УДК 621.383

С.С. Якушин[1], А.В. Достовалов[1, 2], А.А. Вольф[2], А.В. Парыгин[2]

[1] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия
[2] Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДЛИННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ

Рассматривается схема опроса длинных волоконных брэгговских решеток (ВБР) с использованием фотонного фильтра радиочастотных сигналов и перестраиваемого по длинам волн источника излучения. Показано, что данная схема позволяет проводить распределенный мониторинг температурного воздействия с пространственным разрешением менее 1 мм и точностью локального воздействия 1 °C.

Ключевые слова: длинные ВБР, фотонный фильтр радиочастотных сигналов, сенсорные системы распределенного мониторинга, волоконно-оптические датчики, датчики температуры, сильные ВБР.

S.S. Iakushin[1], A.V. Dostovalov[1, 2], A.A. Vol'f[2], A.V. Parygin[2]

[1] Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

MEASUREMENTS OF TEMPERATURE SPOT EXPOSURE VALUE AND LOCATION IN LONG FIBER BRAGG GRATINGS

In this study, a long FBG interrogation system using microwave photonic filter and tunable light source is considered. The ability of this technique to perform the distributed monitoring of thermal action with better than 1 mm spatial resolution and 1 °C temperature accuracy is demonstrated.

Keywords: long FBG, microwave photonic filter, distributed monitoring sensor system, fiber optic sensors, temperature sensors, strong FBG.

Статья подготовлена по материалам доклада на конференции «Оптическая рефлектометрия – 2016».

Введение

В настоящее время волоконно-оптические датчики различных физических величин (температура, давление, деформация и т.д.) все чаще применяются для мониторинга объектов инженерной инфраструктуры, промышленных и гражданских объектов [1], а также при производстве «умных» композиционных материалов [2] и в биомедицинских приложениях [3], благодаря своим принципиальным преимуществам перед традиционными датчиками: невосприимчивости к электромагнитным помехам, безопасной работе во взрыво-, пожароопасных и агрессивных химических средах, отсутствию электрического питания, возможности удаленного (≈10 км) мониторинга, малым весу и габаритам.

Существуют два класса волоконно-оптических датчиков: точечные и распределенные. Линии из нескольких волоконных брэгговских решеток – наиболее распространенный тип точечных датчиков. В данном случае измерения происходят только в местах расположения ВБР, поэтому удается измерять изменения физических величин с высоким пространственным разрешением (≈1 мм), но с разрывами и на небольшой длине, поскольку количество брэгговских решеток в линии ограничено. К распределенным датчикам относятся системы мониторинга на основе комбинационного рассеяния света, поскольку в данном случае весь волоконный световод является чувствительным элементом. Так как зондирующий сигнал ограничен во времени (≈10 нс), удается измерять изменения физических величин на большой длине, но с низким пространственным разрешением – до 1 м [4].

С этой точки зрения актуальной задачей является создание распределенных волоконно-оптических датчиков, способных измерять изменения физических величин с высоким пространственным разрешением (≈1 мм) и на сравнительно большой длине (≥10 см). Волоконно-оптические системы распределенного мониторинга физических величин на основе длинных волоконных брэгговских решеток являются привлекательным решением данной проблемы, однако для них должны быть разработаны адекватные методы опроса.

В [5] была предложена схема опроса слабых ВБР с общей длиной 10 см на основе технологий радиофотоники (англ. microwave photonic (MWP) filter), которая позволяет проводить диагностику ме-

стоположения воздействия на длинную ВБР с высоким пространственным разрешением (≈1 мм) на длине 10–100 см, однако не дает возможности проводить мониторинг амплитуды такого воздействия, что является существенным недостатком с точки зрения создания сенсорных систем. В работе [6] представлена схема опроса длинных ВБР на основе метода рефлектометрии и перестройки длины волны сканирующего лазера, которая позволяет проводить мониторинг не только местоположения воздействия с пространственным разрешением 2 мм, но также и величину данного воздействия с точностью 0,3 °С. Однако в данном случае в схеме опроса применяется перестраиваемый по длине волны лазер с длительностью импульсов менее 10 пс и осциллограф с высокой частотой дискретизации сигнала (80 ГГц), что существенно усложняет схему опроса, сказывается на себестоимости и, следовательно, на возможности ее повсеместного применения.

В данной работе продемонстрирована новая схема опроса длинных ВБР, которая позволяет измерять не только местоположение температурного воздействия с высоким пространственным разрешением (менее 1 мм), но и амплитуду воздействия с высокой точностью (1 °С), при этом схема опроса построена на применении радиофотонного фильтра и перестраиваемого по длинам волн источника непрерывного излучения.

1. Описание экспериментальной установки

Длинная волоконная брэгговская решетка первого порядка была записана с помощью фемтосекундного излучения через защитное полиимидное покрытие в световоде SMP1500 (9/125) P (Fibercore LTD) на установке, схема которой подробно описана в [7]. Общая длина ВБР составила 30 мм, коэффициент отражения – 89 %, центральная длина волны – 1550,4 нм.

Определение величины и пространственного положения температурного воздействия на ВБР производилось с использованием фотонного фильтра радиочастотных сигналов [8], схема которого представлена на рис. 1. В нем непрерывное излучение от источника проходит через электрооптический модулятор (ЭОМ), на который подается сигнал высокой частоты от векторного анализатора цепей (ВАЦ). Промодулированное излучение далее разбивается на некоторое количество каналов, обладающих собственной задержкой и усилением, после чего

вновь объединяется. Сформированный оптический сигнал попадает на фотодетектор (ФД), электрический сигнал с которого возвращается на вход векторного анализатора цепей, где по фазе и соотношению амплитуд исходного и полученного сигналов вычисляется параметр пропускания схемы S_{21}. Функция пропускания такого фильтра имеет вид

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{N} a_k e^{-ik\omega T_k},$$

где a_k – коэффициент усиления; T_k – величина временной задержки; индекс k обозначает порядковый номер канала. Если величина $T_k = T$ для любых k, то $H(\omega)$ будет периодической функцией с периодом по частоте, определяемым параметром FSR (free spectral range), равным $1/T$, который обратно пропорционален периоду.

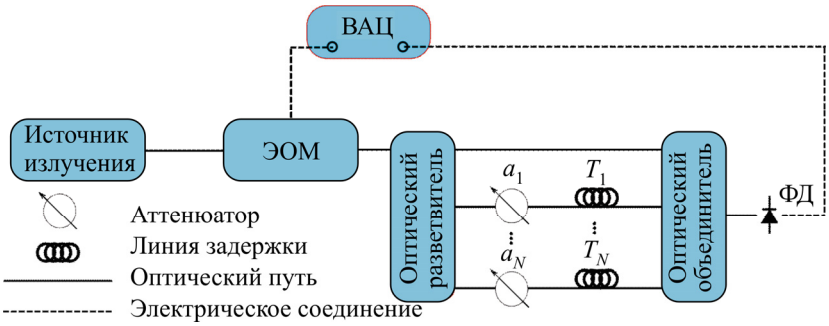

Рис. 1. Схема фотонного фильтра микроволновых сигналов [8]

Схема опроса длинных ВБР на основе фотонного фильтра радиочастотных сигналов, используемая в нашей работе, представлена на рис. 2. В качестве источника излучения использовался суперлюминесцентный диод SLD1005S (Thorlabs, Inc.) с мощностью сигнала 22 мВт при спектральной ширине излучения 50 нм (FWHM) и центральной длине волны 1550 нм, который располагался в термостатированном корпусе. Перестраиваемый фильтр оптического излучения реализован на основе оптического циркулятора и ВБР с контролируемым растяжением. Непрерывное излучение от источника после прохождения фильтра модулируется с помощью электрооптического модулятора Thorlabs LN81S-FC (максимальная рабочая частота – 10 ГГц) от сигнала с выходного порта векторного анализатора цепей «ОБЗОР TR1300/1» производ-

ства ООО «ПЛАНАР» (диапазон рабочих частот – 0,3–1300 МГц). Далее промодулированное излучение делится разветвителем (95:5) на две линии: опорную с линией задержки и линию, содержащую длинную ВБР.

Исходно в этой реализации фильтра имеется 3 канала:

– излучение, отраженное от ВБР на соответствующей длине волны;

– излучение, отраженное от конца волокна с ВБР;

– опорный канал, проходящий через оптический разветвитель мимо линии с решеткой.

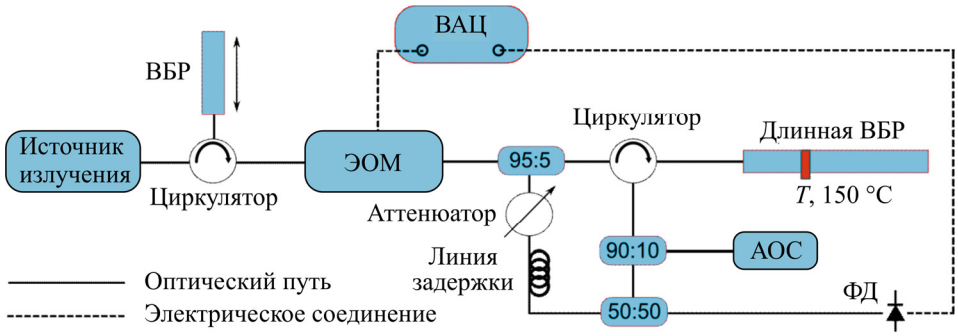

Рис. 2. Схема опроса длинных ВБР

При нагреве локального участка ВБР появляется отражение от него на длине волны, соответствующей пику отражения ВБР при данной температуре нагрева, что дает еще один канал. Канал с отражением от сколотого торца волокна с ВБР мы подавляем за счет его скола под углом и погружения в жидкость со сходным коэффициентом преломления (глицерин). Канал с отражением от ненагретых частей ВБР убирается за счет подавления непрерывного излучения перестраиваемым фильтром на соответствующей длине волны излучения. Таким образом, получается схема фотонного фильтра радиочастотных сигналов с двумя каналами, при этом величина задержки, определяющая период функции пропускания фильтра $H(\omega)$, будет равна $T = 2n_0L/c$, где n_0 – показатель преломления световода, L – разность путей излучения в опорном канале и канале с нагретым участком ВБР.

2. Результаты и их обсуждение

Источником сигнала в линии с ВБР в ходе экспериментов служил нагреваемый участок оптического волокна шириной 5 мм. Отраженное ВБР-излучение объединяется на втором разветвителе (50:50) и попада-

ет на фотодетектор. Сигнал с него поступает на входной порт векторного анализатора цепей, с помощью которого измеряется зависимость параметра пропускания S_{21} от частоты модуляции (рис. 3). Границы по частоте определялись рабочей полосой усилителя сигнала векторного анализатора цепей и составили 40–250 МГц.

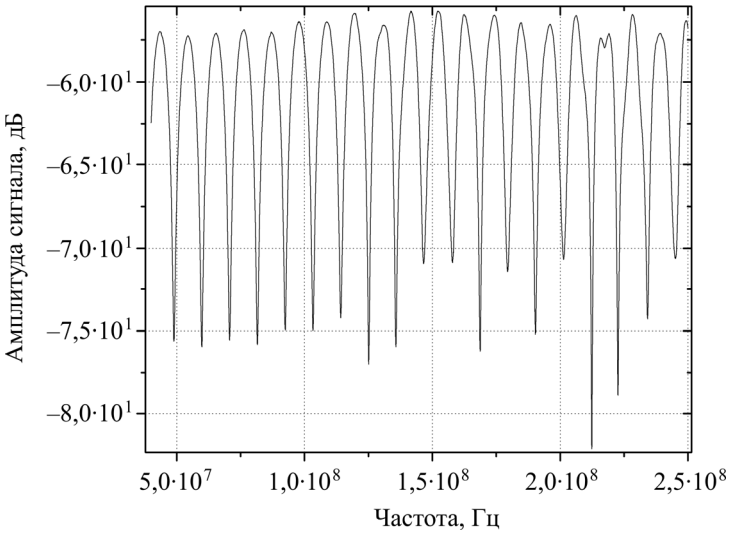

Рис. 3. Сигнал с векторного анализатора цепей, характеризующий зависимость коэффициента пропускания схемы от частоты

Для определения величины временной задержки было выполнено обратное преобразование Фурье частотной зависимости параметра пропускания и был найден его максимум. Пример результата обратного преобразования Фурье для двух разных точек нагрева приведен на рис. 4.

При изменении положения точки температурного воздействия изменяется путь, проходимый излучением, что проявляется в изменении величины временной задержки. Были проведены измерения при нагреве до 150 °С шести разных участков ВБР с шагом 5 мм, и была построена зависимость результата от положения (рис. 5). Полученная точность по времени соответствует длине ≈1 мм. Как видно, в данном случае зависимость является линейной с незначительным разбросом экспериментальных точек, что свидетельствует о высокой точности измерения положения температурного воздействия.

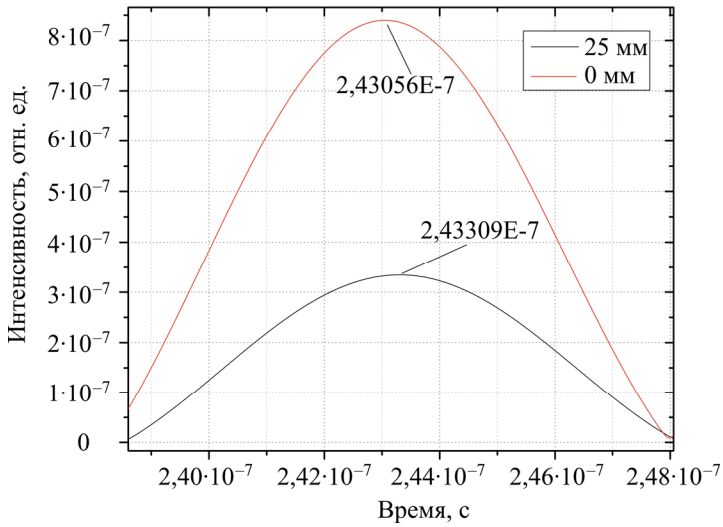

Рис. 4. Обратное преобразование Фурье частотной зависимости параметра пропускания S_{21} для двух разных положений точки нагрева с разницей 25 мм

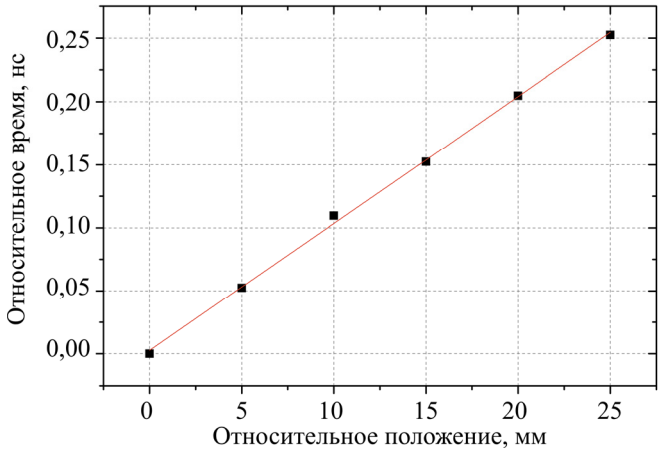

Рис. 5. Зависимость времени задержки распространения сигнала от относительного смещения точки нагрева длинной ВБР

Кроме того, положение пика перестраиваемого фильтра, соответствующее максимуму сигнала, позволяет определить температуру нагрева. Была построена зависимость интенсивности сигнала на фотодетекторе от положения максимума фильтра, изображенная на рис. 6.

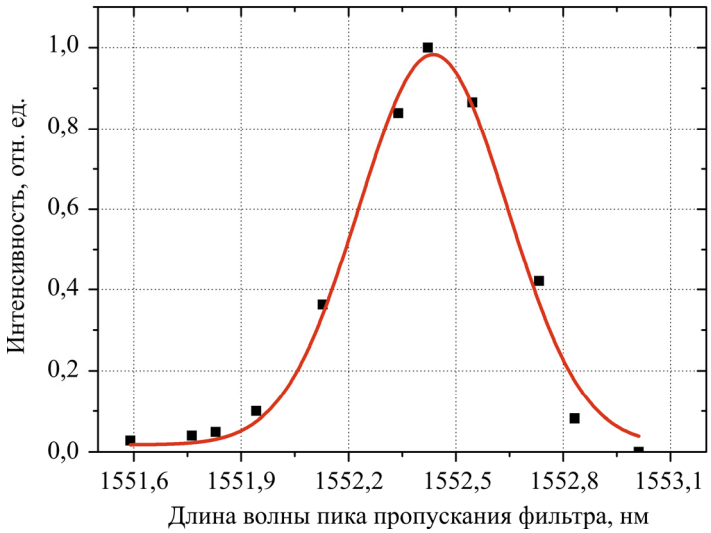

Рис. 6. Изменение интенсивности сигнала
при перестройке пика пропускания фильтра

При точности определения положения профиля порядка 10 пм можно определить температуру с точностью около 1 °С.

Выводы

В работе представлены результаты по созданию схемы опроса длинных ВБР с применением радиофотонного фильтра и перестраиваемого источника непрерывного излучения. Данная схема позволяет измерять с высоким пространственным разрешением (менее 1 мм) местоположение, а также амплитуду локального температурного воздействия на ВБР с точностью 1 °С. Аналогично можно измерять и деформационные воздействия. Данная схема опроса может применяться для создания систем распределенного мониторинга узлов и конструкций композиционных материалов, в биомедицине и других сферах, где требуется проводить распределенные измерения с высоким пространственным разрешением и точностью определения амплитуды воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (14-22-00118) и президентского гранта МК-6657.2016.2 (А.В. Достовалов и А.А. Вольф).

Список литературы

1. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Vol. 3, № 1. – P. 61–75.

2. Separate temperature and strain measurements in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference / V.V. Shishkin, V.S. Terentyev, D.S. Kharenko, A.V. Dostovalov, A.A. Wolf, V.A. Simonov, M.Y. Fedotov, A.M. Shienok, I.S. Shelemba, S.A. Babin // Journal of Sensors. – 2016. – Article 3230968.

3. Optical in -fiber Bragg grating sensor systems for medical applications sensor / Y.J. Rao, D.J. Webb, D.A. Jackson, L. Zhang, I. Bennion // Journal of Biomedical Optics. – 1998. – Vol. 3, № 1. – P. 38–44.

4. Бабин С.А., Кузнецов А.Г., Шелемба И.С. Сравнение методов измерения распределения температуры с помощью брэгговских решеток и комбинационного рассеяния света в оптических волокнах // Автометрия. – 2010. – Vol. 46, № 4. – P. 70–77.

5. Long weak FBG sensor interrogation using microwave photonics filtering technique / A.L. Ricchiuti, D. Barrera, S. Sales, L. Thevenaz, J. Capmany // IEEE Photonics Technology Letters. – 2014. – Vol. 26, № 20. – P. 2039–2042.

6. Sancho J., Chin S., Barrera D. Time-frequency analysis of long fiber Bragg gratings with low reflectivity // Optical Express. – 2013. – Vol. 21, № 6. – P. 7171–7179.

7. Поточечная запись длинных ВБР фемтосекундным излучением через полиимидную оболочку / А.А. Вольф, А.В. Парыгин, С.С. Якушин, В.Е. Зюбин, А.В. Достовалов // Прикладная фотоника. – 2015. – Vol. 2, № 3. – P. 264–275.

8. Ricchiuti A., Barrera D., Sales S. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques // Optical Express. – 2013. – Vol. 21, № 23. – P. 28175–28181.

References

1. Shishkin V.V., Granev I.V., Shelemba I.S. Otechestvennyi opyt proizvodstva i primeneniia volokonno-opticheskikh datchikov [Domestic experience in production and application of fiber optic sensors]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 61-75.

2. Shishkin V.V., Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Fedotov M.Y., Shienok A.M., Shelemba I.S., Babin S.A. Separate temperature and strain measurements in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference. *Journal of Sensors*, 2016, article 3230968.

3. Rao Y.J., Webb D.J., Jackson D.A., Zhang L., Bennion I. Optical in fiber Bragg grating sensor systems for medical applications sensor. *Journal of Biomedical Optics*, 1998, vol. 3, no. 1, pp. 38-44.

4. Babin S.A., Kuznetsov A.G., Shelemba I.S. Sravnenie metodov izmereniia raspredeleniia temperatury s pomoshch'iu breggovskikh reshetok i kombinatsionnogo rasseianiia sveta v opticheskikh voloknakh [Comparing the temperature distribution measurement methods using Bragg gratings and Raman scattering in optical fibers]. *Avtometriia*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 70-77.

5. Ricchiuti A.L., Barrera D., Sales S., Thevenaz L., Capmany J. Long weak FBG sensor interrogation using microwave photonics filtering technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 20, pp. 2039-2042.

6. Sancho J., Chin S., Barrera D. Time-frequency analysis of long fiber Bragg gratings with low reflectivity. *Optical Express*, 2013, vol. 21, no. 6, pp. 7171-7179.

7. Vol'f A.A., Parygin A.V., Iakushin S.S., Ziubin V.E., Dostovalov A.V. Potochechnaia zapis' dlinnykh VBR femtosekundnym izlucheniem cherez poliimidnuiu obolochku [Point-by-point writing of long FBG with femtosecond laser radiation through the poliymide coating]. *Prikladnaia fotonika*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 264-275.

8. Ricchiuti A., Barrera D., Sales S. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques. *Optical Express*, 2013, vol. 21, no. 23, pp. 28175-28181.

Получено 20.06.2016