

# 新型光纤光栅线性调谐方法\*

刘志国 张艺兵 开桂云 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

郑建成 李家安

(香港城市大学电子工程系, 香港)

**摘 要** 报道了一种线性度极佳的光纤光栅波长调谐技术, 调谐范围近 10 nm, 线性拟合度达到 0.9998, 并首次利用材料力学原理推导了这种线性调谐的理论关系式, 此种技术可望在光纤传感、光纤通信及激光技术等方面有重要应用前景。

**关键词** 光纤光栅, 调谐, 简支梁, 传感。

## 1 引 言

光纤光栅自问世以来, 引起人们的广泛关注, 它以其与光纤天然兼容性的优势, 充分发挥对光波选频特性, 已经制作出许多性能优良的光纤光栅器件<sup>[1~7]</sup>, 在光纤通信、光纤传感等领域大显身手, 为实现光纤一维光子集成提供了必要条件<sup>[8]</sup>。

光纤光栅在实际应用过程中有时需要对其工作波长进行适当调整, 它是继光纤光栅制作工艺研究之后的又一研究热点。直接施加轴向力的应力调谐、或通过压电陶瓷(PZT)、铁电体提供轴向应力进行电调谐以及热调谐<sup>[9~11]</sup>等调谐技术均已有报道。文献[9]中报道了波长对于使金属棒弯曲的外力之间的线性调谐关系, 但对于侧向位移成平方关系。本文报道了一种对侧向位移及外力线性度均极好的调谐机构, 在 10 nm 范围线性拟合度达到 0.9998, 工艺容易实现, 并首次用材料力学原理推导了波长与侧向位移的线性调谐关系。实验结果与理论符合得很好。

## 2 原理与实验

以国产高掺铈光敏光纤、自行研制的 248 nm 准分子紫外激光为成栅光源的光纤光栅, 采用位相掩模法测得其反射率为 90~99%, 反射带宽 0.2 nm~1 nm。

大量研究表明, 光纤光栅波长变化与温度  $T$  及应变  $\epsilon$  满足以下线性关系:

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (a + \zeta)\Delta T + \eta\epsilon \quad (1)$$

其中,  $a$  为石英玻璃的热膨胀系数;  $\zeta$  为纤芯石英玻璃的热光系数;  $\eta$  为与光纤弹光效应、光纤

\* 国家自然科学基金重点基金、天津市自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-07-13; 收到修改稿日期: 1997-12-30

泊松比、纤芯有效折射率有关的常数，光敏光纤的  $\eta$  值大小在 0.72 ~ 0.79 之间； $\epsilon$  为轴向应变，(1) 式是有关光纤光栅波长调谐的理论基础。本文报道的实验是在室温恒定条件下 ( $\Delta T = 0$ ) 进行的，于是(1)式可简化为：

$$\Delta\lambda/\lambda_B = \eta\epsilon \tag{2}$$

即通过对光纤光栅轴向应变的线性调谐即可实现对光纤光栅波长的线性调谐。

本文设计的线性调谐实验装置如图 1 所示。这是典型的材料力学中的“简支梁”结构，其中横梁采用杨氏模量较小的材料，横截面成等腰三角形，光纤光栅粘接到杆的棱线上并靠近杆的中部，在杆的中部有精密位移进给装置施以侧向压力，使杆产生弯曲形变，则杆内外两侧分别产生压缩及拉伸，从而实现光纤光栅调谐。

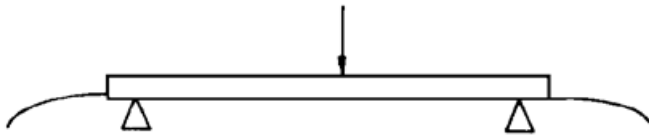


图 2 是光纤光栅调谐过程中的反射光谱图。

Fig. 1 The structure of the bending of a fiber-grating

$\Delta\lambda$  与支撑杆中心侧向位移量  $h$  的实验结果如图 3 所示，得到  $\Delta\lambda - h$  拟合直线方程； $\Delta\lambda = 3.63h + 0.03$ ，线性拟合度到达 0.9998，表明光纤光栅工作波长的偏移  $\Delta\lambda$  与侧向位移量  $h$  成极佳的线性关系。

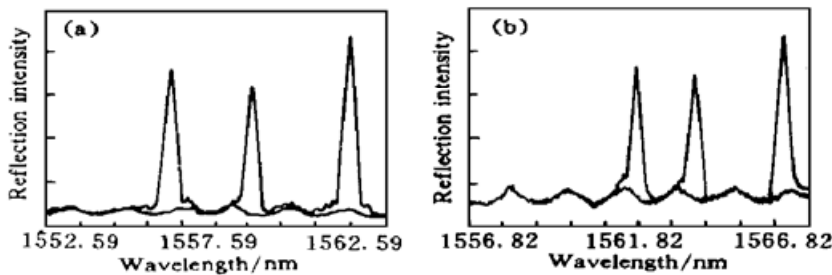


Fig. 2 The tuning characteristic of fiber-grating Bragg reflection wavelength. (a) Compressed fiber-grating, (b) Stretched fiber-grating

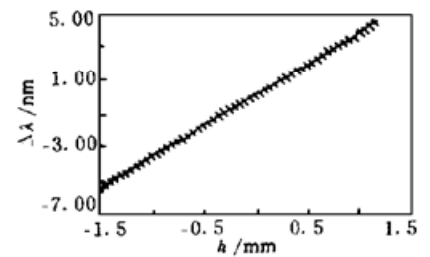


Fig. 3 Function of the fiber-grating wavelength-shifted ( $\Delta\lambda$ ) and the displacement ( $h$ ) of the mid-point of the rod

### 3 分析与讨论

根据材料力学原理可知梁弯曲时内侧材料因被压缩而缩短，外侧被拉伸而伸长，中性层面不受力，长度保持不变。在集中载荷  $P$  作用下，图 1 所示弯曲形变左右对称的简支梁，在区间  $0 \leq x \leq a$ ，各点位移大小满足：

$$y = - (Px/12EI)(3a^2 - x^2) \tag{3}$$

其中， $E$  为材料的杨氏模量， $I$  为梁横截面的惯矩，它与梁横截面的面积及形状有关， $2a$  为横梁长度。这个形变曲线是三次曲线，但粘在简支梁中部的的光纤光栅很短，此范围各点横梁曲率半径的变化很小，可采用等曲率半径近似。

图 4 是简支梁的弯曲形变示意图， $R_1$ 、 $R_0$ 、 $R_2$  分别为横梁中部被压缩面、中性面及拉伸面的曲率半径， $L_0$  为中性面的弧长(即光纤光栅的原有长度)，中性层面距等腰三角形顶点的距离为  $d$ ，横梁中心处的侧向位移为  $h$ ，支点之间的距离为  $2a$ 。计算得到弧长的相对伸长量为：

$$\Delta L/L_0 = - 3hd/a^2 \tag{4}$$

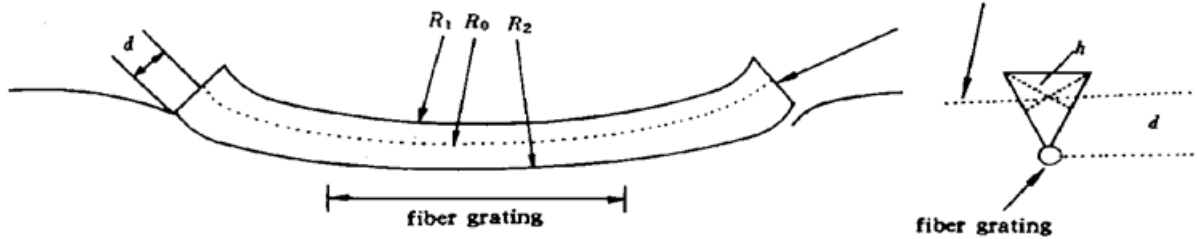


Fig. 4 Simplified geometry of the simple supported beam

假定光纤光栅与简支梁紧密牢固粘合, 并假定光纤光栅及粘接胶对简支梁弯曲的影响用系数  $\eta'$  表示, ( $0 \leq \eta' \leq 1$ ), 利用(2)式和(4)式得到:

$$\Delta\lambda = - (3\eta'h'd\lambda_B/a^2)h \quad (5)$$

括号中各参数为常数, 即  $\Delta\lambda$  与  $h$  为线性关系, 这为实验结果所证实。由(3)式可知  $h$  与侧向外力  $P$  成线性关系, 即  $\Delta\lambda$  也与侧向外力  $P$  成线性关系。另外, 公式中  $d$  如果为零值, 波长变化总为零, 其物理意义是自由状态下的光纤光栅弯曲时波长不发生任何变化, 这也与事实相符, 因为此种情况下光纤光栅不产生轴向应力。假定所粘光纤光栅对简支梁形变影响不计, 即  $\eta' = 1$ , 将实验所用横梁的  $d$ 、 $a$ 、 $\eta$  值(大小为 0.79)及光纤光栅初始波长  $\lambda_B = 1561.82 \text{ nm}$  代入(5)式, 得  $\Delta\lambda-h$  直线理论斜率值为 4.93, 与实验数据拟合所得斜率 3.63 相差较大, 说明光纤光栅及粘接材料对简支梁形变有一定影响, 影响程度系数  $\eta'$  约为 0.737。

另外, 根据材料力学中梁弯曲问题可知, 简支梁中心侧向位移量为

$$h = - Pa^3/6EI \quad (6)$$

式中  $EI$  乘积称之为梁的抗弯刚度。为实现小的外力产生大的波长偏移, 需要合理设计和选择梁材料、横截面面积及形状(如 T 型、工字型、三角形等比圆形和矩形更合适)。

另外, 还可以利用悬臂梁结构实现线性调谐功能, 作者用上述材料力学原理也获得了悬臂梁结构的线性调谐公式, 它与(6)式相同, 只是(6)式中的  $a$  代表悬臂梁的全长, 在横梁长度相等条件下, 调谐灵敏度是简支梁的 1/4, 实验结果与理论分析同样能很好吻合。

**结 论** 本文报道了两种(简支梁和悬臂梁)线性度很好的光纤光栅波长调谐方法, 利用这种方法可以精确地调节和控制光纤光栅的轴向应变, 小的侧向外力即可产生对光纤光栅大的轴向应力, 横梁的侧向线性位移容易实现, 并具有波长双向调谐的特点, 从而增强了光纤光栅使用的灵活性, 尤其在滤波器领域, 可以利用光纤光栅建立透过波长可调法布里-珀罗滤波器, 解决了常规介质膜带通滤波器难以实现的透射中心波长双向可调问题。更重要的是, 将这一调谐原理应用于光纤光栅传感领域, 可衍生出许多新的传感技术, 实现对多种物理量的光学测量。

### 参 考 文 献

- [1] J. Martin, F. Ouellette, Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(10) : 811~ 812
- [2] M. C. Farries, C. M. Ragdale, D. C. J. Reid *et al.*, Broadband chirped fibre Bragg filters for pump rejection and recycling in Erbium doped fibre amplifiers. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(5) : 487~ 489
- [3] B. J. Eggleton, P. A. Krug, L. Poladian *et al.*, Long periodic superstructure Bragg gratings in optical fibres. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(19) : 1620~ 1622

- [4] J. Canning, M. G. Sceats,  $\pi$ -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(16) : 1344~ 1345
- [5] K. O. Hill, F. Bilodean, B. Malo *et al.*, Chirped in-fibre Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17) : 1314~ 1316
- [6] K. O. Hill, F. Bilodean, B. Malo *et al.*, Birefringent photosensitivity in monomode optical fiber: Application to external writing of rocking filters. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(17) : 1548~ 1550
- [7] 刘志国, 张艺兵, 王江等, 光纤光栅技术及其发展. 光通信技术, 1995, **20**(2) : 141~ 145
- [8] 董孝义, 金发宏, 刘志国等, 光纤光栅、全光纤器件及其集成与光纤通信. 光通信技术, 1996, **20**(1) : 6~ 12
- [9] Tetsuro Komukai, Yoshiaki Miyajima, Masataka Nakazawa, In-line fiber grating-type optical bandpass filter tuned by applying lateral stress. *Tan. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(3A) : L306~ L308
- [10] A. Ball, W. W. Morey, Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) : 420~ 422
- [11] G. A. Ball, W. W. Morey, Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23) : 1979~ 1981

## A New Method for Fiber-Grating Linear Tuning

Liu Zhiguo    Zhang Yibing    Kai Guiyun    Dong Xiaoyi  
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjing 300071*)

Zheng Jiancheng    Li Jiaan  
(*Department of Electronic Engineering, City University, HongKong*)

(Received 13 July 1997; revised 30 December 1997)

**Abstract** A new method for fiber-grating linear tuning is reported. The wavelength range of linear tuning is about 10 nm, and  $R^2 = 0.9998$ . The linear formula is obtained theoretically through the material mechanics principles for the first time to our knowledge. This method will have its important application prospects in the area of fiber sensing, fiber communication, lasers and etc.

**Key words** fiber-grating, tuning, simple supported beam, sensing.