

УДК 681.7

# АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

*Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями применения специализированных оптических волокон с брэгговскими решетками (БР). Приведенный в статье обзор может быть использован для разработки новых приложений на основе БР, а описанные модели таких решеток позволяют проводить анализ влияния внешних факторов на параметры устройств на их основе*

**А.И. Филиппенко**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра технологии и автоматизации производства  
радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств\*  
E-mail: fia@kture.kharkov.ua

**И.В. Жарикова**

Студентка\*  
\*Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
пр.Ленина, 14, г.Харьков, 61166  
Контактный телефон: (057) 338-88-91, (097) 615-35-73  
E-mail: pavutyynnya@mail.ru

## 1. Состояние вопроса и постановка задачи

В настоящее время отмечается растущий интерес к специализированным волокнам для создания оптических компонентов.

Применение специальных оптических волокон (ОВ) в системах связи уже достигло существенного прогресса, обещая еще немало новых возможностей использования в оборудовании сетей связи следующего поколения.

Одним из важных свойств кварцевого стекла, используемого для изготовления ОВ, является фоточувствительность: если облучать волокно УФ-излучением, можно локально изменять показатель преломления (ПП).

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок волоконного световода (ВС), как правило, одномодового, в сердцевине которого наведена структура с периодической модуляцией ПП в одном или нескольких направлениях с периодом, сопоставимым с длиной волны света (рис.1).

Условия усиления отражения света на определенной длине волны называют брэгговскими условиями, а длину волны, на которой это происходит, – брэгговской длиной волны. Для всех остальных волн ВБР практически прозрачна.

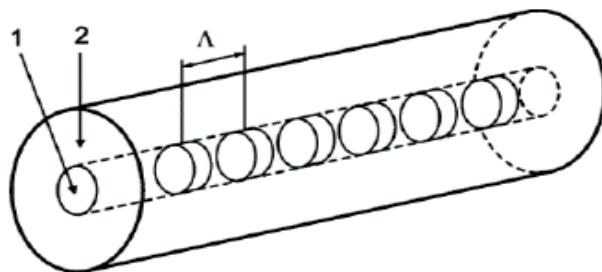


Рисунок 1. Схема волоконной решетки показателя преломления:

1 – фоточувствительная сердцевина волоконного световода; 2 – кварцевая оболочка;  $\Lambda$  – период решетки

Итак, основным свойством ВБР является отражение распространяющегося по волокну света в узкой полосе, которая сцентрирована около брэгговской длины волны.

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. Однако интерес к брэгговским волокнам долгое время был незначительным из-за технологических трудностей их изготовления. Активные исследования свойств брэгговских волокон возобновились недавно, когда началось интенсивное изучение нового класса оптических волокон с двумерной периодической структурой [2].

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 [3].

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

## 2. Классификация волоконных решеток

Анализ публикаций [6,13] 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.

ДПВР 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. ДПВР являются также наиболее перспективным элементом для применения в системах оптической связи со спектральным уплотнением [6].

## 3. Обзор методов изготовления брэгговских решеток

Изготовления 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 (рис.2). Это заставляет интенсивность излучения изменяться периодически по длине волокна. Там, где интенсивность высокая, показатель преломления увеличивается, а где она мала, показатель остается без изменений.



Рисунок 2. Формирование брэгговской решетки

Для производства решеток также могут быть использованы другие методы, такие, как фазовые маски. Фазовая маска является дифракционным оптическим элементом. Когда она облучается пучком света, она расщепляет этот пучок на разные дифракционные порядки, которые потом интерферируют, прочерчивая решетку внутри волокна [6].

## 4. Компоненты на основе ВБР

БР обладает высоким коэффициентом отражения на определенной длине волны, малыми вносимыми потерями, высокой избирательностью длины волны и малыми перекрестными помехами, что обуславливает ее широкое применение в таких устройствах:

- частотные мультиплексоры для телекоммуникационных систем;
- перестраиваемые и фиксированные узкополосные фильтры;
- компенсаторы дисперсии в волоконно-оптических системах (ВОЛС);
- частотно-селективные ответвители и устройства вывода света из волокна;
- лазерные диоды с БР в качестве внешнего отражателя;

- усилители на базе волокна с добавками эрбия;
- мультиплексные пассивные волоконно-оптические датчики (ВОД).

Внедрение ВБР во всех этих областях является экономически целесообразным, следовательно, исследование их свойств и параметров является весьма актуальным и перспективным направлением.

#### 4.1 Устройства ввода-вывода

Постоянно растущая потребность в увеличении скорости передачи информации, связанная с развитием средств телекоммуникаций, увеличением информационных потоков, ростом глобальных информационных систем и баз данных, расширением числа пользователей, привела к тому, что ВОЛС стали разрабатываться с применением спектрального мультиплексирования оптических каналов (DWDM). Для успешной работы таких линий связи требуются устройства ввода-вывода отдельных спектральных каналов, которые могут быть успешно реализованы на основе ВБР.

Многочисленные вариации конструкций этого простого устройства ввода-вывода могут быть реализованы с использованием решеток в комбинации с отражателями и циркуляторами. Основной недостаток этих конструкций состоит в том, что отражение этих решеток не является идеальным, в результате чего часть энергии отобранных длин волн «просачивается» через решетку. Это явление может вызвать нежелательные помехи [6].

#### 4.2 Компенсаторы дисперсии

Одним из факторов, ограничивающих скорость передачи информации в современных линиях связи, является хроматическая дисперсия ВС. Для компенсации хроматической дисперсии при использовании уже имеющихся волоконных световодов может быть использована ВБР с переменным периодом, являющаяся компактным волоконным элементом. Такая решетка способна вносить определенную временную задержку между спектральными компонентами импульса и таким образом восстанавливать его исходную форму [3].

Однако, ВБР имеют в данном случае такие существенные недостатки:

- решетки изготавливаются фотоспособом из фоточувствительного ОВ, со временем под действием световых сигналов происходит нарушение решетки (размывание);
- у большинства компенсаторов на основе волоконных решеток имеется недостаток, заключающийся в том, что сигнал с компенсированной дисперсией отражается в обратном направлении, поэтому для отделения входа от выхода нужно использовать оптический циркулятор;
- для нормального функционирования устройства на основе ВБР необходима стабилизация температурных условий, что увеличивает общую стоимость компенсатора.

#### 4.3 Сенсоры

Возмущение состояния решетки (растяжение, нагрев) вызывают изменение положения максимума в спектре отраженной волны. Это свойство ВБР положено в основу создания сенсоров.

Применение сенсоров на основе ВБР является одним из перспективных методов распределенного измерения температуры, давления, натяжения и других физических величин. Основными преимуществами таких сенсоров являются:

- высокая чувствительность;
- малые размеры;

- способность работы без подвода электричества;
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- дистанционность;
- возможность работы в агрессивных средах;
- возможность объединения сенсоров в распределенные системы;
- удобство в использовании.

Одним из наиболее существенных вопросов, который необходимо решить при использовании ВБР как датчиков, это их одновременная чувствительность к нескольким параметрам (температура и деформация световода) [7].

#### 4.4 Лазеры с ВБР

Одной из важнейших проблем ВОЛС со спектральным уплотнением является создание лазерных источников излучения с узким и стабильным спектром (не более 0,1 нм), который должен сохраняться в динамическом режиме при модуляции информационным сигналом с частотами вплоть до 10 ГГц. Этим требованиям наиболее полно могут отвечать полупроводниковые лазеры с ВБР на одномодовых ВС [7].

#### 4.5 Фильтры с ВБР

Управляемые узкополосные оптические фильтры представляют большой интерес в различных областях лазерной техники, оптического приборостроения и в особенности в оптических телекоммуникационных системах, основанных на принципах спектрального мультиплексирования (WDM). Особенно привлекательными являются электрически управляемые фильтры в интегрально-оптическом исполнении, так как они могут обеспечить высокое быстродействие, требуют сравнительно небольших управляющих напряжений, хорошо сопрягаются с оптоволоконными компонентами и пригодны для массового производства.

Брэгговский волоконный фильтр представляет собой фоточувствительное волокно, на части которого сформирована брэгговская решетка. Брэгговский принцип также применяется в полностью волоконных акустооптических перестраиваемых фильтрах, где решетки выполняются с использованием высокочастотного акустического сигнала, воздействующего на оптически прозрачный волновод. Полностью волоконные акустооптические перестраиваемые фильтры включают преобразователи, в которых используется связь пространственных мод на поверхности обычного одномодового волокна или акустооптические устройства сдвига частоты акустических поверхностных волн, использующие связь поляризованных мод в поляризационных волокнах.

В сглаживающих фильтрах усиления активной среды применяются записанные в непокрытых волокнах брэгговские решетки с большим периодом вариации показателя преломления (~100 мкм). Такие решетки обеспечивают связь между модами сердцевины и оболочки, вызывая потери, зависящие от длины волны [12].

### 5. Модель влияния внешних факторов на параметры ВБР

Для кабелей и волокон, используемых в качестве канала передачи информации одной из основных задач, стоящих перед разработчиком при проектировании волоконно-оптических систем, является сохранение

неизменными оптических характеристик при любых внешних воздействиях в течение срока службы.

Резонансная длина волны брэгговских решеток  $\lambda_{BG}$  зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений. Эта зависимость описывается следующим уравнением:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n\Lambda \left( \left\{ 1 - \left( \frac{n_{эфф}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \epsilon + \left[ \alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \right) \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры,  $\epsilon$  – приложенное механическое напряжение,  $P_{ij}$  – коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла,  $n$  – эффективный показатель преломления основной моды. Для типового волокна  $p_{11}=0.113$ ,  $p_{12}=0.252$ ,  $\nu=0.16$ , и  $n_{эфф}=1.4682$ . Исходя из этих значений чувствительность для длины волны  $\lambda_b=1550$  нм составляет 12 нм/% [2].

Температурная чувствительность сдвига резонансной длины волны для длиннопериодных решеток  $\Delta\lambda_{LPG} / \Delta T$  зависит от номера связываемой оболочечной моды и обычно составляет ~ 0.05-0.1нм/К. Соотношение, описывающее температурную чувствительность решеток, представляется выражением:

$$\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{\lambda_{LPG}} = \frac{\frac{1}{\Delta n_{эфф}} \frac{\partial(\Delta n_{эфф})}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}}{1 - \Lambda \frac{\partial(\Delta n_{эфф})}{\partial \lambda}} \cdot \Delta T \quad (2)$$

где  $\Delta n_{эфф}$  – разность эффективных показателей преломления основной и оболочечной мод.

Вторым слагаемым в числителе этого уравнения, представляющим собой коэффициент теплового расширения кварцевого стекла, как правило, можно пренебречь в сравнении с первым. Таким образом, основными факторами, определяющими температурную чувствительность длиннопериодных решеток, являются термо-оптические коэффициенты сердцевины и оболочки световода, а также спектральные зависимости эффективных ПП связываемых мод на рассматриваемой длине волны (второй член в знаменателе выражения (2)). Отметим, что уменьшение знаменателя с ростом номера оболочечной моды приводит к увеличению температурной чувствительности [10].

## 6. Выводы

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. Этот эффект широко применяется в волоконно-оптических датчиках. Системы на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков являются одними из наиболее перспективных опико-электронных измерительных систем.

В то же время для телекоммуникационных целей такая нестабильность параметров решеток вредна и должна быть скомпенсирована.

Недостаточная изученность на сегодняшний момент вопроса деградации волноводных брэгговских решеток вследствие воздействия температуры или механического напряжения является предметом дальнейших исследований.

## 7. Литература

1. 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.
2. Григорьев В.В., Митюрёв А.К. Информационно-измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния инфраструктурных объектов//Фотон-экспресс. – 2006. – №5, С.22-24Наний О.Е., Павлова Е.Г. Фотонно-кристаллические волокна//LIGHTWAVE Russian edition. – 2004 – №3. – С.47-53.
3. Исследование локальных характеристик волоконных брэгговских решеток методом оптической пространственной рефлексомерии/ Королев И.Г., Васильев С.А., Медведков О.И., Дианов Е.М. // Квантовая электроника, 2003. – Т.33 (8), С.704-710.
4. Наний О.Е., Павлова Е.Г. Фотонно-кристаллические волокна//LIGHTWAVE Russian edition. – 2004 – №3. – С.47-53.
5. Овчинникова И., Овчинников А., Геча Э. Оптические кабели в системах безопасности//Системы безопасности. – 2007. – №2.Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток/ Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И., Шелемба И.С. // Вестник НГУ. Серия Физика. – 2007. – Том 2, выпуск 3. – С.54-57.
6. Перестраиваемый многополосный оптический фильтр на основе последовательно соединенных длиннопериодных волоконных решеток/ Чен С., Жао К., Лиу Л. И др. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, вып.5, С.76-83.
7. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530-1560 нм/ В.П. Дураев, Е.Т. Неделин, Т.П. Недобывайло и др.// Квант. Электроника. – 2001. – 31 (6), С.529-530.
8. Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток/ Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И., Шелемба И.С. // Вестник НГУ. Серия Физика. – 2007. – Том 2, выпуск 3. – С.54-57.
9. Чижов М.Н. Применение ВОБР для построения датчиков физических величин//X Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тез.докл. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2006. – С.96-98.
10. Hill K.O., Meltz G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview//J.of Lightwave Technology. – 1997. – Vol.16,№8/– P.1263-1274.
11. <http://www.c-tt.ru>.
12. <http://www.focom.com>.
13. <http://gratings.fo.gpi.ru>.
14. <http://sensor.nad.ru/sensors/cyrillic/bragg.htm>.
15. <http://vols.pp.ru/3.html>.