

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Состояние вопроса

Специализированные оптические волокна находят все большее применение в современных устройствах связи, поэтому в последнее время к ним наблюдается повышенный интерес. Важными задачами применения таких волокон является сохранение неизменными их параметров в процессе эксплуатации, а следовательно, – обеспечение высокого качества устройств на их основе [1].

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок волоконного световода, как правило одномодового, в сердцевине которого создана структура с периодической модуляцией показателя преломления (ПП) в одном или нескольких направлениях с периодом, сопоставимым с длиной волны света (рис. 1: 1 – фоточувствительная сердцевина волоконного световода; 2 – кварцевая оболочка; Λ – период решетки).

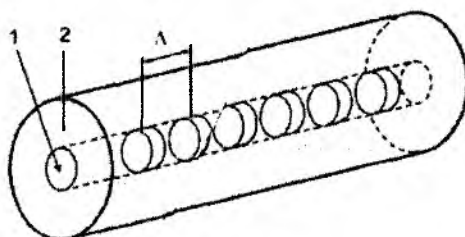


Рис. 1

Преимущества волоконных фотоиндуцированных решеток в сравнении с альтернативными технологиями (например, интерференционными зеркалами и объемными дифракционными решетками) очевидны: это широкое разнообразие получаемых спектральных и дисперсионных характеристик, многие из которых могут быть реализованы только на основе волоконных решеток ПП, полностью волоконное исполнение, а также низкие оптические потери и относительная простота изготовления [2]. Существенно, что благодаря более высокому коэффициенту отражения от периодической структуры затухание в брэгговских волокнах должно быть гораздо меньше, чем в металлических волноводах. Теоретически затухание в брэгговских волокнах можно уменьшить до существенно меньших величин, чем в стандартных. Таким образом, обоснование принципов функционирования компонентов на основе периодических структур, исследование их свойств для использования в составе информационных систем и измерительных устройств является актуальной задачей [3].

Постановка задач исследования

Целью данного исследования является анализ особенностей построения и изготовления ВБР, возможностей создания на их основе различных волоконно-оптических компонентов, моделирование влияния внешних факторов на характеристики решеток.

Для этого были сформулированы следующие задачи:

- исследование особенностей сферы применения специальных ОВ;
- анализ современного состояния вопроса применения волоконно-оптических компонентов на основе периодических структур;
- теоретическое исследование свойств ВБР и их параметров при различных внешних воздействиях;
- анализ методов исследования локальных свойств решеток.

Исходя из поставленных задач в качестве объекта исследования были выбраны теоретические основы и принципы построения волоконно-оптических компонентов на основе пе-

риодических структур. В ходе исследования были применены теория оптических волноводов, теория электромагнитного поля, а также методы имитационного моделирования в средах MathCAD и MatLab, метод оптической пространственной рефлектометрии и транспортный метод.

Теоретические исследования

Структура ВБР обладает уникальными спектральными характеристиками, которые определяют ее широкое применение в различных устройствах волоконной оптики: мультиплексорах, узкополосных фильтрах, компенсаторах дисперсии в ВОЛС, устройствах ввода/вывода, лазерных диодах, усилителях, волоконно-оптических датчиках [4 - 5].

Основным свойством ВБР является отражение распространяющегося по волокну света в узкой полосе, которая сконцентрирована около брэгговской длины волны. Многообразие приложений требует создания решеток с различными спектральными характеристиками, которые определяются деталями строения решетки.

Основными параметрами ВБР являются период, длина, резонансная длина волны, коэффициент отражения. Эти параметры должны в процессе эксплуатации решетки в устройствах сохраняться неизменными.

Основными характеристиками решетки являются распределения амплитуды и периода модуляции ПП, а также среднего значения наведенного ПП вдоль оси световода. Эти параметры задают спектральные и дисперсионные свойства решеток и таким образом определяют их использование в различных приложениях волоконной оптики [6].

Брэгговская длина волны и коэффициент отражения решетки могут быть заданы с большой точностью в процессе изготовления решетки. Эти параметры должны оставаться постоянными на протяжении всего срока эксплуатации решетки. Брэгговская длина волны зависит от температуры и натяжения волокна, а также от давления и радиации. Этот эффект широко применяется в волоконно-оптических датчиках. В то же время для телекоммуникационных целей такая нестабильность параметров решеток вредна и должна быть скомпенсирована.

Профиль показателя преломления (ППП) может быть описан следующим выражением

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(2\pi \cdot z / \Lambda), \quad (1)$$

где Δn – амплитуда изменений показателя преломления (обычно величина Δn составляет $10^{-3} - 10^{-5}$); z – расстояние вдоль оси волокна.

Исходя из теории связанных мод [7] относительная спектральная отражательная способность брэгговских решеток может быть описана следующим выражением

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \cdot \sinh^2(s \cdot l)}{\Delta k^2 \cdot \sinh^2(s \cdot l) + s^2 \cdot \cosh^2(s \cdot l)}, \quad (2)$$

где $R(l, \lambda)$ – функция, зависящая от длины решетки и длины волны излучения; Ω – коэффициент связи; $k = 2\pi \cdot n_0 / \lambda_0$ – волновой вектор брэгговской решетки, $\Delta k = k - 2\pi \cdot n_0 / \lambda$ – коэффициент расстройки волнового вектора, а $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$.

Коэффициент связи Ω для структуры с синусоидальным изменением показателя преломления описывается следующим выражением

$$\Omega = \frac{\pi \cdot \Delta n}{\lambda} \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot d_{серд}^2 \cdot (n_{серд}^2 - n_{об}^2)} \right), \quad (3)$$

где $d_{серд}$ – диаметр сердцевин, $n_{серд}$ – показатель преломления сердцевин оптического волокна, $n_{об}$ – показатель преломления оболочки.

Зависимость центральной отраженной длины волны от деформации также может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma} \cdot (1 - p_e) \cdot \varepsilon_z, \quad (4)$$

где p_e – константа деформации оптического волокна, определяемая из выражения

$$p_e = \frac{n_{эфф}^2}{2} \cdot [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})], \quad (5)$$

где p_{11} и p_{12} – коэффициенты Поккельса в тензоре оптических напряжений, ν – коэффициент Пуассона [8].

Второе слагаемое дает зависимость сдвига волны от температуры. Длина волны изменяется в зависимости от температуры из-за следующих факторов: теплового расширения оптического волокна (удлиняется период брэгговской решетки – изменение механической длины решетки), а также изменения показателя преломления волокна в зависимости от температуры (изменение оптической длины решетки). Откуда следует, что зависимость сдвига длины волны от температуры может быть описана выражением

$$\Delta\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma} \cdot (\alpha_{\Lambda} + \alpha_n) \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где α_{Λ} – тепловой коэффициент расширения; α_n – термооптический коэффициент [7].

Моделирование параметров ВБР

Промоделируем изменение ППП вдоль оси волокна в зависимости от величины Δn , принимая: $z = 0 \dots 20$ мм, $\Delta n_1 = 10^{-5}$ и $\Lambda = 0,5$ мкм (рис. 2).

Из полученных зависимостей видно, что при изменении периода решетки при неизменном значении глубины модуляции ПП в форме ППП вдоль оси волокна наблюдаются отличия в периодичности, а также в амплитуде. Наиболее это заметно для периода решетки $\Lambda = 0,5$ мкм.

На рис. 3 приведен рассчитанный спектр отражения брэгговской решетки при различных значениях глубины модуляции ПП (для длины решетки $l=20$ мм, $d_{сепд} = 8$ мкм, $n_{сепд} = 1,4681$, $n_{об} = 1,464$). Сплошной линией показана зависимость $R(l, \lambda)$ при $\Delta n = 10^{-5}$, а штриховой линией – при $\Delta n = 10^{-4}$.

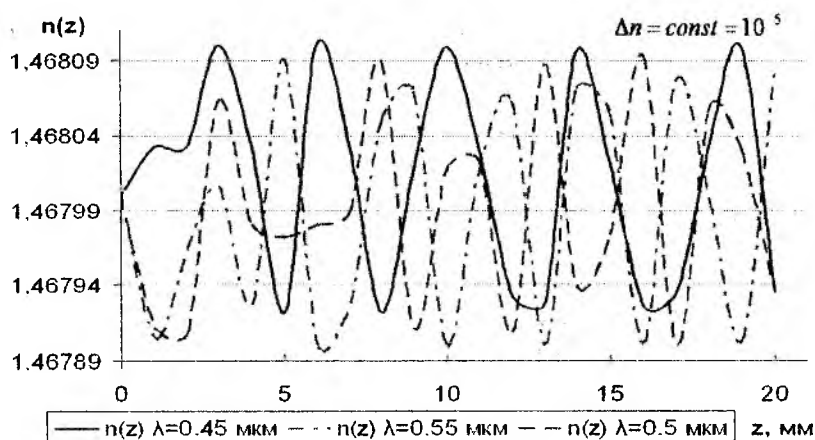


Рис. 2

На рис. 4 приведен рассчитанный спектр отражения брэгговской решетки при разных значениях длины решетки ($\Delta n = 10^{-4}$, $d_{сепд} = 8$ мкм, $n_{сепд} = 1,4681$, $n_{об} = 1,464$). Сплошной линией показана зависимость $R(l, \lambda)$ при $l = 20$ мм, штрихпунктирной линией – при $l = 30$ мм, штриховой – при $l = 40$ мм.

Из полученных графиков следует, что относительная спектральная отражательная способность растет при увеличении глубины модуляции показателя преломления и длины решетки.

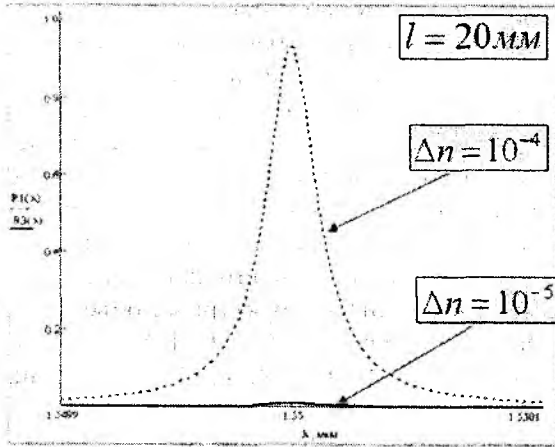


Рис. 3

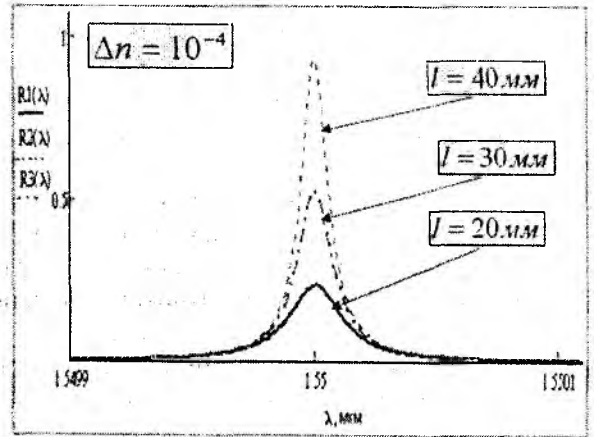


Рис. 4

Для типового волокна $p_{11}=0,113$, $p_{12}=0,252$, $\nu=0,16$, и $n_{эфф}=1,4682$. Используя (4), получаем зависимость, представленную на рис. 5. Принимаем $\lambda_0 = 1550$ нм. Из полученного графика видно, что чувствительность для длины волны $\lambda_0=1550$ нм составляет 12 нм/‰.

Построим зависимость $\Delta\lambda_0(\Delta T)$, используя выражение (6). Пределы изменения температуры принимаем: $\Delta T = 0...100$ °С. Брэгговская длина волны $\lambda_0=1550$ нм, $\alpha_\Lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$ – для плавленого кварца, $\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6}$ – для оптического волокна с легированным германием.

При указанных значениях параметров чувствительность к температуре брэгговской решетки для длины волны $\lambda_0=1550$ нм составит 13,7 нм/°С (рис.6).

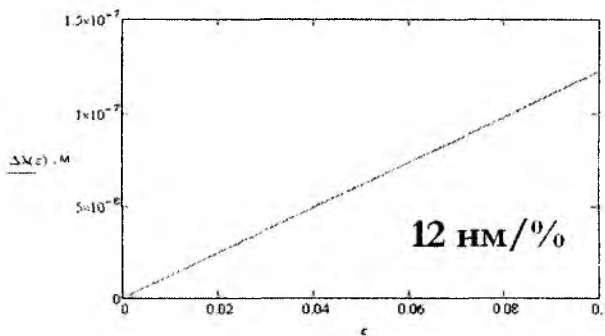


Рис. 5

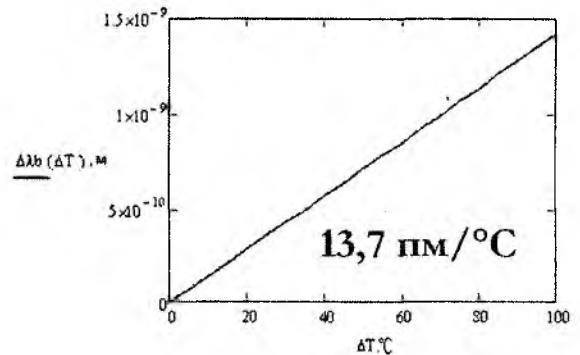


Рис. 6

Выводы

1. В работе исследованы волоконно-оптические компоненты на основе периодических структур, выявлены их особенности, рассмотрены модели волоконных брэгговских решеток, позволяющие учитывать влияние внешних параметров на функционирование различных устройств.

2. Определена чувствительность параметров ВБР к внешним воздействиям. Чувствительность к деформации для длины волны 1550 нм составляет 12 нм/‰, а к температуре – 13,7 нм/°С.

3. Исследована относительная спектральная отражательная способность брэгговских решеток, а именно – ее зависимость от длины решетки и глубины модуляции. Исследована зависимость резонансной длины волны от температуры и растяжения волокна с ВБР.

Список литературы. 1. *Филипенко А. И, Жарикова И. В.* Анализ особенностей применения волоконных компонентов на основе периодических структур // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. № 2/5 (38). С. 22-25. 2. *Специальные оптические волокна* // <http://www.focoms.com/referencesR.htm/>. 2007. 3. *Жарикова И. В.* Исследование параметров волоконно-оптических брэгговских решеток в зависимости от приложенных внешних воздействий / 13-й між нар. молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.» : матеріали форуму, 30 березня-1 квітня 2009 р. Харків // Зб. матеріалів форуму. Ч.1. Харків: ХНУРЕ, 2009. С. 115. 4. *Волоконные брэгговские решетки* // <http://www.c-tt.ru>. 2002. 5. *Волоконные решетки показателя преломления и их применения* / Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И. Г. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35 (12). С.1085-1103. 6. *Hill K. O., Meltz G.* Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview //J. of Lightwave Technology. 1997. Vol. 16, №8. P.1263-1274. 7. *Григорьев В. В.* Информационно-измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния инфраструктурных объектов / В. В. Григорьев, А. К. Митюрёв, А. Б. Пнев и др. // Фотон-Экспресс. 2006. №5. С. 22-24. 8. *Liu Y.-Q.* Fiber grating sensor with enhanced pressure and temperature sensitivity / Y.-Q. Liu, Z.-Y. Guo, Z.-G. Liu, D.-H. Zhao // Chin.Phys.Lett. 2000. Vol.17, №2. PP. 115-116.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 30.11.2009