

# 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐\*

余有龙 刘治国 董孝义 王 江

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

耿淑伟

(哈尔滨建筑大学建工学院, 哈尔滨 150001)

郑建成

(香港城市大学电子工程系, 香港)

**摘 要** 理论上对不同厚度的“凸”字形悬臂梁的调谐能力进行了分析, 实验中选用适当尺寸的悬臂梁, 对粘贴其上的光纤光栅的反射波长实现了线性调谐, 并观察到由于梁轴向应力的梯度分布造成的啁啾输出现象, 指出选用长度较短的光栅可以减小谱的展宽量。

**关键词** 光纤光栅, 线性可调, 悬臂梁, 啁啾光栅。

## 1 引 言

自从 Hill 于 1978 年首次在掺锗二氧化硅光纤中成功地写入光纤光栅(FBG)<sup>[1]</sup>以来, 该无源光子器件已被广泛应用于光通信和光传感等领域。若采用适当的调谐手段, 其潜在应用将会得到进一步地挖掘, 尤其是线性调谐, 它不仅增大工作波长的范围, 也成为研制可调谐光纤激光器、全光纤光谱仪和波长编码的光纤光栅传感器及其实用化的关键技术。许多学者致力于这方面的研究工作, 起初有人提出沿轴向直接施加牵引力, 这种原始的办法较费力, 易将光栅拉断; 后来又发展了压电陶瓷驱动<sup>[2, 3]</sup>、电磁调谐和热调谐<sup>[4]</sup>等技术, 这些调谐方法线性范围小, 有些甚至是非线性操作, 不便定标和操作, 难以满足实际需求。Komukai 等<sup>[5]</sup>借助施加在光纤侧向的力虽能调节, 但调节灵敏度较低(1 N 的力才 6 nm)。作者在简支梁调谐技术基础上又发展了悬臂梁调谐技术, 利用附着其表面的光纤光栅的应变与自由端外力大小成线性关系, 实现其反射谱中心波长的线性调谐。

## 2 利用悬臂梁进行调谐的工作原理

称光纤光栅反射波长  $\lambda_B$  发生变化的现象为波长漂移, 引起波长漂移的可以是温度  $T$  和光纤沿轴向的应变  $\epsilon$ 。这两个独立变化量, 若记绝对漂移量为  $\Delta\lambda_B$ , 温度不变时相对漂移量

\* 本课题得到国家自然科学基金重点项目和国家教委光学信息技术科学开放实验室项目的资助。

收稿日期: 1997-12-30; 收到修改稿日期: 1998-03-23

$\Delta\lambda_B/\lambda_B$  与轴向应变  $\epsilon_x$  成正比<sup>[2]</sup>, 即

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_x \quad (1)$$

右边两项分别意味着应力对  $\lambda_B$  的影响是通过改变光纤光栅的光栅常数和光栅位置的折射率进行的。式中  $P_e$  为有效弹光系数, 它与弹光效应有关,

$$P_e = (n^2/2)[(1 - \mu)P_{12} - \mu P_{11}]$$

二氧化硅光纤的折射率  $n = 1.46$ , 泊松比  $\mu = 0.16$ , 弹光系数  $P_{11} = 0.12$ 、 $P_{12} = 0.27$ , 则  $P_e = 0.22$ 。

悬臂梁进行调谐时, 将光纤光栅刚性粘贴在接近悬臂梁固定端的  $N$  点, 梁的尺寸如图 1 所示,  $xoy$  为中性面,  $L$  为梁长,  $x$  为  $N$  点与固定端的距离。若  $N$  与中性面间距为  $z$ ,  $R$  为该



Fig. 1 Schematic of  $\perp$ -shaped bent cantilever beam. (a) Cross-section of the cantilever, (b) Deformation of the bent cantilever

位置的曲率半径, 则该点沿  $x$  方向的应变  $\epsilon_x$  为

$$\epsilon_x = z/R \quad (2)$$

$R$  与材料的杨氏弹性模量  $E$ 、 $N$  点弯矩  $M$  以及它所在截面关于  $y$  轴的惯性矩  $I_y$  有关, 可表示为

$$R = EI_y/M \quad (3)$$

$$\text{而} \quad I_y = \int_{-z}^z f_y(z) dz \quad (4)$$

式中  $f_y(z)$  为截面沿  $y$  方向的尺寸。考虑  $M = P(L - x)$ , 计

$$k(x, z) = \frac{(L - x)}{E} (1 - P_e) \frac{z}{I_y} \quad (5)$$

称之为调谐系数, 它反映了梁的调谐灵敏度, (1) 式变为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k(x, z)P \quad (6)$$

截面形状为“凸”字形的梁, 既具备较大的  $z$  值, 又具较小的  $I_y$ , 使得它不仅提供较大的应变以期获得较高的灵敏度, 而且还能保证梁的弯曲刚度从而提高调谐的线性度。因此从提供应变能力和适用角度来看, 梁的截面形状以“凸”字形为佳。

对于“凸”字形截面的悬臂梁,  $N$  点与中性面间距

$$z = \frac{a^2b + 2abt + dt^2}{2(ab + dt)} \quad (7)$$

$$\text{中性面与梁底面间距} \quad c = \frac{a^2b + 2adt + dt^2}{2(ab + dt)} \quad (8)$$

$$N \text{ 点所在截面的惯性矩 } I_y = \frac{b-d}{3}(a-c)^3 + \frac{bc^3}{3} + \frac{d}{3}(a+t-c)^3 \quad (9)$$

适当长度的悬臂梁, 给定  $b$ 、 $d$  值,  $x$  越小调谐灵敏度越高;  $x = 0$  时能提供调谐的能力最强, 考虑实际使用的光栅均具有一定的长度, 下面不妨分析  $x = 1.0$  cm 时不同尺寸“凸”字形悬臂梁调谐的情形。从(5)式、(7)式、(8)式和(9)式可知,  $k(x, z)$  取决于  $a$  和  $t$ ,  $a$  值确定后, 它可表示成  $k(x, t)$ 。有机玻璃制成的梁  $E = 2.744 \times 10^5$  N/cm<sup>2</sup>, 取  $L = 10$  cm、 $b = 0.8$  cm、 $d = 0.1$  cm, 则可画出  $a$  取不同值时由(5)式确定的  $k(1.0, t)$  随  $t$  变化关系的理论曲线如图 2 所示。显然每一条曲线都存在一个极大值, 对应高度  $t$  的梁提供给  $N$  位置光纤光栅的应变最大。随着  $a$  值的减小, 曲线极大值位置左移, 而调谐灵敏度趋于增高。可见弱调谐力, 必须选择较小的  $a$  值才能获得足够的调谐量; 考虑光纤光栅承受应变的能力有限, 所以较大的调谐力就必须选择较大  $a$  值的梁。对于  $a = 0.12$  cm, 极值位置对应  $k(1.0, 0.055) = 0.0183$ 。1.56  $\mu\text{m}$  波长、0.1 N 的力对应 2.8548 nm 的波长漂移量。光纤光谱仪分辨率为 0.2 nm 时能检测最小波长为  $10^{-6}$   $\mu\text{m}$ , 可鉴别小到  $3.5 \times 10^{-5}$  N 的力。如果  $P$  的作用方向垂直于梁的轴向上, 则  $N$  位置的光纤光栅将被压缩, 波长会反向漂移。由于调谐能力与  $x$  有关, 一定长度的均匀周期的光纤光栅经调谐后变为啁啾光栅。

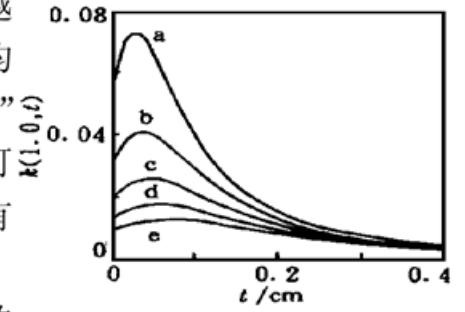


Fig. 2 Theoretical plots of wavelength shifts vs the value of  $t$  with different size  $a$ . a:  $a = 0.06$  cm; b:  $a = 0.08$  cm; c:  $a = 0.1$  cm; d:  $a = 0.12$  cm; e:  $a = 0.14$  cm

### 3 实验结果

采用如图 3 所示的实验装置, 悬臂梁选用的尺寸  $a$ 、 $b$ 、 $t$  以及  $L$  分别为 0.12 cm、

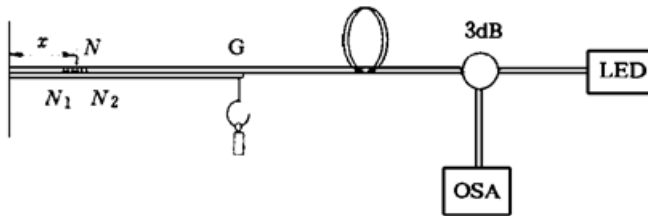


Fig. 3 Experimental arrangement

0.8 cm、0.05 cm 以及 10 cm。实验中将中心波长为 1.56144  $\mu\text{m}$ 、带宽为 0.44 nm、尺寸为  $L' = 18$  mm 光纤光栅的中央部位固定于距上述尺寸梁的固定端 1.0 cm 的  $N$  处, 自由端  $G$  处固定一用来勾挂砝码的小钩, 钩和砝码的总重量提供调谐力。发光二极管 LED 的工作电流为 100 mA, 峰值波长为  $\lambda_{\text{峰}} = 1.536$   $\mu\text{m}$ , 带宽 85.6 nm。与一 3 dB 耦合器连接的光谱仪 OSA 用以监测光纤光栅反射谱的中心波长  $\lambda_p$  和带宽  $\Delta\lambda_{\text{max}/2}$ 。

#### 3.1 中心波长的线性调谐

实验表明, 光纤光栅的中心波长  $\lambda_p$  随着砝码的不断添加呈增加的趋势。图 4 中虚线便是  $\Delta\lambda_B = \lambda_p - \lambda_B$  随  $P$  变化关系的实验曲线, 它表明两者间呈明显的线性关系(该曲线的线性拟合度达 0.997803)。实线则为理论曲线。 $P = 10$  g 时, 理论上波长相对漂移量为 2.7565 nm, 而实验结果却为 1.8 nm, 两者间的差异作者认为是由于光纤、粘结剂以及梁并非同种材料, 其杨氏模量多少有些区别加上刚性连接的不太理想所致。实际使用时, (6) 式应该修正为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \eta k(x, t) P \quad (10)$$

其中修正系数  $\eta \in [0, 1]$ 。这里若取  $\eta = 0.653$ , 则理论曲线与实验曲线完全重合。

#### 3.2 调谐过程中的啁啾现象

实验中还观察到随着  $P$  的增加,  $\Delta\lambda_B$  增加的同时, 光纤光栅反射谱的带宽  $\Delta\lambda_{\text{max}/2}$  也呈增

加的趋势。图 5 便是两者关系的实验曲线。这是由于一方面全部格栅的布拉格反射波长发生了变化，另一方面不同格栅间变化程度不同所至，后者乃造成带宽增加的主要因素。悬臂梁轴向应力呈梯度分布，因此光纤光栅上不同位置的应变程度有异，使得对应格栅间距和折射率分布的变化不同，以至于原本均匀周期的光栅变成了啁啾光栅。

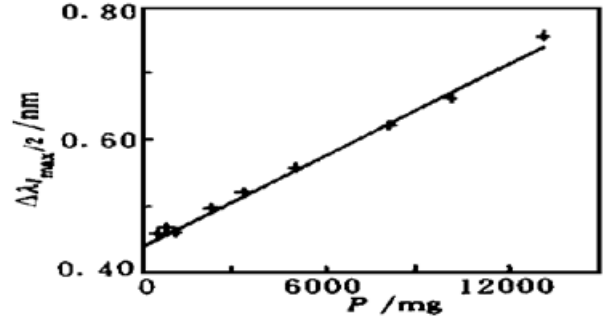
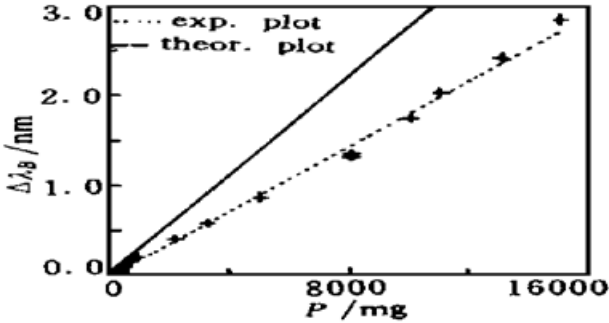


Fig. 4 Experimental and thoretical plots of wavelength shifts as a function of applied force

Fig. 5 Experimental plot of band width vs applied force

光栅两端  $N_1$  和  $N_2$  与固定端相距分别为  $x_1$  和  $x_2$ ，两处格栅的反射波长分别为  $\lambda_{p1}$  和  $\lambda_{p2}$ ，对应的调谐系数为  $k(x_1, z)$  和  $k(x_2, z)$ ，考虑到

$$\Delta\lambda_{Bi} = \lambda_{pi} - \lambda_B, \quad (i = 1, 2) \tag{11}$$

根据(5)式和(6)式可知

$$\frac{\lambda_{p1} - \lambda_{p2}}{\lambda_B} = \frac{z(1 - P_c)L'}{EI_y}P \tag{12}$$

看来调谐时欲减小谱的展宽应选择较短的光栅。波长差与漂移量的比值为

$$\frac{\lambda_{p1} - \lambda_{p2}}{\Delta\lambda_B} = \frac{L'}{L - x} \tag{13}$$

这样该装置在  $P = 10 \text{ g}$  时， $\lambda_{p1} - \lambda_{p2} = 0.5513 \text{ nm}$ ，它引起的附加带宽比该值要小。

(12)式中只有  $P$  为变量。光栅上其它任意两位置的布拉格反射波长差虽小于该值，但也与  $P$  呈线性关系。所观察到的带宽是  $P = 0$  时带宽、中间部位格栅变化引起的附加带宽以及啁啾效应综合作用的结果，前者为定值，后两者均与  $P$  成正比，因此  $\Delta\lambda_{\max}/2$  与  $P$  成线性关系。此外在实验中也注意到  $P$  增加时，随着带宽的增加，反射谱的峰值功率有减弱的趋势。温度也可以引起波长漂移，环境温度的变化对实验结果会有影响。为降低这种影响，操作时尽量远离光纤光栅，避免空气流动，每改变一次  $P$  值，数据取几次测量的平均值。

**结 论** 利用悬臂梁不仅可以对粘贴其上的光纤光栅进行线性度极高的调谐，而且还可对其谱进行展宽。利用该技术通过分析调谐直线的斜率可以精确测定悬臂梁材料的杨氏模量  $E$ ；还可以将均匀周期的光纤光栅转换为啁啾光栅，并在一定范围内灵活地控制啁啾量；稍加改造，此装置可作为传感元件，进行力、电、磁、位移等物理量的精密传感，因此该项工作具有实际应用价值。

参 考 文 献

[1] Hill K O, Fuji Y, Johnson D C *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, 32(6) : 647~ 649

- [2] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) : 420~422
- [3] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23) : 1979~ 1981
- [4] Xu M G, Geiger H, Archambault J L *et al.*. Novel interrogating system for fiber dragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17) : 1510~ 1511
- [5] Komukai T, Miyajima Y, Nakazawa M. In-line fiber grating-type optical bandpass filter tuned by applying lateral stress. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2, 1995, **34**(3A) : L306~ L308

## Linear Tuning of Fiber Bragg Grating Based on a Cantilever

Yu Youlong    Liu Zhiguo    Dong Xiaoyi    Wang Jiang  
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Geng Shuwei

(*Institute of Architecture and Civil Engineering, Harbin Architectural University, Harbin 150001*)

K. S. Chiang

(*Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong*)

(Received 30 December 1997; revised 23 March 1998)

**Abstract** The linear tuning ability of cantilevers with different sizes has been analyzed. By employing a appropriate size cantilever, the linear tuning of Bragg wavelength of fiber grating has been realized experimentally. The chirped output caused by the varied strain along the cantilever-axis has been observed. The broadening can be decreased by selecting short grating.

**Key words** fiber Bragg grating, linearly tunable, cantilever, chirped fiber grating.