

Особенности применения сенсоров на основе волоконно-оптических брэгговских решеток для измерения температуры

¹Вальдемар Вуйцик, ²Павлов Сергій, ³Шедреева Индира

²Технический университет «Люблинская политехника», Польша, Люблин,

²Вінницький національний технічний університет

³Таразский государственный университет имени М.Х.Дулати, Казахстан, Тараз, e-mail: indisher@mail.ru

Features of the use of sensors based on fiber-optic Bragg gratings for measuring temperature

¹Wójcik, Waldemar, ²Pavlov Sergii, ³Shedreyeva Indira

²Vinnitsia National Technical University

³M.Kh.Dulaty Taraz State University, Kazakhstan, Taraz, e-mail: indisher@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности применения сенсоров на основе волоконно-оптических брэгговских решеток, которые являются перспективными для измерения температуры, давления и др. физических величин. Представлена практическая реализация волоконно-оптической сенсорной системы на основе анализатора оптического спектра.

Annotation. In the article the features of application of sensors on the basis of fiber optic Bragg grids are considered, which perspective for measuring temperature, pressure and other physical quantities. The practical implementation of the fiber optic sensor system based on the optical spectrum analyzer is presented.

Ключевые слова — сенсоры на основе брэгговских дифракционных решетках, датчики температуры, сенсоры

Keywords — sensors based on Bragg's diffraction gratings, temperature sensors, sensors

Актуальность. Брэгговские решетки в настоящее время широко используются в оптических волокнах и планарных световодах для уплотнения каналов по длине волны (так называемая DWDM-технология), оптической фильтрации сигналов, как резонаторные зеркала в волоконных и полупроводниковых лазерах, как сглаживающие фильтры в оптических усилителях, для компенсации дисперсии в магистральных каналах связи. Другой областью применения волоконных брэгговских решеток является использование их в различных измерительных системах, контролирующих параметры окружающей среды, такие как: температура, влажность, давление, деформация, содержание химических веществ.

Применение сенсоров на основе волоконно-оптических брэгговских решеток является одним из перспективных методов распределенного измерения температуры, давления и др. физических величин. Основными преимуществами таких сенсоров являются высокая чувствительность, малые размеры, способность работы без подвода электричества, нечувствительность к электромагнитным помехам и возможность объединения сенсоров в распределенные системы [1,2].

Распределенные по длине световодов решетки Брэгга позволяют создавать акустические системы, выгодно отличающиеся от традиционных комплексов аналогичного назначения стоимостью и технологичностью производства [2].

Анализ Брэгговских дифракционных решеток. Анализ публикаций [1–3,6,7] показал, что волоконные решетки классифицируются на короткопериодные и длиннопериодные. Первые также называют брэгговскими решетками и имеют период, сравнимый с длиной волны, обычно порядка 0,5 мкм. Длиннопериодные волоконные решетки (ДПВР) имеют периоды намного больше, чем длина волны, в диапазоне от нескольких сотен микрометров до нескольких миллиметров. Длиннопериодная волоконная решетка (ДПВР) представляет собой волоконно-оптическую структуру с периодическим изменением свойств вдоль волокна, которое создает условия резонанса для взаимодействия нескольких однонаправленных мод волокна. Период такой структуры составляет порядка доли миллиметра. В отличие от брэгговских решеток ДПВР связывают моды, распространяющиеся в одном и том же направлении, разница постоянных

распространения которых невелика, и поэтому период такой решетки может значительно превышать длину волны излучения, распространяющегося в волокне. В связи с тем, что ДПВР обладают периодом, значительно превышающим длину волны, они достаточно просты в изготовлении. Так как ДПВР связывают однонаправленные моды, их резонансы можно наблюдать только в спектрах пропускания. Прошедший сигнал имеет провалы на длинах волн, соответствующих резонансам с различными модами оболочки (в одномодовом волокне). Спектральные характеристики ДПВР зависят от таких параметров, как температура, натяжение и изгиб световода, а также ПП среды, окружающей световод с решеткой. ДВПР применяются в качестве компенсаторов в волоконных оптических усилителях на основе эрбиевого волокна, в оптических заграждающих фильтрах, для создания элементов широкополосного пропускания при отсутствии обратного отражения. ДВПР являются также наиболее перспективным элементом для применения в системах оптической связи со спектральным уплотнением [6].

Изготовление решеток в волокне основано на использовании фоточувствительности определенных типов оптических волокон. Обычное кремниевое волокно при добавлении примеси германия становится чрезвычайно фоточувствительным. Подвергая это волокно воздействию ультрафиолетового света, можно вызвать изменения показателя преломления в сердцевине волокна. В таком волокне решетка может быть создана с помощью облучения волокна двумя интерферирующими ультрафиолетовыми пучками [1-3,6].

Технология и принцип реализации. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок волоконного световода, в сердцевине которого наведена структура показателя преломления с периодом $\Lambda \sim 0,5$ мкм [2]. Наиболее важным свойством ВБР является отражение оптического излучения на брэгговской длине волны $\lambda_B = 2\Lambda n$, где n – показатель преломления сердцевины. Возмущение состояния решетки (растяжение, нагрев) вызывает изменение положения максимума в спектре отраженной волны (рис. 1). Это свойство ВБР положено в основу создания волоконно-оптических сенсоров [1].

В основе использования волоконных брэгговских решеток (ВБР) лежит зависимость резонансной длины волны λ_B от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений.

Предложено большое число способов измерения смещения λ_B [1-3]. Наиболее прямым из них является измерение спектра пропускания/отражения решетки с помощью широкополосного источника излучения и спектроанализатора либо с помощью узкополосного перестраиваемого лазера и фотоприемника.

Такой способ является нечувствительным к оптическим потерям, которые могут возникать в

оптическом тракте при проведении измерений, и обеспечивает высокую точность измерений λ_B . Вместе с тем такая схема регистрации использует достаточно дорогостоящее оборудование и имеет ограниченное быстродействие.

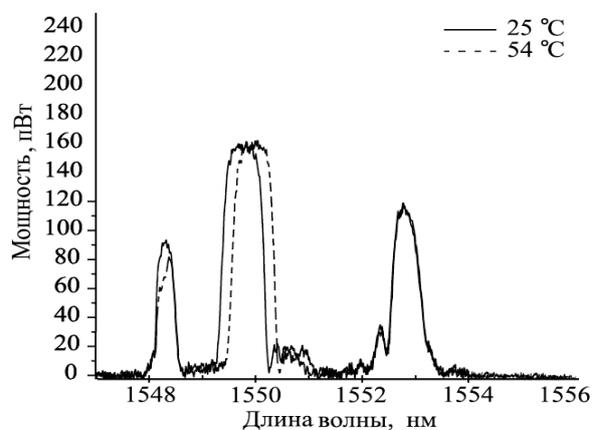


Рис. 1. Спектры отражения трех волоконных брэгговских решеток при температуре окружающей среды 25 °C и при нагревании одной из решеток до температуры 54 ° [1]

Указанные схемы позволяют измерить физическую величину в месте нахождения ВБР, вместе с тем часто возникают задачи измерения пространственного распределения этой величины. Для этого разработаны схемы, позволяющие мультиплексировать чувствительные элементы, в том числе расположенные в одном световоде. К числу таких схем следует отнести:

- спектральное мультиплексирование каналов, при котором чувствительные элементы разнесены на различные длины волн;
- использование оптических переключателей, подключающих тот или иной чувствительный элемент к системе измерения;
- пространственно-временное мультиплексирование, при котором отклик от каждой из решеток регистрируется в различные моменты времени;
- комбинированные схемы, включающие в себя несколько принципов мультиплексирования каналов, перечисленных выше.

Каждая ячейка брэгговской решетки отражает малую часть излучения, пропускаемого через оптоволокно. Для длины волны, в 2 раза большей, чем период решетки, отраженные лучи складываются в фазе. В результате получается отраженный световой сигнал с узкой спектральной полосой. Отражаемая решеткой длина волны называется брэгговской. Брэгговская длина волны зависит от температуры и натяжения волокна.

При воздействии на оптическое волокно (температура, давление и др.) показатель преломления и расстояние между ячейками решетки изменяются и от нее отражаются волны другой длины. По изменению отраженной длины волны определяются необходимые характеристики

(температура, давление, деформация и др.) (рис. 2) [1-3]

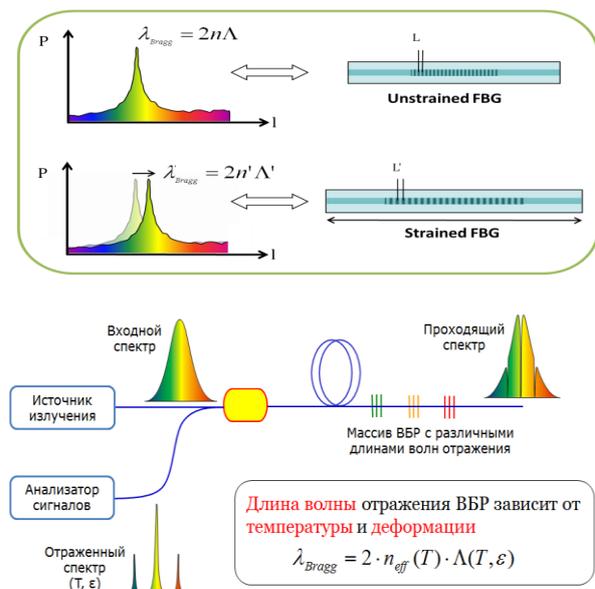


Рис. 2. Особенности работы волоконной кривой брэгговской решетки

Основное выражение для расчета ширины спектра отражения ВБР на полувысоте имеет вид:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \cdot \alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2 \cdot n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2},$$

где N – число штрихов решетки. Параметр α принимается равным 1 для сильно-отражательных решеток (ВБР с отражением около 100%), в то время как для слабо-отражательных решеток $\alpha \approx 0,5$

Реализация волоконно-оптической сенсорной системы на основе анализатора оптического спектра

На рис. 3 представлена базовая схема волоконно-оптической сенсорной системы [1,4]. Оптическое излучение с широкополосного источника поступает на массив из 12-ти сенсоров, записанных в одном волоконном световоде.

Отраженный сигнал сканируется анализатором спектра, данные поступают в компьютер, где по положениям максимумов отражения вычисляется температура каждого сенсора.

В ходе тестирования системы проводились как точечные измерения отдельными сенсорами, так и измерения поля температур 12-ю сенсорами. Было показано, что возмущения одного датчика никак не влияют на соседние, а погрешность измерений в данной системе не превышает $0,5^\circ\text{C}$.

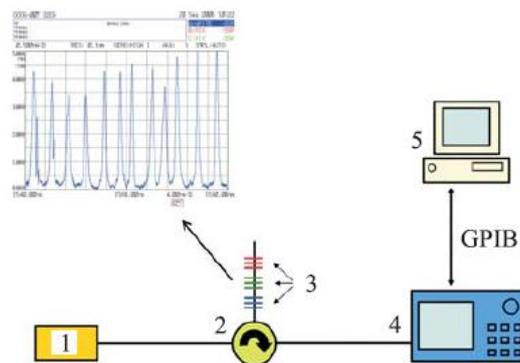


Рис. 3. Сенсорная система на основе анализатора оптического спектра: 1 – широкополосный источник излучения; 2 – циркулятор; 3 – массив брэгговских сенсоров; 4 – анализатор оптического спектра; 5 – компьютер [1]

Выводы.

В статье рассмотрены особенности применения сенсоров на основе волоконно-оптических брэгговских решеток, которые являются одним из перспективными для измерения температуры, давления и др. физических величин.

Представлена практическая реализация волоконно-оптической сенсорной системы на основе анализатора оптического спектра. Продемонстрирована точность измерения температуры не хуже, чем $0,5^\circ\text{C}$, однако его практическое применение ограничено в силу высокой стоимости анализатора.

Література References

1. С. А. Бабин, А. А. Власов, С. И. Кабулков, И. С. Шелемба. Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Том 2, Выпуск 3, 2007. – С.54-57.
2. С.В. Варжель, Волоконные брэгговские решетки. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.
3. Kersey A. N. et al. Fiber Grating Sensors // Journal of Lightwave Technology. 1997. Vol. 15 (8).
4. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квант. электроника. 2005. Т. 35 (12). С. 1085–1103.
5. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2004.
6. Laere F.V., Kotlyar M.V., Taillaert D., Thourhout D.V., Krauss T. F., Baets R. Compact slanted grating couplers between optical fiber and InP-InGaAsP waveguides. // IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, v. 19, № 6, pp. 396–398.
7. Andrusyak O. Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings. // IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., 2009, v. 15, № 2, pp. 344–353.
8. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Мартинюк Т.Б., Лисенко Г.Л. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2002. - 106 с.