

Узкополосный брэгговский фильтр на длину волны 1.5 мкм на основе полимерного волновода с лазерно-индуцированной решеткой показателя преломления

В.И.Соколов, В.Я.Панченко, В.Н.Семиногов

Созданы узкополосные частотно-селективные фильтры для телекоммуникационного диапазона длин волн вблизи 1.5 мкм, включающие одномодовый полимерный волновод, в котором с помощью гелий-кадмиевого лазера записана субмикронная брэгговская решетка показателя преломления. Фильтры имеют коэффициент отражения $R > 98\%$ и близкую к прямоугольной форму полосы отражения с шириной $\Delta\lambda \approx 0.4$ нм. Они могут использоваться в качестве элементов оптических мультиплексоров/демультиплексоров для объединения и разделения сигналов в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи с многоволновым уплотнением каналов.

Ключевые слова: узкополосные брэгговские фильтры, полимерные волноводы, субмикронные решетки, мультиплексоры/демультиплексоры.

1. Введение

Узкополосные брэгговские фильтры для телекоммуникационного диапазона длин волн вблизи $\lambda \approx 1.5$ мкм привлекают внимание исследователей, поскольку они могут использоваться для разделения и объединения сигналов в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) с многоволновым уплотнением каналов. Различают фильтры на основе рельефных решеток и решеток показателя преломления. В первом случае рельефная решетка формируется на границе раздела между световедущей сердцевиной и оболочкой световода. Таким методом были изготовлены, например, брэгговские фильтры на основе кварцевых волокон с боковой полировкой [1–5], а также на основе волноводов из полупроводниковых материалов [6]. Во втором случае субмикронная решетка показателя преломления формируется в самой световедущей сердцевине [7–13].

Принцип действия брэгговских фильтров состоит в том, что электромагнитная мода, идущая по световоду, взаимодействует с решеткой и отражается в направлении, противоположном направлению распространения моды. При этом брэгговская длина волны, соответствующая центру полосы отражения, $\lambda_{Br} = 2dn_{eff}$, где d – период решетки; n_{eff} – эффективный показатель преломления моды в области решетки [14].

Целью данной работы являлось создание узкополосных фильтров для $\lambda_{Br} \approx 1.5$ мкм на основе одномодовых полимерных волноводов с субмикронной решеткой показателя преломления. Для создания волноводов использовались галогенированные мономеры, обладающие повышенной оптической прозрачностью в этом спектральном диапазоне.

В.И.Соколов, В.Я.Панченко, В.Н.Семиногов. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Пионерская, 2; e-mail: visokol@rambler.ru, panch@laser.ru

Поступила в редакцию 12 мая 2010 г.

2. Формирование массива одномодовых полимерных волноводов с использованием галогенированных мономеров

В настоящее время фтор- и хлорсодержащие полимерные материалы все более широко используются для формирования волноводов в интегрально-оптических устройствах передачи и обработки информации благодаря их высоким функциональным возможностям и технологичности [11, 13]. В отличие от обычных углеводородных полимеров, они обладают более низким поглощением во всех трех телекоммуникационных областях длин волн вблизи 0.85, 1.3 и 1.55 мкм. Это обусловлено тем, что положения обертонов валентных колебаний C–F и C–Cl связей сдвинуты в сторону больших длин волн по сравнению с положениями соответствующих обертонов связи C–H, ответственных за поглощение в вышеуказанных спектральных областях [15, 16]. Кроме того, фторполимеры обладают весьма низким показателем преломления n , даже ниже 1.33. Это позволяет путем сополимеризации фторсодержащих мономеров с хлорсодержащими мономерами, имеющими высокие значения n , варьировать показатель преломления композиции в широких пределах. Наконец, фторсодержащие полимеры имеют более высокую термостабильность и менее склонны к пожелтению, т. к. энергия C–F связи больше, чем энергия связи C–H.

Для создания волноводов использовались следующие акриловые мономеры: фторсодержащий бифункционал $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{COO} - \text{CH}_2 - (\text{CF}_2)_6 - \text{CH}_2 - \text{COO} - \text{CH} = \text{CH}_2$ с показателем преломления $n_D = 1.373$ на длине волны $\lambda_D = 589.3$ нм и хлорсодержащий монофункционал $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{COO} - \text{CH}_2 - \text{CCl}_3$ с $n_D = 1.459$. Данные мономеры хорошо растворяются друг в друге и сополимеризуются. Для инициирования реакции радикальной фотополимеризации в композиции для световедущей сердцевины и оболочки волновода добавлялся фотоинициатор типа Darocure в концентрации 0.8%–1%.

Одномодовые полимерные волноводы были изготовлены на кремниевой подложке методом контактной

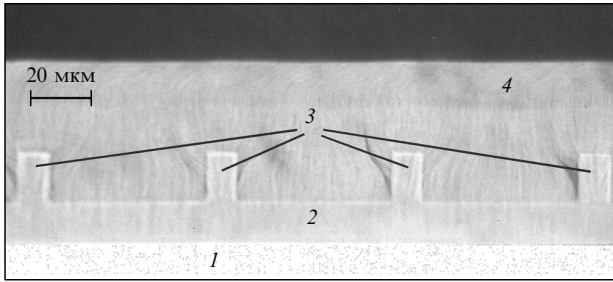


Рис.1. Массив одномодовых полимерных волноводов, сформированных методом контактной фотолитографии: 1 – кремниевая подложка; 2 – полимерный буферный слой; 3 – световедущие жилы; 4 – покровный полимерный слой.

фотолитографии [17]. Сначала на подложке был создан полимерный буферный слой с более низким показателем преломления n_1 толщиной около 14 мкм. На буферном слое, путем УФ освещения через фотошаблон композиции с показателем преломления $n_2 > n_1$, был сформирован массив световедущих жил с шириной 8 мкм и высотой 10 мкм. Затем жилы были закрыты покровным полимерным слоем с показателем преломления n_1 . Фотография изготовленного массива волноводов дана на рис.1.

3. Лазерная запись субмикронных решеток показателя преломления в полимерных волноводах

Формирование решеток показателя преломления в полимерных волноводах проводилось путем освещения волновода излучением гелий-кадмиевого лазера ($\lambda = 325$ нм) через фазовую маску. Схема, иллюстрирующая принцип записи решетки, представлена на рис.2.

Фазовые маски были изготовлены из полимерного материала на кварцевой подложке методом репликации. В качестве мастер-модели использовалась решетка, сформированная на поверхности фосфида индия методом прямого лазерно-индуцированного жидкофазного тра-

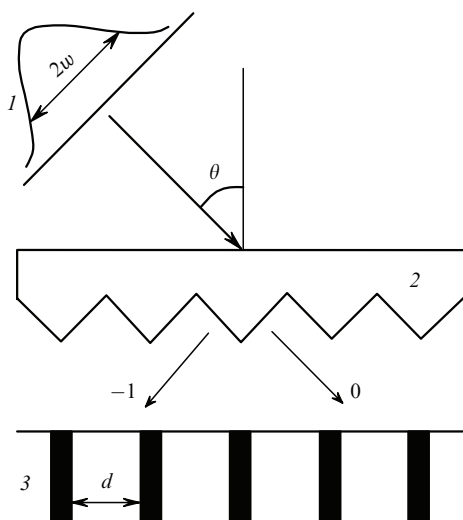


Рис.2. Схема, иллюстрирующая принцип записи решетки показателя преломления в полимерном волноводе: 1 – пучок He–Cd-лазера диаметром $2w$; 2 – фазовая маска; 3 – решетка показателя преломления с периодом d , записываемая в волноводе интерференцией дифрагировавших пучков нулевого (0) и минус первого (–1) порядков; θ – угол падения.

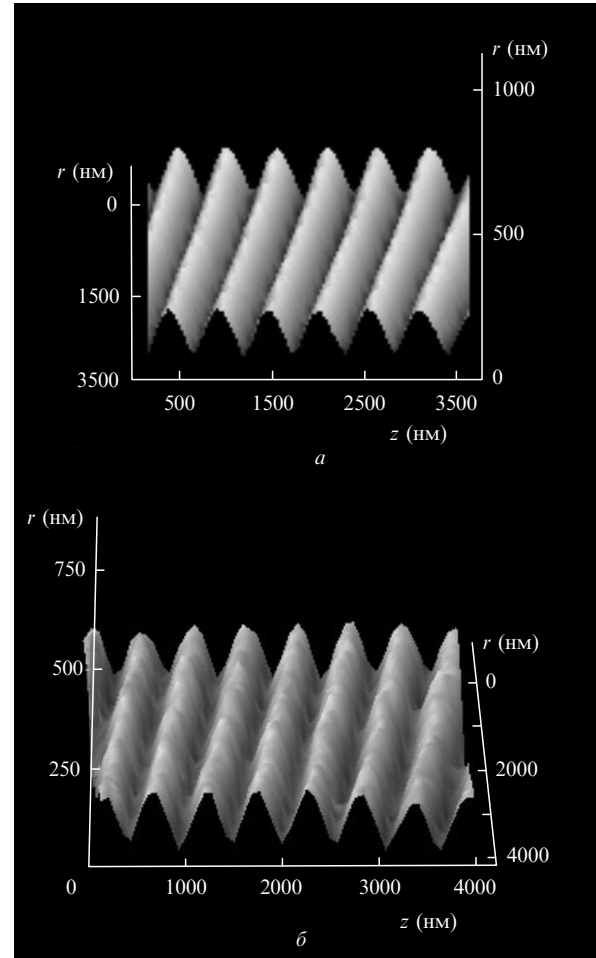


Рис.3. Фотографии мастер-решетки на InP (а) и ее полимерной реплики (б), полученные на атомно-силовом микроскопе.

вления [17, 18]. Решетка имела период $d \approx 0.53$ мкм, амплитуду 0.16 мкм и треугольную форму зубцов (рис.3,а). На рис.3,б показана фотография полимерной реплики от этой решетки, полученной УФ освещением жидкой композиции, находящейся в контакте с мастер-решеткой. Путем подбора показателя преломления композиции можно изменять n полимерной реплики и, следовательно, отношение интенсивностей дифрагировавших пучков первого и нулевого порядков.

Записанные в полимерных волноводах решетки стабильны во времени и не стираются при однородном освещении УФ излучением. Мы предполагаем, что физический механизм образования решетки включает лазерно-индуцированную дополимеризацию остаточных непрореагировавших мономеров и вызванный этим массоперенос мономеров из темновых участков интерференционной картины в освещенные области. Это приводит к повышению показателя преломления в освещенных областях и его понижению в темновых участках, при этом средний показатель преломления в области решетки остается неизменным.

4. Спектры отражения и пропускания полимерных брэгговских фильтров

Для измерения спектральных характеристик фильтров использовался одночастотный перестраиваемый полупроводниковый лазер Newport 2010A. Эксперимента-

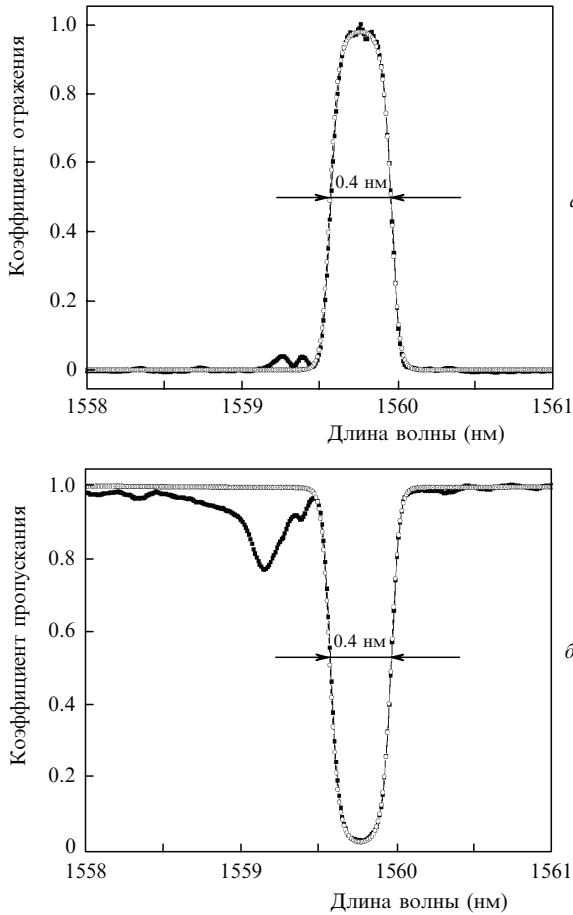


Рис.4. Экспериментально измеренные коэффициенты отражения $R(\lambda)$ (а) и пропускания $T(\lambda)$ (б) брэгговского фильтра (■), а также расчетные данные для R и T , полученные с использованием теории связанных волн (○).

льно измеренные спектры отражения и пропускания фильтра приведены на рис.4. Ширина полосы отражения фильтра $\Delta\lambda$ по уровню 0.5 составляет 0.4 нм, коэффициент отражения $R(\lambda)$ на брэгговской длине волны $\lambda_{Br} = 1559.8$ нм превышает 98 %. Соответствующий провал в спектре пропускания $T(\lambda)$ составляет также 0.4 нм, причем коэффициент пропускания при $\lambda = \lambda_{Br}$ менее 2 %. Фильтр имеет близкую к прямоугольной (без боковых лепестков) форму полосы отражения. Это обусловлено аподизацией, т. е. плавным уменьшением коэффициента связи по мере удаления от центра решетки вследствие гауссового распределения интенсивности в пучке лазера. Отметим, что потери в пропускании при $\lambda < \lambda_{Br}$, связанные с рассеянием направляемой моды волновода в излучательные моды, незначительны. Это обусловлено тем, что под действием УФ лазерного излучения, прошедшего через фазовую маску, решетка показателя преломления формируется не только в сердцевине, но и в оболочке полимерного волновода.

Оценим амплитуду наведенного показателя преломления в брэгговской решетке. Для этого рассмотрим задачу о прохождении плоской электромагнитной волны $E_i \exp(-i\omega t + ikn_0 z)$ с амплитудой E_i и частотой ω ($k = \omega/c = 2\pi/\lambda$, где c – скорость света в вакууме, n_0 – показатель преломления в областях $z < -L/2$ и $L/2 < z$) через одномерную решетку с длиной L и периодом d и с пространственной модуляцией показателя преломления $n(z)$ вдоль оси z

$$n(z) = n_{\text{eff}} + \Delta n(z) \cos(2\pi z/d), \quad -L/2 < z < L/2. \quad (1)$$

Здесь $n_{\text{eff}} \approx n_0$ – эффективный показатель преломления волновода в области решетки, $\Delta n(z)$ – медленно меняющаяся на расстояниях порядка d амплитуда решетки.

Для нахождения коэффициентов отражения и пропускания электромагнитной волны при ее взаимодействии с решеткой воспользуемся моделью связанных волн [14, 19]. Эта модель описывает эволюцию комплексных амплитуд двух брэгговских волн, распространяющихся в волноводе в положительном и отрицательном направлениях вдоль оси z в области $-L/2 < z < L/2$ и взаимодействующих между собой за счет отражения от решетки:

$$\frac{dA^+(z)}{dz} - i\delta A^+(z) = i\kappa(z)A^-(z), \quad (2)$$

$$\frac{dA^-(z)}{dz} + i\delta A^-(z) = -i\kappa(z)A^+(z),$$

где $\kappa(z) = k\Delta n(z)/2$ – пространственно-модулированный коэффициент связи; $\delta = kn_{\text{eff}} - \pi/d$ – параметр, характеризующий отстройку длины волны λ от брэгговской длины волны $\lambda_{Br} = 2dn_{\text{eff}}$. Система связанных волн (2) справедлива при выполнении условий $\Delta n(z) \ll n_{\text{eff}}$ и $\delta \ll kn_{\text{eff}}$.

Аналитическое решение системы (2) для произвольной формы модуляции коэффициента связи $\kappa(z)$ и при произвольной отстройке от брэгговского резонанса δ неизвестно. Однако в случае точного резонанса, когда $\delta = 0$, принимая во внимание условия шивки электрического и магнитного полей на границах решетки $z = \pm L/2$, удается получить строгие аналитические выражения для коэффициентов отражения и пропускания по мощности при произвольном $\kappa(z)$ [20]:

$$R(\lambda_{Br}) = 1 - T(\lambda_{Br}) = \text{th}^2 \left(\int_{-L/2}^{L/2} \kappa(z) dz \right). \quad (3)$$

Учитывая, что при записи решетки гауссовым пучком лазера коэффициент связи имеет форму

$$\kappa(z) = \frac{1}{2} k \Delta n \exp \left[-\frac{z^2}{(w/\cos\theta)^2} \right], \quad (4)$$

где $2w$ – диаметр лазерного пучка; θ – угол падения, из (3) находим

$$\begin{aligned} R(\lambda_{Br}) &= \text{th}^2 \left\{ \frac{k\Delta n}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{z^2}{(w/\cos\theta)^2} \right] dz \right\} \\ &= \text{th}^2 \left(\frac{\sqrt{\pi}\Delta n}{2} kw/\cos\theta \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая во внимание, что $R(\lambda_{Br}) \approx 0.98$ (см. рис.4), $\lambda \approx 1.56$ мкм и $2w/\cos\theta \approx 4$ мм, из формулы (5) получаем оценку: $\Delta n \approx 3.7 \times 10^{-4}$. Теоретически рассчитанные зависимости $R(\lambda)$ и $T(\lambda)$, полученные с использованием модели связанных волн (2) при гауссовой форме коэффициента связи (4) и $\Delta n = 3.5 \times 10^{-4}$, $2w/\cos\theta = 4.2$ мм, $\lambda_{Br} = 1.5598$ мкм, показаны на рис.4 светлыми кружками. Видно, что в области брэгговского резонанса имеет место хорошее согласие между экспериментальными и

теоретическими данными, что подтверждает справедливость сделанной оценки.

5. Заключение

Созданы узкополосные частотно-селективные фильтры для телекоммуникационного диапазона длин волн вблизи 1.5 мкм, включающие одномодовый полимерный волновод с записанной в нем субмикронной решеткой показателя преломления. Фильтры имеют коэффициент отражения $R > 98\%$ и близкую к прямоугольной форму полосы отражения шириной $\Delta\lambda \approx 0.4$ нм. Дальнейшее увеличение R и расширение $\Delta\lambda$ может быть достигнуто путем увеличения коэффициента связи, например за счет увеличения амплитуды Δn решетки. Созданные фильтры могут быть использованы в качестве элементов оптических мультиплексоров/демультиплексоров для объединения и разделения сигналов в высокоскоростных ВОЛС с многоволновым уплотнением каналов.

1. Bennion I., Reid D.C.J., Rowe C.J., Stewart W.J. *Electron. Lett.*, **22**, 341 (1986).
2. Свахин А.С., Сычугов В.А. *ЖТФ*, **57**, 1191 (1987).
3. Sorin W.V., Zorabedian P., Newton S.A. *J. Lightwave Technol.*, **5**, 1199 (1987).
4. Lin X.-Z., Zhang Y., An H.-L., Liu H.-D. *Electron. Lett.*, **30**, 887 (1994).
5. Соколов В.И., Худобенко А.И. *Квантовая электроника*, **33**, 545 (2003).
6. Wong V.V., Ferrera J., Damask J.N., Murphy T.E., Smith H.I., Haus H.A. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13**, 2859 (1995).
7. Mizrahi V., Sipe J.E. *J. Lightwave Technol.*, **11**, 1513 (1993).
8. Bakhti F., Sansonetti P. *J. Lightwave Technol.*, **15**, 1433 (1997).
9. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005).
10. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуклов С.И. *Квантовая электроника*, **36**, 966 (2006).
11. Eldada L. *Opt. Eng.*, **40**, 1165 (2001).
12. Wang W.C., Fisher M., Yacoubian A., Menders J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 548 (2003).
13. Sokolov V.I., Mishakov G.V., Panchenko V.Ya., Tsvetkov M.Yu. *Opt. Memory and Neural Networks (Inform. Opt.)*, **16**, 67 (2007).
14. Erdogan T. *J. Lightwave Technol.*, **15**, 1277 (1997).
15. Groh W. *Macromol. Chem.*, **189**, 2861 (1998).
16. Zhou M. *Opt. Eng.*, **41**, 1631 (2002).
17. Соколов В.И., Панченко В.Я. В сб.: *Пути Ученого. Е.П. Велихов* (М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2007).
18. Семиногов В.Н., Панченко В.Я., Худобенко А.И. *ЖЭТФ*, **111**, 174 (1997).
19. Haus H.A., Shank C.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **12**, 532 (1976).
20. Семиногов В.Н., Соколов В.И., Панченко В.Я. *Радиотехника и электроника*, **51**, 1 (2006).