

电调谐光纤布拉格反射滤波器*

林祥芝 张昀 安宏林 刘弘度
(北京大学物理系, 北京 100871)

摘 要 首次实现了采用磁致伸缩材料制作的电调谐光纤布拉格反射滤波器, 实验得到 1.3 nm 的调谐范围。滤波器带宽 1.5 nm。

关键词 单模光纤, 布拉格滤波器。

1 引 言

光纤布拉格反射滤波器(FBR)^[1~4]与集成光学滤波器相比, 具有低损耗、长相互作用距离和易与光纤系统或半导体激光器相连等优点, 因而受到广泛关注。制作光纤布拉格反射滤波器的传统工艺是在侧面抛光的光纤上用离子束刻蚀的方法制作光栅。最近, 用紫外光辐照的方法制作光纤布拉格反射滤波器也得到了广泛研究。这些方法局限于只能在一个固定波长工作, 而在光纤通信和光纤激光器等应用中, 可调谐光纤布拉格反射滤波器具有特别重要的意义。Sorin 等人演示过采用变周期光栅实现机械调谐^[5], 但还一直没有电调谐光纤光栅滤波器的研究报道。本文作者曾提出并计算了一种电调谐光纤光栅滤波器的方案^[6], 采用液晶作电光介质, 调谐范围可达 0.5 nm。本文提出一种采用磁致伸缩材料实现电调谐光纤光栅滤波器的方案, 并进行了实验研究。

2 理论分析

根据耦合模理论, 光纤布拉格反射滤波器的峰值反射波长由下式决定:

$$\beta(\lambda_0) = \pi/\Lambda \quad (1)$$

式中 $\beta(\lambda)$ 是色散曲线函数, λ_0 是峰值反射波长, Λ 是光栅周期。由(1)式可以看出, 为了使光纤布拉格反射滤波器可调谐, 可以改变光栅周期, 或者改变色散曲线函数。文献[5]中采用的就是改变光栅周期的方法。改变色散曲线来实现调谐的方法见文献[7]。本文将通常的单模光纤布拉格反射滤波器的石英基块换成磁致伸缩材料(稀土铁金属间化合物, $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ 合金), 在外加磁场的作用下, 能改变其内部两个磁畴之间的相互作用, 从而相应于能量极小值的平衡距离发生了改变, 引起物体的长度伸长, 其相对伸长量可达 16×10^{-4} , 这个伸长会引起光纤光栅的周期也随之变大, 根据(1)式, 将会使光纤布拉格反射滤波器的峰值反射波

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年7月23日; 收到修改稿日期: 1994年11月21日

长向长波方向移动。图 1 中曲线 1 是外加磁场下光纤长度变化引起的光纤布拉格反射滤波器峰值波长移动的计算值, 其饱和现象是由磁致伸缩材料的特性决定的。

另一方面, 光纤的伸长还会产生弹光效应, 它会使光纤波导层的折射率发生改变, 从而改变了光纤的色散曲线, 这也产生调谐作用。

下面分析弹光效应对光纤布拉格反射滤波器峰值波长的影响。首先作如下的合理假设:

- 1) 只考虑轴向的应变。这是由于光纤所受的应力基本只沿轴向。
- 2) 光纤芯和包层都均匀的拉伸, 且伸长量与磁致伸缩材料一样。
- 3) 光纤芯和包层具有相同的力学常数。
- 4) 光纤处于弹性形变的范围之内。

根据假设 2), 可得出应变矢量为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, ε_0 是磁致伸缩材料的相对伸长。由 (2) 式可以求得应力矢量为:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_0 E / (1 - 2\mu) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, E 是杨氏模量, μ 是泊松比。由于应力作用所引起的弹光效应可表示为

$$\Delta(1/n^2)_i = \sum_{j=1}^6 P_{ij} \varepsilon_j. \quad (4)$$

由于没有切向应变 ($\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0$) 而且光纤是各向同性的, 只需要考虑弹光张量的 $i, j = 1, 2, 3$ 元素

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(5) 式代入 (4) 式得

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \begin{bmatrix} P_{12}\varepsilon_0 \\ P_{12}\varepsilon_0 \\ P_{11}\varepsilon_0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对于沿光纤轴向传播的光, 其 TE 模感受到的折射率变化为:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_z = \frac{1}{2} n^3 P_{12} \varepsilon_0. \quad (7)$$

这个折射率变化导致光纤的色散曲线发生变化, 从而导致反射峰波长的变化。图 1

中曲线 2 是弹光效应引起的反射峰值波长变化的计算值, 光纤布拉格反射滤波器峰值波长总的变化由图 1 中曲线 3 表示。

在上面的计算中取 $P_{12} = 0.270^{[8]}$ 。并采用平板模型和改进的耦合模理论^[7]。在计算弹光效应引起的折射率变化时, 假设弹光效应按照 (7) 式引起光纤芯径和光纤包层的折射率变化,

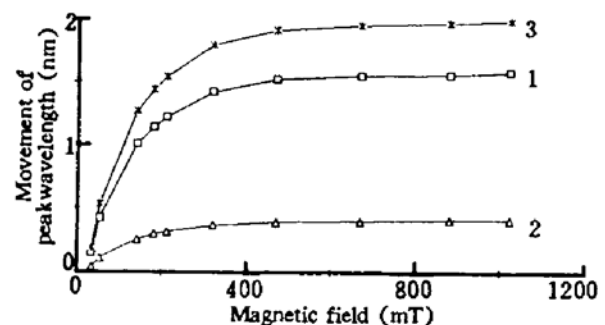


Fig. 1 Movement of peak wavelength caused by varies effects

而且由于光纤包层的折射率变化,按改进的耦合模理论计算时,光栅等效层的等效折射率也要变化。由图 1 可看出,弹光效应也使反射峰值波长向长波方向移动,但其移动的幅度比长度效应要小得多,不过也没小到可以忽略的地步。总的来看,这两种效应引起的反射峰值波长移动的趋势是相同的。

3 实验研究

可调谐光纤布拉格反射滤波器的基本结构及工艺技术在文献中已有叙述。本实验将石英基块换成了磁致伸缩材料 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ 合金。光纤侧面的光栅是用离子束刻蚀的方法制作的。实验获得的用磁致伸缩料作衬底的光纤布拉格反射滤波器的反射率最高可达到 80%。用来测量可调谐光纤布拉格反射滤波器调谐特性的实验装置如图 2 所示

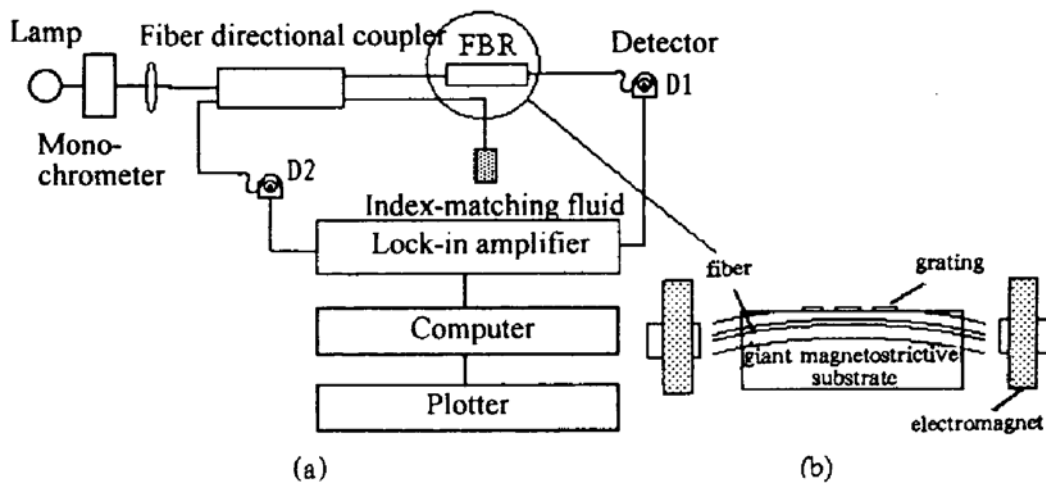


Fig. 2 Experiment arrangement for fiber-grating tunable characterization

卤钨灯发出的光经单色仪后变为准单色光,通过微透镜耦合到光纤方向耦合器的一个输入端中去,方向耦合器的一个输出端连到可调谐光纤布拉格反射滤波器上,然后与光探测器 D_1 相连,给出透射光信号。另一个输出端浸在折射率匹配液中以消除端面反射。方向耦合器的另一输入端连在光探测器 D_2 上,给出反射光信号。两个探测器输出信号都馈送到锁相放大器,测量锁相放大器的信号就可测出光纤布拉格反射滤波器的反射谱和透射谱。可调谐光纤布拉格反射滤波器放在由电磁铁产生的强磁场中,其细节如图 2(b)所示,调节电磁铁的电流可以在不同磁场强度下测量光纤布拉格反射滤波器的透射谱和反射谱。

分别在加磁场和不加磁场的情况下测量光纤布拉格反射滤波器的反射谱线,其结果如图 3 所示。对于实验所用的电磁铁,在工作电流为 8 A 时,对应的磁场强度大约是 400 mT。图 3 表明,器件确实实现了电调谐,调谐范围是 1.3 nm。而且与理论预计相符合,中心反射波长确实向长波方向移动,加磁场前后整个反射峰的形状也完全一样。

滤波器峰值反射波长随磁场强度的变化如图 4 所示。图中实心圆点是实验数据,为了比较,将图 1 中的曲线 1 也示于图 4 中(虚线)。图 4 中实验数据和理论曲线有一些差别,但整体趋势完全一样。这些差别可能是由于在实验中磁场强度测量精度不够所引起的。

为了研究可调谐光纤布拉格反射滤波器的重复特性,重复测量了十次,发现在测量精度之内(0.1 nm),每次去掉磁场后中心反射波长都回到原来的位置,加上磁场后中心波长也移到同一个位置。这说明器件有相当好的重复性,同时也表明光纤的伸缩并没有超过其弹性形

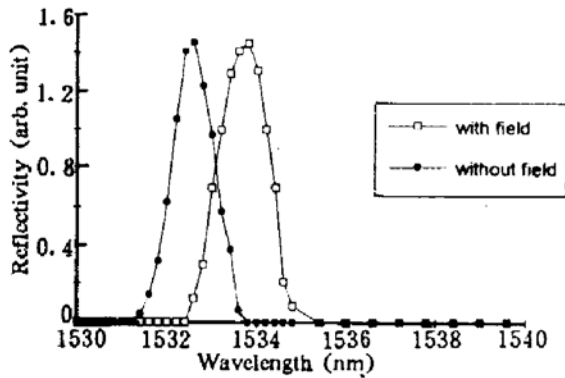


Fig. 3 Reflect spectrum with (working current is 8 A) or without magnetic field

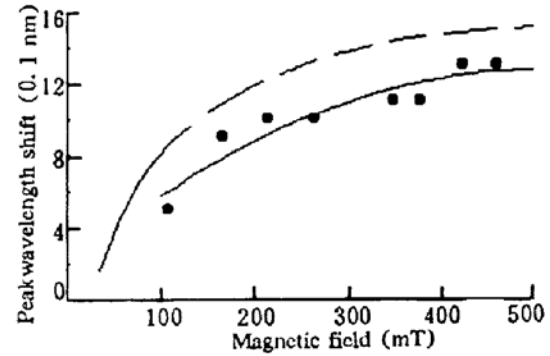


Fig. 4 Change of peak wavelength versus magnetic field

变范围。

结 论 采用磁致伸缩材料制作了可调谐光纤布拉格反射滤波器，首次实现了电调谐光纤布拉格反射滤波器。理论计算的最大调谐量可达 2 nm，但由于所用电磁铁的限制，实验调谐范围为 1.3 nm。获得大的调谐范围要求更大的磁场强度和伸缩量更大的超磁致伸缩材料。

感谢北京科技大学的周寿春、梅武和史振华等先生提供了磁致伸缩材料。

参 考 文 献

- [1] Rowe C. J., Bennion I., Reid D. C. J., High-reflectivity surface-relief gratings in single-mode optical fibers. *IEE Proceedings*, 1987, 134(3): 197~202
- [2] 阎宏, 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): 381~387
- [3] Hill K. O., Malo B., Bilodeau F. et al., Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(10): 1035~1037
- [4] Archambault J. L., Reekie L., Russell St. J., 100% reflectivity bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses. *Electron. Lett.*, 1993, 29(5): 453~455
- [5] Sorin W. V., Zorabedian P., Newton S. A., Tunable single-mode fiber reflective grating filter. *J. Lightwave Tech.*, 1987, 5(9): 1199~1202
- [6] 张昀, 可调谐光纤滤波器研究. 北京大学硕士毕业论文, 1994
- [7] Hocker G. B., Fiber-optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.*, 1979, 18(10): 1445~1448

Electrically Tunable Single-Mode Fiber Bragg Reflective Filter

Lin Xiangzhi Zhang Yun An Honglin Liu Hongdu

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 23 July 1994; revised 21 November 1994)

Abstract An electrically tunable single-mode fiber Bragg reflective filter (FBR) is firstly demonstrated by using a giant magnetostrictive material to which the fiber is embedd in and side-polished. With a reflection bandwidth of about 1.5 nm, our measured tuning range of the FBR filter is 1.3 nm.

Key words single mode fiber, Bragg reflective filter.