

УДК 681.7.068; 681.586.5; 621.373.826; 621.9.048.7

**А.А. Вольф^{1,2}, А.В. Достовалов^{1,2}, С.Л. Семёнов³,
С.Г. Журавлев³, М.Ю. Салганский⁴, О.Н. Егорова⁵**

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

² Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

⁴ Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,
Нижний Новгород, Россия

⁵ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

СОЗДАНИЕ ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ ВБР В 7-СЕРДЦЕВИННОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ПОТОЧЕЧНОЙ ЗАПИСИ

Приводятся экспериментальные результаты по селективной записи однородных и неоднородных волоконных брэгговских решеток в выбранных сердцевинах специализированного 7-сердцевинного волоконного световода с полиимидным защитным покрытием. Селекция сердцевин достигалась за счет использования метода фемтосекундной поточечной записи, при которой поглощение одного лазерного импульса индуцирует изменение показателя преломления исключительно в выбранной области материала. С помощью описанного в работе метода был создан образец массива однородных брэгговских решеток в центральной и боковой сердцевинах световода, а также решетки с chirпованным и аподизованным профилем модуляции показателя преломления. Результаты работы открывают возможность создания многопараметрических датчиков физических величин и компактных векторных изгибных датчиков.

Ключевые слова: многосердцевинный волоконный световод, волоконная брэгговская решетка, модификация показателя преломления, фемтосекундная лазерная микрообработка.

**A.A. Wolf^{1,2}, A.V. Dostovalov^{1,2}, S.L. Semjonov³,
S.G. Zhuravlev³, M.Yu. Salganskii⁴, O.N. Egorova⁵**

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

³ Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow, Russian Federation

⁴ G.G. Deviatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁵ Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russian Federation

FABRICATION OF UNIFORM AND NON-UNIFORM FBGS IN 7-CORE OPTICAL FIBER USING FEMTOSECOND POINT-BY-POINT INSCRIPTION TECHNIQUE

The paper presents the experimental results on the selective inscription of uniform and non-uniform fiber Bragg gratings in selected cores of a specialized 7-core optical fiber with a polyimide pro-

protective coating. The selection of cores is achieved by using the femtosecond point-by-point inscription technique, in which the absorption of a single laser pulse induces the refractive index change strictly in a chosen volume of material. Using the approach described in this work, an array of uniform Bragg gratings in the central and side cores of the optical fiber, as well as gratings having chirped and apodized modulation profile of the refractive index were created. The results open up the possibility of creating multiple-parameter sensors of physical quantities and compact vector bend sensors.

Keywords: multicore optical fiber, fiber Bragg grating, refractive index change, femtosecond laser micromachining.

Введение

Задача записи волоконных брэгговских решеток (ВБР) в много-сердцевинных волоконных световодах (МВС) имеет высокую актуальность для многих прикладных задач: для разработки оптических линий связи с высокой пропускной способностью [1], создания линий задержки в радиофотонике [2], разработки волоконных лазеров с уникальными характеристиками [3], создания датчиков для измерения физического воздействия [4]. Наиболее ярко преимущества записи ВБР в МВС проявляются при создании волоконно-оптических датчиков изгибных деформаций, где величины смещений резонансных длин волн ВБР для разных сердцевин могут быть использованы для вычисления радиуса и направления изгиба, что позволяет создавать векторные изгибные датчики для применения в диагностике конструкций, робототехнике и малоинвазивной хирургии, где для достижения точного и надежного контроля перемещения манипулятора внутри тела пациента требуется система точного трехмерного восстановления формы манипулятора [5]. Данная проблема актуальна на сегодняшний день, поскольку ее решение позволит повысить точность проведения процедур в процессе операции, исключить нежелательные последствия, связанные с ошибками в позиционировании и местоположении воздействия.

Стандартные методы записи ВБР основываются на использовании УФ лазерного излучения и интерференционных схем для формирования периодической модуляции показателя преломления в фоточувствительной сердцевине волоконного световода. Однако при использовании данного подхода для МВС не удается локализовать поглощение УФ излучения, и поэтому запись ВБР с одним периодом происходит сразу в нескольких сердцевинах, что ограничивает возможности по мультиплексированию ВБР.

Данное ограничение может быть преодолено за счет использования технологии модификации прозрачных материалов мощными фемтосекундными лазерными импульсами видимой или ИК-области.

В данном случае поглощение фемтосекундных импульсов в прозрачном материале носит нелинейный характер и происходит при достижении определенной пороговой интенсивности лазерного излучения. Таким образом, при фокусировке фемтосекундного излучения в объемный материал поглощение будет происходить исключительно вблизи фокальной области пучка, а локальность индуцированной модификации может достигать значений $\sim 1 \text{ мкм}^3$. Точное позиционирование модификации показателя преломления в продольном и поперечном сечении волоконного световода позволяет записывать ВБР в выбранных сердцевинах МВС с различными параметрами (поперечное и продольное расположение, резонансная длина волны, коэффициент отражения). Возможность выбора параметров для каждой отдельной ВБР создает перспективы для многопараметрических датчиков, а также позволяет опрашивать такие датчики через один оптический порт, поскольку сигналы от разделенных по длинам волн ВБР могут быть сложены через волоконный объединитель.

1. Экспериментальная установка

В данной работе в качестве источника фемтосекундных импульсов использовался фемтосекундный лазер Light Conversion Pharos 6W ($\lambda = 1030 \text{ нм}$, $t_p = 232 \text{ фс}$). Лазерные импульсы с частотой $f = 1 \text{ кГц}$ фокусировались с помощью микрообъектива Mitutoyo 50X Plan Apo NIR HR ($NA = 0,65$) в заданную область МВС. Специальная стеклянная феррула со шлифованными боковыми гранями позволяла зафиксировать положение МВС относительно области фокусировки, как это показано на рис. 1, а. Феррула крепилась на трехосевом линейном трансляторе Thorlabs MAX312D/M, который позволял подвести МВС в область фокусировки микрообъектива. Для двухкоординатного контроля положения области модификации в поперечном срезе МВС использовались две КМОП-камеры и дополнительный объектив, установленный перпендикулярно основному. Продольная периодическая модуляция показателя преломления достигалась за счет перемещения МВС с выбранной постоянной скоростью ($v_{tr,x} \approx 1 \text{ мм/с}$ для ВБР 2-го порядка) с помощью высокоточного линейного транслятора Aerotech ABL1000. Период ВБР определялся соотношением $\Lambda = v_{tr,x}/f$, а резонансная длина волны $\lambda = 2n_{eff}v_{tr,x}/mf$, где m – порядок ($m = 2$), в котором реализуется резонансное отражение оптического сигнала на

структуре ВБР. При записи МВС фиксировался на линейном трансляторе при помощи зажима, который имел угловую степень свободы, что позволяло поворачивать его вокруг своей оси. К главным преимуществам данной схемы можно отнести высокую производительность записи ВБР, а также возможность модификации широкого круга волоконных световодов, в том числе световодов с защитной пластиковой оболочкой [6], а также световодов со сложной поперечной пространственной структурой, таких как многосердцевинные и многомодовые [7].

Помимо ВБР с однородным профилем показателя преломления (рис. 1, б) в работе приводятся результаты по записи ВБР с аподизованным и чирпованным профилем. Аподизация продольной модуляции показателя преломления достигалась за счет поперечного смещения выбранной сердцевинки МВС относительно фокальной точки f_c лазерного пучка, как это показано на рис. 1, в. В таком случае поле моды, имеющее поперечное распределение, близкое к гауссовому, будет перекрываться с областью f_c модификации с разной эффективностью вдоль оптической оси выбранной сердцевинки. В нашем случае смещение модификаций в поперечном направлении происходило линейным образом с постоянной скоростью $v_{tr,y}$, что обеспечивало гауссов профиль аподизации. Линейный чирп периода ВБР достигался за счет равноускоренного движения МВС в процессе записи, как это показано на рис. 1, г.

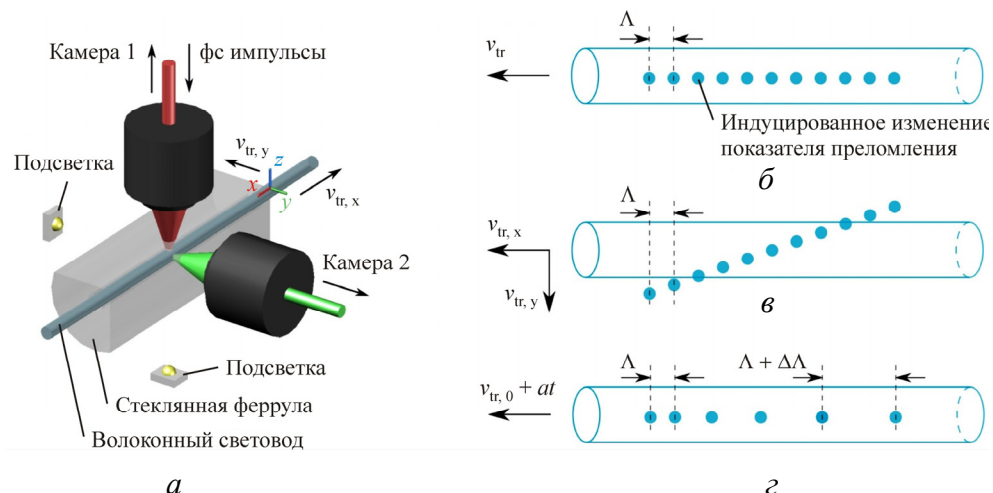


Рис. 1. Поточечная запись ВБР методом протяжки волокна через прозрачную ферулу (а), расположение f_c модификаций относительно сердцевинки волоконного световода при разных профилях модуляции показателя преломления: однородном профиле (б), аподизации (в), чирпе (г)

Поскольку частота f_c лазерных импульсов оставалась постоянной ($f = 1$ кГц), ускорение приводило к увеличению расстояния между соседними модификациями и уширению резонансного спектра ВБР.

Исследование возможностей описанного выше метода записи проводилось для 7-сердцевинного волоконного световода, изготовленного в ИЦВО РАН (г. Москва). Фотография торца 7-сердцевинного волоконного световода, полученная с помощью оптического микроскопа, приведена на рис. 2. Сердцевины световода одинаковые и расположены гексагонально. Расстояние между центрами соседних сердцевин составляло 40,5 мкм, диаметр каждой из сердцевин около 5,3 мкм, диаметр поля моды около 5,7 мкм на длине волны 1550 нм. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки составляла около 0,015, что соответствует апертуре $NA = 0,21$. Длина волны отсечки первой высшей моды каждой из сердцевин находилась в диапазоне 1450–1470 нм. Диаметр оболочки из кварцевого стекла составлял 125 мкм.

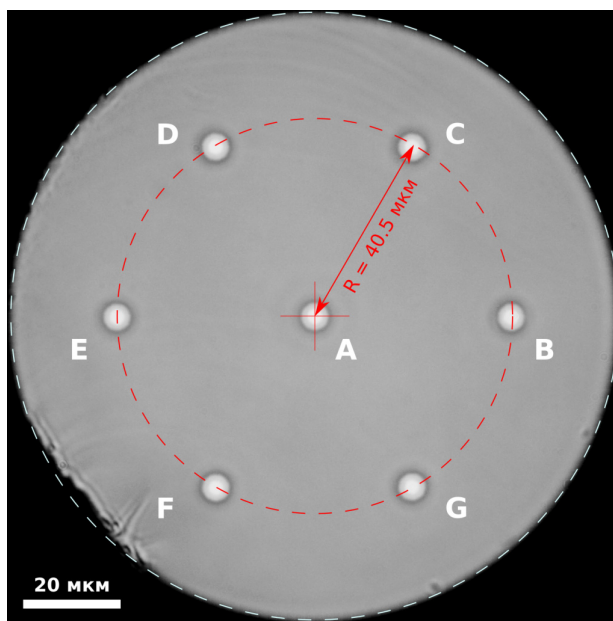


Рис. 2. Микрофотография прямого скола 7-сердцевинного волоконного световода

Световод был покрыт полиимидным защитным покрытием с внешним диаметром 154 мкм. Полиимидное защитное покрытие делает возможным использование световода при высоких температурах

(до 300 °С) и прямом механическом воздействии, поскольку полиимид имеет более высокую твердость по сравнению со стандартным акрилатом, а также высокую адгезию со стеклянной поверхностью оболочки волоконного световода. Данное преимущество позволяет использовать данный волоконный световод для создания высокотемпературных датчиков деформации для разных видов медицинского применения, где на этапе проведения стерилизации изделие со встроенным датчиком подвергается длительному высокотемпературному (> 200 °С) воздействию. Помимо этого малые габариты данного волокна облегчают встраивание волоконно-оптических датчиков на их основе в различные конструкции, например, при производстве «умных» композитных материалов.

Для измерения спектральных характеристик созданных ВБР использовался оптический анализатор спектров Yokogawa AQ6370D (ОСА) и суперлюминесцентный диод SLD1550S-A2 (СЛД). Излучение от источника света заводилось на вход волоконного циркулятора и далее поочередно направлялось в каждую отдельную сердцевину МВС, как это показано на рис. 3 при помощи специализированного устройства ввода-вывода, изготовленного в НЦВО РАН. Устройство ввода-вывода было изготовлено и присоединено к МВС так же, как это описано в работе [2]. Используемое в данной схеме устройство ввода-вывода обеспечивало коэффициент обратного отражения менее -40 дБ, а уровень вносимых оптических потерь – менее 1 дБ.

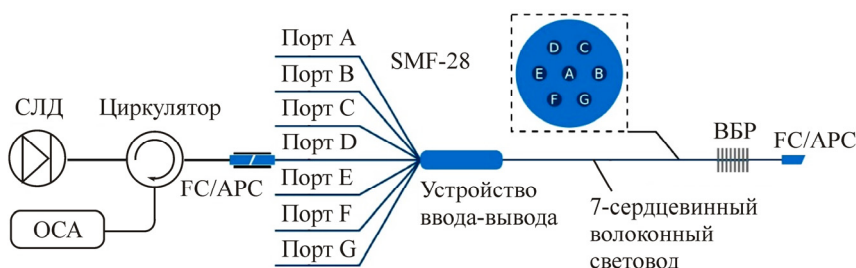


Рис. 3. Схема опроса отдельных сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода

2. Результаты и обсуждение

Для демонстрации работоспособности описанной выше схемы записи был создан массив, состоящий из 12 ВБР: 6 решеток в центральной сердцевине А и 6 решеток в боковой сердцевине С. Все ВБР в массиве имели однородный профиль показателя преломления, фик-

сированную длину $L = 2$ мм и фиксированное продольное расстояние между центрами соседних структур, равное 5 мм. Сначала запись производилась в центральной сердцевине, при этом периоды ВБР менялись последовательно с $\Lambda_1 = 1,036$ мкм до $\Lambda_6 = 1,093$ мкм. Изменение периода на $\Delta\Lambda \approx 11,4$ нм между соседними ВБР позволило спектрально разделить их резонансы на величину $\Delta\lambda \approx 16,7$ нм. После записи массива ВБР в центральной сердцевине А волоконный световод смещался в начальную координату в продольном направлении, а затем в поперечном направлении таким образом, чтобы фокус записывающего объектива переместился в боковую сердцевину С. Далее производилась модификация боковой сердцевины С, при которой ВБР записывались в той же последовательности, что и в случае сердцевины А. При этом длины ВБР и промежутки между ними сохранялись. Результат измерения спектров отражения отдельных сердцевины представлен на рис. 4. На рис. 5 приведена микрофотография участка одной из ВБР, записанных в боковой сердцевине МВС.

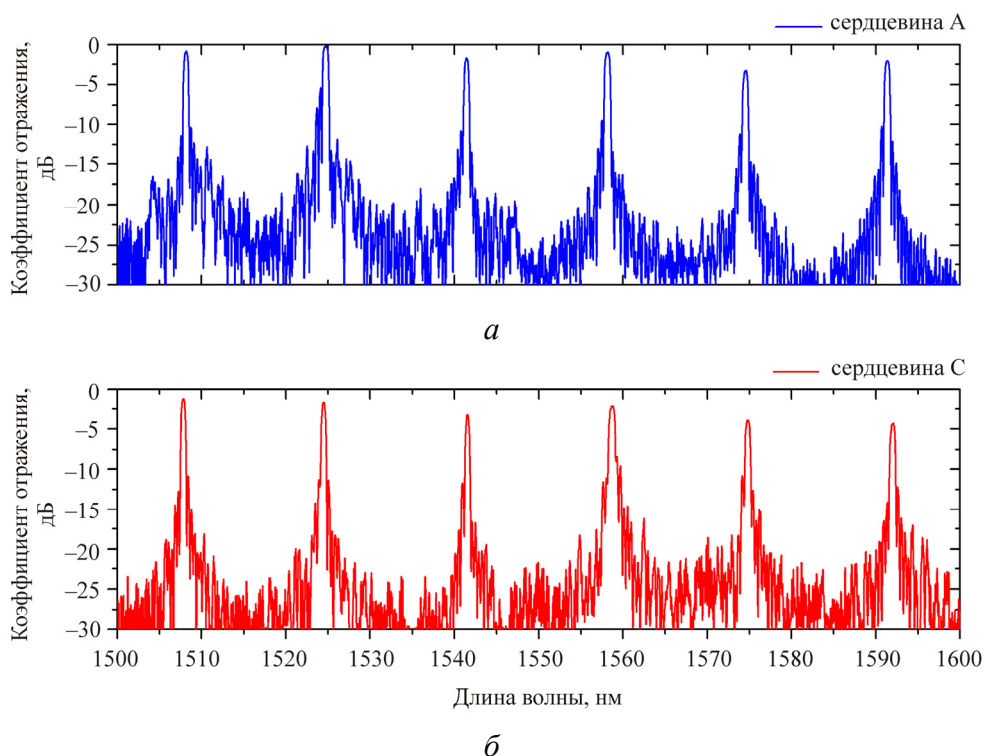


Рис. 4. Спектры отражения массивов ВБР, записанных в центральной сердцевине А (а) и боковой сердцевине С (б) 7-сердцевинного волоконного световода

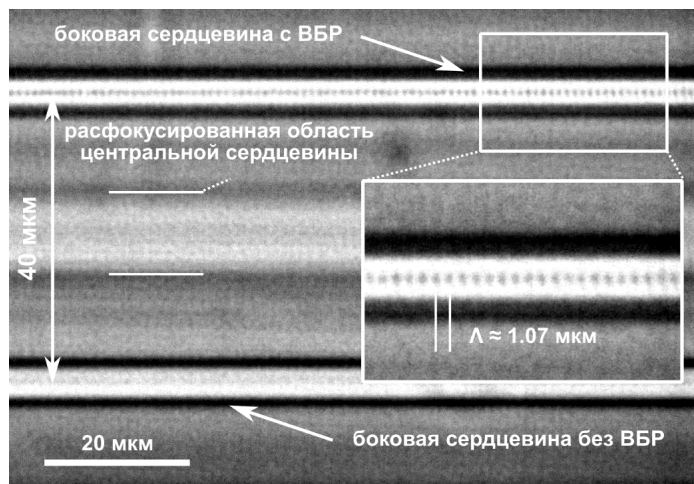


Рис. 5. Микрофотография участка ВБР, записанной в боковой сердцевине МВС

В следующем эксперименте производилась запись линейно chirпованной ВБР с длиной $L = 10$ мм, начальным периодом $\Lambda_s = 1,07$ мкм и конечным периодом $\Lambda_f = 1,072$ мкм. Скорость изменения периода ВБР составила $\Delta\Lambda/L = 0,2$ нм/мм. Для записи была выбрана одна из боковых сердцевины МВС. После записи структуры участок МВС, содержащий ВБР, изгибался на радиус $R = 32,5$ мм, после чего поворачивался вокруг своей оси. При повороте осуществлялась регистрация спектров отражения. На рис. 6 представлены спектры, соответствующие выпрямленному участку МВС, а также минимальному и максимальному спектральному сдвигу, величина которого составила $\Delta\lambda = \pm 1,45$ нм. Из рисунка видно, что форма спектра, а также отражательная способность ВБР не подвергаются значительному изменению при заданном радиусе изгиба.

Далее проводилось сравнение спектральных характеристик однородной и аподизированной ВБР, записанных в центральной сердцевине МВС. Длина каждого из образцов была 2 мм, а период структуры – 1,074 мкм. В случае аподизированной ВБР начальное положение точки фокусировки f_c импульсов находилось вне сердцевины волокна на расстоянии 10 мкм от её центра, конечное положение находилось на расстоянии 10 мкм с противоположной стороны, что обеспечивало переменный коэффициент перекрытия области модификации показателя преломления с полем моды выбранной сердцевины. На рис. 7 приведены спектры пропускания/отражения для созданных образцов. Как вид-

но из приведенных спектров, степень подавления боковых пиков, или параметр SLSR (от англ. side lobe suppression ratio), находится на уровне 7,5 дБ для однородной ВБР и 13,5 дБ для аподизованной. Более широкий спектр аподизованной ВБР обусловлен её меньшей эффективной длиной. В частности, при заданных параметрах записи длина, на которой ВБР пересекает сердцевину, составляет около 0,55 мм.

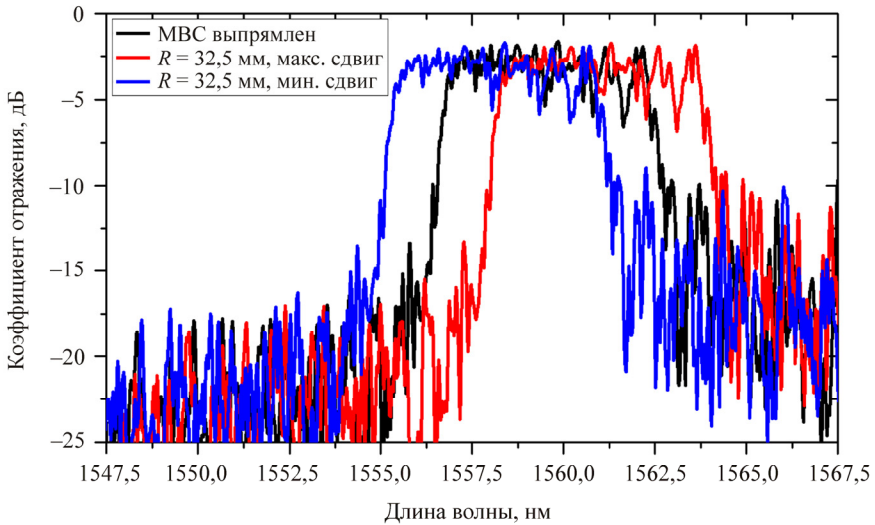


Рис. 6. Спектры отражения линейно chirпованной ВБР, записанной в одной из боковых сердцевины 7-сердцевинного волоконного световода (спектры измерялись для выпрямленного участка МВС (черный) и изогнутого (красный и синий))

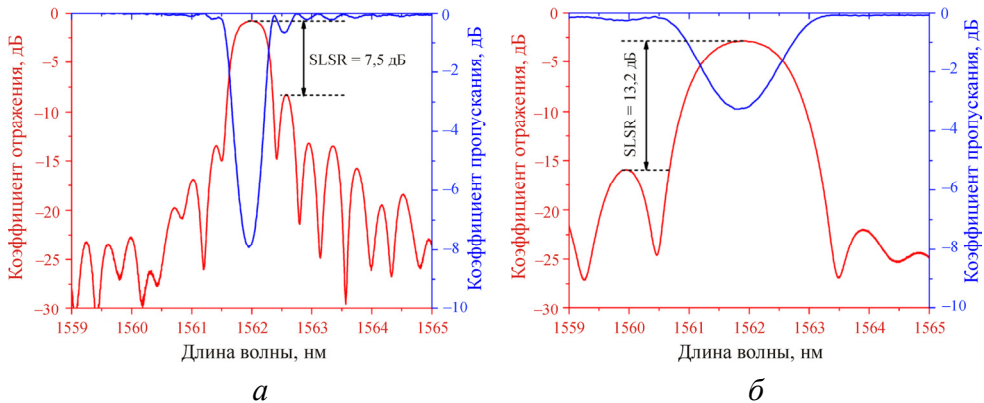


Рис. 7. Спектры отражения/пропускания однородной (а) и аподизованной (б) ВБР, записанных в центральной сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода

Один из образцов аподизованных ВБР был записан в выбранной боковой сердцевине МВС. За счет снижения энергии фс лазерных импульсов полученный образец имел меньший коэффициент отражения и более высокую степень подавления боковых пиков ($SLSR = 17,3$ дБ). Участок МВС с записанной ВБР изгибался на радиус $R = 32,5$ мм, после чего световод поворачивался вокруг своей оси. На рис. 8 представлены спектры, соответствующие минимальному и максимальному спектральному сдвигу пика отражения ВБР, зарегистрированным в процессе вращения. Как и в случае с чирпованной ВБР, изгибная деформация не приводит к заметному изменению отражательной способности ВБР, а также формы резонансного пика. Измеренная величина спектрально сдвига также составила $\Delta\lambda = \pm 1,45$ нм. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования МВС с записанными в сердцевинах ВБР для задач восстановления величин радиуса и направления изгиба волоконного световода с помощью записанных в световоде ВБР.

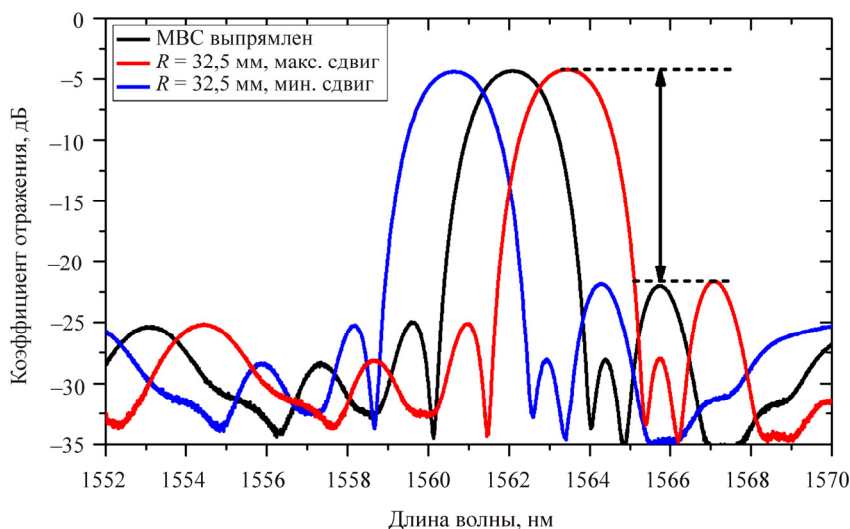


Рис. 8. Спектры отражения аподизованной ВБР, записанной в одной из боковых сердцевинок 7-сердцевинного волоконного световода (спектры измерялись для выпрямленного участка МВС (черный) и изогнутого (красный и синий))

Заключение

Таким образом, в работе было показано, что метод фемтосекундной поточечной записи позволяет создавать ВБР в выбранных сердцевинах

многосердцевинного волоконного световода. В качестве примера было показано, что массив ВБР может быть записан в центральной и выбранной боковой сердцевине световода. Более того, для создаваемых структур могут быть заданы как поперечный, так и продольный профили модуляции показателя преломления, что было продемонстрировано на примере записи аподизованной и чирпованной ВБР. Показано, что спектры отражения ВБР, записанных в боковой сердцевине световода, не подвергаются значительным искажениям при радиусах изгиба 32,5 мм. Возможность модификации волоконного световода через полиимидное защитное покрытие, а также выбор параметров для каждой отдельной ВБР имеют перспективы для создания волоконно-оптических датчиков нового поколения, а именно многопараметрических датчиков физических величин и компактных векторных изгибных датчиков.

Работа А.В. Достовалова выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-72-00139). Авторы выражают благодарность Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПНППК) за вытяжку многосердцевинного волоконного световода в полиимидном покрытии.

Список литературы

1. Saitoh K., Matsuo S. Multicore Fiber Technology // J. Light Technol. – 2016. – Vol. 34, no. 1. – P. 55–66.
2. Microwave signal delay line based on multicore optical fiber / O.N. Egorova, M.E. Belkin, D.A. Klushnik, S.G. Zhuravlev, M.S. Astapovich, S.L. Semojnov // Phys. Wave Phenom. – 2017. – Vol. 25, no. 4. – P. 289–292.
3. Random Raman fiber laser based on a twin-core fiber with FBGs inscribed by femtosecond radiation / M.I. Skvortsov, S.R. Abdullina, A.A. Wolf, A.V. Dostovalov, A.A. Vlasov, I.A. Lobach, S. Wabnitz, S.A. Babin // Opt. Lett. – 2019. – Vol. 44, no. 2. – P. 295.
4. Moore J.P., Rogge M.D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20, no. 3. – P. 2967.
5. Shape Sensing Techniques for Continuum Robots in Minimally Invasive Surgery: A Survey / C. Shi, X. Luo, P. Qi, T. Li, S. Song, Z. Najdovski, T. Fukuda, H. Ren // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2017. – Vol. 64, no. 8. – P. 1665–1678.

6. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule / A.V. Dostovalov, A.A. Wolf, A.V. Parygin, V.E. Zyubin, S.A. Babin // *Opt. Express* – 2016. – Vol. 24, no. 15. – P. 16232–16237.

7. Femtosecond writing of refractive index structures in multimode and multicore fibres / A.A. Wolf, A.V. Dostovalov, S. Wabnitz, S.A. Babin // *Quantum Electron.* – 2018. – Vol. 48, no. 12. – P. 1128–1131.

References

1. Saitoh K., Matsuo S. Multicore fiber technology. *J. Light. Technol.*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 55-66.

2. Egorova O.N., Belkin M.E., Klushnik D.A., Zhuravlev S.G., Astapovich M.S., Semojnov S.L. Microwave signal delay line based on multi-core optical fiber. *Phys. Wave Phenom.*, 2017, vol. 25, no. 4, pp. 289-292.

3. Skvortsov M.I., Abdullina S.R., Wolf A.A., Dostovalov A.V., Vlasov A.A., Lobach I.A., Wabnitz S., Babin S.A. Random Raman fiber laser based on a twin-core fiber with FBGs inscribed by femtosecond radiation. *Opt. Lett.*, 2019, vol. 44, no. 2, p. 295.

4. Moore J.P., Rogge M.D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 3, p. 2967.

5. Shi C., Luo X., Qi P., Li T., Song S., Najdovski Z., Fukuda T., Ren H. Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: a survey. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2017, vol. 64, no. 8, pp. 1665-1678.

6. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule. *Opt. Express*, 2016, vol. 24, no. 15, pp. 16232-16237.

7. Wolf A.A., Dostovalov A.V., Wabnitz S., Babin S.A. Femtosecond writing of refractive index structures in multimode and multicore fibres. *Quantum Electron.*, 2018, vol. 48, no. 12, pp. 1128-1131.

Получено 06.05.19