

07

Перестраиваемый многополосный оптический фильтр на основе последовательно соединенных длиннопериодных волоконных решеток

© С. Чен, К. Жао, Л. Лиу, Д. Жанг, Е. Ян, Х. Донг

Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, P.R. China
E-mail: sh_h_chen@yahoo.com.cn

В окончательной редакции 15 октября 2004 г.

Предложен многополосный оптический фильтр, основанный на последовательно соединенных длиннопериодных волоконных решетках (ДПВР), непрерывно и линейно перестраиваемый в широком спектральном диапазоне при изменении температуры волокна. Впервые продемонстрирован диапазон перестройки длины волны 2.1 nm, что достигается изменением температуры на 62°C, при этом коэффициент регрессии составляет 0.997. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетом.

1. Введение

Предложенные Венсаргаром и его коллегами в 1995 г. [1] длиннопериодные волоконные решетки (ДПВР) применяются в качестве компенсаторов в волоконных оптических усилителях на основе эрбиевого волокна [2], в оптических заграждающих фильтрах [2], для создания элементов широкополосного пропускания при отсутствии обратного отражения. Однако обычно ДПВР не могут использоваться в качестве узкополосных фильтров, особенно многоволновых. Позднее были предложены каскадные ДПВР [3], характеристики пропускания которых имеют несколько хорошо изолированных интерференционных максимумов с высоким коэффициентом экстинкции. ДПВР являются также наиболее перспективным элементом для применения в системах оптической связи со спектральным уплотнением [4].

В последнее время в работе [5] для перестройки длины волны ДПВР использовалась осевая деформация. Однако даже при деформации 3000 $\mu\epsilon$ диапазон перестройки составлял только 1 nm, что не

удовлетворяет требованиям к фильтрам, используемым в системах с расстоянием между соседними каналами более 1 nm.

В данной работе предлагается перестраивать рабочую длину волны фильтра путем изменения температуры. Впервые, как нам известно, диапазон перестройки достиг 2.1 nm с коэффициентом регрессии 0.997. Дальнейшее расширение диапазона перестройки может быть достигнуто при увеличении интервала изменения температуры. Эксперимент хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Если в каскадном фильтре расположить ДПВР с таким интервалом, чтобы расстояние между каналами удовлетворяло международному стандарту разделения частот 100 или 50 GHz, то такой элемент может использоваться в качестве перестраиваемого фильтра в оптических системах со спектральным уплотнением. Между тем если при соответствующем изменении температуры диапазон перестройки равен половине расстояния между каналами, то устройство может также работать как фильтр временного уплотнения импульсных сигналов.

2. Теория

1. Принцип работы каскадных ДПВР. Для простоты наши вычисления основывались на предположении, что имеются только две последовательно соединенные полностью однородные ДПВР. Качественное объяснение принципа работы каскадных ДПВР представлено на рис. 1. Часть энергии падающей волны, изначально распространяющейся по сердцевине волокна, перекачивается в моды оболочки на первой ДПВР и затем переходит обратно в моду сердцевины на второй ДПВР. Эта волна интерферирует с волной, распространяющейся по волокну

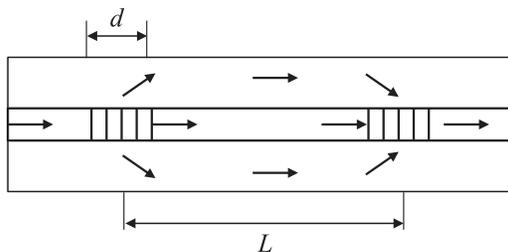


Рис. 1. Схема прохождения лучей в фильтре с двумя ДПВР.

напрямую, т. е. без взаимодействия с модами оболочки, и получающийся интерференционный спектр является кривой пропускания каскадного ДПВР.

Уравнения связанных мод [6] для амплитуд сердцевинной моды $a_{01}^{co}(d)$ и оболочечной моды $a_m^{cl}(d)$ единичной ДПВР могут быть записаны в виде [7,8]

$$\begin{pmatrix} a_{01}^{co}(d) \\ a_m^{cl}(d) \end{pmatrix} = e^{j\frac{(\beta_{01}^{co} + \beta_m^{cl})}{2}d} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где учтены граничные условия $a_{01}^{co}(0) = 1$ и $a_m^{cl}(0) = 0$.

В уравнении (1) β_{01}^{co} и β_m^{cl} — постоянные распространения сердцевинной и оболочечной мод соответственно; $K = 2\pi/\Lambda$ — модуль вектора обратной решетки ДПВР, где Λ — период решетки; d — длина ДПВР; t, r — коэффициенты пропускания для сердцевинной и оболочечной мод соответственно, которые описываются уравнениями

$$\begin{aligned} t &= \cos(s_m d) + j \frac{\delta_m}{s_m} \sin(s_m d), \\ r &= j \frac{\kappa_m}{s_m} \sin(s_m d). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $|t|^2, |r|^2$ — передаточные отношения соответствующих мод. В уравнении (2)

$$\delta_m = (1/2)(\beta_{01}^{co} - \beta_m^{cl} - 2\pi/\Lambda)$$

есть расстройка; κ_m — коэффициент связи между сердцевинной и оболочечной модами; s_m — константа, определяемая как $\sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2}$.

После прохождения через каскадные ДПВР амплитуды сердцевинной и оболочечной мод записываются как

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a_{01}^{co}(2d + L) \\ a_m^{cl}(2d + L) \end{pmatrix} &= e^{j(\beta_{01}^{co} + \beta_m^{cl})d} \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\beta_{01}^{co}L} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_m^{cl}L} \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} e^{j\frac{K}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{K}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где L — расстояние между центрами двух ДПВР, как показано на рис. 1. Передаточное отношение $|a_{01}^{co}(2d + L)|^2$ может быть вычислено из уравнения (3).

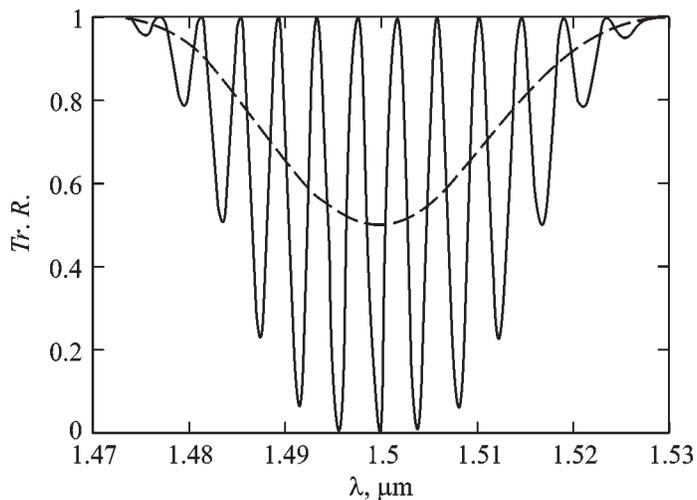


Рис. 2. Кривые пропускания единичной и каскадных ДПВР.

Спектральные кривые пропускания единичной и двух последовательно соединенных ДПВР показаны на рис. 2 соответственно штрихованной и сплошной линиями. Параметры ДПВР следующие: $\Lambda = 750 \mu\text{m}$, $\kappa_m d = \pi/4$, $d = 3.75 \text{ см}$, $L \ll 6d$. Видно, что передаточная функция двух (каскадных) ДПВР образована синусоидальной кривой с высоким коэффициентом экстинкции, огибающая которой соответствует передаточной функции одной ДПВР.

II. Температурная перестройка длины волны. Из рассмотрения рис. 1 видно, что длина волны каскадных ДПВР будет смещаться в результате изменения разности фаз между сердцевинной и оболочечной модами, вызванного изменением L . Это расстояние может легко варьироваться за счет изменения температуры отрезка оптического волокна между двумя ДПВР. В этом случае температура самих ДПВР остается постоянной, что упрощает как экспериментальную ситуацию, так и теоретическое рассмотрение.

На рис. 3 представлена расчетная зависимость температурного смещения пиков пропускания. Эта зависимость показывает, что смещение всех пиков происходит синхронно, а температурный коэффициент и коэффициент регрессии составляют соответственно $0.035 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ и 0.999 .

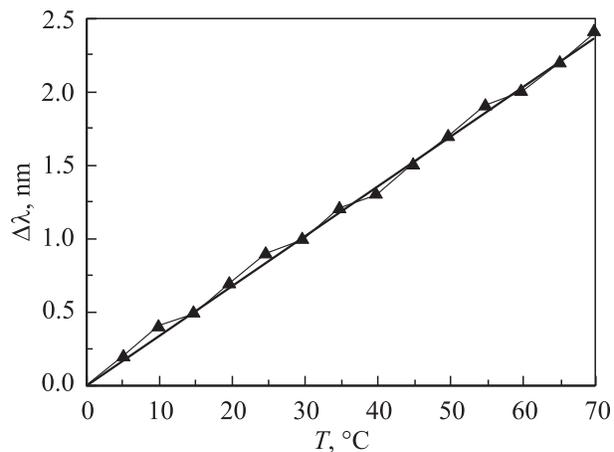


Рис. 3. Расчетная зависимость смещения длины волны в каскадном ДПВР. Экспериментальные данные показаны \blacktriangle , кривая регрессии с коэффициентом 0.999 показана сплошной линией.

В эксперименте очень сложно изготовить две полностью однородные ДПВР. Поэтому были также проведены расчеты характеристической кривой пропускания для каскадных ДПВР с различными параметрами. В этом случае по сравнению с результатами, представленными на рис. 2, интерференционные эффекты ослабляются и коэффициент гашения пропускания уменьшается. Однако принцип перестройки по температуре полностью соответствует случаю каскадных ДПВР с однородными характеристиками.

Это можно объяснить следующим образом. В эксперименте внешняя среда не оказывает никакого влияния на ДПВР — изменяется только температура соединительного участка оптического волокна. Соответственно смещение длины волны фильтра определяется лишь свойствами этого участка световода и не зависит от характеристик обеих ДПВР, таких как центральная длина волны и контрастность кривой пропускания.

3. Эксперимент

Были изготовлены две ДПВР длиной 1.5 см, у которых длины волн центра полосы затухания были равны 1529.6 и 1530.0 nm, а переда-

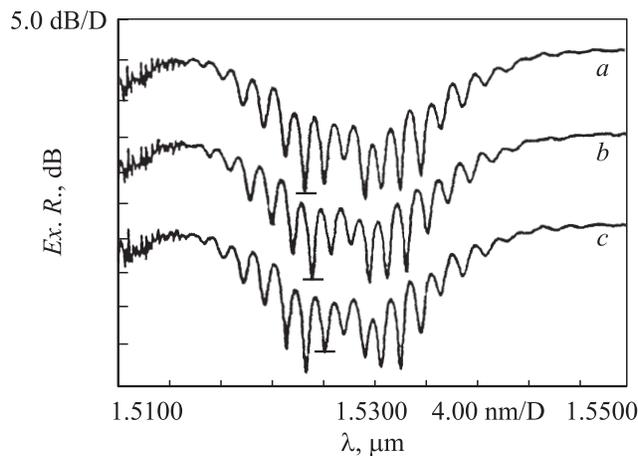


Рис. 4. Спектры пропускания каскадного ДПВР при температуре 34°C (*a*), 64°C (*b*) и 96°C (*c*).

точные отношения составляли 14 и 13 dB соответственно. Участки волокна с решетками были соединены отрезком волокна длиной 59 см (рис. 1). Таким образом, был изготовлен элемент с каскадными ДПВР. Центральный отрезок волокна помещался в камеру с контролируемой температурой. На вход фильтра поступал свет от источника спонтанного излучения на основе оптического волокна, легированного эрбием, а прошедший свет регистрировался с помощью оптического анализатора спектра Q8383 с разрешением 0.1 nm. При плавном изменении температуры на выходе регистрировался стабильный интерференционный спектр.

На рис. 4 кривыми *a*, *b* и *c* показаны спектры пропускания, полученные при температурах 34, 64 и 96°C (эти спектры смещены по оси *Y*, так как на самом деле они сильно накладываются друг на друга). На представленных спектрах длины волн, соответствующие 7-му минимуму, равны соответственно 1524.3, 1525.5 и 1526.4 nm. На рис. 4 хорошо видно, что коэффициент ослабления пропускания составляет около 8 dB. Полученные интерференционные кривые отличаются от кривой, представленной на рис. 2, что вызвано неидентичностью двух ДПВР. При увеличении температуры все интерференционные максимумы линейно смещаются в сторону больших длин волн.

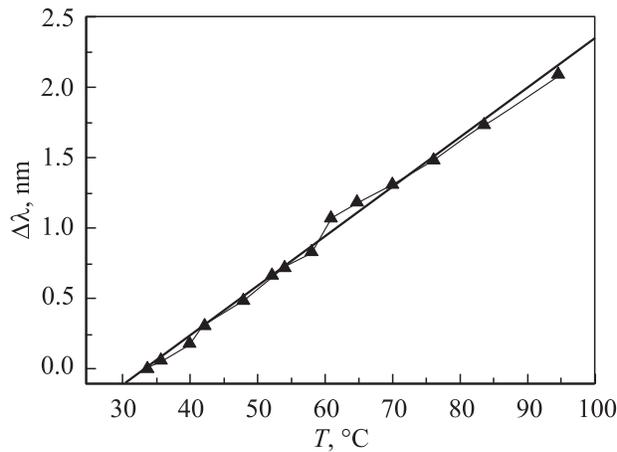


Рис. 5. Экспериментальная зависимость смещения длины волны каскадного ДПВР от температуры. \blacktriangle — экспериментальные данные, сплошная линия — кривая регрессии с коэффициентом 0.997.

График смещения центральной длины волны 7-го минимума при изменении температуры в диапазоне от 34 до 96°C представлен на рис. 5. Для такого изменения температуры величина смещения составляет 2.1 nm, что превосходит расстояние между каналами 1.5 nm. Температурный коэффициент смещения равен 0.034 nm/°C и коэффициент регрессии 0.997, что совпадает с результатами расчета, представленными на рис. 3.

В эксперименте увеличение температуры приводит к незначительному изгибу соединительного участка волокна. Однако сдвиг спектра, вызванный этим изгибом, составляет менее 0.2 nm, что меньше сдвига, возникающего за счет изменения температуры. В данном случае этим эффектом можно пренебречь.

Отметим, что длину участка волокна между ДПВР можно выбрать такой, чтобы спектральное расстояние между каналами удовлетворяло международному стандарту разделения частот 100 или 50 GHz. Тогда каскадные ДПВР можно использовать в качестве линейно перестраиваемого фильтра в оптических системах со спектральным уплотнением каналов, причем перестройка достигается простым изменением температуры волокна. Более того, если при соответствующем изменении

температуры сдвиг длины волны составляет половину расстояния между каналами, то данный фильтр может работать как фильтр временно́го уплотнения импульсных сигналов.

4. Заключение

Продемонстрирован многополосный оптический волоконный фильтр, основанный на каскадных ДПВР, спектр пропускания которого перестраивается в широком диапазоне путем изменения температуры. Получена характеристика перестройки с коэффициентами регрессии и чувствительности 0.997 и $0.034 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ соответственно, что хорошо согласуется с результатами моделирования.

Предложенный перестраиваемый фильтр может использоваться в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов. Однако скорости перестройки как по температуре, так и по деформации слишком малы, что может ограничить применение такого фильтра. Задачей нашего текущего проекта является разработка многополосного фильтра с быстрой перестройкой полос пропускания.

Данное исследование поддержано Национальным фондом естественных наук Китая (№ 69977006), Специальным национальным фондом наук г. Тяньжин (№ 013800511) и фондом поддержки докторских программ министерства образования (№ 20020055036).

Список литературы

- [1] *Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins U.B. et al. // J. Lightwave Technology. 1996. V. 14. P. 58.*
- [2] *Vengsarkar A.M., Pedrazzani J.R., Judkins J.B. et al. // Optics Letters. 1996. V. 21. P. 336.*
- [3] *Gu X.J. // Optics Letters. 1998. V. 23. P. 509.*
- [4] *Chow J., Town G., Eggleton B. et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1996. V. 8. P. 60.*
- [5] *JinHyoungh Lee, Won-Taek Han, Un-Chul Paek et al. // Measurement Science and Technology. 2002. V. 12. P. 778.*
- [6] *Turan Erdogan // Journal Lightwave Technology. 1997. V. 15. P. 1277.*
- [7] *Byeong Ha Lee, Young-Jae Kim, Youngjoo Chung et al. // IEICE Trans Electron. 2001. V. E84-C. P. 621.*
- [8] *Liu Y., Williams J.S.R., Zhang L., Bennion I. // Optics Communications. 1999. V. 164. P. 27.*