

# 窄带高反射光纤布拉格反射滤波器\*

安宏林 林祥芝 闫 宏 崔晓明 刘弘度

(北京大学物理系及国家介观物理重点实验室, 北京 100871)

**摘 要** 利用改进的非对称六层波导模型, 分析了光纤布拉格反射滤波器的特性, 讨论了波导结构参数——主要是高折射率层的厚度对器件特性的影响, 指出了在制作过程中控制器件反射率的途径。实验上在  $1.55 \mu\text{m}$  波段制作出了反射率达 96%、带宽 1.5 nm 的器件。

**关键词** 单模光纤, 光纤光栅, 光纤布拉格反射滤波器。

## 1 引 言

光纤布拉格反射滤波器(简称 FBR)的剖面结构如图 1 所示。由于采用标准的石英通信光纤, 所以布拉格反射滤波器具有损耗极低的优点, 且易于与其他光纤器件和系统相连。光纤布拉格反射滤波器有许多重要应用, 例如, 可用作光通信波分复用器<sup>[1]</sup>、光纤激光器和光纤传感器中的反射镜<sup>[2,3]</sup>以及构成单频窄线宽外腔半导体激光器的外腔<sup>[4]</sup>等。

在不同应用中, 对布拉格反射滤波器的反射率及带宽的要求也不同。故在器件的制作过程中, 实现对器件的峰值反射率和反射带宽的控制是非常重要的。

在文献[5]中已报道过对光纤布拉格反射滤波器的理论分析和实验研究以及制作方法。为分析结构参数(例如剩余包层厚度、高折射率层的厚度及折射率、覆盖层材料的折射率等)对器件性能的影响, 同时考虑到单模光纤为弱导引波导以及光栅区

宽度远大于光纤芯区直径等因素, 文献[5]中采用五层平板波导模型结构来近似分析布拉格反射滤波器的特性。由于实验中光栅深度约为  $0.1 \mu\text{m}$ , 与高折射率层的厚度可以相比, 所以光栅的存在对光场分布有一定影响, 在计算耦合系数时, 必须考虑到这一因素。本文将光栅引起的折射率的变化考虑在内, 采用改进的六层光波导模型<sup>[6]</sup>来分析布拉格反射滤波器的模场分布、反射率和带宽。按照文献[6]中的算法, 光栅等效波导层的折射率取为 1.52355。依此计算了器件波导参数对模场分布及反射率和带宽的影响, 提出控制器件反射率的方法, 并

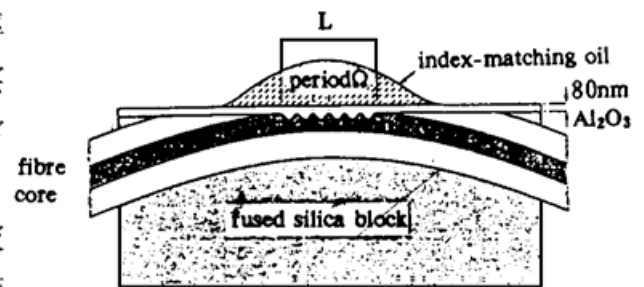


Fig. 1 Cross-section view of fiber Bragg reflective filter

\* 国家科委 863 高科技项目及国家八五攻关项目。

收稿日期: 1996 年 4 月 26 日

对器件进行优化。

## 2 理论分析

用非对称多层平板光波导模型来近似布拉格反射滤波器的结构,其合理性已在文献[5]中给予了讨论。本文将光栅引起的折射率的变化

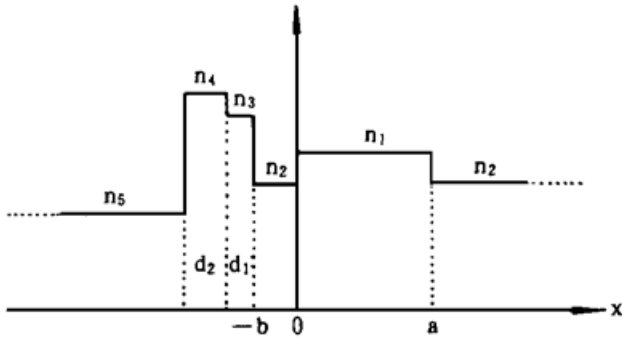


Fig. 2 Geometry of asymmetric six-layer waveguide

考虑在内,采用改进的六层光波导模型来分析布拉格反射滤波器的特性,模型如图2所示。其中  $n_5$ 、 $n_4$ 、 $n_3$ 、 $n_2$ 、 $n_1$  分别为覆盖层、高折射率层、光栅等效层、光纤包层及光纤芯区的折射率,且有  $n_4 > n_3 > n_1 > n_2 > n_5$ ;  $d_2$ 、 $d_1$ 、 $b$ 、 $a$  分别为高折射率层厚度、光栅深度(也即光栅等效层厚度)、剩余包层厚度及光纤芯区直径;覆盖层以及光纤下包层的厚度设为无穷大。对于本文讨论的布拉

格反射滤波器,高折射率层、光栅等效层的厚度足够小,并不独立支持导引模,故不存在邻近波导同向传播导引模之间的耦合问题。对于图2所示的波导结构,TE模的模场分布可写为<sup>[5]</sup>

$$y(x) = \begin{cases} \left( \{ [A \cosh(k_2b) - C \sinh(k_2b)] \cos(k_3d_1) - D \sin(k_3d_1) \} \right. \\ \quad \times \left. \cos(k_4d_2) - E \sin(k_4d_2) \right) \exp[k_5(x + b + d_1 + d_2)], & x \leq -(b + d_1 + d_2); \\ \{ [A \cosh(k_2b) - C \sinh(k_2b)] \cos(k_3d_1) - D \sin(k_3d_1) \} & -(b + d_1 + d_2) < x \leq \\ \quad \times \cos[k_4(x + b + d_1)] + E \sin[k_4(x + b + d_1)], & -(b + d_1); \\ [A \cosh(k_2b) - C \sinh(k_2b)] \cos[k_3(x + b)] & \\ \quad + D \sin[k_3(x + b)], & -(b + d_1) < x \leq -b; \\ A \cosh(k_2x) + C \sinh(k_2x), & -b < x \leq 0; \\ A \cos(kx) + B \sin(kx), & 0 < x \leq a; \\ [A \cos(ka) + B \sin(ka)] \exp[-k_2(x - a)], & a < x. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} k^2 &= k_0^2(n_1^2 - n_e^2), & k_2^2 &= k_0^2(n_e^2 - n_2^2), & k_3^2 &= k_0^2(n_3^2 - n_e^2) \\ k_4^2 &= k_0^2(n_4^2 - n_e^2), & k_5^2 &= k_0^2(n_e^2 - n_5^2), & k_0 &= 2\pi/\lambda_0, \end{aligned} \quad (2)$$

$\lambda_0$  为真空中光波波长,  $n_e = \beta/k_0$ , 为波导有效折射率,  $\beta$  为模式有效传播常数。

由波导边界上电场  $E_y$  及其一阶导数  $\partial E_y/\partial x$  的连续性条件可得出本征值方程:

$$ka = m\pi + \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{k_2}{k} \right] + \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{\frac{k_2}{k} [(k_2/k_3) \sinh(k_2b) + \operatorname{tg}(\theta_3 - k_3d_1) \cosh(k_2b)]}{\operatorname{tg}(\theta_3 - k_3d_1) \sinh(k_2b) + (k_2/k_3) \cosh(k_2b)} \right] \quad (3)$$

其中,

$$\theta_3 = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{\operatorname{tg} [\operatorname{tg}^{-1}(k_5/k_4) - k_4d_2]}{(k_3/k_4)} \right], \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

依此可求出模式传播常数  $k$  及模场分布。根据平板波导耦合模理论,在一级布拉格反射条件

下, 两反向传输模式之间的耦合系数  $K_c$  为<sup>[7]</sup>

$$K_c = - \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi} \int_{\text{光栅区}} \Delta[n^2(x, z)] |E_y(x)|^2 dx \quad (4)$$

一级布拉格反射率  $R$  为

$$R = K_c^2 \sinh^2(SL) / [(\Delta\beta)^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)] \quad (5)$$

其中  $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$ , 为相位失配,  $\Lambda$  为光栅周期;  $S = [K_c^2 - (\Delta\beta)^2]^{1/2}$ ;  $L$  为光栅有效作用长度。当相位完全匹配时,  $\Delta\beta = 0$ , 布拉格反射滤波器的峰值反射率  $R_{\max}$  为

$$R_{\max} = \tanh^2(K_c L) \quad (6)$$

利用以上关系式, 给定布拉格反射滤波器的参数就可以计算出布拉格反射滤波器峰值反射率及带宽。

图 3(a)、3(b)、3(c) 表示外覆盖层折射率为 1.4415 的条件下, 高折射率  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的厚度  $d_2$  分别为  $0.04 \mu\text{m}$ 、 $0.06 \mu\text{m}$ 、 $0.08 \mu\text{m}$  时的光场分布。计算中取  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $L = 1 \text{ mm}$ ,  $n_1 = 1.452$ ,  $n_2 = 1.447$ ,  $n_3 = 1.52355$ ,  $n_4 = 1.6$ ,  $n_5 = 1.4415$ ,  $a = 8 \mu\text{m}$ ,  $b = 0.9 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 0.1 \mu\text{m}$ 。由图 3 可见,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的厚度越大, 光场越靠近光栅层, 从而与光栅的相互作用越强, 反射率也越大; 但发现当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的厚度超过  $0.08 \mu\text{m}$  时, 整个波导不再工作于基横模, 这是不希望出现的, 因此实验中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的厚度应控制在  $0.08 \mu\text{m}$  以内。

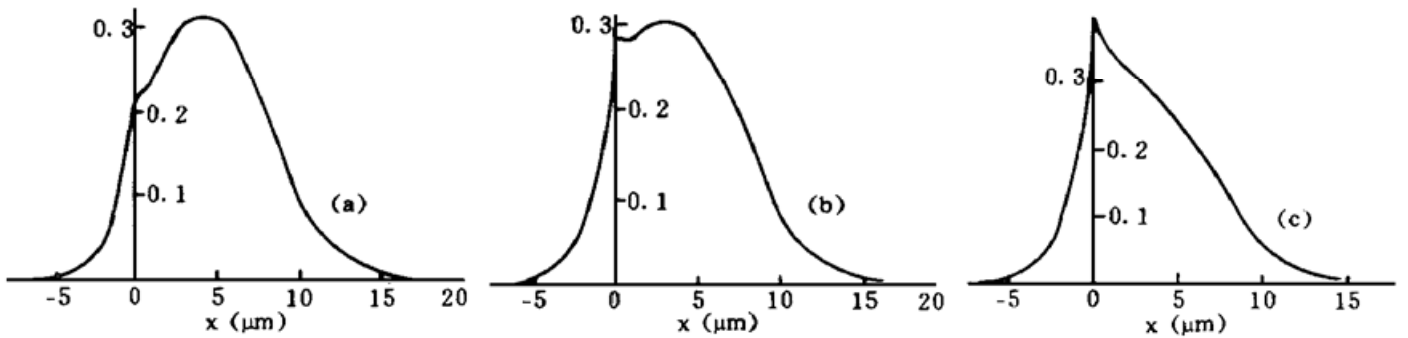


Fig. 3 Variation of the optical field distribution with the thickness  $d_2$  of high index layer (a)  $d_2 = 0.04 \mu\text{m}$ ; (b)  $d_2 = 0.06 \mu\text{m}$ ; (c)  $d_2 = 0.08 \mu\text{m}$

图 4 为峰值反射  $R_{\max}$  随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层厚度  $d_2$  的变化关系。 $d_2$  越大,  $R_{\max}$  越大。这是因为  $d_2$  越大, 光场越靠近光栅层, 从而与光栅的相互作用越强, 耦合系数  $K_c$  越大, 由(6)式知峰值反射率也越大。这样, 可以方便地控制布拉格反射滤波器上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的淀层厚度, 以制作出有不同反射率的布拉格反射滤波器。

图 5 为反射带宽  $\Delta\lambda$  随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的厚度  $d_2$  的变化关系。由图可见, 带宽  $\Delta\lambda$  随  $d_2$  的增加而

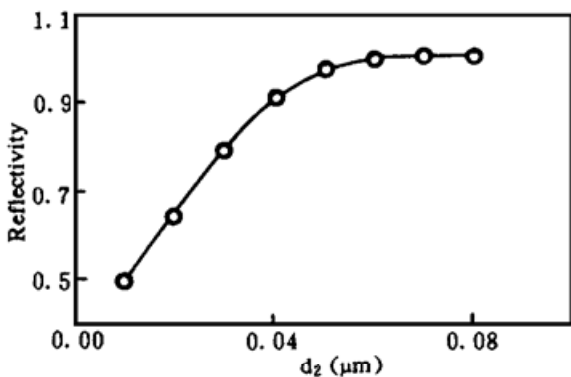


Fig. 4 Variation of reflectivity with the thickness of high index layer

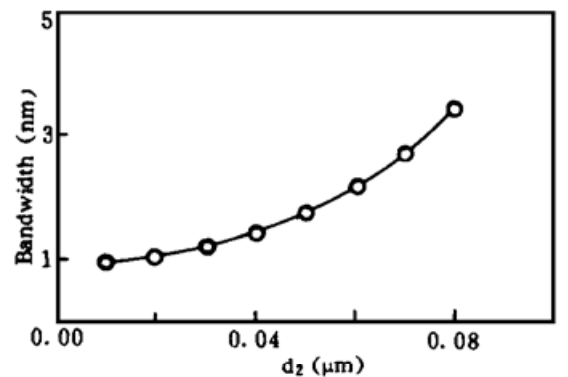


Fig. 5 Variation of reflection bandwidth with the thickness of high index layer

增加。这也是因为  $d_2$  越大，光场与光栅相互作用更强的缘故。所以，虽然增加高折射率层厚度可提高反射率，但却增加了反射带宽，这对实现窄带反射滤波器不利。由(6)式知，峰值反射率  $R_{max}$  取决于  $K_c L$  的大小。可以在保持  $K_c L$  的大小不变的条件下，增加光栅有效作用距离  $L$ ，减小  $K_c$  值。 $K_c$  值的减小，意味着光场与光栅的作用强度减弱，也即意味着带宽的减小。故要制作窄带高反射的布拉格反射滤波器，应减小耦合系数，增加有效作用距离。实验中可以采用蒸镀较薄的高折射率层和沿光纤轴向刻蚀更长的光栅的办法来达到这一目的。

### 3 实验结果与讨论

理论分析表明，控制高折射率层的厚度可以控制布拉格反射滤波器反射率的大小。实验中，对同一布拉格反射滤波器用电子束蒸发方法先后淀积上不同厚度的  $Al_2O_3$  薄膜，分别对其进行了透射特性的测试。测试系统如图 6 所示，其中宽带光源为溴钨灯， $D_1$ 、 $D_2$  为 In-GaAsP PIN 结构的探测器。溴钨灯的输出光经过斩波进入单色仪，输出光再耦合进方向耦合器的一入射臂。耦合器一出射臂与待测的布拉格反射滤波器相连，另一出射臂浸泡在折射率匹配液中以消除光纤端面反射对测量的影响。布拉格反射滤波器的反射信号、透射信号分别由探测器  $D_1$ 、 $D_2$  测量， $D_1$ 、 $D_2$  的输出信号经过锁相放大器后送入计算机，同时送入计算机的还有驱动单色仪进行波长扫描的步进电机的脉冲信号，这样就得到了布拉格反射滤波器的反射谱与透射谱。整个系统的分辨率受探测系统信噪比的限制，单色仪的入射狭缝宽为 0.3 mm，对应的系统分辨率为 0.5 nm。

测量结果如图 7 所示，测试中覆盖层是折射率为 1.4415 的折射率匹配液。由图可见，当

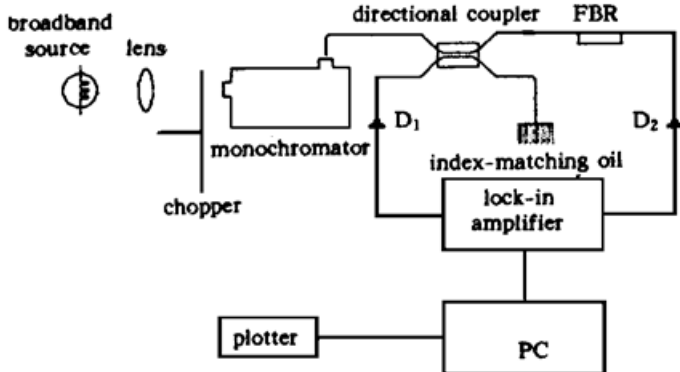


Fig. 6 Schematic diagram of the measurement system for FBR device characterization

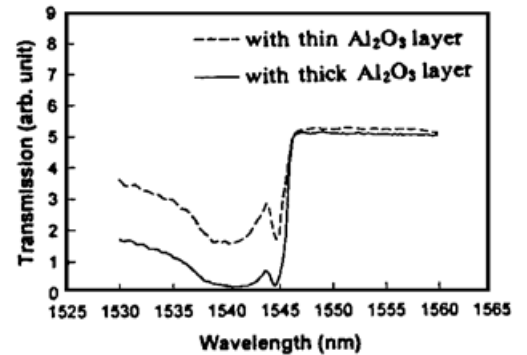


Fig. 7 Transmission spectra of FBR device with different thickness of high index layer

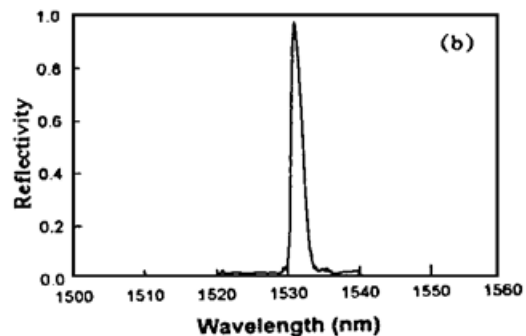
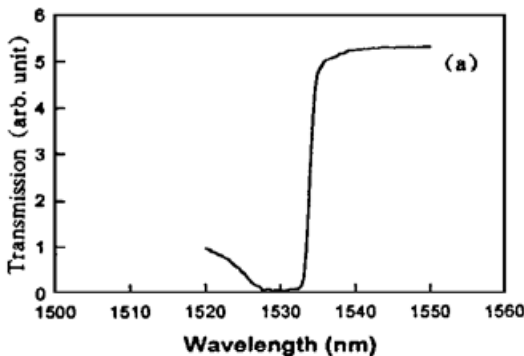


Fig. 8 Typical characterization spectrum of FBP device (a) transmission spectrum; (b) reflection spectrum

$\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层的厚度较小时, 布拉格反射滤波器透射谱上对应着一级布拉格反射的透射谷较浅, 表明器件的反射率也较小;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄层的厚度较大时, 透射谷的深度增加, 表明器件的反射率增加, 这与前面的理论分析一致。由布拉格反射滤波器透射曲线上透射谷的深浅可以估算出器件反射率的大小, 所以, 根据所需的反射率的大小, 可在镀膜过程中监测布拉格反射滤波器的透射谱以确定最佳的薄膜淀积厚度, 从而得到期望的布拉格反射滤波器。图 8 给出了典型的布拉格反射滤波器的透射谱与反射谱, 峰值反射率达 96%, 反射带宽为 1.5 nm。

**结 论** 利用改进的六层波导模型分析了光纤布拉格反射滤波器的特性, 计算了器件反射率、带宽与波导参数的关系, 分析计算了高折射率层的厚度对器件特性的影响。结果表明, 通过控制高折射率层的厚度可以控制布拉格反射滤波器的反射率、带宽, 以适用不同的应用需求。实验上在 1.55  $\mu\text{m}$  波段, 得到了反射率为 96%、带宽为 1.5 nm 的布拉格反射滤波器。

### 参 考 文 献

- [1] M. S. Whalen, M. D. Divino, R. C. Alferness, Demonstration of a narrowband Bragg-reflection filter in a single-mode fiber directional coupler. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(12): 681~ 682
- [2] I. M. Jauncey, L. Reekie, R. J. Mears *et al.*, Narrow linewidth fiber laser with integral fiber grating. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19): 987~ 988
- [3] A. Othonos, A. T. Alavie, S. Melle *et al.*, Fiber Bragg grating laser sensor. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(11): 2841~ 2845
- [4] C. A. Park, C. J. Rowe, J. Buus *et al.*, Single-mode behaviour of a multimode 1.55  $\mu\text{m}$  laser with a fiber grating external cavity. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(21): 1132~ 1134
- [5] 闫宏, 林祥芝, 崔晓明等, 单模光纤布拉格反射滤波器. *光学学报*, 1994, **14**(4): 381~ 388
- [6] K. Handa, S. T. Peng, T. Tamir, Improved perturbation analysis of dielectric gratings. *Appl. Phys.*, 1975, **5**(4): 325~ 328
- [7] A. Yariv, M. Nakamura, Periodic structures for integrated optics. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, **QE-13**(4): 233~ 253

## Optical Fiber Bragg Reflective Filter with High Reflectivity and Narrow Bandwidth

An Honglin Lin Xiangzhi Yan Hong Cui Xiaoming Liu Hongdu

(Physics Department and National Key Labs of Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 26 April 1996)

**Abstract** The characteristics of optical fiber Bragg reflective filter (FBR) are analyzed on the basis of asymmetric six-layer optical waveguide model using an improved perturbation procedure for investigating dielectric gratings. The influences of waveguide structural parameters, mainly the thickness of the high index layer, on the characteristics of FBR are discussed. The experimental method of controlling FBR reflectivity during the fabrication process is given. At 1.55  $\mu\text{m}$  region, FBR devices with reflectivity up to 96% and reflection bandwidth (FWHM) about 1.5 nm are fabricated.

**Key words** single-mode optical fiber, fiber grating, fiber Bragg reflective filter.