

文章编号: 0253-2239(2001)11-1309-04

# 利用光纤光栅在双侧悬臂梁中的啁啾实现对挠度和应力的传感研究\*

张伟刚 董新永 赵春柳 开桂云 赵启大 袁树忠 刘志国 董孝义  
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 报道一种利用双侧悬臂梁展宽光纤光栅带宽实现对挠度和应力线性传感的新方法。理论研究与实验结果表明, 光纤光栅的带宽对挠度及外力均很敏感, 并呈线性关系。实验上传感范围超过 17 nm, 传感灵敏度分别达到 0.658 nm/mm 及 5.32 nm/N。

**关键词:** 光纤光栅; 啁啾效应; 双侧悬臂梁; 带宽; 线性传感

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 光纤光栅作为一种新型的光无源器件, 因其体积小、与光纤系统充分兼容、可对光波选频等独特的优良特性, 在传感领域受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。在利用光纤布拉格光栅(FBG)进行传感器研制方面, 人们提出了多种设计方法。从对光纤光栅的作用方式而言, 有机械传感<sup>[2~8]</sup>、电磁传感<sup>[9,10]</sup>、热传感<sup>[11,12]</sup>等; 从对波长的响应形式而言, 又有线性传感与非线性传感。上述方法各有所长, 适合于不同的传感系统需求。

机械传感器形式简便, 易于调控, 发展迅速, 已经制作出了多种基于纵向应力(使光纤布拉格光栅轴向拉伸与压缩<sup>[2,3]</sup>)、横向应力(使光纤布拉格光栅侧向弯曲<sup>[4~6]</sup>)及扭转应力<sup>[7~8]</sup>分别作用的、性能良好的光纤光栅传感器件。近年来, 利用光纤光栅的啁啾效应进行传感研究引起了人们的兴趣<sup>[13,14]</sup>。本文将光纤布拉格光栅粘接于弹性梁的中部表面, 设计成双侧可调的悬臂梁结构进行传感实验。报道了一种利用双侧悬臂梁展宽光纤布拉格光栅带宽对位移和应力进行线性传感的实验结果, 建立了光纤光栅带宽线性传感的新方法。研究表明, 该传感方法具有传感范围大, 线性响应度高、温度不敏感、复用性好等优点, 可望在光纤传感领域中得到实际应用。

## 2 基本原理

本文设计的光纤布拉格光栅双侧悬臂梁结构如图 1 所示。设  $L$ 、 $b$ 、 $h$ 、 $E$  分别为弹性梁的长度、宽度、厚度及杨氏模量。梁的中部固定, 区间为  $\delta$ , 使两端自由可调成为双侧悬臂梁。将原长为  $l$  的光纤布拉格光栅沿梁的轴向刚性粘接于上表面, 固定端将其隔离为相等的两部分。由图 1 可知, 梁自由端在侧向力  $F$  作用下产生挠度  $\omega$ (侧向位移)时, 其应变使光纤光栅右侧拉伸而使左侧压缩, 从而可实现光纤光栅双向传感。取梁轴向为  $x$  轴, 梁厚方向为  $y$  轴。由于双侧悬臂梁的对称性, 为使问题简化, 选择右侧悬臂梁分析应变情况。根据材料力学原理, 当自由端挠度为  $\omega$  时, 距固定端  $x$  处梁沿轴向的应变为

$$\epsilon_x = \frac{6(L - 2x)h\omega}{L^3}, \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \frac{3(L - 2x)F}{Ebh^2}. \quad (2)$$

由图 1 可知, 右侧悬臂梁上光纤布拉格光栅应变作用区间可分为两段: 在区间  $[\delta/2, (l - \delta)/2]$  上, 光纤布拉格光栅应变沿  $x$  轴方向呈均匀梯度分

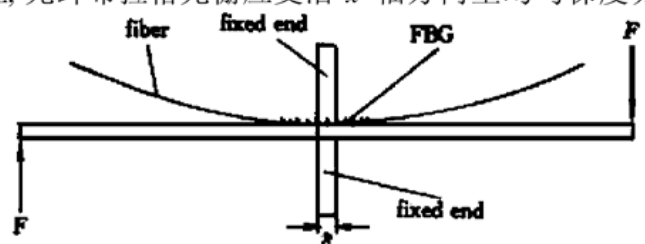


Fig. 1 Structure of FBG bilateral cantilever beam

\* 国家博士点基金和天津市科技攻关项目(003104011)资助课题。

布; 在区间 $[0, \delta/2]$ 上, 理论上光纤布拉格光栅应变变为零, 而实际上, 由于弹性梁的连续性及固定端的非线性等因素, 使得光纤布拉格光栅应变在此区间上并非是跃变的, 而是呈连续变化并在 $\delta/2$ 处达到极大值。左侧悬臂梁上光纤布拉格光栅应变分析与此相同。双侧悬臂梁应变分布如图 2 中的实线所示。

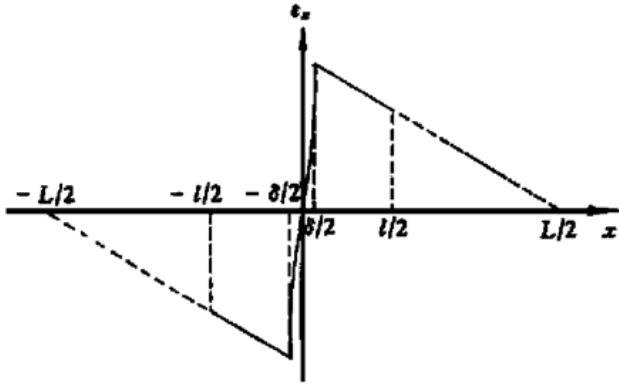


Fig. 2 Distribution of FBG strain on bilateral cantilever beam

大量研究表明, 应变可以改变光纤光栅常数及光栅位置的折射率, 使光纤光栅反射(或透射)波长 $\lambda_B$ 产生一定的漂移量。在恒温条件下, 光纤光栅中心波长的变化 $\Delta\lambda_B$ 与应变 $\varepsilon_x$ 满足如下关系式

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \varepsilon_x, \quad (3)$$

式中 $P_e = (n_{\text{eff}}^2/2)[(1 - \mu)P_{12} - \mu P_{11}]$ 为有效弹光系数,  $n_{\text{eff}}$ 为导模的有效折射率,  $\mu$ 为纤芯材料的泊松比,  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 为弹光系数。

根据图 2, 由于 $L \gg l$ , 梁的自由端处应变为零, 故在侧向力 $F$ 的作用下, 由于光纤布拉格光栅在整个应变区间上的准梯度分布, 均匀布拉格光纤光栅将变为准梯度型啁啾光纤光栅(CFBG)。考虑到双侧悬臂梁上光纤布拉格光栅应变的对称性, 若两侧同时施以侧向力 $F$ , 则反射谱将以光纤布拉格光栅自由中心波长 $\lambda_B$ 为对称中心向长波和短波两个方向扩展或压缩。因此, 这种准梯度型啁啾光纤光栅将反射一系列布拉格谱线, 从而形成具有一定带宽的反射谱。

由于啁啾光纤光栅的反射谱不是由单一栅格所决定, 而是啁啾光纤光栅上所有栅格集体作用的贡献, 根据(3)式, 其带宽应由光纤布拉格光栅应变的极大值所决定。而且, 只有将光纤布拉格光栅粘接到悬臂梁的固定端, 它才能获得最大的应变。于是, 将(1)式(2)式代入(3)式, 并注意到光纤光栅粘接于固定端处的对称性, 取 $x = \delta/2$ , 即得到啁啾光纤光栅带宽 $\Delta\lambda_{Bm}$ 与悬臂梁挠度 $\omega$ 和侧向力 $F$ 之间的关系分别为

$$\Delta\lambda_{Bm} = \frac{6(1 - P_e)(L - \delta)\lambda_B h}{L^3} (2\omega) = 2\omega\kappa_{\omega m}, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{Bm} = \frac{3(1 - P_e)(L - \delta)\lambda_B}{Ebh^2} (2F) = 2F\kappa_{Fm}, \quad (5)$$

式中 $\kappa_{\omega m}$ 、 $\kappa_{Fm}$ 分别为挠度 $\omega$ 和应力 $F$ 的传感灵敏度。在本文中, 梁的参数选取如下:

$$n_{\text{eff}} = 1.46, \quad \mu = 0.16, \\ P_{11} = 0.12, \quad P_{12} = 0.27,$$

则

$$P_e = 0.22, \quad L = 130 \text{ mm}, \\ b = 8.3 \text{ mm}, \quad h = 1.8 \text{ mm}, \\ l = 15 \text{ mm}, \quad \delta = 3 \text{ mm}, \\ E = 2.744 \times 10^3 \text{ N/mm}^2.$$

光纤布拉格光栅的自由波长

$$\lambda_B = 1534.74 \text{ nm}.$$

于是, 得到理论传感灵敏度分别为

$$\kappa_{\omega m} = 0.747 \text{ nm/mm}, \\ \kappa_{Fm} = 6.18 \text{ nm/N}.$$

(4)式(5)式反映了光纤光栅反射谱的带宽 $\Delta\lambda_{Bm}$ 与梁的挠度 $\omega$ 及侧向力 $F$ 均呈线性关系。这说明, 利用光纤光栅带宽的变化信息, 可以对应力(应变)、挠度(位移)等参量进行线性传感测量与控制。

另一方面, 由于恒温下的弹性梁各处温变相同, 故温度变化对刚性粘接于梁上的光纤光栅的栅格改变是相同的, 从而导致光纤光栅反射带宽的整体漂移。因此, 这种利用光纤光栅带宽的传感方法消除了温度对测量结果的影响, 即传感测量结果对温度是不敏感的。

### 3 实验及分析

本实验使用的光纤光栅是用高掺铈光敏光纤以相位掩膜法自行研制的, 测得其反射率为 90%, 反射带宽约为 0.4 nm。光谱仪(OA)的分辨率为 0.2 nm, 用于测定光纤布拉格光栅反射波长 $\lambda_B$ 以及带宽 $\Delta\lambda_{Bm}$ ; 波长扫描平均次数为 20; 3 dB 耦合器一方面将自制宽带光源(BBS)发出的光耦合进入光纤布拉格光栅, 另一方面将光纤布拉格光栅反射回来的光耦合进入光谱仪以便观察。双侧悬臂梁自由端处的挠度由精密位移给进装置步进调节, 侧向力由应力计精确测定。

图 3 为采用双侧悬臂梁实验获得最大带宽时的光纤光栅反射谱, 此时带宽  $\Delta \lambda_{Bm} \approx 17.8 \text{ nm}$ 。反射谱以光纤布拉格光栅自由中心波长  $\lambda_B$  为对称中心, 这与前面的理论分析相一致。

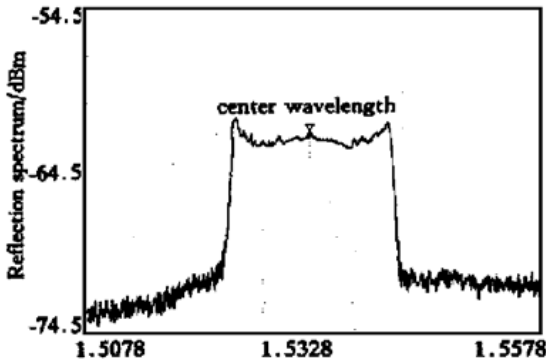


Fig. 3 Reflection spectrum of CFBG when  $\Delta \lambda_{Bm} \approx 17.8 \text{ nm}$

图 3 中的反射谱上沿具有一定的不平坦度, 并以  $\lambda_B$  为对称中心呈现一定的下凹沿。反射谱的不平坦性与光纤布拉格光栅应变梯度的不均匀性、固定端材料的非刚性、压力大小及均匀性、 $\delta$  区间的宽窄等因素有关。在  $17.8 \text{ nm}$  范围内, 不平坦度小于  $1.75 \text{ dB}$ 。

图 4 为光纤光栅带宽  $\Delta \lambda_{Bm}$  与双侧悬臂梁自由端的挠度( $2\omega$ )和侧向力( $2F$ )的实验关系曲线。

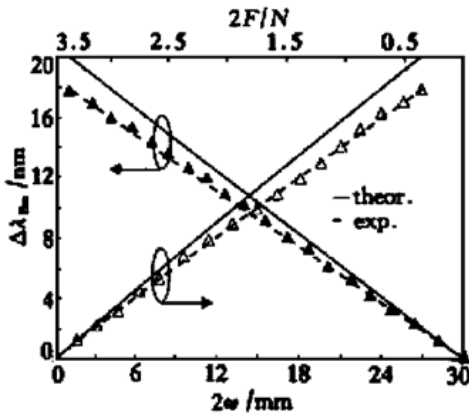


Fig. 4 The relationship between CFBG bandwidth  $\Delta \lambda_{Bm}$  and deflection  $2\omega$  (or lateral force  $2F$ ) of bilateral cantilever

由图 4 可见,  $\Delta \lambda_{Bm}$  与  $\omega$ 、 $F$  均呈明显线性关系, 二直线实验拟合方程分别为:

$$\Delta \lambda_{Bm} = 0.658(2\omega), \quad \Delta \lambda_{Bm} = 5.32(2F),$$

其线性拟合度均达到 0.998, 这表明其线性度是很好。实验传感灵敏度分别为

$$\kappa_{\omega m} = 0.658 \text{ nm/mm}, \quad \kappa_{Fm} = 5.32 \text{ nm/N}.$$

文献[6]利用悬臂梁进行侧向位移(挠度)传感实验时, 得到  $0.32 \text{ nm/mm}$  的灵敏度, 本文实验结果与之相比, 则提高了约 2.1 倍。实验中, 要保证双侧悬臂梁中部固定良好, 这对传感测量的质量影响很大。实验发现, 固定光栅段  $\delta$  的大小对反射谱有影响。

在双侧悬臂梁两端均受侧向力  $F$  作用的条件下, 当  $\delta$  较大时, 反射谱中  $\lambda_B$  处(光纤布拉格光栅自由态)的谱线峰值较高, 反射谱其余部分则较平坦。反之, 当  $\delta$  较小直至趋于零时, 反射谱的中部  $\lambda_B$  处的谱线峰值将由高向低趋于平缓, 逐渐形成一个带下凹沿的较平坦的反射谱。这时, 若应力  $F$  仅作用于单侧悬臂梁, 则反射谱的中部  $\lambda_B$  处的谱线峰值将逐渐消失, 反射谱带宽变窄。

本文实验结果与理论预测值虽很接近, 但有一定差异。这是由于光纤光栅、粘结剂及弹性梁属于非同性材料, 其粘接并非完全刚性所致, 而光纤光栅的质量、固定材料性质(如刚性化程度等)及固化程度也会直接影响反射谱的形状, 进而影响传感效果。因此, 在实际应用时, 根据实验结果, (4)式、(5)式需分别加一修正因子, 其关系式可修正为

$$\Delta \lambda_{Bm} = x_{\omega} \kappa_{\omega m} \omega, \tag{6}$$

$$\Delta \lambda_{Bm} = x_F \kappa_{Fm} F, \tag{7}$$

其中修正因子  $x_{\omega}$ 、 $x_F \in [0, 1]$ 。在本实验中, 若取  $x_{\omega} = 0.88$ 、 $x_F = 0.86$ , 则理论预测值与实验结果能很好地吻合。

实验表明, 在实验温度  $T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内, 反射波长的带宽  $\Delta \lambda_{Bm}$  基本保持不变, 带宽漂移量不大于  $0.2 \text{ nm}$ , 与实验测量时光谱分析仪的分辨率相当。这验证了采用双侧悬臂梁结构进行光纤光栅带宽传感时, 其测量结果对温度不敏感的理论预测。图 5 为双侧悬臂梁两臂均受侧向力  $F$  作用时的实验结果。

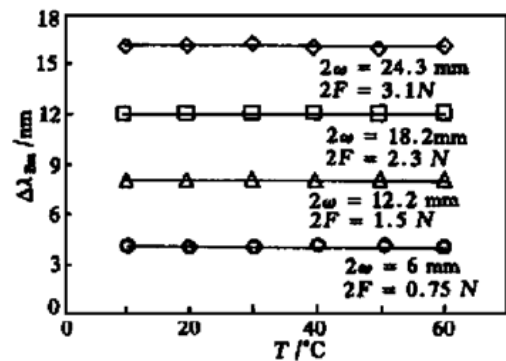


Fig. 5 The relationship between CFBG bandwidth  $\Delta \lambda_{Bm}$  and temperature  $T$

**结论** 设计了一种双侧悬臂梁传感机构, 利用该机构研究并实现了一种光纤光栅带宽传感的新方法。理论分析与实验结果表明, 光纤光栅的带宽对挠度及外力均很敏感, 并呈线性关系。该传感方法具有传感范围大、线性响应度高、温度不敏感、复用性好

等优点,可望在智能结构探测与材料蒙皮技术中得到实际应用。

### 参 考 文 献

- [1] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- [2] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating filter laser. *Opt. Soci. Ameri.*, 1994, **19**(23): 1997~ 1981
- [3] 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): 306~ 308
- [4] Komukai T, Nakazawa M. Tunable single frequency erbium doped fiber ring laser using grating etalons. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(6A): 697~ 680
- [5] 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
- [6] 关柏鸥, 刘志国, 开桂云 等. 基于悬臂梁结构的光纤光栅位移传感研究. *光子学报*, 1999, **28**(11): 983~ 985
- [7] Zhang Weigang, Dong Xiaoyi, Feng Dejun *et al.*. Linearly fiber grating-type sensing tuning by applying torsion stress. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(20): 1686~ 1688
- [8] Zhang Weigang, Feng Dejun, Ding Lei *et al.*. Linear quasi-chirp-free tuning of fiber grating using torsional beam. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(3): 174178
- [9] Cruz J L, Diez A, Andres M V *et al.*. Fiber Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(3): 235~ 236
- [10] Cavaleiro P M, Araujo F M, Ribeiro A B L. Metal coated fiber Bragg grating sensor for electric current metering. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(11): 1133~ 1135
- [11] Lauzon J, Thibault S, Martin J *et al.*. Implementation and characterization of fiber Bragg gratings linearly chirped by a temperature gradient. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 2027~ 2029
- [12] Gupta S, Mizunami T, Yamao T *et al.*. Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25): 5202~ 5205
- [13] Kersey A D, Davis M A, Tsai T. Fiber optic Bragg grating strain sensor with direct reflectometric interrogation. In Proc. 11th Int. Conf. Optical Fiber Sensors, OFS'96, Sapporo, Japan, 1996. 634637
- [14] 董新永, 赵春柳, 宁 鼎 等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的弯曲传感. *光子学报*, 2000, **30**(4): 425428

## Study of Deflection and Stress Sensing Using Fiber Grating Chirp Effect in Bilateral Cantilever Beam

Zhang Weigang Dong Xinyong Zhao Chunliu Kai Guiyun Zhao Qida  
Yuan Shuzhong Liu Zhiguo Dong Xiaoyi

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

(Received 30 October 2000; revised 4 December 2000)

**Abstract:** A new linear sensing method of deflection and stress, in which the fiber grating bandwidth is stretched by using bilateral cantilever beam, is reported. The theoretical studies and the experimental results show that the bandwidth of fiber grating is sensitive and linear to deflection and lateral force. In the experiments, the range of linear sensing is not less than 17 nm. The sensing sensitivities are 0.658 nm/mm and 5.32 nm/N, respectively.

**Key words:** fiber Bragg grating; chirp effect; bilateral cantilever beam; bandwidth; linear sensing