

# 刻蚀光纤布喇格反射器的特性

陈章渊 安宏林\* 徐安士 吴德明

(北京大学电子学系, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室; \* 物理系 北京 100871)

**提要** 从实验和理论上研究了刻蚀光纤布喇格反射器的频谱响应和偏振特性。分析表明反射器的偏振敏感性是因为光纤截面的圆对称性被破坏, 其反射谱呈现多峰结构则是反射器波导支持偶、奇对称两个模式以及偏振敏感性共同起作用的结果, 并给出了高阶模截止的条件。通过反射器结构参数的优化, 可以减小其反射带宽和偏振敏感性。

**关键词** 光纤, 布喇格反射器, 偏振

## 1 引 言

刻蚀光纤布喇格反射器是在单模光纤的抛光侧面上用离子束刻蚀出光栅, 再镀上高折射率的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层和匹配层制成的。在一阶布喇格波长上其反射率可高于 95%<sup>[1,2]</sup>。它可用作滤波器、反射镜和耦合器件, 在半导体激光器模式控制、光纤激光器和波分复用等方面有很好的应用前景。已有不少文献从理论和实验方面讨论刻蚀光纤布喇格反射器<sup>[1,3,4]</sup>, 但对其反射谱的多峰结构及偏振特性的研究尚未见报道。本文研究波导耦合型刻蚀光纤布喇格反射器的频谱响应及偏振特性。

## 2 实 验

测量装置如图 1 所示。用一个宽带 LED 作为白光光源, 其输出经一个 1·1 耦合器的一臂进入刻蚀光纤布喇格反射器(FBR)。输入光的偏振状态用一个光纤偏振控制器(PC)来控制。布喇格反射器的反射和透射特性用 HP 光谱分析仪测量。整个系统的带宽分辨率为 0.1 nm。

图 2(a) 给出了刻蚀光纤布喇格反射器典型的反射和透射特性。这种反射器光栅区长度为 1 mm, 刻槽深为 100 nm。单模光纤的芯径为 8  $\mu\text{m}$ , 折射率为 1.452,  $\Delta=0.005$ 。可以看出反射谱呈现分立的多峰结构, 共有 6 个峰(注意其长波方向的肩), 位置分别为 1531.23 nm, 1531.58 nm, 1531.88 nm, 1532.08 nm, 1532.25 nm 和 1532.43 nm, 其中前面三个峰近似于等间隔(分别为 0.35 nm, 0.3 nm), 后面

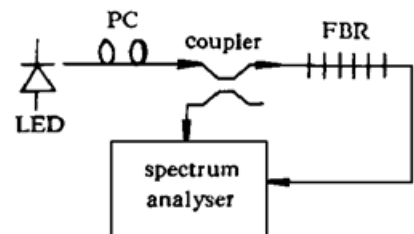


图 1 测量刻蚀 FBR 特性的实验装置  
Fig. 1 Experimental arrangement for FBR characterization

三个峰也近似于等间隔(0.17 nm, 0.18 nm); 透射谱相应地有 6 个谷。这与文献[1]不同, 原因可能是[1]中采用的测量系统分辨率只有 0.5 nm。比一阶 Bragg 波长更短的光波存在着较大的损耗, 其来源于辐射损耗<sup>[1]</sup>。该反射器在 1531.2 nm 中心波长处的最大反射率为 95.8%, FWHM 为 1.5 nm。图 2(b) 为其偏振特性, 可以发现反射谱中较短波长的三个峰来源于 TM 模, 而较长波长的三个峰来源于 TE 模, 但在两种偏振状态下都能看到另一偏振态的反射峰, 这可能是因为输入光的偏振度较低, 而 TE 和 TM 模的反射峰间隔较小。在另一些布喇格反射器的反射谱中, 由于 TE 和 TM 模的反射峰间隔较大, 可以看到比较“干净”的两种偏振状态。

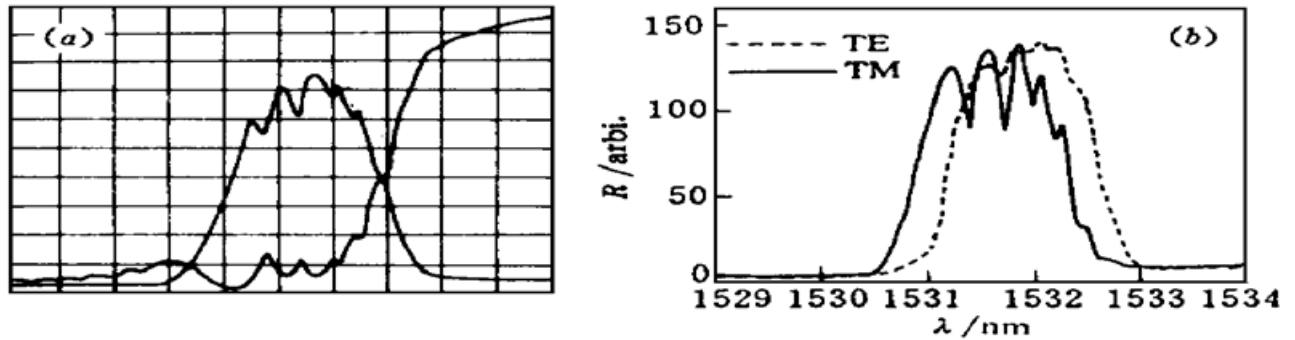


图 2 刻蚀 FBR 的典型频谱响应

(a) 反射和透射谱; (b) 偏振特性

Fig. 2 Typical measured response of etched FBRs as a function of the wavelength

(a) Reflectivity and transmission; (b) Polarization characteristics

### 3 讨 论

刻蚀光纤布喇格反射器结构如图 3 所示, 为简单计, 简化成平板波导结构。其中, 将光栅作用区近似为一个有效折射率为  $n_3 = (n_2 + n_4)/2$  的波导层, 将光纤近似为一个 TE 模模式传播常数等于光纤基模传播常数的对称平板波导。光栅微扰用  $n(x, z)$  表示。一般地, 该复合波导支持有限数目的束缚 TE 模(包括分量  $E_y, H_x, H_z$ ) 和 TM 模(包括分量  $H_y, E_x, E_z$ )。该结构的辐射模式这里不予考虑。如果假设该波导结构支持偶对称和奇对称两个模式, 同时考虑到刻蚀光纤光栅的偏振敏感性(因为光纤截面的圆对称结构被破坏了, 因而对偏振是敏感的, 在色散关系上表现为 TE 和 TM 模的差别), 就可以很好地解释实验中观察到的多峰反射谱及偏振敏感性。设偶对称和奇对称本征模的传播常数分别为  $\beta_s$  和  $\beta_a$ (其中  $s, a$  分别表示偶对称和奇对称)。光栅常数为  $K = 2\pi/\Lambda$ , 其中  $\Lambda$  为光栅周期。发生一阶布喇格反射的相位匹配条件是: 某个波长的正反向模式的传播常数之差与光栅常数相等, 即

$$\vec{\beta}_{-i} - \vec{\beta}_{+j} = \vec{K} \quad (1)$$

时, 相应的模式  $-i$  和  $+j$  之间出现明显的功率交换, 在布喇格反射器中才会出现明显的反射。其中  $i, j = s, a, +$  和  $-$  号分别表示正向和反向。如果考虑到 TE 和 TM 模的差异, 以及  $\beta_{-i} = -\beta_{+i}$ , 可以得到如下的相位匹配条件

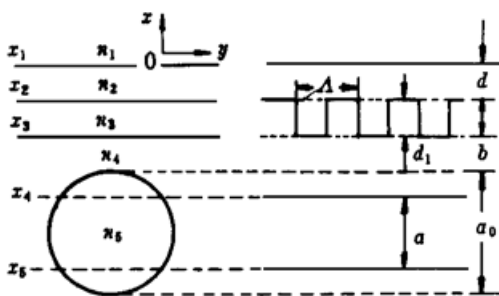


图 3 刻蚀 FBR 的平板波导模型

Fig. 3 Slab waveguide model for etched FBRs

$$2\beta_s^j = K \quad (2)$$

$$2\beta_a^j = K \quad (3)$$

$$\beta_s^j + \beta_a^j = K \quad (4)$$

其中  $j = \text{TE}, \text{TM}$ 。(2) 式为某个波长正反向偶对称正规耦合时的相位匹配条件, (3) 式则对应正反向奇对称正规耦合, (4) 式对应正反向奇偶对称正规耦合。从以上三式可以看出, 对于给定的结构和光栅周期, 这 6 个相位匹配条件只能在 6 个不同的波长上满足。因此, 在布喇格反射器的反射谱中, 将出现 6 个分立的反射峰。这正是实验中观察到的结果。对于每一种耦合机制, 当相位匹配条件得到满足时, 相应的峰值功率反射率为<sup>[13]</sup>

$$R_j = \tanh^2(\kappa_i L) \quad (5)$$

其中  $\kappa_i (i = ss, sa, aa)$  为耦合系数,  $L$  为光栅作用区长度。耦合系数用下式计算

$$\kappa_{j_1 j_2} = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{x_3}^{x_2} E_{j_1} E_{j_2} n(x, z) dx \quad (6)$$

这里  $j_1, j_2 = s, a$ ,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\omega$  为光频,  $E$  为模式归一化电场分布。反射器的禁带宽为

$$\Delta\omega_{\text{gap}} \approx \frac{2\kappa_i c}{n_{\text{eff}}} \quad (7)$$

这里  $n_{\text{eff}}$  为模式有效折射率 ( $i = ss, aa$ ) 或奇、偶模有效折射率的平均 ( $i = sa$ ),  $c$  为真空中光速。因此, 反射率和带宽都决定于耦合系数。

在实际应用中, 通常要求布喇格反射器带宽窄, 反射率高。但上述实验表明, 反射谱存在多峰结构, 这无疑增大了带宽。如果此复合波导只支持基模, 就能避免这一点。下面从图 3 所示的平板波导模型出发, 讨论如何优化反射器的结构, 从而减小带宽和偏振敏感性。

沿  $z$  方向传播的 TE 模  $E_y$  分量可以表示为

$$E_y(t, x, z) = E_y(x) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (8)$$

设

$$h_m^2 = \beta^2 - n_m^2 k^2 \quad (9)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $m = 1, 2, \dots, 6$ 。如果不考虑光栅的微扰, 横向函数  $E_y(x)$  可以表示为

$$E_y(x) = A_m \exp(h_m x) + B_m \exp(-h_m x) \quad (10)$$

利用  $E_y$  和  $H_z = -\frac{i}{\omega\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} E_y(x)$  在界面上的连续性 ( $\mu_0$  为真空磁介质常数), 可得

$$A_m P_m + B_m Q_m = A_{m+1} U_m + B_{m+1} V_m \quad (11)$$

$$(A_m P_m - B_m Q_m) h_m = (A_{m+1} U_m - B_{m+1} V_m) h_{m+1} \quad (12)$$

其中

$$P_m = \exp(h_m x_m) \quad (13)$$

$$Q_m = \exp(-h_m x_m) \quad (14)$$

$$U_m = \exp(h_{m+1} x_m) \quad (15)$$

$$V_m = \exp(-h_{m+1} x_m) \quad (16)$$

对于束缚模式, 当  $x \rightarrow \pm \infty$  时,  $E_y \rightarrow 0$ , 因此  $A_1 = B_6 = 0$ 。从初始条件  $A_1 = 0, B_1 = 1$  出发, 由 (11), (12) 式可以求出全部  $A_m, B_m (m = 2, 3, \dots, 6)$ 。从而可得本征值方程

$$f(\beta) = \left[ 1 - \frac{h_5}{h_6} \right] A_5 P_5 + \left[ 1 + \frac{h_5}{h_6} \right] B_5 Q_5 = 0 \quad (17)$$

在图 3 所示的波导结构中, 光纤的参数通常不变, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层厚度  $d$ 、距离  $b$  和光栅刻槽深度  $d_1$  作为调节参数, 因此基模总是存在的。高阶模截止的条件可以通过在 (17) 式中求  $\beta \rightarrow n_4k$  时的极限得到, 这时  $h_4 = h_6 = 0$ 。由此可得只支持 TE 基模的条件

$$d < \frac{1}{g_2} \tan^{-1} \left\{ \frac{[g_1 - g_3 \tan(g_3 d_1)]u - [g_1 \tan(g_3 d_1) + g_3]v}{[g_2 + g_1 g_3 \tan(g_3 a)/g_2]u - [g_2 \tan(g_3 d_1) - g_1 g_5/g_2]v} \right\} \quad (18)$$

其中

$$g_i = |h_i(n_4k)| = k \sqrt{|n_i^2 - n_4^2|}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (19)$$

$$u = 1 - b g_5 \tan(g_5 a) \quad (20)$$

$$v = (g_5/g_3) \tan(g_5 a) \quad (21)$$

对于 TM 模情形, 以上各式略作修改即可。

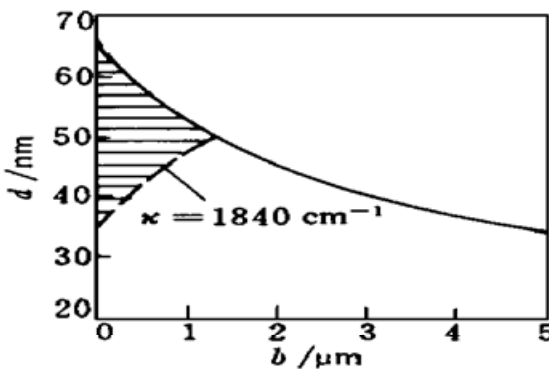


图 4 高阶 TE 模的截止条件

Fig. 4 The cut-off condition of high order TE modes

计算时取参数:  $n_1 = 1.4415, n_2 = 1.6000, n_3 = 1.5235, n_4 = n_6 = 1.4470, n_5 = 1.4520, a_0 = 8 \mu\text{m}, d_1 = 100 \text{ nm}$ 。光纤的等效波导层厚度  $a = 3.63 \mu\text{m}$ 。由 (18) 式可以计算出此复合波导的单模工作条件, 如图 4 中的实线所示。在选取合适的参数时, 不仅需要考虑单模条件, 还要考虑耦合系数的大小以及 TE 和 TM 模的差别  $\Delta\beta_s = (\beta_s^{\text{TE}} - \beta_s^{\text{TM}})$ 。例如, 图 5(a), (b) 分别示出  $b = 0.9 \mu\text{m}$  时该波导结构的模式传播常数、耦合系数与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层厚度  $d$  的关系(没给出  $\kappa_{sa}$ )。可以看出  $\Delta\beta_s$ , 基模的耦合系数  $\kappa_{ss}$  以及 TE/TM 模耦合系数的差  $\Delta\kappa_s$  均随  $d$  的增大逐渐增大, 因为基

模的电场分布随  $d$  的增大而趋向于集中在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中。在  $d > 54 \text{ nm}$  和  $d > 70 \text{ nm}$  时分别开始出现 1 阶 TE 和 TM 模。图 6 表示  $d = 50 \text{ nm}$  时模式传播常数与距离  $b$  的关系, 可以看出  $\Delta\beta_s$  随  $b$  的增大而减小。窄带宽要求耦合系数不能太大, 而高反射率要求乘积  $\kappa L$  足够大, 因此可以通过增大  $L$  来兼顾窄带宽和高反射率的要求。如果光栅作用区长  $L = 1 \text{ mm}$ , 当  $\kappa = 1840 \text{ m}^{-1}$  时, 由 (5), (7) 式可得  $R = 95\%$ , 反射器禁带宽小于  $0.95 \text{ nm}$ 。

对于 TE 基模, 满足  $\kappa = 1840 \text{ m}^{-1}$  的  $d$ - $b$  曲线如图 4 中虚线所示, 阴影部分表示既是单模工作又是  $R \geq 95\%$  的区域。减小偏振性要求  $\Delta\beta_s, \Delta\kappa_s$  尽可能小, 这可以通过在图 4 阴影区选取尽可

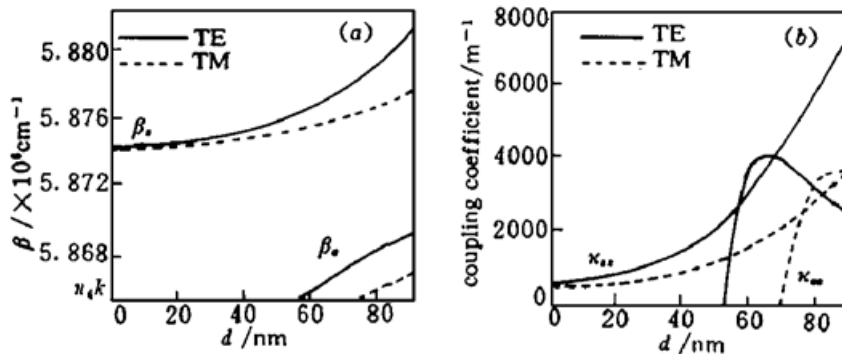


图 5 传播常数和耦合系数与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  厚度的关系: (a) 传播常数; (b) 耦合系数

Fig. 5 Dependence of propagation constant and coupling coefficient on the depth of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer

(a) propagation constant; (b) coupling coefficient

能大的  $b$  值和尽可能小的  $d$  值来达到。例如, 当  $b = 0$   $\mu\text{m}$ ,  $d = 34.8$   $\text{nm}$  时,  $\Delta\beta_s = 585$   $\text{m}^{-1}$  (相当于  $\Delta\lambda \approx 0.17$   $\text{nm}$ ),  $\Delta\kappa_s = 584$   $\text{m}^{-1}$ 。另一种办法是, 增大光栅作用区长度  $L$ , 减小  $d$  值, 可以进一步减小偏振敏感性。

## 4 结 论

本文研究了刻蚀光纤布喇格反射器的频谱响应和偏振特性。分析表明反射器的偏振敏感性是因为光纤截面的圆对称性被破坏, 而反射谱呈现多峰结构则是由于波导支持偶、奇对称两种模, 因而存在偶-偶、奇-奇、偶-奇三种耦合方式的缘故。多峰结构的存在显然增大了反射器的带宽。为减小带宽, 应当使反射器波导只支持基模, 为此给出了反射器波导高阶模截止的条件。通过优化反射器的结构参数, 可以使反射器波导只支持基模, 减小带宽和偏振敏感性。

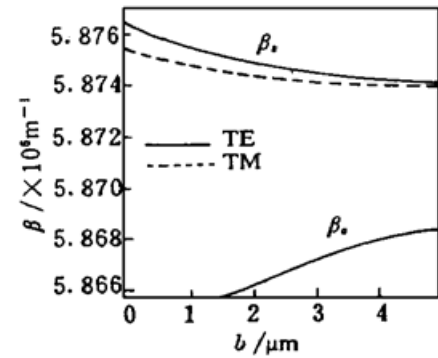


图 6 传播常数与参数  $b$  的关系

Fig. 6 Dependence of propagation constants on parameter  $b$

## 参 考 文 献

- 1 C. J. Rowe, I. Bennion, D. C. J. Reid. High-reflectivity surface-relief gratings in single-mode optical fibres. *IEE Proceedings*, Pt. 3, 1987, **134**(3) : 197~ 202
- 2 An Honglin, Lin Xianzhi, Yan Hong *et al.*. Optical fiber Bragg reflective filter with high reflectivity and narrow bandwidth. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(4) : 503~ 507 (in Chinese)
- 3 A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**(9) : 919 ~ 933
- 4 J. Hong, W. -P. Huang, T. Makino. Analytical theory of coupled-waveguide Bragg reflectors and resonant transmission filters. *IEE Pro. -Optoelectron.*, 1995, **142**(5) : 209~ 218

## Characteristics of Etched Optical Fiber Bragg Reflectors

Chen Zhangyuan An Honglin\* Xu Anshi Wu Deming

(Department of Electronics, Peking University, National Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems, Beijing 100871)

**Abstract** The spectrum and polarization sensitivity of etched optical fiber Bragg reflectors are studied experimentally and theoretically. Their polarization sensitivity results from the destruction of the round symmetry of the fiber cross-section, and the distinct peaks observed in the reflection spectrum result from multiple modes supported by the waveguide. The cut-off condition of the high order modes is presented. The polarization sensitivity and bandwidth of the reflectors can be reduced by optimizing their construction parameters.

**Key words** optical fiber. Bragg reflector. polarization.

\* is with Physics Department of Peking University