

# 单模光纤布拉格反射滤波器\*

闫 宏 林祥芝 崔晓明 刘志渊 安宏林 刘尧根 刘弘度

(北京大学物理系及介观物理重点实验室, 北京 100871)

**摘 要** 采用非对称五层光波导模型, 分析了光纤布拉格反射滤波器特性, 讨论实现窄带和宽带高反射滤波器的结构参数. 文中报道关于光纤布拉格反射滤波器的实验研究, 包括制作工艺和测试方法. 典型的光纤布拉格反射滤波器在  $1.5 \mu\text{m}$  波段的反射率达 80%, 带宽 1.5 nm.

**关键词** 单模光纤, 反射滤波器.

## 1 引 言

平面光波导光栅滤波器已深入研究并应用于集成光学和各种光电子器件<sup>[1]</sup>. 采用单模光纤也可制作光栅布拉格滤波器<sup>[2,3]</sup>, 其优点包括极低的传输损耗和很长的相互作用距离, 并且易于与光纤系统耦合和接续, 在与半导体激光器等光电子器件耦合时也可实现高效率<sup>[4]</sup>. 因而, 光纤布拉格反射滤波器性能优越, 具有重要的应用前景. 例如, 窄带光纤布拉格反射滤波器可用以构成混合集成式耦合腔半导体激光器, 实现单纵模和窄光谱线宽的激光振荡<sup>[5,6]</sup>; 光纤布拉格反射滤波器也可用以构成光纤激光器光学腔<sup>[7]</sup>, 甚至可用作光谱分析器<sup>[8]</sup>并应用于许多场合.

光纤布拉格反射滤波器的结构如图 1 所示. 文献[3]简化为三层或四层光波导模型并给出解析解, 但这样的处理过于简单. 例如, 如光纤布拉格反射滤波器近似为三层或四层光波导器件, 则光栅结构落在光纤芯区以内, 对光纤本征模产生很强的扰动, 因而可能需处理 D 型光纤本征模<sup>[9]</sup>及其耦合问题; 如果光栅结构落在磨抛后剩余包层上(如图 1 所示),

则最少必须处理五层结构的光波导问题. 本文旨在处理非对称五层光波导光栅布拉格滤波器问题, 由于剩余包层厚度可独立控制, 增加了器件结构参数, 得出一些新的结果, 对于器件设计很有帮助. 文中还介绍采用全息光栅掩膜、离子束刻蚀和电子束蒸发技术制作光纤布拉格滤波器, 以及器件特性测试技术和实验研究结果.

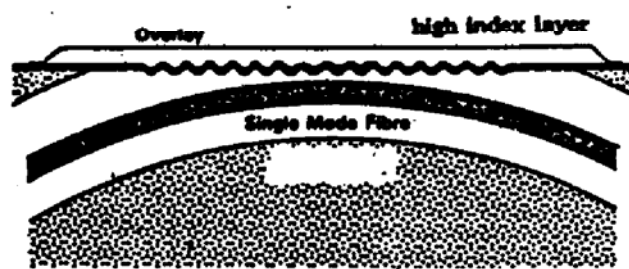


Fig. 1 Schematic diagram of the structure of a single mode fibre Bragg reflector

\* 本课题得到 863 国家高技术光电子研究基金和国家自然科学基金的资助

收稿日期: 1993 年 4 月 26 日; 收到修改稿日期: 1993 年 7 月 19 日

## 2 理论分析

光纤布拉格反射滤波器结构如图 1 所示, 将单模光纤嵌入石英块沟槽内再磨平、抛光至光纤区附近, 在抛光表面上刻蚀光栅后再淀积高折射率薄层和低折射率顶层. 图 2(a) 表示光纤布拉格反射滤波器的截面, 显然已失去圆柱对称性而呈 D 形. 为了简单, 图 2(a) 可近似为矩形波导的情况如图 2(b), 坐标原点选在芯区上边界中点. 由于主要关心光栅结构所起的作用, 即沿 X 方向分布的模场与光栅的相互作用, 并考虑到弱导引光纤模场沿 Y 方向向芯区两侧扩展很大的情况, 所以进一步把问题简化为图 2(c) 所示的五层非对称平面光波导, 其折射率分布如图 2(d) 所示.

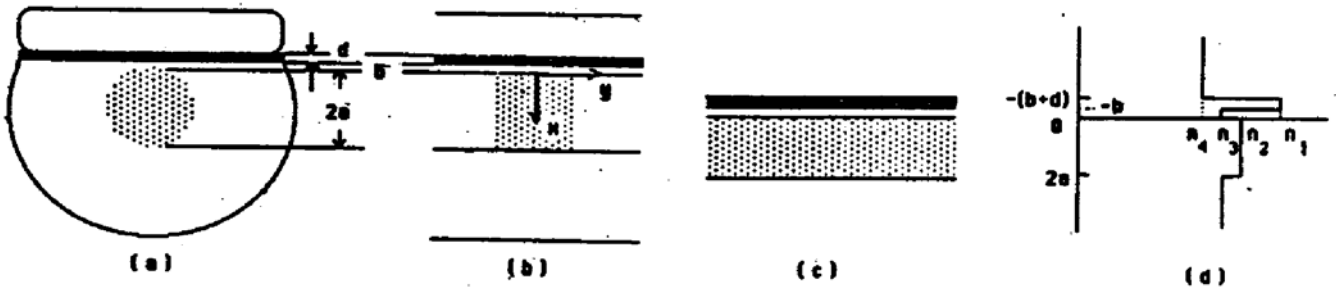


Fig. 2 (a) Cross-section view of the side-polished fiber  
 (b) rectangular waveguide approximation  
 (c) planar waveguide approximation with asymmetric five layer structure  
 (d) refractive index profile

现在讨论图 2(d) 的光波导结构本征模, 如图所示, 波导层厚  $2a$ , 折射率为  $n_2$ ; 下包层和上包层(光纤磨抛后剩余的包层部分) 折射率为  $n_3$ , 厚度分别为无穷大和  $b$ ; 蒸镀的高折射率层折射率  $n_1$  最大, 厚度为  $d$ ; 最上面的顶层折射率  $n_4$  较小, 厚度也设为无穷大. 本文讨论的是  $n_1 \geq n_2 > n_3 \geq n_4$  的情况, 并且导引模传播常数  $\beta$  满足以下条件

$$n_3 k_0 < \beta < n_2 k_0 \quad (1)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为自由空间中光波波长. 在本文的器件结构中, 高折射率层厚度  $d$  小于 100 nm, 因而并不独立地支持导引模, 即我们不必考虑  $d$  层和  $2a$  层导引模的耦合问题. 对于图 2(d) 所示的结构, 满足(1)式的 TE 和 TM 导引模场分布可统一写成

$$E_y(x), H_y(x) = \begin{cases} [(A \cos hpb - C \sin pb) \cos \delta d - D \sin \delta d] e^{\delta(x+b+d)} & x \leq -(b+d) \\ (A \cos pb - C \sin hpb) \cos \delta(x+b) + D \sin \delta(x+b), & -(b+d) \leq x \leq -b \\ A \cosh px + C \sinh px & -b \leq x \leq 0 \\ A \cos kx + B \sin kx, & 0 \leq x \leq 2a \\ (A \cos 2ka + B \sin 2ka) e^{-\gamma(x-2a)}, & x \geq 2a \end{cases} \quad (2)$$

$$k^2 = k_0^2(n_2^2 - n_e^2), \quad \delta^2 = k_0^2(n_1^2 - n_e^2), \quad p^2 = k_0^2(n_e^2 - n_3^2), \quad q^2 = k_0^2(n_e^2 - n_4^2) \quad (3)$$

其中  $n_e = \beta/k_0$  为波导有效折射率. 由连续性条件可得出本征值方程

$$2ka = m\pi + \tan^{-1}\left(\frac{p}{k} \eta_{23}\right) + \tan^{-1}\left[\frac{p}{k} \eta_{23} \frac{\tan(\tan^{-1} g \eta_{14}/\delta - \delta d) + \eta_{13} p/\delta + \tanh pb}{p \eta_{13}/\delta + \tan(\tan^{-1} g \eta_{14}/\delta - \delta d) \tanh pb}\right]_{m=0,1,2,\dots}, \quad (4)$$

式中  $\eta_{ij}$  系数定义为

$$\eta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{对于 TE 模} \\ (n_i/n_j)^2, & \text{对于 TM 模} \end{cases} \quad (5)$$

1) 当  $b = 0$  时, 图 2(d) 所示的光波导结构简化为四层层光波导的情况; 此时,  $\tan pb = 0$ , (4) 式化为

$$2ka = m\pi + \tan^{-1}\left(\frac{p}{k}\eta_{23}\right) + \tan^{-1}\left[\frac{\delta}{k}\eta_{21}\tan\left(\tan^{-1}\frac{q}{\delta}\eta_{14} - \delta d\right)\right] \quad m=0,1,2,\dots$$

确为四层平板波导的本征值方程.

2) 当  $b \rightarrow \infty$ , 由 (4) 式可得出对称三层平板波导的本征值方程

$$2ka = m\pi + 2 \tan^{-1}\left(\frac{p}{k}\eta_{23}\right), \quad m=0,1,2,\dots$$

3) 当  $b = 0$ , 且  $d = 0$  时, (4) 式转化为非对称三层波导的本征值方程

$$2ka = m\pi + \tan^{-1}\left(\frac{p}{k}\eta_{23}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{q}{k}\eta_{24}\right), \quad m=0,1,2,\dots$$

由以上讨论可见, (4) 式不但描述五层平板波导的本征值, 也包括了三层或四层平板导的情况在导出本征值方程的过程中, 还可求出模场分布 (2) 式中的振幅系数

$$\begin{cases} B = -A \tan\left(\tan^{-1}\frac{p}{k}\eta_{23} - 2ka\right) \\ C = -\eta_{32}\frac{k}{p}A \tan\left(\tan^{-1}\frac{p}{k}\eta_{23} - 2ka\right) \\ D = \eta_{14}\frac{p}{\delta}A \left[\sinh pb - \eta_{32}\frac{k}{p}\tan\left(\tan^{-1}\frac{p}{k}\eta_{23} - 2ka\right)\cosh pb\right] \end{cases} \quad (6)$$

式中  $A$  由功率归一化条件确定. 对于 TE 模, 导波光功率  $P$  为

$$P = \frac{\beta}{2\omega\pi} \int_{-a}^a [E_y^m(x)]^2 dx$$

对 TM 模

$$P = \frac{\beta m}{2\omega\epsilon_0} \int_{-a}^a \frac{1}{n_i^2} [H_y^m(x)]^2 dx$$

其中  $\beta_m$  为  $m$  阶导引模的传播常数,  $\omega$  为圆频率.  $E_y^m$  和  $H_y^m$  分别为  $m$  阶 TE 模电场和 TM 模磁场沿  $y$  方向的分布. 图 3 表示非对称五层光波导零阶 TE 和 TM 模场分布, 可以看到剩余包层厚度  $b$  对场分布的影响. 计算中取  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.600$ ,  $n_2 = 1.452$ ,  $n_3 = 1.477$ ,  $n_4 = 1.440$ ,  $2a = 8 \mu\text{m}$ ,  $d = 0.1 \mu\text{m}$ .

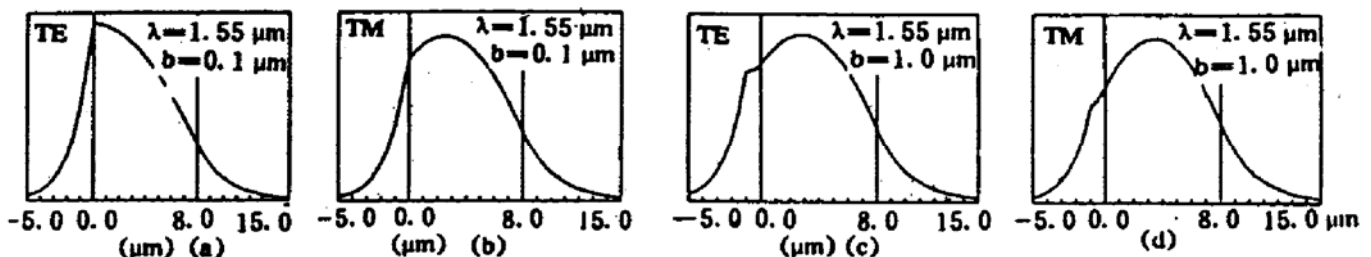


Fig. 3 Fundamental TE and TM mode profile in asymmetric five layer waveguide

现在考虑周期性结构分布布拉格反射作用. 为了简单, 只讨论 TE 导引模的情况, 其模

场  $E_r(x, z, t)$  可按理想波导本征模展开

$$E_r(x, z, t) = -\frac{1}{2} \sum_m [A_m(z) E_r^m(x) e^{i(\omega t - \beta_m z)} + c. c.] \quad (7)$$

式中  $E_r^m(x)$  为  $m$  阶 TE 导引模的场分布,  $c. c.$  表示复共轭. 由于不考虑与辐射模的耦合, 上式求和不包括辐射模项. 设周期性微扰作用来自光波导表面周期为  $\Lambda$  的矩形光栅, 耦合模方程可写成<sup>[10]</sup>

$$\frac{dA_m^{(+)}}{dz} = k_c A_m^{(-)} e^{-i2\Delta\beta z}, \quad \frac{dA_m^{(-)}}{dz} = k_c A_m^{(+)} e^{i2\Delta\beta z} \quad (8)$$

式中  $A^{(+)}$  和  $A^{(-)}$  分别为前向和后向波的振幅,  $k_c$  为耦合系数, 而  $\Delta\beta$  为相位失配

$$\Delta\beta = \beta_m - l(\pi/\Lambda), \quad l = 1, 2, \dots \quad (9)$$

对一级布拉格散射的情况, 即  $l = 1$ , 耦合系数  $k_c$  可表示为

$$k_c = -\frac{\omega^2 \epsilon_0}{4\pi} (n_1^2 - n_2^2) \int_d |E_r^m(x)|^2 dx \quad (10)$$

(10) 式表明光栅刻蚀深度  $d$  和该处场强直接影响了耦合系数  $k_c$  的大小, 求解耦合模方程(8), 可得出后向散射波并求出布拉格反射率  $R$

$$R = \frac{k_c^2 \sinh^2(SL)}{(\Delta\beta)^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} \quad (11)$$

式中  $S = [k_c^2 - (\Delta\beta)^2]^{1/2}$ ,  $L$  为光栅作用区长度. 当  $\Delta\beta = 0$ , 即满足相位匹配条件, (11) 式化为

$$R_{\max} = \tanh^2(k_c L) \quad (12)$$

利用以上关系式, 给定光波导和光栅参数后可以计算耦合系数、反射带的极大值及其波长位置, 以及反射带半高全宽度等. 图 4 表示耦合系数  $k_c$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) 随上包层厚度  $b$  的变化, 其中以顶层折射率  $n_4$  为参数, 计算中选取光栅刻槽深度 100 nm,  $n_1 = 1.600$ ,  $n_2 = 1.452$ ,  $n_3 = 1.447$ . 由图 4 可见  $k_c$  随  $b$  的增大而迅速减小; 同时, 顶层折射率的数值也对耦合系数有显著影响, 如果取  $n_4 = 1.44$ , 则  $b$  值从  $0.1 \mu\text{m}$  变至  $1 \mu\text{m}$ ,  $k_c$  均可保持  $2 \text{mm}^{-1}$  或更高. 这一点对于器件工艺很有帮助, 因为  $b$  的控制是由研磨、抛光决定的, 通常难以达到高的精度. 计算中还发现, 如令  $b \rightarrow 0$ , 且适当提高  $n_4$  数值,  $k_c$  的数值可高达  $15 \text{mm}^{-1}$  以上, 这指出实现宽带反射的技术途径. 图 5 给出布拉格反射带半高全宽度随耦合系数的变化, 其中以光栅作用区长度  $L$  为参数. 由图 5 可见, 当作用区长度较大时, 反射带半高全宽与耦合系数成正比, 在耦合系数较大时则反射带宽很大且与作用区长度的关系很小. 可见, 实现大的耦合系数, 是制作宽带布拉格反射滤波器的关键. 当然, 根据(12)式,  $R_{\max}$  取决于  $k_c L$  乘积, 所以  $k_c$  很大时反射带峰值趋于 1. 相反, 如果要求窄带高反射特性, 则需设计和制作布拉格滤波器使之具有小的耦合系数值但同时具有长的作用距离, 以保证  $k_c L$  乘积足够大. 结论是相同的  $k_c L$  值对应相同的峰值反射率, 而在保持  $k_c L$  乘积不变时较小的  $k_c$  给出较窄的反射带宽, 反之亦然. 例如, 取  $k_c L = 3$ ,  $R_{\max} = 99\%$ , 如果  $k_c = 1.5 \text{mm}^{-1}$ ,  $L = 2 \text{mm}$ , 则带宽 = 1 nm; 如  $k_c = 15 \text{mm}^{-1}$ ,  $L = 0.2 \text{mm}$ , 则带宽 = 10 nm.

最后讨论一下图 1 所示光纤光栅布拉格反射滤波器中光纤弯曲半径  $r$  的影响. 与以上简单模型不同, 由于光纤弯曲成圆弧状, 故此光波导结构上包层厚度  $b$  与坐标  $z$  有关. 例如, 取圆弧顶点为  $z = 0$ , 则在  $z = \pm l$  处  $b = b_0 + (l^2/2r)$ ,  $b_0$  是圆弧顶点处上包层厚度. 因此, 耦合

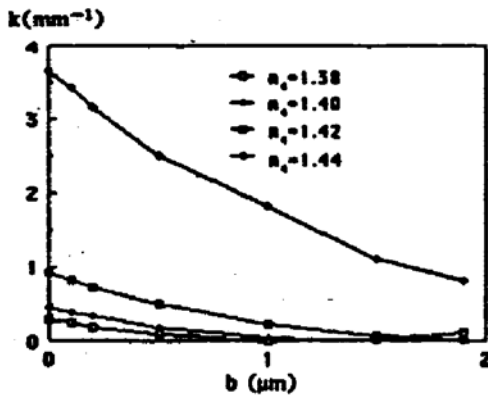


Fig. 4 Variation of the coupling coefficient  $k_c$  with the upper cladding thickness  $b$

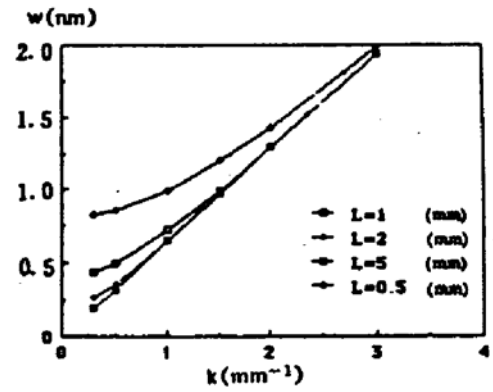


Fig. 5 Variation of the reflection bandwidth (full width at half maximum) of the Bragg reflector with the coupling coefficient  $k_c$ .

系数  $k_c$  也与  $z$  坐标有关(见图 4), 光纤光栅滤波器特性将受到影响. 定性地看, 增大弯曲半径相当于增大有效耦合作用距离  $L$ , 如果同时控制上包层厚度, 便可得到宽带高反射或窄带高反射特性, 可见光纤弯曲半径是制作布拉格滤波器一个重要的器件结构参数. 当然, 光栅刻槽深度直接影响耦合系数值, 而刻蚀深度主要由离子束加工工艺条件决定.

### 3 实验研究

根据上一节的分析, 制备光纤布拉格反射滤波器的工艺技术主要包括: 1) 在石英基块上制备曲率半径合适的凹形沟槽并将单模光纤镶嵌和固定于槽内; 2) 精确控制带光纤的石英块的磨抛深度, 以控制上包层厚度  $b$ ; 3) 在磨抛好的光纤上包层表面制作光栅, 方法是利用全息光栅作为掩膜再经离子束刻蚀而成. 由于光栅周期决定了布拉格反射波长, 故需对光栅周期进行精密控制; 4) 在刻蚀光栅的上包层表面蒸镀适当的高折射率( $n_1$ ) 薄层和低折射率( $n_4$ ) 顶层; 5) 测试并评价光纤布拉格反射滤波器特性. 以下, 择要作进一步的讨论.

从图 4 看到, 上包层厚度  $b$  对耦合系数的影响很大. 根据经验,  $b$  的控制精度约为  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ . 通常采用厚度计测量研磨深度, 但精度约为  $1 \mu\text{m}$  的量级, 所以在实验中只用其进行粗略的测量. 另一种方法是测量研磨过程中光纤侧面出现的椭圆形的切面的长短轴, 由此可以计算研磨深度. 理论上, 光纤弯曲半径精度只要达到毫米, 研磨深度的测量精度即可达  $0.2 \mu\text{m}$ . 实际上有两个因素不可控制, 其一虽然石英块沟槽的曲率半径很准确, 但光纤不一定每次都能紧贴沟槽底面, 因而带来误差; 其二来自光纤的同心度, 即纤芯与包层同心度的精度约为微米数量级, 因而研磨深度虽有可能测准, 但剩余的上包层厚度仍不能控制. 最后采用直接测量研磨抛光深度对传输损耗的影响的方法, 确定  $b$  的相对值. 例如, 当  $b$  很小时,  $b$  由  $2 \mu\text{m}$  变至  $0.6 \mu\text{m}$  时, 透射光强变化达几百倍. 结合器件特性测量结果, 便可积累经验而确定适当的上包层厚度.

光栅周期控制是另一个重要问题. 采用 He-Cd 激光器  $441.6 \text{ nm}$  输出, 安排了普通的对称光路, 在 AZ1350J 光刻胶薄膜上制作全息光栅, 对应于  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$  的一级布拉格光栅, 估算得出光栅约为  $1884 \text{ 线/mm}$ , 这里取  $n_2 = 1.460$ . 经光纤布拉格反射滤波器测试反射峰值波长后, 再微调光栅周期以使光纤布拉格反射滤波器工作于某一特定波长位置. 如果改变光束入射角以调节光栅周期, 估计  $20''$  的角度精度可实现  $\Delta\Lambda/\Lambda \sim 10^{-4}$ , 这里  $\Lambda$  表示光栅周期. 不过, 这一方法不易实施. 文献[11]曾报道改用球面波干涉方法,  $\Delta\Lambda/\Lambda$  可达  $10^{-6}$ , 但曝光时

间也从通常的 10 sec 至几十 sec 增加至 4~5 min, 且光栅面积较大时边缘部位刻线弯曲. 本文改进了通常的平面波干涉法, 保持很短的曝光时间(例如 10 sec 以内), 但使  $\Delta A/\lambda$  达到  $10^{-8}$ . 有关这一新的方法, 作者将另文加以讨论.

离子束刻蚀实验是光纤布拉格反射滤波器工艺的关键之一. 其实验装置如图 6 所示, 在通常的真空镀膜机钟罩内安装了考夫曼离子源, 离子能量可在 100~1500 eV 范围内调节, 离子束直径约 50 mm, 最大束流 100 mA; 样品台装有水冷装置, 并可改变取向以变更离子束入射角. 如在样品台附近引入反应性气体, 则可进行化学辅助反应离子束刻蚀. 在 Ar 离子束轰击下光刻胶的溅射速率很低, 但氧离子轰击时光刻胶溅射速率却很高, 因此实验中要保证 Ar 气源的纯度, 以防破坏光刻胶光栅掩膜. 此外, 离子轰击造成样品表面的温升, 严重时破坏光刻胶掩膜图形, 所以样品的冷却很重要. 经过仔细调节离子束流和离子能量, 以及控制各项工艺参数, 作者获得良好的光栅刻蚀结果. 图 7(a)为光刻胶层上的全息光栅 SEM 照片, 图 7(b)表示石英衬底上离子束刻蚀的光栅图形.

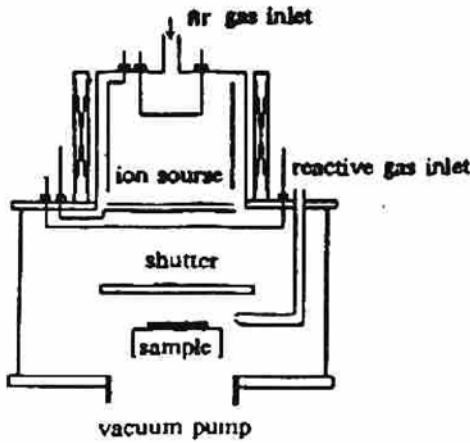


Fig. 6 Schematic diagram of the ion-beam etching apparatus

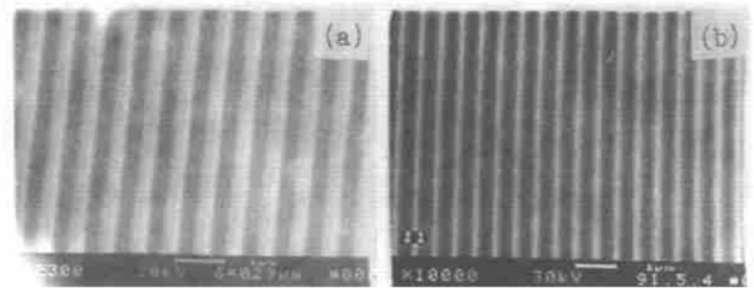


Fig. 7 (a) SEM photograph of the grating on the photoresist  
(b) SEM photograph of ion-beam etching grating on silica substrate

对于窄带高反射滤波器, 选择  $n_1 = 1.60$  的高折射率薄层材料, 其厚度约为 80~100 nm. 为了制作宽带高反射光纤布拉格反射滤波器, 选择了  $n_1 = 1.90$  左右的高折射率薄层材料. 实验研究表明, 高折射率薄厚度  $d$  对器件特性影响很大, 需加以精确控制. 器件的复盖顶层材料选择  $\text{SiO}_2$  ( $n_4 = 1.44$ ), 各薄层材料均采用电子束蒸发方法淀积在刻好光栅的光纤样品表面上.

最后讨论光纤布拉格反射滤波器的特性测试. 图 8 表示光纤布拉格反射滤波器特性测试系统, 卤素灯和单色仪组成可调谐的单色光源并耦合至单模光纤, 经定向耦合器后由输出端口 3 进入待测的光纤布拉格反射滤波器, 探测器  $D_1$  测量透过光纤布拉格反射滤波器的光强信号, 而端口 2 处则放置探测器  $D_2$  测量自光纤布拉格反射滤波器反射过来的光强信号,  $D_1$  和  $D_2$  的输出经锁相放大器后送入计算机, 同时馈入计算机的还有单色仪驱动同步电机的脉冲信号, 这样便采集到透射率  $T$  或反射率  $R$  随波长  $\lambda$  的变化, 由绘图仪画出光谱分布. 这一系统的分辨率约为 0.8~1 nm, 受光源强度的约制, 如果采用可调谐激光光源, 则分辨率可以高得多. 图 9 给出一只典型的光纤布拉格反射滤波器反射和透射光谱分布, 反射率达 80%, 带宽约 1.5 nm.

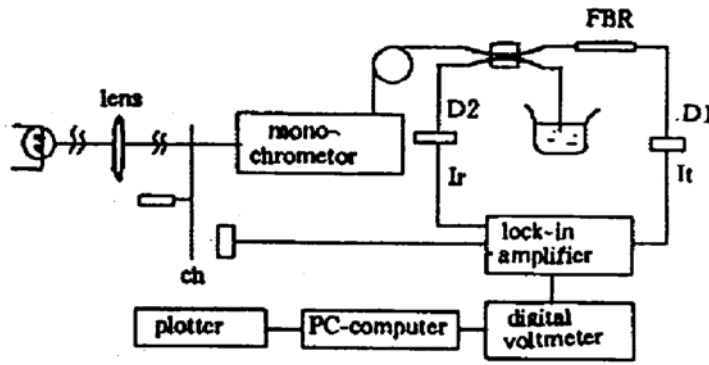


Fig. 8 Measurement system for fiber Bragg reflector characterization

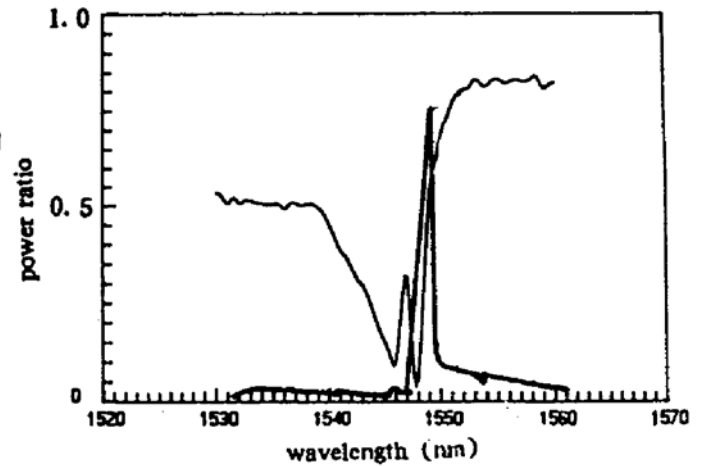


Fig. 9 Typical spectrum of FBR device

## 4 结 论

本文用非对称五层光波导模型简化描述光纤布拉格反射滤波器，计算结果对器件研制工艺有指导意义，特别指出上包层厚度、高折射率薄层和顶层的厚度与折射率的选择，对器件特性有决定性影响，也提供了调节器件特性所需的自由度。当然，光纤布拉格反射滤波器最关键的环节是布拉格光栅的刻蚀，不但要求一定的光栅沟槽深度，还要求刻蚀面光滑，以减少散射损耗。因此，离子束刻蚀工艺研究对于提高光纤布拉格反射滤波器质量有至关重要的作用。本文的实验光纤布拉格反射滤波器在  $1.55 \mu\text{m}$  波段达到反射率 80%、带宽 1.5 nm，表明器件设计与制作工艺均合理。

实验研究和测量工作得到李惠兰、林廷东、王勇、梁毅和赵福庭等多方面的协助，特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] N. A. Olsson, C. H. Henry, R. F. Kazaninov, Performance characteristics of a  $1.5 \mu\text{m}$  single-frequency semiconductor laser with an external waveguide Bragg reflector. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(2): 143~147
- [2] I. Bennion, D. C. J. Reid, C. J. Rowe *et al.*, High-reflectivity monomode fiber grating filters. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(6): 341~343
- [3] C. J. Rowe, I. Bennion, D. C. J. Reid, High-reflectivity surface-relief gratings in single-mode optical fibers. *Proc. IEEE.*, 1987, **134**(3): 197~202
- [4] A. Kotsas, H. Ghafouri-Shiraz, T. S. M. Maclean, Microlens fabrication on single-mode fibers for efficient coupling from laser diodes. *Opt. and Quant. Electron.*, 1991, **23**(3): 367~368
- [5] 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
- [6] E. Brinkmeyer, W. Brennecke, M. Zum *et al.*, Fiber Bragg reflector for mode selection and line-narrowing of injection laser. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(3): 134~135
- [7] C. J. Rowe, L. Reekie, R. J. Mears *et al.*, Narrow-linewidth fiber laser with integral fiber grating. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19): 987~988
- [8] P. St J. Russell, R. Ulrich, Grating fiber coupler as a high-resolution spectrometer. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(6): 291~293

- [9] M. A. Jensen, R. H. Selfridge, Analysis of diffraction gratings based on D-shaped fiber. *J. O. S. A. (A)*, 1992, **9**(7): 1086~1090
- [10] A. Yariv, M. Nakamura, Periodic structures for integrated optics. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, **QE-13**(4): 233~253
- [11] Shu-Tong Zhou, Zong-Qi Lin, William S. C. Chang, Precise periodicity control in the fabrication of holographic gratings. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(8): 1270~1272

## Single Mode Optical Fibre Bragg Reflective Filter

Yang Hong      Lin Xiangzhi      Cui Xiaoming      Liu Zhiyang

An Honglin      Liu Yongen      Liu Hongdu

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

(Received 26 April 1993; revised 19 July 1993)

**Abstract** The characteristics of optical fibre Bragg reflective filter (FBR) are analysed on the basis of asymmetric five-layer optical waveguide model, and the structural parameters of FBR are discussed for broad and narrow bands with high reflectivity. The experimental studies on FBR are presented in this paper, including fabrication technologies and measurement method. Typical performances of our FBR devices are as follows: 80% reflectivity and 1.5 nm bandwidth (FWHM) at 1.5  $\mu\text{m}$  region.

**Key words** Single mode optical fibre, reflective filter.