая математический расчет одномерной прямой задачи рассеяния, – вычисление амплитуды, фазы, коэффициента отражения, интенсивности, а также групповой задержки.

Численное решение задачи рассеяния возможно как для ВБР, так и для произвольного продольного распределения показателя преломления. В обоих случаях применим метод трансфер-матриц (T -матриц).

Разобьем отрезок длины L , на котором задано распределение показателя преломления (решетка) на N элементарных отрезков длины $h = L/N$, внутри которых показатель преломления (амплитуду решетки)

можно считать постоянным. Заменяем краевую задачу (задачу рассеяния) задачей Коши. Начальными условиями для элементарного отрезка является пара амплитуд волн на правом конце, решением – пара амплитуд на левом конце. Решение связано с начальными условиями линейным преобразованием, которое может быть представлено в виде T -матрицы. Решение задачи распространения для отрезка длины L можно выразить аналогичным образом как произведение его T -матрицы и двухкомпонентного вектора начальных условий. T -матрица полного отрезка является произведением T -матриц элементарных отрезков в порядке их расположения:

$$T = \lim_{h \rightarrow 0} [T(0, h)T(h, 2h)T(2h, 3h) \dots T(L - h, L)]. \quad (2)$$

Соотношение (2) используется в данной работе для численного расчета коэффициентов отражения и пропускания. Шаг h выбирается достаточно малым по сравнению с характерным масштабом изменения функции связи мод $q(x)$, поэтому можно использовать T -матрицу однородной решетки.

В случае уравнения Гельмгольца элементарная T -матрица может быть найдена следующим образом. Амплитуды волн меняются только на границах слоев и являются кусочно-постоянными функциями, внутри слоев происходит лишь набег фазы. При этом напряженность поля волны E должна быть непрерывной функцией координаты и иметь непрерывную первую производную. Таким образом, поле на границе слоев выражается в виде

$$E = \begin{cases} a_l e^{ik_l x} + b_l e^{-ik_l x}, & x < 0, \\ a_r e^{ik_r x} + b_r e^{-ik_r x}, & x > 0, \end{cases}$$

где индексы r и l обозначают величины на элементарных отрезках справа и слева от границы соответственно. Амплитуды удовлетворяют условиям

$$a_l + b_l = a_r + b_r, \quad k_l(a_l - b_l) = k_r(a_r - b_r).$$

Матрица перехода через границу имеет вид

$$T^b = \begin{pmatrix} \frac{k_l + k_r}{2k_l} & \frac{k_l - k_r}{2k_l} \\ \frac{k_l - k_r}{2k_l} & \frac{k_l + k_r}{2k_l} \end{pmatrix}.$$

Кроме того, в слое происходит распространение волн, описываемое матрицей

$$T^s = \begin{pmatrix} e^{ik_l h} & 0 \\ 0 & e^{-ik_l h} \end{pmatrix}.$$

Элементарная трансфер-матрица получается перемножением матриц перехода через границу и распространения в слое: $T = T^s T^b$ [16].

Для проведения расчетов зададим базовые параметры:

- эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна до записи решетки $n_0 = 1,4683$;
- амплитуда модуляции показателя преломления $n_{\text{mod}} = 0,00065$;
- период решетки $d = 0,5189$ мкм;
- диапазон рассчитываемой координаты по длине ВБР $z = -3000$; 3000 мкм;
- шаг сетки расчета $dz = 0,05$ мкм;
- физическая длина ВБР $L = 6$ мм.

Существует ряд различных кривых аподизации, описанных, например, в работах [13, 14, 16, 17]. Отдельные кривые упоминаются в различных источниках с несколько отличными друг от друга результатами. Различия, по-видимому, связаны с исходными параметрами, индивидуальными для каждого исследования. В табл. 2 перечислены исследуемые функции аподизации и их уравнения. Помимо известных кривых аподизации, упомянутых в вышеперечисленных источниках, в таблицу также внесены новые дополнительные гауссоподобные функции (№ 9–11).

Таблица 2

Исследуемые функции аподизации ВБР

№ п/п	Название функции	Уравнение	Параметры
1	Гаусс	$f(z) = a \cdot \exp(-z^2/c^2)$	$a = 1$; $c = 1500$
2	Хэмминг	$f(z) = a - b \cdot \cos(2\pi z/L)$	$a = 0,54$; $b = 0,46$
3	Бартан	$f(z) = a - b \cdot \text{abs}(z/L - 0,5) + c \cdot \cos(2\pi(z/L - 0,5))$	$a = 0,62$; $b = 0,48$ $c = 0,38$
4	Наттолл	$f(z) = a_0 - a_1 \cos(2\pi(z/L)) + a_2 \cos(4\pi(z/L)) - a_3 \cos(6\pi(z/L))$	$a_0 = 0,36358194$; $a_1 = 0,48917755$; $a_2 = 0,1365995$; $a_3 = 0,0106411$
5	Sinc	$f(z) = \sin[c^a(\text{abs}(2(z - L/2)/L)^b)]$	$a = 2,5$; $b = 1,8$; $c = 1,2$
6	Cos	$f(z) = \cos^a(\pi z/L)$	$a = 1,5$

Окончание табл. 2

№ п/п	Название функции	Уравнение	Параметры
7	Коши	$f(z) = (1 - (2z/L)^2) / (1 - (2az/L)^2)$	$a = 0,7$
8	Блакман	$f(z) = \frac{1 + a \cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) + b \cos\left(\frac{4\pi z}{L}\right)}{c}$	$a = 1,19; b = 0,19; c = 2,38$
9	Новая 1	$f(z) = \cos^a(2z/L - 1)$	$a = 8$
10	Новая 2	$f(z) = 1/\exp((z/2)^4/(a^2))$	$a = 10^6$
11	Новая 3 (супергаусс)	$f(z) = 1/\exp((z/2)^8/(a^2))$	$a = 2 \cdot 10^{12}$

На рис. 2 изображены графики всех исследуемых функций аподизации с их исходными параметрами.

Рис. 2. Исследуемые функции аподизации

Для моделирования ВБР без выравнивания среднего показателя преломления по длине воспользуемся следующей формулой:

$$n_1(z) = n_0 + \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi z}{d}\right)\right) \cdot f(z) \cdot \frac{n_{\text{mod}}}{2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет получить график эффективного показателя преломления после первого шага записи ВБР. Если же из него исключить член, отвечающий за модуляцию наведенного показателя преломления, то получим уравнение, определяющее средний эффективный показатель преломления по длине ВБР после первого шага записи:

$$\langle n(z) \rangle = n_0 + f(z) \cdot \frac{n_{\text{mod}}}{2}. \quad (4)$$

На рис. 3 представлены расчетные графики формул (3) и (4) в качестве примера для функции Гаусса.

Рис. 3. Графики эффективного наведенного показателя преломления и его средней по длине величины

Если ограничить моделирование только первым этапом, то для всех функций результат будет неудовлетворительный, поскольку спектры отражения будут получаться аналогично графику, представленному на рис. 4. Боковые пики в коротковолновой области будут достигать уровней от -5 до -15 дБ.

Рис. 4. Спектр отражения ВБР после первого этапа записи для аподизации по кривой Гаусса

Для выравнивания среднего эффективного коэффициента преломления ВБР требуется дополнительная засветка участка записи ВБР с распределением мощности пучка, дополняющего имеющуюся функцию $f(z)$. Обозначим такое распределение $g(z)$. Для любой из представленных кривых аподизации функцию $g(z)$, уравнивающую средний эффективный показатель преломления по длине ВБР, можно найти по следующей формуле:

$$g(z) = 1 - f(z). \quad (5)$$

Дополнительная амплитуда показателя преломления в процессе проведения второго этапа записи может быть рассчитана в таком случае по формуле

$$n_2(z) = g(z) \cdot \frac{n_{\text{mod}}}{2}. \quad (6)$$

После проведения второго этапа засветки с распределением мощности пучка лазера по кривой $g(z)$ средний эффективный показатель преломления ВБР должен стать равным по всей длине и иметь значение, получаемое по формуле

$$\langle n(z) \rangle = n_0 + \frac{n_{\text{mod}}}{2}.$$

С другой стороны, эффективный показатель преломления рассчитывается по формуле

$$n(z) = n_1(z) + n_2(z). \quad (7)$$

Сравнивая формулы (3), (5)–(7), после преобразований находим

$$n(z) = n_0 + \left[\cos\left(\frac{2\pi z}{d}\right) \cdot f(z) + 1 \right] \cdot \frac{n_{\text{mod}}}{2}. \quad (8)$$

Полученная формула (8) является итоговой для получения массивов значений эффективного показателя преломления $n(z)$ по длине ВБР.

Для всех перечисленных выше форм аподизации были созданы такие массивы, которые были обработаны при помощи вышеуказанной программы с дополнительной установкой границ обработки по длине волны в вакууме от 1522 до 1528 нм и числа разбиений диапазона обработки в выходной таблице данных.

Все представленные в табл. 2 функции аподизации проходили обработку идентичным образом и с одинаковыми входными параметрами. В табл. 3 приведены сводные параметры по всем расчетным спектрам ВБР.

С учетом требований по величине коэффициента отражения и уровню подавления боковых пиков была произведена автоматизированная корректировка коэффициентов в функциях аподизации. В табл. 4

приведены функции с подобранными параметрами для максимального удовлетворения условиям поставленной задачи.

Таблица 3

Сводные значения параметров расчетных спектров отражения ВБР

№ п/п	Название функции	Максимальный коэффициент отражения, %	Подавление боковых пиков, дБ
1	Гаусс	88,5	-45,25
2	Хэмминг	94,6	-37,32
3	Бартан	92,6	-29,81
4	Наттолл	79,8	-113,69
5	Sinc	94,2	-29,07
6	Cos	95,2	-8,96
7	Коши	99,0	-11,17
8	Блакман	86,6	-60,94
9	Новая 1	87,5	-53,03
10	Новая 2	96,7	-14,19
11	Новая 3 (супергаусс)	98,9	-7,28

Таблица 4

Функции аподизации ВБР с модифицированными коэффициентами

№ п/п	Название функции	Коэффициенты	№ п/п	Название функции	Коэффициенты
1	Гаусс	$a = 1;$ $c = 1600$	7	Коши	$a = 0,7$
2	Хэмминг	$a = 0,52;$ $b = 0,48$	8	Блакман	$a = 1,09;$ $b = 0,09;$ $c = 2,18$
3	Бартан	$a = 0,53;$ $b = 0,08;$ $c = 0,47$	9	Новая 1	$a = 6$
4	Наттолл	$a_0 = 0,4132234;$ $a_1 = 0,4291865;$ $a_2 = 0,1265995;$ $a_3 = 0,0304784$	10	Новая 2	$a = 10^6;$ $n_{\text{mod}} = 0,00041$
5	Sinc	$a = 2,5;$ $b = 1,8;$ $c = 1,2$	11	Новая 3 (супергаусс)	$a = 2 \cdot 10^{12};$ $n_{\text{mod}} = 0,00041$
6	Cos	$a = 2,5$			

По результатам математического моделирования спектров отражения измененных функций аподизации ВБР со скорректированными коэффициентами (см. табл. 4) можно сделать вывод, что для дальней-

шего анализа следует ограничиться функциями № 1, 2 и 9 с указанными в табл. 4 коэффициентами.

3. Схема экспериментальной установки.

Методика проведения экспериментов

Оптическая схема записи, в отличие от стандартной, была несколько модифицирована для проведения эксперимента с аподизированными ВБР. Основными отличиями модифицированной схемы записи являются:

- фокусировка лазерного луча по вертикали в плоскости за оптическим волокном;
- использование специальных комбинированных амплитудных масок.

На рис. 5 изображена схема экспериментальной установки.

Рис. 5. Схема экспериментальной установки

На схеме: 1 – эксимерный лазер Coherent BraggStar M, являющийся источником УФ (длина волны – 248 нм) когерентных импульсов; 2 – амплитудная маска, необходимая для получения определенной формы распределения лазерного излучения в плоскости маски (состоит из двух экспозиционных частей различной формы и закреплена во вращающейся оснастке); 3 – цилиндрическая линза, предназначенная для фокусировки луча лазера в сердцевине оптического волокна; 4 – фазовая маска, служащая для получения необходимой для записи интерференционной картины, обладающей определенным периодом; 5 – оптическое волокно, на котором производится запись ВБР, прошедшее обработку под давлением 80 бар в атмосфере водорода в течение двух недель для повышения фоточувствительности. Оптическое волокно установлено в пневматические зажимы для удерживания в неподвижном натянутом состоянии. Отрезок

волокна, на котором производится запись, стыкуется со спектроанализатором, при помощи которого осуществляется непрерывный контроль спектральных параметров ВБР в процессе записи.

Амплитудные маски были изготовлены из листа нержавеющей стали толщиной 0,5 мм в виде дисков с вырезанными в них отверстиями специальной формы, повторяющей форму профиля аподизации ВБР. Пример чертежа и фотография одной из амплитудных масок приведены на рис. 6. Отверстия изготовлены при помощи технологии лазерной резки CO₂-лазером с размером пятна 0,5 мм. Следует отметить, что перед использованием с каждой маски снимался отпечаток на термобумаге, на основе которого маски дорабатывались вручную алмазным надфилем. Оцифровка отпечатка путем сканирования позволила оценить степень точности задания необходимой формы отверстий.

Рис. 6. Пример чертежа (а) и фотография (б) одной из амплитудных масок

Запись аподизированных ВБР по выбранной схеме производится в два приема.

Первая часть записи позволяет создать периодическое изменение эффективного показателя преломления, определяющее длину волны результирующей аподизированной ВБР. Для осуществления первой части записи амплитудная маска поворачивается таким образом, чтобы лазерный луч проходил через ее основное окно. Засветка волокна производится через фазовую маску, которая подводится на расстояние примерно 80–200 мкм от оптического волокна (данное расстояние обусловлено пространственной когерентностью эксимерного лазера). Когда коэффициент отражения достигает необходимого значения, равного 90 %, ла-

зер отключается. По завершении первой части записи полученный спектр отражения имеет высокие коротковолновые боковые пики.

Вторая часть записи аподизированной ВБР позволяет выравнивать средний эффективный показатель преломления по длине ВБР, вследствие чего высокие боковые пики в коротковолновой части спектра отражения уменьшаются. Для реализации второй части записи амплитудная маска переворачивается на 180° таким образом, чтобы лазерный луч проходил через ее дополнительные окна. Фазовая маска отодвигается от волокна и извлекается из держателя. Оптическое волокно остается в таком же состоянии и положении, как и во время первой части записи. Засветка лазером длится до тех пор, пока правые и левые боковые пики не уравниваются по мощности. Это свидетельствует о том, что средний эффективный показатель преломления по длине ВБР выравнялся и дополнительной засветки более не требуется.

Изменение формы аподизации записываемой ВБР производится с помощью замены амплитудной маски. Эксперименты на амплитудных масках различных форм проводятся идентично, по описанной двухэтапной схеме, каждый раз на новом отрезке оптического волокна из той же партии и той же процедуры наводораживания.

4. Результаты экспериментов

Эксперименты ставились с применением амплитудных масок, изготовленных по кривым аподизации, которые отобраны по результатам математического моделирования спектральных характеристик ВБР.

На рис. 7 представлен спектр одной из аподизированных ВБР, полученной в результате экспериментальной записи с амплитудной маской, в которой отверстие вырезано по функции № 9 «Новая 1» (см. табл. 4).

Рис. 7. Спектр отражения экспериментальной ВБР

Приведенная ниже табл. 5 содержит данные по наиболее успешным экспериментальным записям аподизированных ВБР в рамках этой работы для отобранных функций. Как видно из представленных в табл. 5 результатов, присутствует некий общий сдвиг величины подавления боковых пиков ВБР в сторону их увеличения. Вероятно, это можно объяснить недостаточной точностью юстировки компонентов системы.

Таблица 5

Характеристики наиболее успешных экспериментальных записей ВБР

Функция аподизации	Коэффициент отражения, %	Подавление боковых пиков, дБ
Гаусс	92,3	–37,51
	91,7	–36,10
	88,5	–34,92
Хэмминг	88,0	–38,19
	91,4	–36,85
	90,1	–36,40
Новая 1	93,3	–38,67
	92,1	–38,48
	94,5	–35,78

Из анализа приведенных в табл. 5 результатов следует отметить, что функция «Новая 1» показала наиболее близкий к требуемым параметрам средний результат по итогам проведенных экспериментов, однако другие образцы достаточно близки по параметрам и отличаются друг от друга незначительно.

Заключение

Данное исследование доказывает, что эффективность аподизационных процедур в процессе записи ВБР может быть повышена путем сочетания программных и аппаратных средств, а именно посредством анализа и выбора наиболее адекватных решаемой задаче функций аподизации на основе математического моделирования, сопровождающегося экспериментальным исследованием с разработкой и использованием специальных комбинированных амплитудных масок, соответствующих выбранным профилям аподизации.

Показана целесообразность применения модифицированной оптической схемы записи аподизированных ВБР, дополненной фокусировкой лазерного луча по вертикали в плоскости за оптическим волокном и установкой соответствующих амплитудных масок.

Представленные результаты и программные продукты позволяют прогнозировать и управлять спектральными характеристиками различных типов ВБР, в частности подавлять негативный эффект боковых резонансов.

Проведенные физические эксперименты позволили расширить номенклатуру производимых ВБР на производственной площадке ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь).

Список литературы

1. Агравал Г. Применение нелинейной волоконной оптики: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2011. – 592 с.
2. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 61–75.
3. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.
4. Экспериментальные характеристики волоконных брэгговских решеток с собственной анизотропией / В.Г. Беспрозванных, Е.Н. Гребенщикова, С.В. Зырянов, А.А. Оглезнев // Науч. тр. SWorld. – 2014. – Т. 2, вып. 1. – С. 51–55.
5. Patrice M., Sébatien B., Cathy C. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications. – NY: Artech House Publisher, 2007.
6. Особенности записи волоконных брэгговских решеток гауссовым пучком / С.Р. Абдуллина, С.А. Бабин, А.А. Власов, С.И. Каблуков // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 10. – С. 966–970.
7. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. – NY: Academic Press, 1999.
8. Mihailov S., Bilodeau F., Hill K. Apodization technique for fiber grating fabrication with a halftone transmission amplitude mask // Applied Optics. – 2000. – Vol. 39, № 21.
9. Достовалов А.В., Вольф А.А., Бабин С.А. Поточечная запись ВБР первого и второго порядка через полиимидное покрытие фемтосекундным излучением с длиной волны 1026 нм // Прикладная фотоника. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 48–61.
10. Ennser K., Zervas M. Optimization of apodized linearly chirped fiber gratings for optical communications // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 34, № 5.

11. Абдуллина С.Р., Власов А.А., Бабин С.А. Сглаживание спектра волоконных брэгговских решеток в схеме записи с интерферометром Ллойда // *Квантовая электроника*. – 2010. – Т. 40, № 3. – С. 259–263.
12. Абдуллина С.Р., Немов И.Н., Бабин С.А. Метод подавления боковых резонансов в спектре волоконных брэгговских решеток за счет поперечного сдвига фазовой маски относительно волокна // *Квантовая электроника*. – 2012. – Т. 42, № 9. – С. 794–798.
13. Абдуллина С.Р., Власов А.А. Методы подавления боковых резонансов в спектре отражения волоконных брэгговских решеток // *Автометрия*. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 90–104.
14. Khan S., Islam M. Determination of the best apodization function and grating length of linearly chirped fiber Bragg grating for dispersion compensation // *Journal of Communications*. – 2012. – Vol. 7, № 11.
15. Бела́й О.В. Методы решения обратной задачи рассеяния для волоконных брэгговских решеток: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2008. – 124 с.
16. Ikhlef A., Hedara R. Uniform fiber Bragg grating modeling and simulation used matrix transfer method // *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*. – 2012. – Vol. 9, № 2.
17. Nazmi A., Taha A. Performance optimization of apodized FBG-based temperature sensors in single and quasi-distributed DWDM systems with new and different apodization profiles // *AIP Advances*. – 2013. – № 122125.

References

1. Agrawal G. *Primenenie nelineinoi volokonnoi optiki* [Application of nonlinear fiber optics]. Saint Petersburg: Lan', 2011. 592 p.
2. Shishkin V.V., Granev I.V., Shelemba I.S. Otechestvennyi opyt proizvodstva i primeneniia volokonno-opticheskikh datchikov [Domestic experience of production and use of fiber optic sensors]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 61-75.
3. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Volokonnye reshetki pokazatelia prelomleniia i ikh primeneniia [Refractive index fiber gratings and their applications]. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103.
4. Besprozvannykh V.G., Grebenshchikova E.N., Zyrianov S.V., Ogleznev A.A. Eksperimental'nye kharakteristiki volokonnykh breggovskikh reshetok s sobstvennoi anizotropiei [The experimental characteristics of fiber

Bragg gratings with intrinsic anisotropy]. *Nauchnye trudy SWorld*, 2014, vol. 2, iss. 1, pp. 51-55.

5. Patrice M., Sébatien B., Cathy C. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications. New York: Artech House Publisher, 2007.

6. Abdullina S.R., Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I. Osobennosti zapisi volokonnykh breggovskikh reshetok gaussovym puchkom [Features of fiber Bragg gratings written by Gaussian beam]. *Kvantovaia elektronika*, 2006, vol. 36, no. 10, pp. 966-970.

7. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. New York: Academic Press, 1999.

8. Mihailov S., Bilodeau F., Hill K. Apodization technique for fiber grating fabrication with a halftone transmission amplitude mask. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 21.

9. Dostovalov A.V., Vol'f A.A., Babin S.A. Potochechnaia zapis' VBR pervogo i второго poriadka cherez poliimidnoe pokrytie femtosekundnym izlucheniem s dlinoi volny 1026 nm [Pointwise record of first and second order FBGs through the polyimide coating by femtosecond radiation with a wavelength of 1026 nm]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 48-61.

10. Enns K., Zervas M. Optimization of apodized linearly chirped fiber gratings for optical communications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, vol. 34, no. 5.

11. Abdullina S.R., Vlasov A.A., Babin S.A. Sglazhivanie spektra volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme zapisi s interferometrom Lloyda [Smoothing the spectrum of the fiber Bragg grating in the Lloyd interferometer recording scheme]. *Kvantovaia elektronika*, 2010, vol. 40, no. 3, pp. 259-263.

12. Abdullina S.R., Nemov I.N., Babin S.A. Metod podavleniia bokovykh rezonansov v spektre volokonnykh breggovskikh reshetok za schet poperechnogo sdviga fazovoi maski otnositel'no volokna [The method of suppressing the lateral resonances in the spectrum of fiber Bragg gratings by shear phase mask with respect to the fiber]. *Kvantovaia elektronika*, 2012, vol. 42, no. 9, pp. 794-798.

13. Abdullina S.R., Vlasov A.A. Metody podavleniia bokovykh rezonansov v spektre otrazheniia volokonnykh breggovskikh reshetok [Methods of suppressing lateral resonances in the reflection spectrum of fiber Bragg gratings]. *Avtometriia*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 90-104.

14. Khan S., Islam M. Determination of the best apodization function and grating length of linearly chirped fiber Bragg grating for dispersion compensation. *Journal of Communications*, 2012, vol. 7, no. 11.

15. Belai O.V. Metody resheniia obratnoi zadachi rasseianiia dlia volokonnykh breggovskikh reshetok [Methods of solving the inverse scattering for fiber Bragg gratings]. Novosibirsk: Institut avtomatiki i elektrometrii Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2008. 124 p.

16. Ikhlef A., Hedara R. Uniform fiber Bragg grating modeling and simulation used matrix transfer method. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2012, vol. 9, no. 2.

17. Nazmi A., Taha A. Performance optimization of apodized FBG-based temperature sensors in single and quasi-distributed DWDM systems with new and different apodization profiles. *AIP Advances*, 2013, no. 122125.

Получено 27.08.2016