

УДК 681.7.063

Экспериментальное исследование и моделирование волоконных брэгговских решёток с фазовым сдвигом

© 2021 г. **В. А. Новикова**, АСПИРАНТ; **С. В. Варжель**, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК;
Е. А. Лосева, СТУДЕНТ; **А. А. Дмитриев**, АСПИРАНТ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: novivial@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-06-36-44

В данной работе представлены данные по записи и исследованию волоконных брэгговских решёток с фазовым сдвигом. Предложен метод записи таких структур, позволяющий варьировать параметр ширины области пропускания в полосе отражения на полувысоте в диапазоне от 8 до 76 пикометров. Изучено и проанализировано влияние амплитуды наведённой модуляции показателя преломления и длины сформированной структуры на исследуемый параметр — результаты представлены в виде кривых для экспериментально и теоретически полученных данных. Исследования, проведённые в работе, позволяют создавать структуры с известными значениями ширины области пропускания, что открывает широкий спектр возможностей создания оптических элементов на основе таких специальных структур решёток Брэгга (волоконно-оптических сенсоров, перестраиваемых фильтров пропускания, демультимплексоров и т.д.)

Ключевые слова: волоконная брэгговская решётка, фазовый сдвиг, интерферометр Фабри-Перо, волоконная дифракционная структура.

Коды OCIS: 060.3735, 060.3738, 230.1950, 050.5080.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования в области волоконной оптики продемонстрировали широкие возможности использования волокон в качестве среды передачи информации в волоконно-оптических линиях связи [1, 2], активной среды лазеров [3, 4], чувствительных элементов датчиков различных физических величин [5, 6] и т.д. Изучение изменения структуры легированных волоконных световодов (а именно — изменение показателя преломления сердцевин) под действием излучения позволило использовать волокна в оптических фильтрах, резонаторах, компенсаторах дисперсии, усилителях и пр. Впервые формирование стабильных во времени решёток пока-

зателя преломления (ПП) при облучении было обнаружено и описано в 1978 году [7], позже в 1989 году была предложена методика записи решёток Брэгга [8] через боковую поверхность оптического волокна (ОВ). Результатом последней публикации стало активное изучение таких видов структур вследствие демонстрации всех преимуществ и перспектив их использования.

На сегодняшний день, широкое применение решёток Брэгга обуславливается возможностями подстройки необходимых параметров для каждой конкретной задачи, стабильностью работы таких решёток и созданием особых типов волоконных брэгговских решёток (ВБР) [9]. Исходя из различных областей

применения ВБР и взяв во внимание преимущества их использования, выделяют несколько наиболее используемых специальных структур решёток ПП, таких как непрерывно [10, 11] и пошагово [12, 13] чирпированные, с наклонными штрихами [14, 15], суперпозиции нескольких ВБР [16, 17] и решётки с фазовым сдвигом (ВБРсФС) [18, 19]. Между собой все эти структуры заметно отличаются спектральными откликами, что расширяет возможности использования волоконных решёток ПП для решения различных задач.

ВБР С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

ВБР с фазовым сдвигом наиболее интересны для разработчиков сенсорных систем, так как в сравнении со стандартными ВБР, они позволяют повысить разрешающую способность датчиков на их основе в десятки [20], а иногда и сотни раз, сохраняя при этом относительно невысокую стоимость. Подобные структуры представляют собой две решётки ПП, условие формирования которых требует изменение структуры волокна таким образом, чтобы суммарные излучения от решёток находились в противофазе между собой на длине волны брэгговского резонанса. Таким образом, если в стандартных решётках Брэгга на длине волны резонанса наблюдается пик отражения, то в ВБР с фазовым сдвигом в полосе отражения будет наблюдаться узкая область пропускания. В качестве параметра, по которому делается вывод об эффективности структуры и осуществляется сравнение между собой сформированных решёток, берётся значение ширины области пропускания в полосе отражения на полувысоте $\Delta\lambda_{pb}$ ($\Delta\lambda_{pb}$ — pass band). Во множестве работ представлены различные данные по величине указанного значения в диапазоне от сотен до десятков, а иногда и единиц пикометров. Данный параметр зависит от выбора способа формирования решёток ПП, их физических характеристик (периода и длины ВБР, амплитуды наведённой модуляции ПП), метода внесения фазового сдвига, дефектов в волокне и прочих особенностей используемых устройств и применяемых волокон.

Существует несколько методик формирования волоконных брэгговских решёток с фа-

зовым сдвигом, но большинство из них имеют определённые недостатки, ограничивающие возможности формирования таких структур вследствие высокой стоимости используемого оборудования, отсутствия возможности подстройки параметров решётки, влияющих на спектральные характеристики полученных структур и т.д. Одна из первых предложенных методик записи решёток Брэгга с фазовым сдвигом заключается в записи одной решётки и последующей ультрафиолетовой постобработке узкой области в центре сформированной ВБР, что вносит разность фаз между решётками, разделёнными областью с повышенным ПП [21]. Известен способ формирования ВБР с π -сдвигом, запись которых осуществляется посредством использования фазовой маски [22]. Такой метод позволяет записать решётки с достаточно точным наведением разности фаз (что обуславливается наличием фазового сдвига в самой фазовой маске) и исключить какое-либо вмешательство в структуру волокна, т.к. сдвиг фаз наводится при записи всей структуры решётки. Одним из наиболее точных вариантов записи ВБР является использование высокоточных подвижек, позволяющих формировать две решётки Брэгга, разделённые одним периодом с повышенным ПП [23]. Ещё одним вариантом формирования решёток Брэгга с фазовым сдвигом является введение воздушного зазора между двумя решётками ПП [24]. Таким образом, при прохождении воздушной прослойки, излучение испытывает сдвиг фаз, в результате чего и происходит формирование структуры, спектральные характеристики которой совпадают со спектральными характеристиками решёток с π -сдвигом. Также в работе [24] рассмотрен способ записи стандартной ВБР и введение фазового сдвига путём воздействия электрической дугой сварочного аппарата в центре дифракционной структуры. Данный способ, во-первых, требует использование высокоточных подвижек для определения центра ВБР, во-вторых, уменьшает коэффициент отражения конечной структуры с фазовым сдвигом относительно первоначально сформированной стандартной решётки (вследствие затирания части структуры). В нашей работе указанная методика была взята в качестве прототипа и доработана с учётом описанных выше недостатков.

Необходимо отметить, что вышеупомянутые методики не всегда позволяют записывать ВБР с π -сдвигом, в некоторых случаях формируются ВБР с произвольным фазовым сдвигом. Как указано в работе [25] увеличение фазового сдвига (которое зачастую реализуется путём записи двух пространственно разнесённых решёток с одинаковой длиной волны брэгговского резонанса) приводит к увеличению количества областей пропускания в полосе отражения, и такая структура, по аналогии с объёмной оптикой, обычно называется интерферометром Фабри–Перо. Однако при относительно небольшом расстоянии между двумя ВБР и/или наличии узкой полосы отражения решётки формы спектральных откликов таких внутриволоконных интерферометров Фабри–Перо и ВБР с π -сдвигом подобны.

Различные методики записи решёток ПП с фазовым сдвигом открыли широкие возможности использования описанных структур. В связи с этим появляется необходимость в детальном изучении зависимости ширины области пропускания в полосе отражения от таких величин, как амплитуда наведённой модуляции ПП и длина сформированной структуры. Для более полного анализа результатов проведённых исследований необходимо сравнить экспериментальные данные с моделями зависимостей, учитывающих параметры волокна и записанных решёток.

Представленная статья является логичным продолжением исследования, описанного в работе [19], и содержит как уточнённые, так и новые экспериментальные результаты, а также сравнение с полученными теоретическими данными. В данной работе представлена методика создания ВБРсФС, позволяющая формировать структуры, имеющие различные спектральные характеристики в зависимости от начальных параметров записи. Представлено исследование влияния таких параметров, как длина решётки и модуляция показателя преломления, на конечные спектральные отклики. Результаты такого исследования позволяют формировать ВБРсФС с необходимыми значениями $\Delta\lambda_{pb}$ в зависимости от условий решаемой задачи. Так же в работе приведено моделирование (учитывающее характеристики волокна и его дисперсионную зависимость), которое хорошо согласуется с экс-

периментально полученными данными, что свидетельствует о правильности проведённых исследований.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

В данной работе для записи ВБР применяется интерферометрический метод [26, 27], а в качестве источника излучения использовалась KrF эксимерная лазерная система Optosystems CL-7550 типа задающий генератор — усилитель. Такая система генерирует импульсы длительностью 17 нс на полувысоте с длиной волны излучения 248,3 нм (диапазон перестройки центральной длины волны излучения — 30 пм) и номинальной энергией 250 мДж, максимальная частота повторения импульсов — 50 Гц, размер пучка — 20×6 мм². Как указывалось ранее, запись решёток Брэгга осуществляется интерферометрическим методом, а именно, с применением интерферометра Тальбота. Среди основных его преимуществ выделяют следующие: возможность перестройки длины волны брэгговского резонанса в широком диапазоне без замены фазовой маски и отсутствие непосредственного контакта между оптическим волокном и элементами схемы записи. Схема записи решёток Брэгга на интерферометре Тальбота (рис. 1а) поясняется следующим: излучение с высотой пучка h фокусируется линзой на фазовую маску, прохождение которой позволяет получить различные порядки дифракции. Зеркалами, расположенными на поворотных подвижках, отражаются +1 и -1 порядки дифракции, после этого пучки с двух зеркал сводятся в области ОВ и интерферируют между собой, в результате чего осуществляется запись волоконных брэгговских решёток. Поворотные подвижки в данной схеме позволяют изменять угол между нормалью к оси ОВ и падающим лучом +1 или -1 порядка дифракции, благодаря чему осуществляется подстройка периода интерференционной картины (a , следовательно, и длины волны брэгговского резонанса). Преимущество использования интерферометра Тальбота в сочетании с KrF эксимерной лазерной системой заключается в высокой степени пространственной (более 5 мм) и временной (более 10 мм)

когерентностей, что снижает требования к юстировке интерферометра и увеличивает контраст интерференционной картины.

Угол дифракции α будет определяться в соответствии с условием дифракционных максимумов по формуле 1 [9]:

$$\Lambda_{pm} \sin \alpha = \pm k \lambda_r, \quad (1)$$

где Λ_{pm} — период фазовой маски, k — порядковый номер дифракционного максимума, λ_r — длина волны излучения.

Как было указано ранее, с помощью угла поворота зеркал ϕ (рис. 1а) можно регулировать угол падения отражённого от зеркала излучения на оптическое волокно ($\theta = \alpha - 2\phi$). При этом период ВБР (Λ_{FBG}) определяется по формуле 2 [9]:

$$\Lambda_{FBG} = \frac{\lambda_r}{2 \sin \theta}. \quad (2)$$

После формирования первой решётки Брэгга волокно смещается на расстояние, равное суммарному значению длины решётки L и расстояния между решётками a (рис. 1). При этом конечная длина ВБРсФС определяется как $2L + a$. После смещения первой ВБР на заданное расстояние осуществляется запись

второй ВБР, при этом обе решётки ПП записываются в одинаковых условиях, то есть такие параметры, как длина решётки, амплитуда модуляции показателя преломления и период решётки одинаковы.

После записи двух решёток оптическое волокно помещалось в сварочный аппарат (рис. 1в), электроды которого располагались в центре между двумя записанными ВБР. Положение волокна контролировалось с помощью микрометрической линейной подвижки, имеющей шаг 10 мкм. Кратковременное воздействие электрической дуги сварочного аппарата приводит к тому, что волокно нагревается до температур около 2000 °С и становится мягким, ввиду чего даже слабое влияние гравитационных сил вызывает изменение геометрии волокна, что и приводит к наведению фазового сдвига. Необходимо учитывать, что каждое воздействие электрической дуги вносит свои изменения в геометрию волокна, что позволяет получить решётку ПП со спектральными характеристиками, наиболее близкими к решёткам с π -сдвигом (соответственно, количество воздействий электрической дуги варьировалось до достижения таких спектральных характеристик). Анализ эффективности полученных решёток осуществлялся в реальном

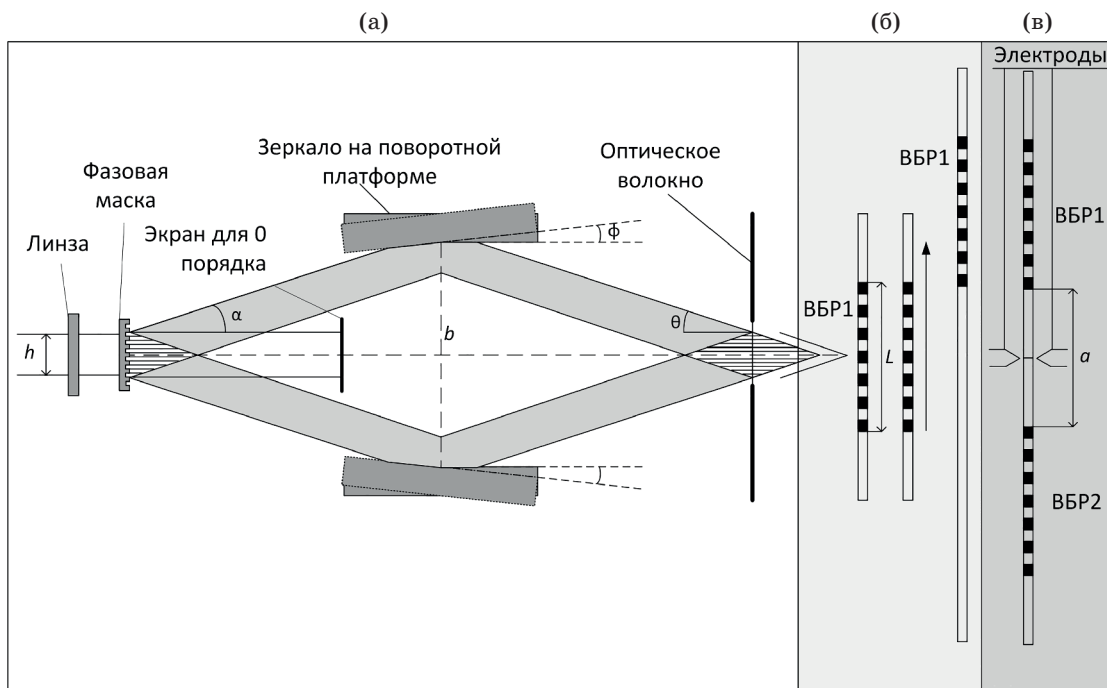


Рис. 1. Схема записи волоконных брэгговских решёток на интерферометре Тальбота с этапом введения фазового сдвига путём воздействия электрической дуги сварочного аппарата.

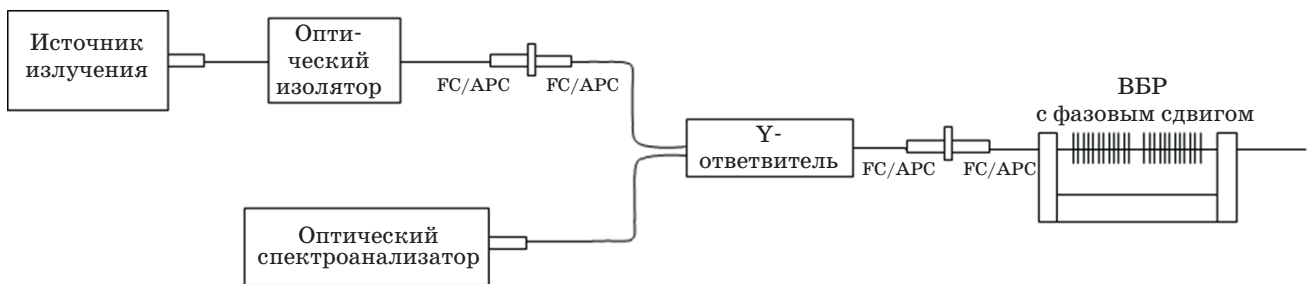


Рис. 2. Схема снятия спектров отражения ВБР с фазовым сдвигом.

времени (то есть после каждого воздействия электрической дуги фиксировался спектр отражения сформированных структур). При нормальных условиях и в отсутствии нагрузки долговечность ВБР с фазовым сдвигом не уступает стандартным ВБР.

Время однократного воздействия электрической дуги сварочного аппарата составляло 0,3 с, значение тока — 8 мА. Заданные параметры выбирались исходя из экспериментально проведенных исследований, учитывалась необходимость внесения минимального «шага» фазового сдвига для создания структур, спектральный отклик которых наиболее близок к ВБР с π -фазовым сдвигом.

Стоит также отметить, что представленный способ наведения фазового сдвига может применяться и на одиночной ВБР [19] по аналогии с методикой, заключающейся в постобработке решётки ультрафиолетовым излучением, продемонстрированной в работе [21].

Для анализа спектров отражения ВБР с фазовым сдвигом была осуществлена сборка схемы, представленная на рис. 2. Для опроса решёток Брэгга использовался широкополосный источник излучения Thorlabs S5FC1005S с центральной длиной волны излучения 1560 нм и шириной спектра на полувысоте около 70 нм.

В подобной схеме вводимое в оптическое волокно излучение через Y-ответвитель направляется на сформированную дифракционную структуру, от которой отражается часть излучения, соответствующая длине волны брэгговского резонанса. Обратное отражённое излучение направляется через Y-ответвитель на оптический спектроанализатор. Оптический изолятор используется для предотвращения влияния обратных отражений на спектр излучения источника. Спектральные характеристики сформированных структур исследо-

вались с помощью двух спектроанализаторов с различным разрешением: Yokogawa AQ6370C (диапазон изменений 600–1700 нм, разрешение — 20 пм) и Aragon Photonics BOSA 100 (диапазон измерений 1525–1565 нм, разрешение — 0,08 пм). По описанной технологии были созданы ВБРсФС со значениями ширины области пропускания в полосе отражения на полувысоте в диапазоне от 8 до 76 пм.

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ В РАБОТЕ ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Для исследования использовалось одномодовое оптическое волокно компании АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова» с концентрацией GeO_2 в сердцевине световода 12 мол.%. На рис. 3 представлена экспериментально полученная дисперсионная зависимость эффективного ПП основной моды для указанного волокна. С учётом параметров волокна (диаметр сердцевины, концентрация GeO_2) была построена модель дисперсионной зависимости.

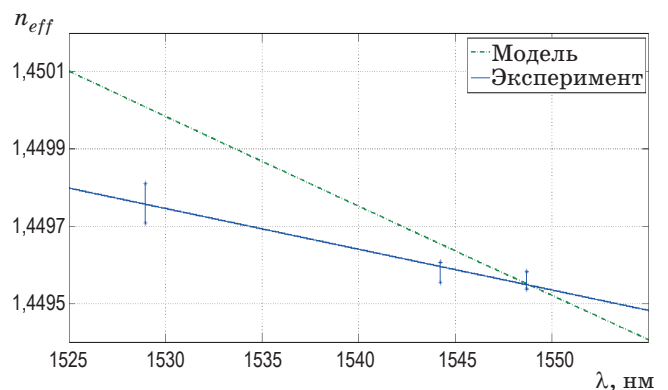


Рис. 3. Дисперсионная зависимость эффективного показателя преломления основной моды одномодового ОВ производства компании АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова».

Зависимость строилась следующим образом: методом фазовой маски записывалось несколько ВБР и фиксировалась центральная длина волны каждой решётки, после чего рассчитывался эффективный показатель преломления n_{eff} по формуле (3):

$$n_{eff} = \frac{\lambda_{Br}}{\Lambda_{pm}}, \quad (3)$$

где λ_{Br} — длина волны брэгговского резонанса каждой решётки. Описанным способом осуществлялись измерения для трёх фазовых масок (с $\Lambda_{pm} = 1054,62; 1065,30; 1068,40$), для каждой из которых записывалось пять решёток ПП, после чего определялось среднее квадратичное отклонение (СКО) для каждого среднего значения длины волны брэгговского резонанса. Запись осуществлялась в одноимпульсном режиме, плотность энергии в импульсе на поверхности оптического волокна — 150 мДж/см^2 .

С помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM 710 была получена фотография торца оптического волокна (рис. 4), по которому был установлен диаметр сердцевины используемого для исследования световода, равный $4,4 \text{ мкм}$.

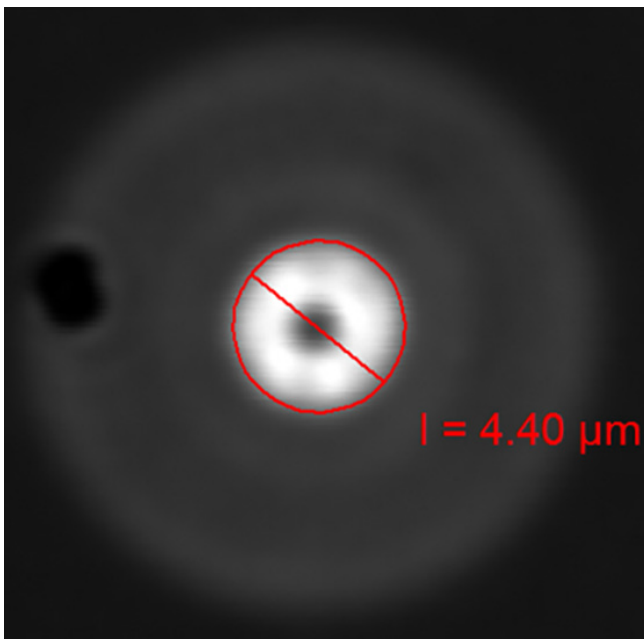


Рис. 4. Фотография оптического волокна, полученная с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM 710.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В результате описанного способа формирования ВБР с фазовым сдвигом наблюдались спектральные отклики, один из которых представлен на рис. 5. В данном случае спектр отражения построен для структуры, где $L = 7 \text{ мм}$, $a = 1 \text{ мм}$, таким образом, полная длина всей структуры ВБРсФС 15 мм . Зелёной линией на данном графике отображён спектр отражения, а синей — спектр пропускания дифракционной структуры. Длина волны брэгговского резонанса — $1548,585 \text{ нм}$, а значение $\Delta\lambda_{pb}$ составило $13,8 \text{ пм}$. Запись решёток была реализована при следующих условиях: плотность энергии в импульсе на поверхности оптического волокна — 62 мДж/см^2 , частота следования импульсов — 10 Гц , время экспозиции — 10 с .

В ходе исследования решёток ПП с фазовым сдвигом была выявлена необходимость экспериментального исследования влияния амплитуды наведённой модуляции показателя преломления на ширину области пропускания в полосе отражения. Увеличение амплитуды наведённой модуляции ПП приводит к тому, что ширина спектра стандартной ВБР увеличивается, а область пропускания в полосе отражения становится более узкой, что наглядно представлено на рис. 6. Условия записи ВБР: плотность энергии в импульсе на поверхности оптического волокна — 94 мДж/см^2 (для $\Delta n = 2,9 \times 10^{-4}$), 47 мДж/см^2 (для $\Delta n = 8,7 \times 10^{-5}$), 15 мДж/см^2 (для $\Delta n = 4,3 \times 10^{-5}$) частота следования лазерных импульсов составляла 10 Гц ,

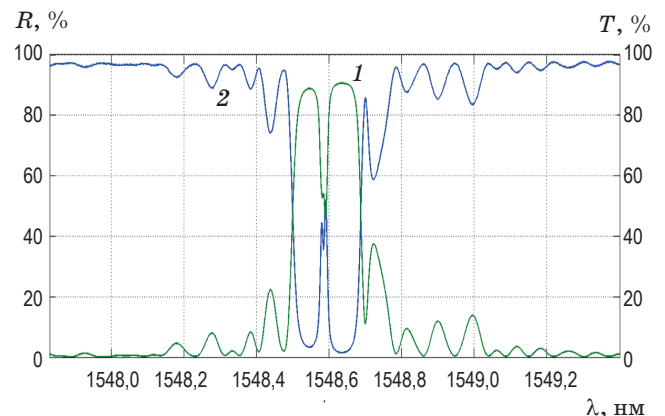


Рис. 5. Спектры отражения (кривая 1) и пропускания (кривая 2) ВБРсФС, где $L \cdot 2 = 14 \text{ мм}$, $a = 1 \text{ мм}$.

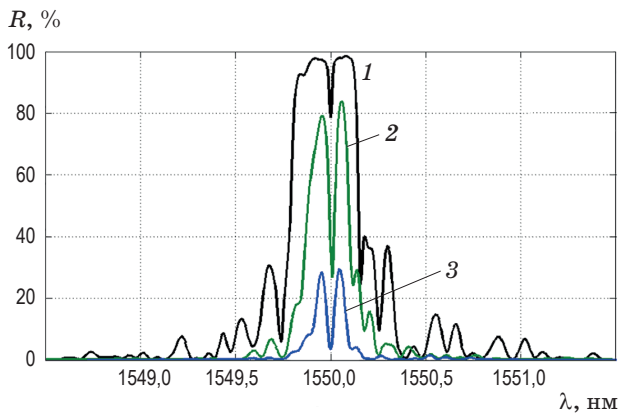


Рис. 6. Спектры отражения ВБРсФС с различными значениями наведённой модуляции ПП: $\Delta n = 2,9 \times 10^{-4}$ (чёрная линия 1), $\Delta n = 8,7 \times 10^{-5}$ (зелёная линия 2), $\Delta n = 4,3 \times 10^{-5}$ (синяя линия 3).

время экспозиции 37 с (для $\Delta n = 2,9 \times 10^{-4}$), 26 с (для $\Delta n = 8,7 \times 10^{-5}$), 6 с (для $\Delta n = 4,3 \times 10^{-5}$).

На рис. 6 представлены спектры трёх решёток ПП с фазовым сдвигом, центрированные на одну длину волны брэгговского резонанса (1550 нм), полная длина всей структуры равна 11 мм (где $L = 5$ мм, $a = 1$ мм). Как видно из графика, уширение спектра приводит к уменьшению значения ширины проходящего излучения, что подтверждается теоретическими данными [28].

Как известно, увеличение длины решётки приводит к более узкому значению спектрального отклика [29], что видно из следующей формулы (4):

$$\Delta\lambda = \lambda_{Br} \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda$ — ширина спектра отражения ВБР, Δn — модуляция ПП, n_0 — показатель преломления сердцевины ОВ, N — число штрихов. Таким образом, представляется возможным выбор необходимого значения ширины проходящего излучения на полувывоте, исходя из двух параметров: суммарная длина сформированной структуры L и величина наведённой модуляции ПП Δn . На рис. 7 представлена экспериментально полученная зависимость для ширины области пропускания в полосе отражения на полувывоте $\Delta\lambda_{pb}$ (для оптического волокна компании АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова») с учётом двух описанных

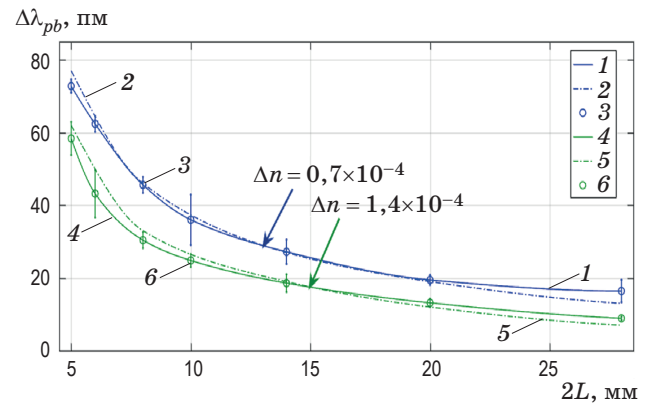


Рис. 7. Зависимость ширины области пропускания в полосе отражения на полувывоте от длины решётки с учётом наведённой модуляции ПП: сплайн-аппроксимация данных для $\Delta n = 0,7 \times 10^{-4}$ (синяя линия 1), результаты моделирования для $\Delta n = 0,7 \times 10^{-4}$ (синяя линия 2), измеренные значения для $\Delta n = 0,7 \times 10^{-4}$ (синие полые точки 3), сплайн-аппроксимация данных для $\Delta n = 1,4 \times 10^{-4}$ (зелёная линия 4), результаты моделирования для $\Delta n = 1,4 \times 10^{-4}$ (зелёная линия 5), измеренные значения для $\Delta n = 1,4 \times 10^{-4}$ (зелёные полые точки 6).

выше величин, влияющих на итоговое проходящее излучение.

На рис. 7 представлена функция сплайна (сплошная линия), построенная по средним значениям области пропускания (для различных длин решёток). Для $\Delta n = 0,7 \times 10^{-4}$ экспериментальные данные взяты из работы [19] и дополнены изучением поведения кривой на более длинных структурах. Для каждой точки построено СКО по 5 значениям. Минимальное и максимальное значения СКО — 0,495 пм и 6,9282 пм соответственно.

Для анализа правильности проведённых экспериментов осуществлялось сравнение экспериментальных (сплошная линия на рис. 7) и теоретических (штрихпунктирная линия на рис. 7) данных. По описанному ниже алгоритму моделировались спектры отражения ВБРсФС, а затем вычислялись $\Delta\lambda_{pb}$. Моделирование осуществлялось для тех же длин структур, для которых проводились эксперименты, по полученным результатам также строилась аппроксимирующая функция (штрихпунктирная линия на рис. 7).

Моделирование в работе сводилось к решению уравнений Максвелла: рассматривалось распределение поля мод, распространение

которых без каких-либо неоднородностей подразумевает отсутствие связи друг с другом. При этом, в случае наличия периодической структуры (например, решётки Брэгга) возникает связь определённых мод, которая описывается теорией связанных мод [30–31].

На первом этапе моделирования описывались свойства оптического волокна как среды распространения излучения — дисперсионная зависимость (в работе использовались формулы Селмейера) и параметры используемого волокна представлены в разделе «Используемое в работе оптическое волокно».

После описания свойств среды распространения производился расчёт коэффициентов связи мод. Как было указано ранее, в работе была использована теория связанных мод, позволяющая рассматривать распределение модового поля внутри световода со сформированной дифракционной структурой как линейную комбинацию мод световода, распространяющихся в том же световоде, но без неоднородностей.

Спектры отражения волоконных брэгговских решёток рассчитывались на основе метода передаточных матриц [9, 32]. Суть такого метода сводится к изучению изменения выходящих полей по отношению к входящим полям через передаточную матрицу, характеризующую параметры сформированной дифракционной структуры (амплитуду и фазу). Метод передаточных матриц подразумевает введение матрицы фазового сдвига, в которой и задавалась разность фаз между двумя сформированными стандартными ВБР.

На основе метода передаточных матриц и методики определения дисперсионной зави-

симости эффективного показателя преломления, использовался алгоритм команд, позволяющий рассчитать спектр отражения ВБР с фазовым сдвигом [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе нами была разработана методика формирования волоконных брэгговских решёток с фазовым сдвигом (с устранением изученных в литературе недостатков существующих методов), позволяющая записывать решётки ПП различных длин, а также осуществлять контроль и изменение параметров решётки.

Основным значением для сравнения между собой решёток с фазовым сдвигом была величина ширины области пропускания в полосе отражения на половинной амплитуде. Таким образом, в ходе проведения работы авторами были получены зависимости указанного параметра от длины решётки и от наведённой модуляции показателя преломления. Также были получены модели указанной зависимости с учётом дисперсионной зависимости для используемого в работе оптического волокна. Показано, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования.

В ходе проведённых экспериментов значение ширины провала на полувысоте варьируется в диапазоне от 8 до 76 пм. Результаты работы носят высокую практическую значимость для исследований в областях сенсорных систем различной точности, оптических фильтров с необходимыми окнами пропускания, узкополосных лазеров с различными диапазонами излучения и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hao J., Jing C., Tundong L., Hongyan F. Design of an FBG sensor network based on Pareto multi-objective optimization // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2013. V. 25(15). P. 1450–1453.
2. Spolitis S., Ivanovs G. Extending the Reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation // *IEEE Swedish Communication Technologies Workshop*. 2011. P. 29–33.
3. Shuo L., Fengping Y., Wanjin P., Ting F., Ze D., Geekung C. Tunable dual-wavelength Thulium-doped fiber laser by employing a HB-FBG // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 26(18). P. 1809–1812.
4. Alyshev S.V., Ryumkin K.E., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Gur'yanov A.N., Dianov E.M. Fibre laser based on tellurium-doped active fibre // *Quantum Electronics*. 2014. V. 44. P. 95–97.
5. Wang S., Wang Y., Hu M., Wang J., Guo C., Lei H. A new style of FBG vibration sensor // *Journal of Basic and Applied Physics*. 2013. V. 2(1). P. 20–23.
6. Minghao Y., Xin Z., Tengyun G., Jinxue S. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on fiber vibrating wire // *Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology*. 2014. P. 529–533.

7. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32(10). P. 647–649.
8. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Opt. Lett. 1989. V. 14(15). P. 823–825.
9. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. San Diego: Academic Press, 1999. 478 p.
10. Byron K.C., Sugden K., Bricheno T., Bennion I. Fabrication of chirped Bragg gratings in photosensitive fibre // Electron. Lett. 1993. V. 29(18). P. 1659–1660.
11. Мухнева А.А., Грибаев А.И., Варжель С.В., Фролов Е.А., Новикова В.А., Коннов К.А., Залеская Ю.К. Запись и исследование спектральных характеристик чирпированных волоконных решеток Брэгга // Оптический журнал. 2018. Т. 89(9). С. 12–16.
12. Kashyap R., McKee P.F., Campbell R.J., Williams D.L. Novel method of producing all fibre photoinduced chirped gratings // Electronics Letters. 1994. V. 30(12). P. 996–998.
13. Idrisov R.F., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K., Rothhardt M., Becker M., Schuster K., Bartelt H. Spectral characteristics of draw-tower step-chirped fiber Bragg gratings // Optics & Laser Technology. 2016. V. 80. P. 112–115.
14. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. In-fiber Bragg grating tap // OSA/OFC. paper TUG1. 1990.
15. Konnov K.A., Frolov E.A., Gribaev A.I., Zakharov V.V., Mikhneva A.A., Novikova V.A., Varzhel S.V. Inscription and visualization of tilted fiber Bragg gratings // Optics and Spectroscopy. 2018. V. 125(1). P. 54–59.
16. Othonos A., Lee X., Measures R.M. Superimposed multiple Bragg gratings // Electron. Lett. 1994. V. 30(23). P. 1972–1973.
17. Idrisov R.F., Gribaev A.I., Stam A.M., Varzhel' S.V., Slozhenikina Yu.I., Konnov K.A. Inscription of superimposed fiber Bragg gratings using a Talbot interferometer // J. Opt. Technol. 2017. V. 24(10). P. 694–697.
18. Liu Y., Lee S.B., Choi S.S. Phase-shifted fiber Bragg Grating transmission filters based on the Fabry-perot effect // Journal of the Optical Society of Korea. 1998. V. 2(1). P. 30–33.
19. Novikova V.A., Varzhel S.V., Konnov K.A., Gribaev A.I., Mikhneva A.A., Frolov E.A. Phase-shifted fiber Bragg gratings fabrication method // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1038(012095). P. 1–6.
20. Rosenthal A., Razansky D., Ntziachristos V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating // Opt. Lett. 2011. V. 36(10). P. 1833–1835.
21. Canning J., Sceats M.G. π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing // Electronics Letters. 1994. V. 30(16). P. 1344–1345.
22. Kashyap R., McKee P.F., Armes D. UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibres using phase-shifted phase masks // Electronics Letters. 1994. V. 30(23). P. 1977–1978.
23. Chehura E., James S., Tatam R. A simple method for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings with flexible choice of centre wavelength // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7503. P. 1–4.
24. Yuanhong Y., Xuejing L., Wei J. Phase shifted fiber Bragg grating fabrication techniques and their laser applications // Asia Communications and Photonics Conference 2013, OSA Technical Digest (online). 2013. paper AT3D.5.
25. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. 2005. V. 35(12). P. 1085–1103.
26. 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. V. 60(5). P. 466–473.
27. 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 // Opt Quant Electron. 2016. V. 48. P. 1–7.
28. Martinez C., Ferdinand P. Analysis of phase-shifted fiber Bragg gratings written with phase plates // Applied Optics. 1999. V. 38(15). P. 3223–3228.
29. Othonos A. Fiber Bragg gratings // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68(12). P. 4309–4341.
30. Kogelnik H., Shank C.W. Coupled-Wave theory of distributed feedback lasers // Journal of Applied Physics. 1972. V. 43(5). P. 2327–2335.
31. Matsuhara M., Hill K.O., Watanabe A. Optical-waveguide filters: Synthesis // Journal of the Optical Society of America. 1975. V. 65(7). P. 804–809.
32. Yamada M., Sakuda K. Analysis of almost periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach // Applied Optics. 1987. V. 26(16). P. 3474–3478.
33. Архипов С.В. Исследование и оптимизация технологии записи решёток Брэгга в анизотропных волоконных световодах // Автореф. канд. дис. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2017. 22 с.