

利用悬臂梁将均匀周期光纤光栅变为 啁啾光纤光栅*

余有龙 刘志国 关柏鸥 董孝义

(南开大学现代光学研究所 天津 300071)

提要 利用均质、等厚及等腰梯形的悬臂梁,对刚性粘贴其表面的光纤光栅的布拉格反射中心波长在 1557.68~1564.2 nm 范围内进行了线性调谐,同时带宽为 0.52 nm 的均匀周期的光纤光栅被调谐成带宽为 2.52 nm 的啁啾光栅,且啁啾量可调。随着带宽的增加,反射谱的峰值功率呈减弱的趋势。

关键词 光纤光栅,啁啾光栅,悬臂梁,调谐

1 引 言

标准电信光纤铺设的通信网已遍布全球,人们力图用它进行高速、大容量、长距离的信号传输。该类光纤的几个通信窗口中,1.33 μm 处虽然信号能进行无色散传输,但损耗较大,而 1.55 μm 处损耗极小,却有一定的色散。因此 1.55 μm 窗口的发展更具潜力,也是新一代光纤光通信发展的必然。掺铒光纤放大器(EDFA)解决了信号传输过程中的衰减问题后,色散引起信号失真就成为制约光纤通信进一步实用化的关键。考虑啁啾光纤光栅(CFBG)体积小、插入损耗较低、带宽较宽,并能提供负色散,它既是理想的色散补偿器件^[1~4],又具备脉冲压缩功能^[5],因此有必要研制这种无源器件。目前相位掩模成栅技术已很成熟,然而不同要求的啁啾掩模板不易获得,且价格昂贵,所以怎样将均匀周期的光纤光栅(FBG)按要求调制成 CFBG 就尤其显得重要了。

J. Lauzon^[6], P. C. Hill^[7] 和 J. L. Cruz^[8] 曾分别利用温度梯度和软胶中的应力梯度以及非均匀磁场将 FBG 变为 CFBG,这些方法不便操作,难以实行编程控制。本文介绍一种利用等厚、梯形悬臂梁上应力的梯度分布引起光栅各格栅间距和折射率发生变化从而将均匀周期光纤光栅变为一定范围内啁啾量可调的啁啾光栅的方法。

2 梯形悬臂梁调制 FBG 的原理

图 1 中,外力 P 垂直作用于长度为 L 的悬臂梁的自由端 Q ,梁的各位置均产生应力。中性面 XOY 上应力为零, XOY 的上方产生拉应力,而下方则出现压应力。若将长度为 l 的 FBG 沿轴向

* 国家自然科学基金重点项目资助课题。

收稿日期: 1998-04-17; 收到修改稿日期: 1998-06-16

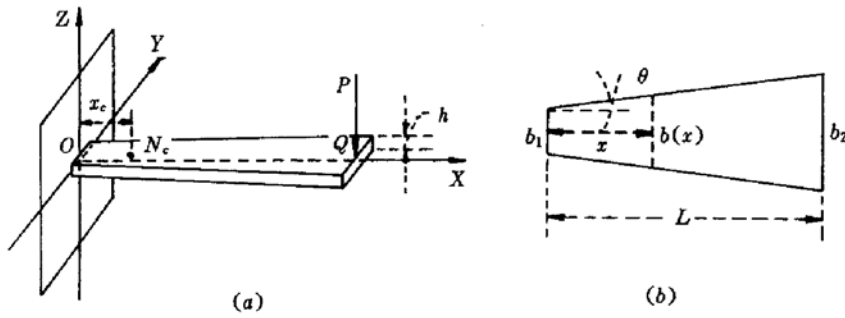


图 1 用于调谐的等腰梯形悬臂梁示意图

(a) 结构图; (b) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of an isosceles trapezoid-shaped cantilever beam used for wavelength tuning

(a) structural drawing; (b) vertical view

刚性粘贴于梁的上表面, 其中央位置处在与固定端相距 x_c 的 N_c 点, 在应力作用下, FBG 上与固定端相距 x 的考察点处的形变使得光栅常数 Λ 发生变化, 同时弹光效应决定了有效折射率 n_e 的大小也会改变, 两者分别为

$$\Delta\Lambda/\Lambda = \varepsilon_x \quad (1a)$$

$$\Delta n_e/n_e = -P_e \varepsilon_x \quad (1b)$$

式中 P_e 为有效弹光系数。 Λ 和 n_e 构成对 FBG 格栅间光程的总贡献, 因此应力将影响 FBG 的反射波长。温度不变时, 根据 (1a), (1b), 结合 $\lambda_B = 2n_e\Lambda$, 应力引起的布喇格反射中心波长的相对漂移量为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\varepsilon_x \quad (2)$$

考虑轴向应变 ε_x 与梁的杨氏模量 E , 考察点位置 $x (x \in [x_c - \frac{1}{2}, x_c + \frac{1}{2}])$, 梁截面的形状以及 P 的大小有关

$$\varepsilon_x = zP(L - x)/EI_Y \quad (3)$$

式中 I_Y 为考察点处梁截面的惯性矩, 对矩形截面梁

$$I_Y = b(x)h^3/12 \quad (4)$$

可见 ε_x 沿轴向呈梯度分布, 这样 (2) 式可写成

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1 - P_e}{E} \frac{z(L - x)}{I_Y} P \quad (5)$$

设计图 1(b) 所示的均质、等厚、等腰梯形悬臂梁, 较大尺寸的底边作为自由端。其上、下底尺寸分别为 b_1 和 b_2 , 厚度为 h , 考察点与中性面间距 $z = h/2$ 。(5) 式可写为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{6(1 - P_e)}{Eh^2} \frac{L - x}{b_1 + 2x\tan\theta} P \quad (6)$$

(6) 式反映了 $\Delta\lambda_B$ 对 P 呈线性关系, 这说明调节 P 可以连续线性地调节 FBG 反射波的中心波长, 而 $\Delta\lambda_B$ 对 x 的依赖关系表明经该梁调谐后 FBG 变为 CFBG。 $\Delta\lambda_B$ 随 x 的减小而增大, 一方面表明靠近固定端粘贴的 FBG 的波长漂移量较大, 另一方面也反映了 FBG 接近固定端的部分较远离固定端的部分获得的调谐量大, 这意味着越接近固定端粘贴光栅, 调谐后得到的啁啾量越大。

根据 (6) 式, 不难得出 FBG 上任意两位置 x_1, x_2 处布喇格反射的波长差为

$$\lambda_{B1} - \lambda_{B2} = \frac{6(1 - P_e)}{Eh^2} \frac{(x_2 - x_1)(b_1 + 2L\tan\theta)}{(b_1 + 2x_2\tan\theta)(b_1 + 2x_1\tan\theta)} P\lambda_B \quad (7)$$

光栅两端波长差最大,其值为 $\frac{6(1 - P_e)}{Eh^2} \frac{1(b_1 + 2L\tan\theta)}{(b_1 + 2x_2\tan\theta)(b_1 + 2x_1\tan\theta)} P\lambda_B$ 。简单分析可知减小 b_1 , 增大 b_2 和 l , 可以提高该装置的啁啾调谐能力, 但 b_1 太小势必影响梁的弯曲刚度, 以至容易折断, 因此它应该保持一定的值。 l 值一定时, $\lambda_{B1} - \lambda_{B2}$ 随 x_1 减小而增大, 这也说明靠近固定端粘贴可以提高该装置的啁啾调谐能力。

如果 P 的作用方向垂直于梁的轴向上, 则不同位置的格栅被压缩的程度不同, FBG 也将被调谐成 CFBG, 波长反向漂移的同时, 带宽也会变化。

3 实验结果

为验证上述设计的梁可用来将均匀周期 FBG 调谐成 CFBG, 且啁啾量可调, 不妨设计图 2 所示的实验方案。有机玻璃制成的梁, 其尺寸为 $L = 11.3 \text{ cm}$, $x_c = 0.75 \text{ cm}$, $b_2 = 17 \text{ mm}$, $b_1 = 8.8 \text{ mm}$, $h = 2.5 \text{ mm}$ 。实验中将自由状态下中心波长 $\lambda_{B0} = 1.5607 \mu\text{m}$, 半宽为 0.52 nm , 长度为 $l = 15 \text{ mm}$ 的 FBG 的中央部位固定于 N_c 处。宽带光源 BBS 的峰值波长为 $1.536 \mu\text{m}$, 其带宽为 85.6 nm 。光谱分析仪 OSA 用来检测 FBG 反射波中心波长 λ_b 以及带宽 $\Delta\lambda_{l_{\max}/2}$, 为了获得较高的精度, 取 $\text{Res} = 0.2 \text{ nm}$, $\text{AVR} = 100$ 。耦合器 3 dB 一方面将光源发出的光耦合进入 FBG, 另一方面将 FBG 反射回来的光耦合进入 OSA 以便观察。

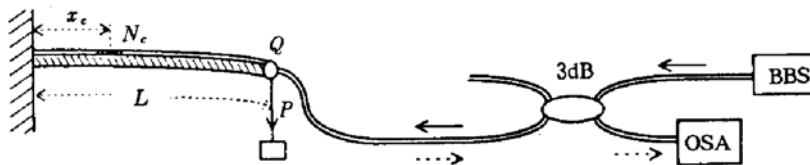


图 2 用于 FBG 调谐的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup used for FBG tuning

3.1 $\Delta\lambda_B$ 与 P 的关系

实验中通过添加砝码来增加 P 的大小。很容易观察到 FBG 的布喇格反射中心波长的漂移量随 P 值的增加而增大, 两者间呈明显的线性关系(见图 3 中的虚线所示)。熔硅的 $P_e = 0.22^{[9]}$, 有机玻璃的杨氏模量 $E = 2.744 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$, 则可画出由(6)式确定的绝对漂移量 $\Delta\lambda_B$ 随 P 变化关系的理论曲线(图 3 中实线所示)。造成实验与理论曲线间出现差异的主要原因有二: (1) 引用的 P_e, E 的数值与所使用的 FBG 的实际值不完全相符; (2) FBG 与梁间刚性粘贴得不太理想, 以至调谐过程中 FBG 与梁间出现相对移动, 这一点难以克服, 所以实际使用时(6)式应添加修正因子 η ($\eta \in (0, 1)$), 变为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \eta \frac{6(1 - P_e)}{Eh^2} \frac{L - x}{b_1 + 2x\tan\theta} P \quad (6')$$

这里若取 $\eta = 0.712$, 则理论计算与实验结果便能较好地吻合。

3.2 反射谱带宽(FWHM)与 P 的关系

随着 P 的增加, $\Delta\lambda_B$ 增加的同时, 反射谱的带宽 $\Delta\lambda_{l_{\max}/2}$ 也发生变化, 图 4 便是两者间的实验关系。不难看出无论 FBG 是被压缩或是被拉伸, $\Delta\lambda_{l_{\max}/2}$ 均随 P 值的增加而迅速地增大。所测带

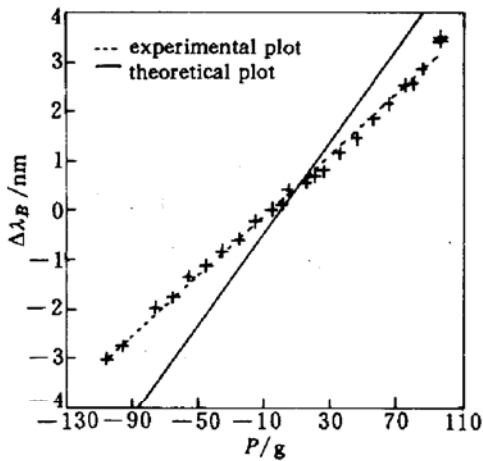


图 3 波长漂移量与外力间关系曲线

Fig. 3 Plots of the wavelength shifts of the FBG reflected wave vs the applied force

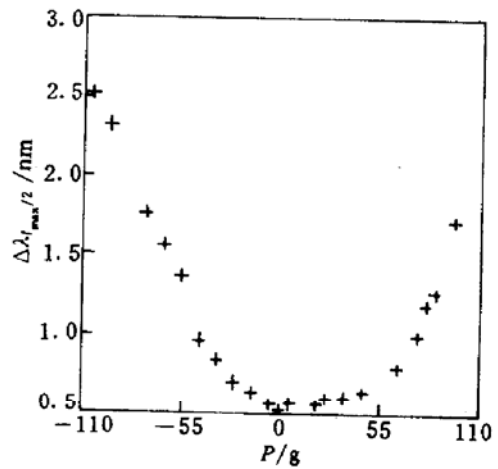


图 4 FBG 带宽与外力间的关系

Fig. 4 Relationship between the bandwidth $\Delta\lambda$ (FWHM) of the reflection spectrum of FBG and the applied force

宽应该是 $P = 0$ 时带宽、光栅中间部位的格栅变化和啁啾效应引起的附加带宽综合作用的结果,后者乃是造成带宽增加的主要原因。计算可知光栅两端的波长差值为 $1.223 \times 10^{-2} \times P(\text{nm})$ (这里 P 以 g 为单位),它是啁啾引起的带宽增量。外力 P 的范围,取决于 FBG 和梁的承受能力,本实验中 $-150 \text{ g} < P < 150 \text{ g}$ 。

实验中还观察到,随着带宽的增加,反射谱的峰值功率呈下降的趋势(见图 5 所示),这是

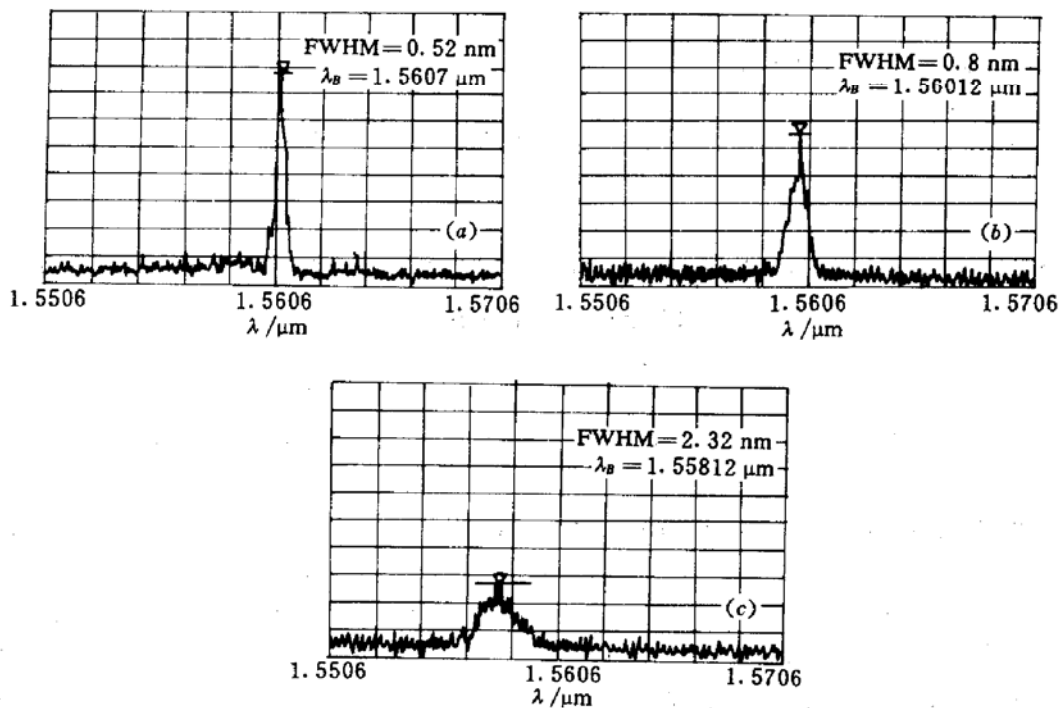


图 5 不同外力作用下光纤光栅的反射谱

Fig. 5 FBG reflection spectrum under different applied forces

(a) $P = 0 \text{ g}$; (b) $P = -25.5 \text{ g}$; (c) $P = -90 \text{ g}$

能量分布在众多波长上的结果。

以上结果是在室温下获得的。实验证明,如果环境温度不变,上述结果具备可重复性。

4 结 论

调谐过程中,均质、等厚梯形悬臂梁表面应力分布的梯度值随 P 增加而增大,以至于粘贴其上的 FBG 不同部位的格栅间光程出现梯度变化,造成原本均匀周期的 FBG 变成 CFBG,且啁啾量随 P 的增加而增大。 $-105.47 \sim 95.47$ g 范围内调节作用在自由端的外力 P 的大小,可以在 $1557.68 \sim 1564.2$ nm 波长范围内线性地调节 FBG 的布喇格反射中心波长,同时带宽在 $0.52 \sim 2.52$ nm 内变化。这种装置结构简单、容易操作,结合计算机技术还可实现编程控制,因此它可望应用于色散补偿、孤子通信等光电子技术领域。

参 考 文 献

- 1 W. H. Loh, R. I. Laming, N. Robinson *et al.*. Dispersion compensation over distances in excess of 500 km for 10-Gb/s system using chirped gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(7):944~946
- 2 D. Taverner, D. J. Richardson, S. Barcelos *et al.*. Dispersion compensation of 16 ps pulses over 100 km of step-index fibre using cascaded chirped fibre gratings. *Electron. Lett.*, 1995, 31(12):1004~1006
- 3 J. A. R. Williams, I. Bennion, K. Sugden *et al.*. Fibre dispersion compensation using a chirped in-fibre Bragg grating. *Electron. Lett.*, 1994, 30(12):985~987
- 4 K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo *et al.*. Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Opt. Lett.*, 1994, 19(1):1314~1316
- 5 J. A. R. Williams, I. Bennion, L. Zhang. The compression of optical pulses using self-phase-modulation and linearly chirped Bragg-gratings in fibers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, 7(5):491~493
- 6 J. Lauzon, S. Thibault, J. Martin *et al.*. Implementation and characterization of fiber Bragg gratings linearly chirped by a temperature gradient. *Opt. Lett.*, 1994, 19(23):2027~2029
- 7 P. C. Hill, B. J. Eggleton. Strain gradient chirp of fiber Bragg gratings. *Electron. Lett.*, 1994, 30(14):1172~1174
- 8 J. L. Cruz, A. Diez, M. V. Andres *et al.*. Fibre Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields. *Electron. Lett.*, 1997, 33(3):235~236
- 9 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, 17(6):420~422

Transforming a Uniform Fiber Grating into a Chirped One Using a Cantilever Beam

Yu Youlong Liu Zhiguo Guan Baiou Dong Xiaoyi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract Employing a uniform density and thickness isosceles trapezoid-shaped cantilever beam, the central wavelength of the reflected wave of a fiber Bragg grating, which is pasted on the surface of the beam along the beam axis, is linearly tuned within the range of 1557.68 to 1564.2 nm experimentally. At the same time, the original uniform period fiber grating with a width of 0.52 nm (FWHM) is transformed into a chirped one which is with the maximum bandwidth of 2.52 nm and the chirp is tunable. The peak power of the reflection spectrum of the tuned grating decreases with broadening of the bandwidth.

Key words fiber Bragg grating, chirped grating, cantilever beam, tuning