

# 光纤光栅力传感器的无源温漂补偿技术\*

余有龙\*\* 关柏鸥 董孝义 刘志国

(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** 将一光纤光栅沿轴向粘贴于两重叠等腰三角形悬臂梁的交界处进行力传感。理论和实验均证实该无源装置具有自动补偿布拉格波长温漂效应的功能。0~ 0.34 N 力范围内, 实验表明其传感灵敏度达 6.2 nm/N。

**关键词** 光纤光栅, 传感器, 无源补偿。

## 1 引 言

近几年来, 光纤光栅(FBG)传感器由于有广阔的应用前景而倍受青睐。其信息对波长绝对编码、不受电磁场干扰、高灵敏度以及易于复用等特点决定了它在某些领域的应用是不可替代的。引起光纤光栅反射波长变化的因素可以是温度或沿光纤轴向的应力<sup>[1]</sup>, 两者交织在一起, 光纤光栅本身并不能对其加以区别, 所以发展免受温度影响的光纤光栅传感或者能同时鉴别应变与温度变化的技术都非常重要。许多学者在这方面作了不少工作, 其中, 利用径向尺寸不同的光纤连接处光栅作为传感元<sup>[2, 3]</sup>, 其机械性能难以得到保证; 多光栅法<sup>[4, 5]</sup>成本高, 双波长光栅<sup>[6]</sup>不易获得, 而啁啾光栅法<sup>[7]</sup>由于带宽宽而削弱了传感精度。

本文借助特殊设计的悬臂梁, 待测力使得梁表面产生轴向应变, 利用交界处存在应变差而没有温差的特点, 实现了具有温漂自动补偿功能的光纤光栅力传感。

## 2 原 理

满足布拉格条件  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  的光波才能被光纤光栅反射, 作用于光纤光栅的某一物理量发生变化, 引起光栅常数  $\Lambda$  或有效折射率  $n_{\text{eff}}$  改变, 使得布拉格反射波长  $\lambda_B$  出现漂移。若漂移

\* 国家自然科学基金快速响应项目。

\*\* 现通讯地址: 黑龙江大学物理系, 哈尔滨 150080。

收稿日期: 1998-09-28; 收到修改稿日期: 1998-12-28

量  $\Delta\lambda_B$  与该物理量的变化值存在某种联系, 利用光谱仪测出  $\Delta\lambda_B$  后就可以判断光栅部位该物理量的变化程度。

温度和应变这两个独立变化的物理量, 前者通过热膨胀和热光效应影响布拉格反射波长, 而后者则由于改变了光纤光栅的光栅常数和弹光效应引起波长漂移。可表述为<sup>[1]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_x + (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

其中  $\epsilon_x$  为轴向应变,  $\Delta T$  为温差;  $p_e$  为有效弹光系数, 它与光栅部位光纤的伸缩和弹光效应有关,  $\alpha$  和  $\xi$  分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。

均质、等厚、等腰三角状悬臂梁, 顶端为自由端时, 调节自由端挠度可对梁表面轴向任意位置刚性粘贴的光纤光栅实现无啁啾线性调谐<sup>[8]</sup>, 这意味着调谐过程中光栅的各格栅间光程呈相同的变化规律。若将梁设计成图 1 所示形状,  $CD$  边作为固定端的均质、等厚、截面呈

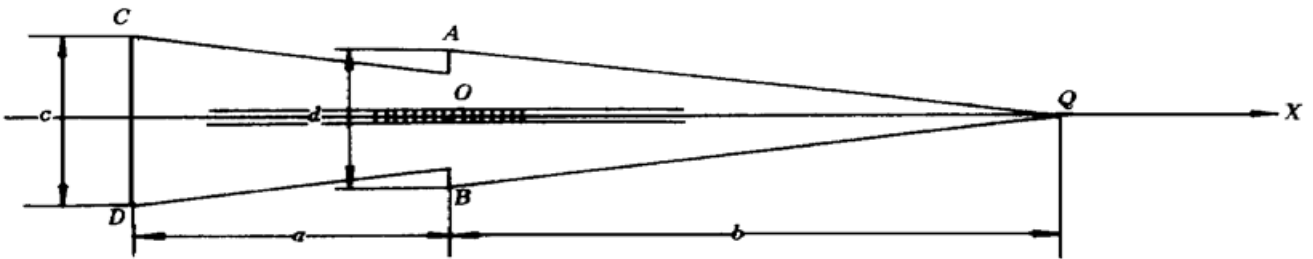


Fig. 1 Schematic diagram of the cantilever beam

矩形的悬臂梁可被认为是两同材料等腰三角状悬臂梁的重叠。垂直于  $CDQ$  所在面的外力  $P$  作用于自由端  $Q$  点时, 梁表面沿轴向出现的应力以  $AB$  为界呈阶跃分布。将长度为  $\rho$  的光纤光栅沿轴向刚性粘贴于  $AB$  附近, 两侧光栅长度接近相等。材料的杨氏模量为  $E$ , 梁的厚度为  $h$ , 矩形截面的惯性矩  $I = f(x)h^3/12$ , 这里  $f(x)$  为距界线  $x$  处截面的宽度。经计算左右两侧轴向应变分别为

$$\epsilon_{x1} = \frac{6P}{Eh^2} \frac{a+b}{c}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{x2} = \frac{6P}{Eh^2} \frac{b}{d}, \quad (3)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的意义如图 1 所示。

假设  $t$  时刻对应温差为  $\Delta T(t)$ , 不计梁本身的重量, 将(2)式、(3)式代入(1)式得到左右两侧光栅的相对漂移量分别为

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_B} = \frac{6P(1 - P_e)}{Eh^2} \frac{a+b}{c} + (\alpha + \xi)\Delta T(t), \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} = \frac{6P(1 - P_e)}{Eh^2} \frac{b}{d} + (\alpha + \xi)\Delta T(t). \quad (5)$$

这样两侧光栅的布拉格反射中心波长差  $\Delta\lambda_{B12}$  为

$$\frac{\Delta\lambda_{B12}}{\lambda_B} = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} = \frac{6(1 - P_e)}{Eh^2} \left( \frac{a+b}{c} - \frac{b}{d} \right) P. \quad (6)$$

可见任意时刻  $\Delta\lambda_{B12}$  与  $P$  成正比, 与环境温度无关。看来如此设计的无源装置用作对作用于梁端并垂直于梁表面的力传感时可自动补偿布拉格温漂效应。

记(6)式右侧的系数为  $K$ :

$$K = \frac{6(1 - P_c)}{Eh^2} \left( \frac{a+b}{c} - \frac{b}{d} \right),$$

则  $K$  与该装置的灵敏度有关。有机玻璃制成的梁  $c = 12.0 \text{ mm}$ ,  $a + b = 120.0 \text{ mm}$ ,  $h = 1.7 \text{ mm}$ , 杨氏模量  $E = 2.7 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$ ,  $b$  取不同值时,  $K$  随  $d$  变化关系的理论曲线如图 2 所示。 $d$  太大不便使用,  $K$  值也不会显著增加, 且本身重力引起系统产生零误差也不能忽略; 取较小  $d$  值时, 随着  $b$  的减小,  $|K|$  迅速增加, 但与自由端太接近, 光栅容易受损。考虑实用性, 不妨取  $b = 40.0 \text{ mm}$ ,  $d = 12.0 \text{ mm}$ , 此时  $K = 4.0 \times 10^{-3} \text{ N}^{-1}$ 。

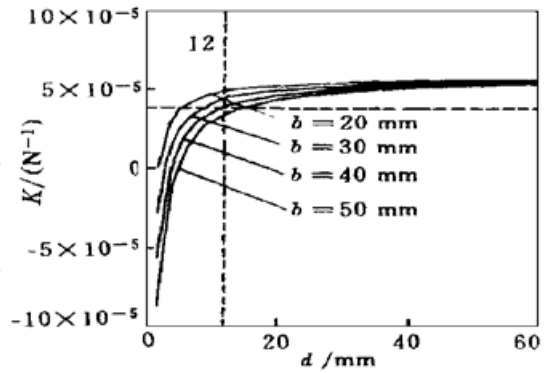


Fig. 2 Plots of  $K$  vs  $d$  for different  $b$

### 3 实验结果

采用图 3 所示的实验装置, 光源为带宽为  $85.6 \text{ nm}$  的发光二极管(LED), 它的工作电流为  $100 \text{ mA}$ , 峰值波长为  $1536 \text{ nm}$ 。所用光纤光栅的长度为  $11.0 \text{ mm}$ , 反射率为  $61\%$ 。温度为  $26^\circ\text{C}$  时, 自由状态下工作波长为  $1565.30 \text{ nm}$ , 带宽为  $0.37 \text{ nm}$ , 其中央部位被固定在距悬臂梁固定端  $80.0 \text{ mm}$  的  $O$  处。有机玻璃制成的上述设计的梁,  $b = 40.0 \text{ mm}$ ,  $h = 1.7 \text{ mm}$ ,  $d = 12.0 \text{ mm}$ , 自由端压力  $P$  由微驱动器提供。

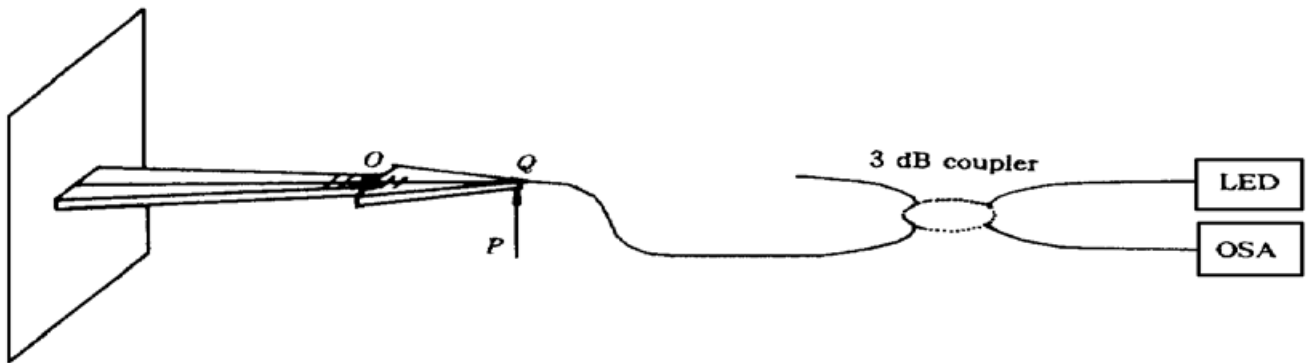


Fig. 3 Experimental setup for applied force sensing. OSA: optical spectrum analyzer

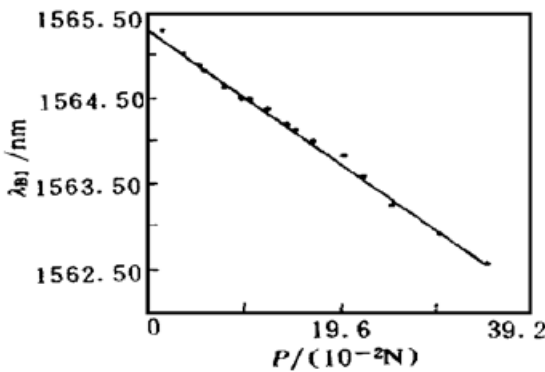


Fig. 4 Relationship between  $\lambda_{B1}$  and  $P$

实验中随着  $|P|$  值的增加, 左右两侧原本重合的布拉格反射光波向同侧漂移(见图 4 所示)的同时相互间逐渐分离(见图 5),  $P > 0$  时  $\lambda_{B1} < \lambda_{B2}$ ;  $P < 0$  时,  $\lambda_{B1} > \lambda_{B2}$ 。图 5(a) 反映了  $\Delta\lambda_{B12}$  与  $P$  间呈明显的线性关系, 实线为(6)式确定的理论曲线, 可见实验结果与理论值相符。0~  $0.34 \text{ N}$  范围内, 实验数据拟合直线的斜率为  $6.2 \text{ nm/N}$ , 它正是该传感器的实际传感灵敏度(未标出), 它与理论值  $6.1 \text{ nm/N}$  间存在少许差异是因为未考虑梁本身的重量。

所使用光纤光栅裸纤的反射波长随温度变化关系实验曲线如图 6 所示, 可见温度对其影响比较明显。而上述悬臂梁传感装置在不同温度下重复力传感实验, 得到与图 5(a) 相同的变化规律。另外也尝试了在同一实验过程中不断改变温度(准静态过程), 尽管两侧光栅各自的反射波长均发生变化, 但两者的差值  $\Delta\lambda_{B12}$  与  $P$  之间关系的变化规律未出现异常现象。这证实

了该装置确实具有良好的自动温漂补偿功能。

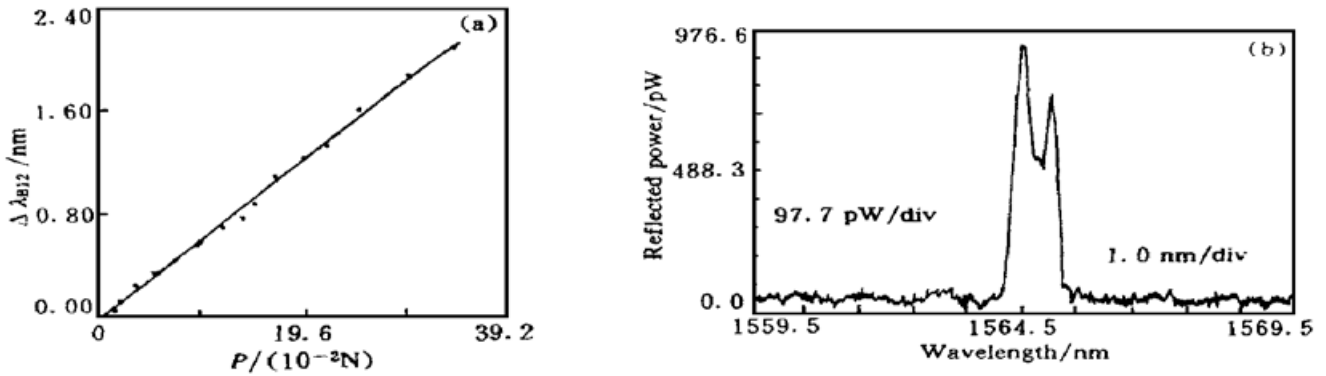


Fig. 5 (a) Relationship between  $\Delta \lambda_{B12}$  and  $P$ , (b) Reflection spectrum correspond to  $P = 10.3$  g

实验中还观察到, 随着  $|P|$  的增加, 无论温度变化与否, 左右两侧反射谱带宽保持 0.37 nm 不变, 这有利于保证读数精度, 也正是设计等腰形状梁的目的。

该装置的分辨率由光谱仪的分辨率和瑞利判据确定, 后者数值与光栅带宽相当, 因此选择窄带宽光栅和高分辨率光谱仪是提高该装置分辨率的重要途径。

利用上述传感装置两侧光栅反射光束的干涉, 通过观测条纹移动情况, 考虑条纹的移动量与  $P$  有关而与  $T$  无关, 因此它也可用来准确地测定  $P$  值并可进一步提高传感精度, 这种干涉计量式传感方法以后将作进一步报道。 $P = 0$  时, 上述装置经定标后可直接用来探测温度; 若自由端挠度作为变量, 挠度变化与自由端压力成正比, 挠度视作待测位移时, 该装置还可用来对位移进行线性传感。

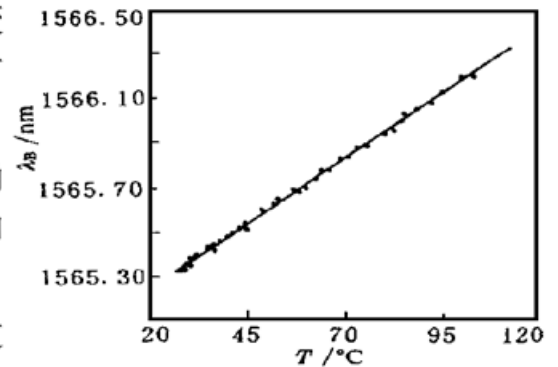


Fig. 6 Relationship between Bragg reflection wavelength  $\lambda_B$  and temperature  $T$

**结 论** 将一定长度的光纤光栅沿重叠的等腰三角状悬臂梁界线处轴向刚性粘贴后可以用来进行无啁啾温漂自动补偿的力传感, 其传感灵敏度达 6.2 nm/N。该技术消除了传感过程中环境温度的影响, 提高了测量的准确度, 且具备多功能传感能力, 因此具有推广应用的价值。

### 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] Song M, Lee B, Lee S B *et al.*. Interometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11) : 790~ 792
- [3] James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg grating Sensor. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12) : 1133~ 1134
- [4] Kanellopoulos S E, Handerek V A, Rogers A J. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3) : 333~ 335
- [5] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9) : 1223~ 1225
- [6] Xu M G, Archambault J L, Reekie L *et al.*. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13) : 1085~ 1087

- [7] Xu M G, Dong L, Reekie L *et al.*. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fiber. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10) : 823~ 825
- [8] 余有龙, 刘志国, 董孝义等. 基于悬臂梁的光纤光栅无啁啾线性调谐. 光学学报, 1999, **19**(7) : 873~ 876
- [9] 余有龙, 刘志国, 董孝义等. 用于光纤光栅线性调谐的悬臂梁结构优化. 光子学报, 1998, **27**(8) : 714 ~ 718
- [10] Yoffe G W, Krug P A, Ouellette F *et al.*. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30) : 6859~ 6861

## Passive Temperature Induced Wavelength-Shift Compensating Technique for Fiber Bragg Grating Force Sensing

Yu Youlong    Guang Boou    Dong Shaoyi    Liu Zhiguo  
(*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 28 September 1998; revised 28 December 1998)

**Abstract** A fiber Bragg grating stuck onto the juncture between two dual-isosceles triangle cantilever beams along the beam axis, which overlaps each other, is employed to act as a force sensor. It is demonstrated in theory and experiment that this passive device can automatically perform compensation for Bragg wavelength shift induced by temperature. Experimental results show that a sensitivity of 6.2 nm/N has been achieved within the working range of 0~ 0.34 N.

**Key words** fiber Bragg grating, force sensor, passive compensating.