

基于悬臂梁的光纤光栅无啁啾线性调谐*

余有龙 刘志国 董孝义 盛秋琴

(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)

摘 要 设计了一种均质、等厚、等腰三角状悬臂梁, 调节该梁自由端的挠度, 实现了光纤光栅布拉格反射中心波长的线性无啁啾调谐(调谐范围 4.50 nm)。引入修正因子 $\eta = 0.71$ 后, 理论值与实验结果基本一致。光栅与梁间刚性粘贴的质量影响反射谱形状。

关键词 光纤光栅, 线性调谐, 啁啾, 悬臂梁。

1 引 言

光纤光栅的应用已渗透到光通信和光传感领域的诸多方面。为使其在滤波、传感等重要技术领域中应用更加灵活、深入, 发展调谐技术极为重要。目前人们已经发展了压电陶瓷驱动调谐^[1-3]、电磁调谐^[4,5]、热调谐^[6]、侧向施压调谐^[7]、简支梁调谐^[8]以及悬臂梁调谐^[9]等技术。其中悬臂梁调谐法, 由于结构简单、线性好, 操作方便, 因而具有推广应用的价值。本文设计的厚度相等截面呈矩形的三角状悬臂梁, 顶端为自由端, 调节自由端的挠度便可对粘贴其上的光纤光栅进行无啁啾线性调谐。

2 原 理

光纤光栅被刚性地粘贴于均质悬臂梁的上表面, 取向与梁的轴线方向一致。光栅中央部位所在点 N 与固定端相距 x , 梁的长度为 L 。温度不变时梁沿轴向的应变 ϵ_x 可引起光纤光栅反射波长 λ_B 发生变化, 若记绝对漂移量为 $\Delta\lambda_B$, 则相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与作用于自由端 Q 垂直于轴向的外力 F 间的关系为^[9]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = k(x, z)F \quad (1)$$

其中反应调谐灵敏度的调谐系数

$$k(x, z) = [(L - x)/E](1 - p_e)(z/I_y) \quad (2)$$

这里 E 是梁的杨氏模量, p_e 为纤芯的有效弹光系数, z 为 N 点与中性面间距, I_y 为 N 点所在截面关于 y 轴的惯性矩。若梁的厚度为 h , 截面是宽为 b 的矩形, 则

* 国家自然科学基金资助项目和国家攀登计划预研项目。

收稿日期: 1998-04-07

$$I_y = bh^3/12 \tag{3}$$

保持梁的厚度 h 不变, (2)、(3) 式中 p_e 、 E 和 h 均为定值, 对于等截面的悬臂梁, I_y 与 x 无关, 则 $\partial k(x, z)/\partial x \neq 0$ 。由(1) 可知, F 作用时, 具有确定长度的光纤光栅上不同位置的布拉格反射波长的相对漂移量不同, 造成反射谱的半宽增加, 出现啁啾现象。实际上梁表面应力沿轴向呈梯度分布, 使得光栅的不同格栅被展宽的程度不同, 且不同位置由弹光效应引起的折射率变化量也有差异, 两者共同作用使得原本均匀周期的光栅变成啁啾光栅。

若将悬臂梁形状设计成图 1 所示, 高为 h 、长为 L 、底边长为 b_0 的等腰三角形, xOy 为中性面, $z = h/2$, 若梁的宽度沿 x 轴呈如下规律变化

$$b(x) = (6/h^2)(1 - p_e)(L - x)/(CE) \tag{4}$$

其中 C 为常数, 将(4)、(3) 式代入(2) 得 $k(x, z) = C$,

$$EI_y = (L - x)(1 - p_e)h/(2C),$$

且(1) 式变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = CF \tag{5}$$

描述悬臂梁弯曲的微分方程为

$$d^2\omega/dx^2 = F(L - x)/(EI_y) = 2CF/[(1 - F_e)h] \tag{6}$$

其中 $\omega(x)$ 为 F 作用下考察点偏离平衡位置的距离, 叫做挠度。考虑边界条件: $\omega(0) = 0, d\omega/dx|_{x=0} = 0$, 则

$\omega(x) = CFx^2/[2(1 - p_e)h]$, 对自由端 Q 有

$$\omega(L) = CFL^2/[2(1 - p_e)h] \tag{7}$$

(5) 式则变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_e)h\omega(L)/L^2 \tag{8}$$

显然波长漂移与 $\omega(L)$ 呈线性关系, 而与 N 在光栅上所处的位置以及光栅在梁轴向的位置无关, 它意味着这种设计的悬臂梁用于调谐时, 既能保证对布拉格反射中心波长进行线性调谐, 又可避免调谐过程中出现啁啾现象。

3 实验结果

为验证上述梁可实现无啁啾线性调谐, 采用图 2 所示的实验装置。用有机玻璃制成的梁, 其尺寸为 $b_0 = 11.0 \text{ mm}$, $L = 130.0 \text{ mm}$, $h = 2.5 \text{ mm}$ 。BBS 为宽带光源, 其峰值波长 $\lambda_{\text{峰}} = 1536.00 \text{ nm}$, 带宽为 85.60 nm 。实验中将自由状态下中心波长 $\lambda_{B0} = 1560.48 \text{ nm}$ 、半宽为 0.52 nm 、长度为 $l = 15.0 \text{ mm}$ 的光纤光栅的中央部位固定于距上述尺寸梁的固定端 12.0 nm 的 N 处。OSA 为光谱分析仪, 用来检测光纤光栅反射波中心波长 λ_B 以及半宽 $\Delta\lambda_{\frac{1}{2}}^l$, 为了

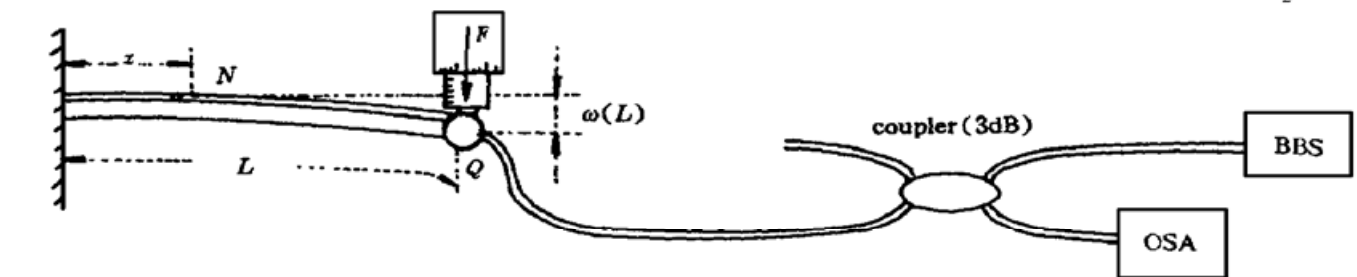


Fig. 2 Experimental Arrangement

获得较高的精度, 选取光谱仪的分辨率(Res)为 0.2 nm。耦合器(3 dB)起耦合分束作用。

为了较准确地读取 $\omega(L)$ 值, 使用经改装了的螺旋测微器来调节挠度, 其顶端顶住梁的自由端。观察拉应变对布拉格波长的影响时, 测微器置于 Q 的正上方; 而考察压应变的影响时则将测微器置于 Q 的正下方。

3.1 布拉格反射波长的漂移与 $\omega(L)$ 间关系

实验表明, 光纤光栅的中心波长 λ_B 随着自由端挠度 $\omega(L)$ 的增大呈增加的趋势。图3中虚线便是波长漂移量 $\Delta\lambda_B = \lambda_B - \lambda_{B0}$ 随 $\omega(L)$ 变化关系的实验曲线, 它表明两者间呈明显的线性关系。熔硅的 $p_e = 0.22^{[1]}$, 根据(8)式可以确定 $\Delta\lambda_B$ 随 $\omega(L)$ 变化关系的理论曲线(见图中实线所示)。 $\omega(L) = 13.75$ mm 时, 理论上 $\Delta\lambda_B = 2.48$ nm, 而实验结果却为 1.76 nm。造成两者间出现差异的原因可能有二: 1) 掺锗二氧化硅与熔硅的 p_e 值多少有些差异; 2) 光纤、粘结剂以及梁并非同种材料, 其杨氏模量略有区别, 并且刚性粘贴也不尽理想。若(8)式添加修正因子 η , 变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \eta(1 - p_e)h\omega(L)/L^2 \tag{9}$$

则更具有实用性。不同的调谐实验, 其 η 值可能有些差异, 但 $\eta \in (0, 1)$ 。这里若取 $\eta = 0.71$, 则图3中理论曲线与实验曲线基本吻合。

3.2 调谐过程中带宽与 $\omega(L)$ 的关系

实验中也同时观察到光纤光栅的布拉格反射带宽 $\Delta\lambda_{max}^l$ 不随 $\omega(L)$ 的变化而变化, 实验结果如图4所示。可见在实验误差允许的范围内, 可认为上述设计的梁用于调谐时, 能保证被调谐光栅的反射带宽不变, 这意味着调谐过程中, 梁沿轴向应变不会呈现梯度分布, 光栅各格栅被均匀展宽, 且不同位置的折射率变化程度一致, 从而不出现啁啾现象。

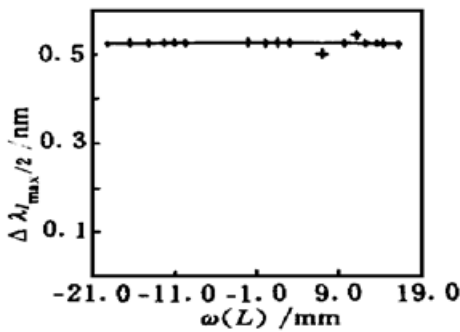


Fig. 4 Relationship between the deflection and the half-width of Bragg reflected spectrum

结果如图4所示。可见在实验误差允许的范围内, 可认为上述设计的梁用于调谐时, 能保证被调谐光栅的反射带宽不变, 这意味着调谐过程中, 梁沿轴向应变不会呈现梯度分布, 光栅各格栅被均匀展宽, 且不同位置的折射率变化程度一致, 从而不出现啁啾现象。

光纤光栅与悬臂梁间的粘贴质量对调谐来说十分重要。自由状态下光纤光栅的反射谱如图5(a)所示, 经过一般的粘贴处理, 其反射谱形状如图5(b)所示, 甚至更为复杂。选用特殊的粘合剂, 并经独特的工艺处理, 调谐过程中谱的形状保持不变[如图5(c)所示]。

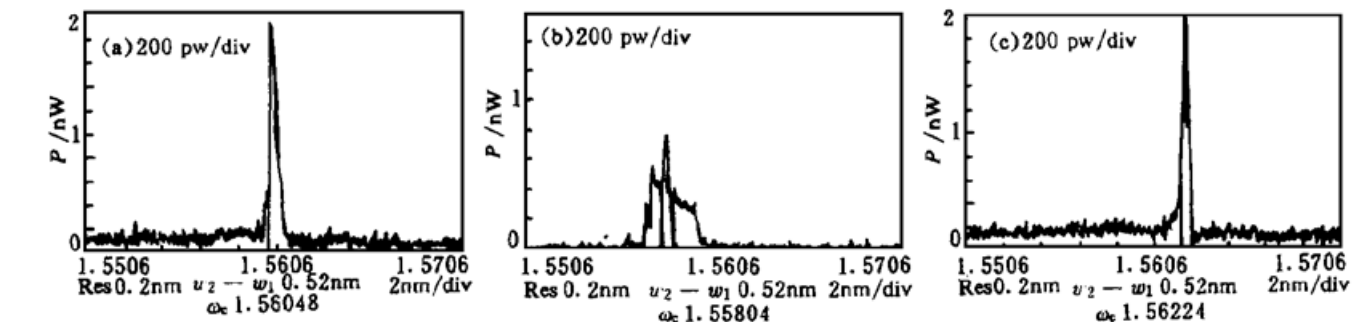


Fig. 5 The dependence of the forms of the reflected spectrum on the quality of pasting. (a) Free state, (b) Regular pasting, (c) Rigid pasting, P is the power of reflected wave

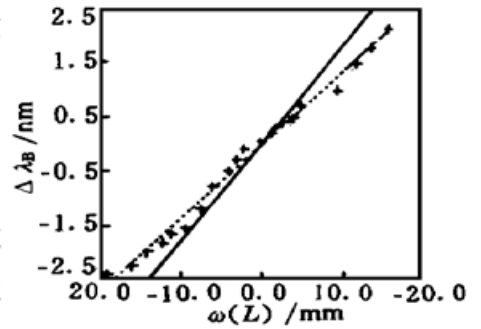


Fig. 3 Bragg reflection wavelength shift as a function of deflection

稍加改造,图 2 所示的装置可用作位移传感器,通过观察光纤光栅布拉格反射波长的改变可实时监测自由端垂直于轴向的位移变化。

结 论 均质等厚、等腰三角形悬臂梁可用于光纤光栅的线性无啁啾调谐。由于可对梁自由端的挠度进行精密控制,因此该调谐方法可用来对光纤光栅反射波长进行微调。这种无啁啾线性调谐装置不仅可用来研制可调谐激光器,也可充当光纤光栅传感网络中的寻址器以及光纤光谱仪的波长扫描器等,因此该技术有望得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) : 420~ 422
- [2] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23) : 1979~ 1981
- [3] Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10) : 822~ 823
- [4] 陈章渊,张佰成,朱立新等. 磁调谐的光纤光栅分插复用器. 全国第八次光纤通信暨第九届集成光学学术会议论文集,北京:中国建材工业出版社,1997. 759~ 761
- [5] Arce-Diego J L, Lopez-Ruisanchez R, Lopez-Higuera J M *et al.*. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9) : 603~ 605
- [6] Xu M G, Geiger H, Archambault J L *et al.*. Novel interrogating system for fiber Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17) : 1510~ 1511
- [7] Komukai T, Miyajima Y, Nakazawa M. In-line fiber grating-type optical bandpass filter tuned by applying lateral stress. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(3A) : L306~ L308
- [8] 刘志国,张艺兵,开桂云等. 新型光纤光栅线性调谐方法. 光学学报, 1998, **18**(12) : 1731~ 1734
- [9] 余有龙,刘治国,董孝义等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐. 光学学报, 1999, **19**(5) : 621~ 625

No-Chirped Linearly Tuning Technique for Fiber Bragg Grating with a Cantilever Beam

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

Geng Shuwei

nstitute of Architecture and Civil Engineering, Harbin Architectural University, Harbin 150001)

(Received 7 April 1998)

Abstract A kind of uniform density and thickness isosceles triangle cantilever beam is designed to realize linear tuning of Bragg wavelength of fiber grating without chirping by adjusting the deflection of the free end that is the vertex part of the triangle. The tuning is demonstrated experimentally within the range of 4.5 nm. After introducing a correction index $\eta = 0.71$, experimental results agree with the theoretical value. The form of the reflected spectrum is related to the quality of pasting between fiber Bragg grating and the beam.

Key words fiber Bragg grating, linear tuning, chirping, cantilever beam.