УДК 681.586.5

**А.А. Вольф¹, А.В. Парыгин¹, С.С. Якушин²,
В.Е. Зюбин¹, А.В. Достовалов¹**

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ПОТОЧЕЧНАЯ ЗАПИСЬ ДЛИННЫХ ВБР ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЧЕРЕЗ ПОЛИИМИДНУЮ ОБОЛОЧКУ

Представлены результаты записи длинных (до 90 мм) ВБР (волоконных брэгговских решеток) фемтосекундным излучением без удаления защитного покрытия методом протяжки световода через феррулу. Измерены чувствительности записанных ВБР к изменению температуры и деформации. Исследовано поведение спектра длинной ВБР при локальном воздействии.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, фемтосекундная лазерная модификация показателя преломления, длинные брэгговские решетки.

**A.A. Wolf¹, A.V. Parygin¹, S.S. Yakushin²,
V.E. Ziubin¹, A.V. Dostovalov¹**

¹ Institute of Automation and Electrometry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

POINT-BY-POINT WRITING OF LONG FBG WITH FEMTOSECOND LASER RADIATION THROUGH THE POLYIMIDE COATING

The results of inscription of long (up to 90 mm) FBG (fiber Bragg grating) with femtosecond laser radiation without removing of the polyimide coating and with ferrule based writing technique are presented. Temperature and strain sensitivities of inscribed FBG were measured.

Ключевые слова: fiber Bragg grating, femtosecond laser refractive index modification, long fiber Bragg gratings.

Введение

Создание длинных волоконных брэгговских решеток (ВБР) показателя преломления актуально для различных прикладных задач фотоники [1–3], в частности, для распределенных сенсорных систем, где

использование длинных ВБР позволит проводить мониторинг объектов с высоким пространственным разрешением на сравнительно большой длине [4]. Основные результаты записи таких решеток получены по технологии УФ-модификации показателя преломления фоточувствительных световодов с использованием фазовой маски, при которой длина ВБР определяется шириной пучка. При этом для увеличения интенсивности излучения в сердцевине световода применяют фокусировку с помощью цилиндрической линзы, что делает затруднительным фокусировку в сердцевину при большой величине диаметра пучка. Для решения данной проблемы в [5] была предложена схема сканирования фазовой маски при записи. Таким образом, длина ВБР ограничивается только длиной фазовой маски либо последовательно расположенных нескольких коротких фазовых масок вдоль световода [6]. В работе [7] удалось усовершенствовать метод записи длинных ВБР, в предложенной схеме с помощью высокоточного позиционера осуществлялось перемещение только волокна. Таким образом, длина ВБР в данном случае определяется максимальным диапазоном перемещения линейного позиционера, что дает возможность записи решеток с общей длиной до 1 м и спектральной шириной 2,5 нм [8].

Однако технология УФ-модификации показателя преломления требует использования фоточувствительных световодов (например, стандартный германоциликатный световод, подвергнутый насыщению сетки стекла молекулярным водородом), а также удаления защитного пластикового покрытия, которое не прозрачно для УФ-излучения. Альтернативным и бурно развивающимся направлением создания ВБР является технология фемтосекундной лазерной модификации показателя преломления [9]. Для фемтосекундных импульсов поглощение энергии происходит через механизм нелинейного (многофотонного) поглощения, что делает возможным запись в нефоточувствительных материалах, а также прямую запись через защитное покрытие волоконного световода, которое прозрачно для инфракрасного (ИК) фемтосекундного лазерного излучения. Помимо перечисленных выше важных достоинств технологии фемтосекундной лазерной записи, было продемонстрировано, что решетки, записанные фемтосекундными лазерными импульсами, имеют температурную стабильность вплоть до 1600 °C [10], а также устойчивы к гамма-излучению [11]. Таким образом, запись волоконных решеток фемтосекундными импульсами пред-

ставляется перспективной с точки зрения создания сенсорных систем с расширенными техническими характеристиками.

К настоящему времени продемонстрировано два метода фемтосекундной записи решеток показателя преломления в волоконных световодах: запись с использованием фазовой маски и поточечная запись [12, 13]. Второй метод записи более привлекателен при записи ВБР для сенсорных применений, где требуется иметь набор ВБР с различными резонансными длинами волн отражения. Однако данный метод имеет ряд недостатков, связанных как с высокой точностью позиционирования штрихов решетки внутри сердцевины световода, так и с их относительным расположением. Для решения данной проблемы был предложен метод записи ВБР с протяжкой световода через прозрачную феррулу со шлифованной боковой гранью для эффективной фокусировки в сердцевину волокна [14]. Однако авторы использовали стандартную феррулу с внутренним диаметром $D = 126$ мкм для работы со стандартным световодом $D = 125$ мкм без защитного покрытия, таким образом, теряется преимущество прямой записи ВБР через оболочку.

В данной работе предложена схема прямой записи длинных ВБР без удаления защитного покрытия, что открывает возможности для создания распределенных сенсорных систем с рекордными параметрами рабочих диапазонов (температура и деформация), а также возможностями для эксплуатации в химически агрессивных средах и средах с повышенным радиационным фоном.

1. Экспериментальная установка

Поточечная запись ВБР осуществлялась на установке прецизионной фемтосекундной модификации материалов, схема которой представлена на рис. 1. Данная установка была существенно модифицирована по сравнению с исходным вариантом [15], где не было протяжки через феррулу. Прозрачная феррула с внутренним диаметром 150 мкм и шлифованной боковой стороной (см. вставку на рис. 1) располагалась на трехкоординатном пьезопозиционере с диапазоном перемещений 20 мкм, пространство между волоконным световодом (ВС) и внутренними стенками феррулы заполнялось иммерсионной жидкостью. С помощью подсветки и ПЗС-матрицы выполнялась настройка положения области фокусировки внутри сердцевины световода. Для записи ВБР световод SM1500 (9/125) P (Fibercore LTD) с диаметром 145 мкм про-

Рис. 1. Схема экспериментальной установки по записи длинных ВБР фемтосекундным лазерным излучением

тягивался через феррулу с помощью высокоточного линейного позиционера Aerotech ABL1000. Поскольку диаметр волокна меньше внутреннего диаметра феррулы, волокно может отклоняться в ферруле в поперечном направлении на 5 мкм, что недопустимо при записи длинных ВБР. Для устранения этих отклонений использовалась система с обратной связью, которая с помощью пьеэопозиционера компенсирует смещения волокна при протяжке, величина которых измеряется по отклонению границ волокна на изображении с камеры. Энергия импульсов лазерного излучения контролировалась высокочувствительным фотодетектором Ophir PD10-pJ (PD). Регистрация спектров волоконных решеток осуществлялась с помощью источника белого света Yokogawa AQ4305 и анализатора спектра Yokogawa AQ6370.

Сфокусированное объективом в сердцевину движущегося ВС излучение лазера периодически модифицирует показатель преломления, при этом период решетки определяется выражением

$$\lambda_{FBG} = \frac{v_{trans}}{f_{rad}}, \quad (1)$$

где v_{trans} — скорость перемещения ВС; f_{rad} — частота следования лазерных импульсов. Это означает, что период ВБР можно изменять, варьируя лишь скорость перемещения ВС при постоянной частоте повторе-

ния лазерных импульсов. С учетом этого выражение для резонансной длины волны ВБР λ_{FBG} примет следующий вид:

$$\lambda_{FBG} = \frac{2n_{eff}^{core} v_{trans}}{m f_{rad}}, \quad (2)$$

где m – дифракционный порядок решетки. Поскольку частота следования импульсов фиксирована, $f_{rad} = 1$ кГц, для создания решеток с резонансной длиной волны $\lambda_{FBG} \approx 1550$ нм скорость перемещения ВС в этом случае равна $v_{trans} = 0,535$ мм/с.

2. Результаты

На рис. 2 представлен спектр ВБР ($\lambda = 535$ нм) с длиной 5 см и $R = 22,5$ %, записанной через полиимидное покрытие фемтосекундными импульсами с энергией $E = 140$ нДж. Ширина спектра записанной решетки равна 100 пм. На рис. 3 представлены зависимости резонансной длины волны отражения ВБР при изменении температуры и деформации. Измеренная чувствительность ВБР к изменению температуры равна 11 пм/градус и чувствительность к деформации – 1,17 нм при деформации 0,1 %. На рис. 4 представлены результаты исследования локального воздействия на длинную ВБР. Металлический брусок размером 3 мм с температурой 150 °С располагался вплотную к ВБР, таким образом небольшая часть ВБР подвергалась нагреванию, что соответствует появлению дополнительного пика в спектре отражения ВБР. По мере прогревания участка данный дополнительный пик смещается в длинноволновую область, и крайнее положение пика соответствует теоретическому положению пика в соответствии с известной температурной чувствительностью данной ВБР. Кроме того, необходимо отметить появление слабой модуляции между основным пиком и дополнительным, которая связана с неравномерным прогревом области воздействия и уменьшением температуры на краях воздействия, что и приводит к появлению пиков, отстоящих левее дополнительного пика.

При записи более длинной решетки (с общей длиной $L = 90$ мм) было установлено, что смещение положения области фокусировки относительно центра световода во время непрерывной протяжки через феррулу препятствует записи длинной качественной ВБР. На рис. 5 (красная линия) представлен спектр ВБР с $L = 90$ мм и $R = 17,4$ %, записанной стандартной протяжкой световода через феррулу импульсами

Рис. 2. Спектр ВБР с $L = 50$ мм, записанной через полиимидное покрытие

Рис. 3. Зависимость длины волны отражения ВБР от температуры (а) и деформации (б)

Рис. 4. Изменение спектра отражения при локальном воздействии с температурой $T = 150$ °C

Рис. 5. Спектр ВБР с $L = 90$ мм, записанной с автоподстройкой положения фокуса (черная линия) и без автоподстройки (красная линия)

с $E = 120$ нДж. Видно, что в данном случае спектр ВБР состоит из набора пиков, что соответствует неоднородной структуре решетки, при этом спектральная ширина ВБР в данном случае достаточно большая (80 пм). Данную проблему удалось частично решить за счет автоподстройки положения фокуса при записи, поскольку в экспериментальной установке имеется возможность наблюдать область записи с помощью видеокамеры и, следовательно, иметь информацию по возможным отклонениям центра сердцевины световода от области фокусировки. С помощью разработанных программных средств обработки изображения и алгоритма управления пьезопозиционером, на котором закреплена феррула, удалось выполнить процедуру автоподстройки положения фокусировки относительно центра сердцевины световода. На рис. 5 (черная линия) представлен спектр записанной с применением автоподстройки ВБР с $L = 90$ мм и $R = 13,6$ %, который был измерен с помощью OSA. Для более точного измерения спектральной ширины длинной ВБР была собрана схема, представленная на рис. 6.

Узкополосное излучение от перестраиваемого одночастотного лазера (DFB) с распределенной обратной связью (спектральная ширина линии генерации ~ 10 кГц) через циркулятор направлялось на тестируемую ВБР (FBG) и измерялся отраженный сигнал с помощью высокочувствительного фотодетектора (PD). Для устранения отражения от торца волокна после ВБР был расположен волоконный оптический

Рис. 6. Схема измерения спектра длинной ВБР

изолятор. Перестройка длины волны генерации волоконного DFB-лазера осуществлялась за счет растяжения его резонатора с помощью пьезоэлемента. Максимальное растяжение пьезоэлемента соответствовало смещению длины волны лазера на 23 пм. Кроме того, резонатор DFB-лазера находился в термостатированном корпусе, изменение температуры которого также приводит к смещению длины волны генерации лазера. Таким образом, варьируя температуру и поддерживая ее постоянной, возможно выставить начальную длину волны лазера в различных точках спектра длинной ВБР перед сканированием длины волны лазера с помощью пьезоэлемента и измерить весь спектр длинной ВБР. пилообразный сигнал с высоковольтного генератора подавался на пьезоэлемент DFB-лазера и на первый канал осциллографа, на второй канал которого подавался сигнал с фотодиода. Тем самым определялась зависимость амплитуды сигнала с фотодиода относительно напряжения на пьезоэлементе, которое пересчитывалось в длины волн. Таким образом, был измерен спектр длинной ВБР со спектральным разрешением, во много раз превышающим разрешение оптического анализатора спектра. На рис. 7 представлено сравнение спектра, полученного с помощью OSA с предельным разрешением 20 пм и полученного с помощью схемы опроса с перестраиваемым одночастотным лазером, а также расчетного спектра в случае однородной синусоидальной решетки с модуляцией $\Delta n = 5 \cdot 10^{-6}$. Видно, что в данном случае спектральная ширина решетки заметно уменьшилась (до 16,5 пм) и побочные пики стали заметно слабее. Однако сравнение экспериментальных и расчетных спектров отражения ВБР, представленное на рис. 7, показывает, что полученная спектральная ширина ВБР заметно превышает значение в случае «идеальной» решетки (9 пм), что может быть связано с влиянием других факторов: стабильности протяжки световода

Рис. 7. Спектр ВБР с длиной $L = 90$ мм: эксперимент и расчет (OSA – с анализатором спектра, DFB – с одночастотным лазером)

через феррулу, поскольку даже незначительные частички пыли, попадая в зазор между световодом и феррулой, приводят к заклиниванию и неравномерности протяжки; стабильности энергии импульсов записывающего излучения; неоднородностей на самом защитном покрытии, которые, возможно, также могут оказывать влияние на запись идеальной решетки.

Заключение

В работе продемонстрирована возможность записи длинных ВБР через защитное покрытие поточечной записью с протяжкой световода через феррулу. По предложенной схеме записи были созданы ВБР с различной длиной 50–90 мм, спектральной шириной 16,5–100 пм и коэффициентами отражения 13,6–22,5 %. Измерена чувствительность записанных ВБР к изменению температуры и деформации. Исследование поведения спектра длинной ВБР при локальном воздействии показало наличие дополнительного пика, связанного с нагретым участком ВБР. Продemonстрированные ВБР могут применяться в распределенных системах мониторинга с расширенным рабочим диапазоном по температуре, в сравнении с ВБР, записанными по УФ-технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (13-02-00805а и 14-42-0823р_офи_м) и партнерского интеграционного проекта СО РАН N43.

Список литературы

1. Komukai T. An efficient 0.04-nm apodized fiber Bragg grating and its application to narrow-band spectral filtering // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 1997. – Vol. 9, no. 7. – P. 934–936.
2. Strong phase-controlled fiber Bragg gratings for dispersion compensation / Y. Liu, L. Dong, J. Pan, C. Gu // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28, no. 10. – P. 786–788.
3. Gagné M., Kashyap R. Demonstration of a 3 mW threshold Er-doped random fiber laser based on a unique fiber Bragg grating // *Opt. Express.* – 2009. – Vol. 17, no. 21. – P. 19067–19074.
4. Long Weak FBG Sensor Interrogation Using Microwave Photonics Filtering Technique / A.L. Ricchiuti, D. Barrera, S. Sales, L. Thevenaz, J. Capmany // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2014. – Vol. 26, no. 20. – P. 2039–2042.
5. Martin J., Ouellette F. Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings // *Electron. Lett.* – 1994. – Vol. 30, no. 10. – P. 811–812.
6. Kashyap R., Froehlich H., Swanton A., Armes D. 1,3 m long super-step-chirped fibre Bragg grating with a continuous delay of 13,5 ns and bandwidth 10 nm for broadband dispersion compensation // *Electron. Lett.* – 1996. – Vol. 32, no. 79. – P. 1807–1809.
7. A Writing Technique for Long Fiber Bragg Gratings with Complex Reflectivity Profiles / A. Asseh, H. Storoy, S. Member, B.E. Sahlgren, S. Sandgren, R.A.H. Stubbe // *J. Light. Technol.* – 1997. – Vol. 15, no. 8. – P. 1419–1423.
8. Fabrication of high quality, ultra-long fiber Bragg gratings: up to 2 million periods in phase / M. Gagné, S. Loranger, J. Lapointe, R. Kashyap // *Opt. Express.* – 2014. – Vol. 22, no. 1. – P. 21550–21557.
9. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // *Nat. Photonics.* – 2008. – Vol. 2, no. 4. – P. 219–225.
10. Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibres for high-temperature sensor applications / M. Busch, W. Ecke, I. Latka, D. Fischer, R. Willsch, H. Bartelt // *Meas. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 20, no. 11. – P. 115301.

11. Radiation sensitivity of Bragg gratings written with femtosecond IR lasers / D. Grobnc, H. Henschel, S.K. Hoeffgen, J. Kuhnenn, S.J. Mihailov, U. Weinand // *Proc. of SPIE.* – 2009. – Vol. 7316. – P. 73160C–73160C–9.

12. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation / S.J. Mihailov, C.W. Smelser, P. Lu, R.B. Walker, D. Grobnc, H.M. Ding, G. Henderson, J. Unruh // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28, no. 12. – P. 995–997.

13. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser / A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, I. Bennion // *Electron. Lett.* – 2004. – Vol. 40, no. 19. – P. 19–20.

14. Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs / G.D. Marshall, R.J. Williams, N. Jovanovic, M.J. Steel, M.J. Withford // *Opt. Express.* – 2010. – Vol. 18, no. 19. – P. 19844–19859.

15. 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. – № 2. – С. 48–61.

References

1. Komukai T. An efficient 0.04-nm apodized fiber Bragg grating and its application to narrow-band spectral filtering. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, vol. 9, no. 7, pp. 934-936.

2. Liu Y., Dong L., Pan J., Gu C. Strong phase-controlled fiber Bragg gratings for dispersion compensation. *Opt. Lett.*, 2003, vol. 28, no. 10, pp. 786-788.

3. Gagné M., Kashyap R. Demonstration of a 3 mW threshold Er-doped random fiber laser based on a unique fiber Bragg grating. *Opt. Express*, 2009, vol. 17, no. 21, pp. 19067-19074.

4. Ricchiuti A.L., Barrera D., Sales S., Thevenaz L., Capmany J. Long Weak FBG Sensor Interrogation Using Microwave Photonics Filtering Technique. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2014, vol. 26, no. 20, pp. 2039-2042.

5. Martin J., Ouellette F. Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings. *Electron. Lett.*, 1994, vol. 30, no. 10, pp. 811-812.

6. Kashyap R., Froehlich H., Swanton A., Armes D. 1.3 m long super-step-chirped fibre Bragg grating with a continuous delay of 13.5 ns and

bandwidth 10 nm for broadband dispersion compensation. *Electron. Lett.*, 1996, vol. 32, no. 79, pp. 1807-1809.

7. Asseh A., Storoy H., Member S., Sahlgren B.E., Sandgren S., Stubbe R.A.H. A Writing Technique for Long Fiber Bragg Gratings with Complex Reflectivity Profiles. *J. Light. Technol.*, 1997, vol. 15, no. 8, pp. 1419-1423.

8. Gagné M., Loranger S., Lapointe J., Kashyap R. Fabrication of high quality, ultra-long fiber Bragg gratings: up to 2 million periods in phase. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, no. 1, pp. 21550-21557.

9. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nat. Photonics*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 219-225.

10. Busch M., Ecke W., Latka I., Fischer D., Willsch R., Bartelt H. Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibres for high-temperature sensor applications. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 11, p. 115301.

11. Grobncic D., Henschel H., Hoeffgen S.K., Kuhnhehn J., Mihailov S.J., Weinand U. Radiation sensitivity of Bragg gratings written with femtosecond IR lasers. *Proc. of SPIE*, 2009, vol. 7316, pp. 73160C-73160C-9.

12. Mihailov S.J., Smelser C.W., Lu P., Walker R.B., Grobncic D., Ding H.M., Henderson G., Unruh J. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation. *Opt. Lett.*, 2003, vol. 28, no. 12, pp. 995-997.

13. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion I. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser. *Electron. Lett.*, 2004, vol. 40, no. 19, pp. 19-20.

14. Marshall G.D., Williams R.J., Jovanovic N., Steel M.J., Withford M.J. Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, no. 19, pp. 19844-19859.

15. Dostovalov A.V., Vol'f A.A., Babin S.A. Potochechnaia zapis' VBR pervogo i vtorogo poriadka cherez poliimidnoe pokrytie femtosekundnym izlucheniem s dlinoi volny 1026 nm [Point-by-point writing of first and second order FBGs through polyimide coating with femtosecond radiation at 1026 nm]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 2, pp. 48-61.

Получено 20.09.2015