Сравнение методов измерения и моделирования спектров отражения волоконных брегговских решеток

06, июнь 2012

DOI: 10.7463/0612.0422468

Сазонкин С. Г., Дворецкий Д. А., Денисов Л. К., Пнёв А. Б., Лазарев В. А.

УДК 681.7.068; 535

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ssazonkin@gmail.com

ddvoretzkiy@gmail.com

ldenisov@bmstu.ru

apniov@gmail.com

sintetaza@mail.ru

Введение

Волоконные брегговские решетки (ВБР) являются одними из ключевых элементов в различных устройствах волоконной оптики, в том числе в волоконных лазерах [1, 2], широко используются в качестве датчиков деформации и температуры [3-7]. Поэтому сегодня разработка новых методов определения их основных характеристик и параметров является актуальной задачей.

Первые брегговские решетки были созданы в 1978 г. Г. Хилом [3]. Волоконные решетки изготавливаются путём облучения фоточувствительного германосиликатного волокна интенсивным излучением ультрафиолетового лазера (УФ-лазера), посредством наведенной интерференционной картины от излучения лазера в сердцевине волокна. В результате возникает наведенный показатель преломления. Значение наведенного показателя преломления зависит от многих факторов, таких как состав и метод изготовления оптического волокна, температура и механические напряжения в структуре ОВ, легирующий элемент и его концентрация, длина волны, интенсивность и режим облучения [1, 2].

Следует отметить, что, круг задач, связанных с измерением спектра отражения и пропускания ВБР, является чрезвычайно широким. Достаточно сказать, что по данной тематике уже опубликовано более 100 работ. Например, в работах [5, 6] представлены

более сложные методы измерения, которые оправданы не для всех задач. Количество публикуемых работ увеличивается с каждым годом.

Целью данной работы является разработка метода измерения спектра отражения и пропускания волоконной брэгговской решетки в заданном диапазоне длин волн.

1 Теоретическое моделирование прохождения электромагнитного излучения через ВБР

Первый подход. ВБР связывают основную моду волоконного световода с основной модой, имеющей противоположное направление распространения, на резонансной длине волны λ_{Br} . В работе [2] рассмотрено взаимодействие мод волоконного световода с учетом изменения эффективного показателя преломления основной моды, возникающее при записи решетки. В общем случае параметры решетки зависят от продольной координаты z , поэтому введем локальную резонансную длину волны $\lambda_{Br}(z)$. При этом соотношение для резонансной длины волны запишется в виде

$$\lambda_{Br}(z) = 2n_{eff}(z)\Lambda(z), \quad (1)$$

где $n_{eff}(z)$ – эффективный показатель преломления, $\Lambda(z)$ – период брэгговской. функциональные зависимости $n_{eff}(z)$ и $\Lambda(z)$ решетки обозначают, что соответствующие величины усреднены в некоторой окрестности Δz продольной координаты z , размер которой много больше периода решетки $\Delta z \gg \Lambda(z)$. Изменение наведенного показателя преломления в световоде вдоль его оси описывается равенством

$$\Delta n_{ind}(z) = \Delta n_{avr}(z) + \Delta n_{mod}(z) \frac{[\exp\{-i\theta(z)\} + \text{к. с.}]}{2}, \quad (2)$$

где $\Delta n_{avr}(z)$ и $\Delta n_{mod}(z)$ – среднее значение и амплитуда модуляции наведенного показателя преломления соответственно, $\theta(z)$ – фаза. Фазу в уравнении (2) обычно выражают через усредненный период решетки Λ_0 равный

$$\theta(z) = \frac{2\pi z}{\Lambda_0} + \varphi(z),$$

где $\varphi(z)$ – относительно небольшие по сравнению с первым слагаемым изменения фазы. Период Λ_0 удобно выбирать соответствующим центральной длине волны λ_0 в спектре отражения решетки, при этом

$$\lambda_0 = 2(n_{eff} + \eta \cdot \Delta n_{avr}) \Lambda_0,$$

где Δn_{avr} – средний наведенный показатель преломления в решетке, η – доля модности основной моды, которая распространяется в сердцевине световода.

Спектральная отстройка от строгого резонанса σ определяется разностью постоянных распространения основной моды $\beta = 2\pi \cdot \Delta n_{\text{eff}}/\lambda$, а локальный эффективный показатель преломления $n_{\text{eff}}(z) = n_{\text{eff}} + \eta \cdot \Delta n_{\text{avr}}(z)$. Коэффициент связи решетки $k(z)$ на длине волны λ пропорционален амплитуде модуляции наведенного показателя преломления $\Delta n_{\text{avr}}(z)$.

Для определенной длины волны λ взаимодействие мод, распространяющихся в противоположных направлениях, на брэгговской решетке описывается системой уравнений связанных мод

$$\begin{aligned}\frac{dR(z)}{dz} &= i\sigma(z)R(z) + ik(z)S(z), \\ \frac{dS(z)}{dz} &= i\sigma(z)S(z) + ik(z)R(z),\end{aligned}\quad (3)$$

где $R(\lambda, z)$ и $S(\lambda, z)$ – медленно меняющиеся на масштабе длины волны амплитуды волн, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях соответственно, $\sigma(z)$ – спектральная отстройка от строго резонанса.

Система линейных однородных дифференциальных уравнений первого порядка (3) в случае однородных волоконных брэгговских решеток ($\sigma(z) = \sigma \equiv \text{const}, k(z) = k \equiv \text{const}$) имеет постоянные коэффициенты и может быть решена аналитически. Для заданной длины волны λ общее решение запишется в виде

$$\begin{pmatrix} R(z) \\ S(z) \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} k \\ -i\gamma_B - \sigma \end{pmatrix} \exp(\gamma_B z) + C_2 \begin{pmatrix} k \\ i\gamma_B - \sigma \end{pmatrix} \exp(-\gamma_B z), \quad (4)$$

где $\gamma_B \equiv \sqrt{k^2 - \sigma^2}$, C_1 и C_2 – некоторые константы. В частности, с граничным условием для коэффициента отражения $r = |S(\lambda, 0)|^2$ из (4) имеем

$$r = \frac{\text{sh}^2(\gamma_B L)}{\text{ch}^2(\gamma_B L) - \sigma^2/k^2}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент отражения на резонансной длине волны ($\sigma^2 = 0$) выражается соотношением $r = \text{th}^2(kL)$.

Второй подход. Для описания электромагнитных полей при прохождении ВБР можно использовать подход, аналогичный тому, который применяется для описания поведения электрического и магнитного поля в оптических волноводах [3].

В этом анализе для нахождения распределения поля в оптическом волокне используются следующие допущения: оптическое волокно не имеет потерь; профиль показателя преломления ступенчатый и описывается *сi*rc-функциями, центры которых

совпадают; материал является оптически изотропным; волокно является одномодовым в исследуемом спектральном диапазоне; волокно является слабонаправляющим.

При таких допущениях можно рассмотреть решетки с постоянным коэффициентом связи на ограниченном участке $0 \leq z \leq L$, где L - длина решетки.

В результате можно получить выражения для коэффициента отражения и коэффициента ослабления (по амплитуде)

$$r(\delta) = \frac{-q \cdot \sinh(\gamma \cdot L)}{\gamma \cdot \cosh(\gamma \cdot L) - i\delta \cdot \sinh(\gamma \cdot L)},$$

$$t(\delta) = \frac{\gamma}{\gamma \cdot \cosh(\gamma \cdot L) - i\delta \cdot \sinh(\gamma \cdot L)}.$$

Здесь γ - параметр, определяемый из соотношения $\gamma^2 = |q|^2 - \delta^2$, где

$$q(\lambda) = \frac{\pi \cdot \Delta n}{\lambda} \left[1 - \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot (n_{co}^2 - n_{cl}^2)} \right] -$$

– коэффициент связи, в котором n_{co} и n_{cl} – показатели преломления оболочки и сердцевины соответственно,

$$\Delta\delta(\lambda) = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{co}}{\lambda_b} - \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{co}}{\lambda} -$$

– разностное волновое число.

Отсюда коэффициенты отражения и пропускания по интенсивности определяются следующим образом:

$$R(\delta) = |r(\delta)|^2 = \frac{q^2 \cdot \sinh^2(\gamma \cdot L)}{\gamma^2 \cdot \cosh^2(\gamma \cdot L) + \delta^2 \cdot \sinh^2(\gamma \cdot L)},$$

$$T(\delta) = |t(\delta)|^2 = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 \cdot \cosh^2(\gamma \cdot L) + \delta^2 \cdot \sinh^2(\gamma \cdot L)}.$$

Проведенные в этой работе теоретические расчеты спектров отражения для изучаемой ВБР решетки представлены на рисунке 1. Очевидно, что оба теоретических подхода к расчету дают эквивалентные результаты и могут быть использованы для моделирования оптических свойств ВБР.

Рисунок 1 – Рассчитанные спектры отражения ВБР: 1 – реализован первый подход расчета спектра отражения ВБР; 2 – реализован второй подход расчета спектра отражения ВБР

2 Экспериментальные методы исследования спектра отражения и пропускания ВБР

На рисунке 2 представлена структурно-функциональная схема установки, которая реализует новый экспериментальный метод исследования спектра отражения и пропускания ВБР. Источник излучения представляет собой полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер), генерирующий на длине волны 1550 нм и мощностью излучения ~ 10 мВт, с возможностью перестройки длины волны генерации в пределах 3 нм с шагом порядка 10 пм на $0,1$ °С при изменении температуры в пределах от 15 до 40 °С.

Исследовательская установка может функционировать в двух режимах и измерять отраженное и пропущенное излучение от ВБР. Это обеспечивается путем переключения фотоприемного устройства ФПУ2 с помощью оптических волоконных разъемов в разные положения относительно ВБР (разъемы на структурной схеме показаны крестом).

В первом режиме отраженное от ВБР излучение попадает обратно в волоконный разветвитель с коэффициентом деления 0,5/0,5, далее излучение падает на ФПУ2, где измеряется мощность падающего излучения. Во втором режиме излучение полупроводникового лазера, прошедшее разветвитель, попадает на решетку. Далее с помощью переключения ФПУ2 в соответствующий разъем измеряется мощность

излучения, прошедшее ВБР. Другая часть излучения попадает на фотоприемное устройство ФПУ1, с помощью него осуществляется измерение зависимости мощности излучения от температуры РОС-лазера.

Рисунок 2 – Установка для исследования спектра пропускания и отражения брэгговской решетки

Фотоприемные устройства ФПУ1 и ФПУ2 представляют собой InGaAs-фотодиодные модули, согласованные с одномодовым оптическим волокном.

Рисунок 3 – Спектры отражения ВБР: 1 – измеренный с помощью спектроанализатора и широкополосного источника излучения; 2 – с помощью описываемой установки; 3 – рассчитанный спектр отражения ВБР

Полученные нами экспериментальные зависимости спектров отражения ВБР представлены на рисунке 3. Измеренный относительный спектр отражения ВБР с помощью нового метода исследования представлен на рисунке 3 (кривая 2). Спектр отражения измеренный на спектроанализаторе Agilent 86142A Optical Spectrum Analyzer с использованием широкополосного источника излучения, представлен на рисунке 3 (кривая 1). Очевидно, данные полученные на спектроанализаторе и на установке для исследования спектра отражения и пропускания ВБР качественно совпадают с теоретически рассчитанным спектром. Кроме того, спектроанализатор, имея максимальное спектральное разрешение $\sim 0,1$ нм, не имеет возможности определения спектрального положения побочных максимумов ВБР, в то время как созданная установка, основанная на новом экспериментальном методе, имеет разрешение порядка $\sim 0,01$ нм со сравнительно большим отношением сигнал/шум.

Заключение

Таким образом, в работе представлен обзор существующих подходов к теоретическому моделированию прохождения электромагнитного излучения через ВБР и рассчитаны спектры отражения ВБР. Предложен новый экспериментальный метод исследования спектра отражения и пропускания волоконной брэгговской решетки, который реализован в созданном приборе. Прибор обладает повышенной разрешающей способностью и соотношением сигнал/шум, по сравнению с коммерчески доступным спектроанализатором на заданном участке оптического спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта от 06 октября 2011 г. № 07.514.12.4017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skaar J. Fiber Bragg gratings: Analysis and synthesis techniques. In book: Cusano A., Cutolo A., Albert J., Eds. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation, Bentham Science Publishers, 2011, pp. 35-52. DOI 10.2174/978160805084011101010035.
2. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств.- М.: НЦВО ИОФ, 2004.- 46 с.- (Препринт / Научный Центр Волоконной Оптики при Ин-те общей физики им. А.М. Прохорова Рос. акад. наук ; № 6).
3. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток: Дальнаука, 1999. 283 с.

4. Пнев, А.Б. Оптико-электронные измерительные системы на основе квазираспределенных волоконно-оптических брэгговских датчиков [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.11.07 : защищена 25.06.08 : утв. 10.10.08 / Пнев Алексей Борисович. – М., 2008. – 176 с.
5. Григорьев, В. В. Измерение деформации и температуры датчиками на основе брэгговских решёток [текст] / В. В. Григорьев, В. А. Лазарев, А. К. Митюрёв, А. Б. Пнев, С. В. Тихомиров, Н. П. Хатырев // Датчики и системы. – 2009. – № 1(116). – С. 15–19.
6. Григорьев, В. В. Квазираспределенная измерительная система на основе брэгговских датчиков механических напряжений с повышенной частотой опроса [текст] / В. В. Григорьев, В. А. Лазарев, А. К. Митюрёв, Н. А. Неверова, А. Б. Пнев, С. В. Тихомиров // Квантовая Электроника. – 2008. – № 11. – С. 58–62.
7. 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, 35 (№12), С. 1085 – 1102.

Comparison of measuring methods and modeling spectra of reflection of fiber Bragg gratings

06, June 2012

DOI: 10.7463/0612.0422468

Sazonkin S.G., Dvoreckii D.A., Denisov L.K., Pnev A.B., Lazarev V.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

ssazonkin@gmail.com

ddvoretskiy@gmail.com

ldenisov@bmstu.ru

apniov@gmail.com

sintetaza@mail.ru

This work covers the study of basic characteristics and parameters of optical fiber Bragg gratings (FBG). The paper describes the main theoretical calculation methods of FBG spectral reflection and transmission coefficients and shows FBG reflection spectra measured in two different ways: by using a spectrum analyzer and a broadband pump source, and also by newly created units. The authors compared the theoretically calculated reflection spectra with the experimentally obtained by two different methods.

Publications with keywords: [optical fiber](#), [optical fiber sensor](#), [fiber Bragg grating](#), [comparison of methods for measuring fiber gratings](#)

Publications with words: [optical fiber](#), [optical fiber sensor](#), [fiber Bragg grating](#), [comparison of methods for measuring fiber gratings](#)

References

1. Skaar J. Fiber Bragg gratings: Analysis and synthesis techniques. In book: Cusano A., Cutolo A., Albert J., Eds. *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation*, Bentham Science Publishers, 2011, pp. 35-52. DOI 10.2174/978160805084011101010035.
2. Medvedkov O.I., Korolev I.G., Vasil'ev S.A. *Zapis' volokonnykh breggovskikh reshetok v skheme s interferometrom Lloyda i modelirovanie ikh spektral'nykh svoystv* [Recording of fibre Bragg gratings in the scheme with interferometer Lloyd and modeling of their spectral properties]. Moscow, The Scientific Centre of Fiber Optics

- under the Institute of the General physics them. A.M. Prokhorov, 2004. 46 p. Not published .
3. Kul'chin Iu.N. *Raspredelennye volokonno-opticheskie datchiki i izmeritel'nye seti* [The distributed fiber-optical sensors and measuring network]. Vladivostok, Dal'nauka, 1999. 283 p.
 4. Pnev A.B. *Optiko-elektronnye izmeritel'nye sistemy na osnove kvaziraspredelennykh volokonno-opticheskikh breggovskikh datchikov. Kand. diss.* [Opto-electronic measuring system based on the quasi-distributed optical fiber Bragg sensors. Cand. diss.]. Moscow, 2008. 176 p.
 5. Grigor'ev V. V., Lazarev V. A., Mitiurev A. K., Pnev A. B., Tikhomirov S. V., Khatyrev N. P. Izmerenie deformatsii i temperatury datchikami na osnove breggovskikh reshetok [Measurement of deformation and temperature by sensors on the basis of fiber Bragg gratings]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 1(116), pp. 15–19.
 6. Grigor'ev V. V., Lazarev V. A., Mitiurev A. K., Neverova N. A., Pnev A. B., Tikhomirov S. V., Khatyrev N. P. Kvaziraspredelennaia izmeritel'naia sistema na osnove breggovskikh datchikov mekhanicheskikh napriazhenii s povyshennoi chastotoi oprosa [Quasi-distributed measurement system based on the Bragg sensors of mechanical stress with increased frequency of interrogation]. *Kvantovaia Elektronika*, 2008, no. 11, pp. 58–62.
 7. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Volokonnye reshetki pokazatelia prelomleniia i ikh primeneniia [Fiber gratings of the refractive index and their application]. *Kvantovaia elektronika*, 2005, no. 35 (№12), pp. 1085 – 1102.