

文章编号: 0258-7025(2001)07-0621-04

# 单个光纤光栅实现对位移和温度的同时测量<sup>\*</sup>

董新永<sup>1</sup> 关柏鸥<sup>1</sup> 张颖<sup>1</sup> 开桂云<sup>1</sup> 赵启大<sup>1</sup> 董孝义<sup>1</sup> 姚春德<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南开大学光子技术中心 天津 300071; <sup>2</sup>天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室 天津 300072)

**提要** 结合光纤光栅悬臂梁调谐的特点,采用一种新颖的光纤光栅悬臂梁结构,将光纤光栅粘贴在悬臂梁和固定端基板的结合处,成功地实现了对位移和温度的同时测量。基于光谱分析仪 0.1 nm 的光谱分辨率,实验可得到的位移分辨率为 0.08 mm,温度分辨率为 3.1℃(位移不变时可达 0.73℃),位移测量范围可达 10.5 mm。实验结果与理论分析基本一致。

**关键词** 光纤光栅 悬臂梁 位移传感 温度传感

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Simultaneous Displacement and Temperature Measurement Using One Fiber Bragg Grating

DONG Xin-yong GUAN Bai-ou ZHANG Ying

KAI Gui-yun ZHAO Qi-da DONG Xiao-yi

(*Photonic Technology Center, Nankai University, Tianjin 300071*)

YAO Chun-de

(*National Engine Combustion Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072*)

**Abstract** A novel displacement and temperature fiber Bragg grating (FBG) sensor based on cantilever-structure is presented, and studied both theoretically and experimentally in this paper. FBG is affixed on the adjoiner between the cantilever and a fixed placode. Vertical displacement of the cantilever free end is measured by wavelength shift of FBG due to the strain action inflicted on FBG by the cantilever. The FBG section attached on cantilever is of different sensitivities to strain and temperature from that attached on the placode due to their making from different materials. Due to the spectral resolution of 0.1 nm for spectral analyzer, the resolutions of displacement measurement and temperature measurement are 0.08 mm and 3.1℃, respectively (the latter, with a constant displacement, might be 0.73℃), the measurement range of displacement is 10.5 mm.

**Key words** fiber Bragg grating, cantilever, displacement sensing, temperature sensing

## 1 引言

应用光纤光栅可实现对多种物理量的传感测量,如压力、温度、压强、磁场、电压、电流、微振动、超声波等,因此在传感领域引起极大的研究兴趣<sup>[1~6]</sup>。但光纤轴向应变能力较弱,容易被拉断,因此用于位移传感具有很大的局限性。文献[7]中我们用悬臂梁调谐的方法进行了这方面的初步研究,但受梁材

料热膨胀效应的影响,传感具有较强的交叉敏感效应,影响了传感的精确性。本文在原有的光纤光栅悬臂梁传感研究的基础上,提出了一种新颖的光纤光栅传感方法,该方法继承了悬臂梁光纤光栅传感的优点,操作简便、灵敏度高、动态范围大、光栅损害小,对位移或温度具有良好的线性响应度。该传感装置可实现对温度和位移的同时测量,消除温度引起的交叉敏感效应对传感准确度的影响,可望在智能建筑和皮蒙技术中得到实际应用。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60077012, 69977006)资助项目。

收稿日期: 2000-04-28; 收到修改稿日期: 2000-06-12

## 2 原 理

### 2.1 FBG 的应变和温度响应

光纤布拉格光栅(FBG)的 Bragg 波长由下式决定<sup>[1]</sup>

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为光栅区导模的有效折射率,  $\Lambda$  为栅格周期。由于温度和应力的变化都将引起  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  的改变,因此 FBG 对温度和应力都是敏感的。研究表明,温度和应变引起的光纤光栅 Bragg 波长的移动可表示为<sup>[2]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_{\text{ax}} + (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T \quad (2)$$

式中  $p_e = (n_{\text{eff}}^2/2)[p_{12} - \nu_s(p_{11} + p_{12})]$  为光纤的有效弹光系数,其中的  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为光纤的弹光系数,  $\nu_s$  为泊松比。 $\epsilon_{\text{ax}}$  为光纤光栅的轴向应变,  $\alpha_s = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$  为光纤的热膨胀系数,  $\zeta_s = (1/n_{\text{eff}})(\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$  为热光系数。对于石英光纤,  $p_e \sim 0.22$ ,  $\alpha_s \sim 0.5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ,  $\zeta_s \sim 7 \times 10^{-6}/\text{C}$ <sup>[4]</sup>。

当 FBG 被粘贴或埋置于基底材料中时,基底材料的形变和热膨胀通过应力对 FBG 的作用也可使其 Bragg 波长发生移动。若用  $\alpha_{\text{sub}}$  表示基底材料的热膨胀系数,则此时 FBG 的温度与应变响应可表示为<sup>[4]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_{\text{ax}} + [\alpha_s + \zeta_s + (1 - p_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha_s)]\Delta T \quad (3)$$

通常基底材料的热膨胀系数远大于光纤材料本身的热膨胀系数,即满足  $\alpha_{\text{sub}} \gg \alpha_s$ ,因此(3)式可简化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_{\text{ax}} + [\zeta_s + (1 - p_e)\alpha_{\text{sub}}]\Delta T \quad (4)$$

### 2.2 位移测量原理

FBG 粘贴在由两种不同材料构建的悬臂梁上,如图 1 所示。A 部分是由杨氏模量较小的材料制成的矩形平板梁,B 部分为一固定基板,由热膨胀系数较大、刚度远大于 A 材料的另一种材料制成,A、B 两部分强力粘合对接,表面成一光滑平面。FBG 沿梁长方向粘贴在此面中线上,并确保悬臂梁与基板上均粘贴有相当长度的光栅。悬臂梁自由端发生侧向位移时,粘贴在梁表面上的部分 FBG 会受到由此引起的应力的作用,其 Bragg 波长就会发生移动。由于应力的大小与此位移成正比,所以将待测物体与悬臂梁自由端连接,使其位移方向与悬臂梁侧向位移方向一致,即可通过 FBG 的波长变化实现对待

测物体位移的测量。

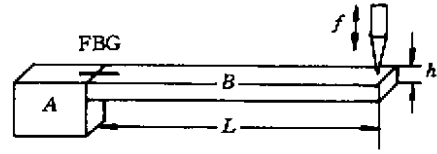


图 1 悬臂梁结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the cantilever beam used in sensing system

由材料力学理论推得,悬臂梁上 FBG 所受应力与侧向位移  $f$  的关系可表示为<sup>[7]</sup>

$$\epsilon = \frac{3h}{2L^3}(L - x_0)f \quad (5)$$

式中,  $h$  为梁的厚度,  $L$  为梁的长度,  $x_0$  为 FBG 粘贴位置到悬臂梁固定端的距离。若本部分 FBG 的长度为  $l_1$ ,则  $x_0 = l_1/2$ 。将(5)式代入(4)式即可得到 FBG 悬臂梁部分的位移和温度响应,关系如下

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{3h}{2L^3}\left(L - \frac{l_1}{2}\right)(1 - p_e)f + [\zeta_s + (1 - p_e)\alpha_{\text{sub}}]\Delta T \quad (6)$$

式中忽略了温度变化对梁长  $L$  的影响,这需要梁材料的热膨胀系数很小。实验中采用位移物体与悬臂梁自由端非固定接触的方法,使梁长保持不变,避开了温度对梁长的影响。

另一部分的 FBG 粘贴在基板上,基板是固定的,且其刚度远大于梁材料的刚度。这样,在梁发生形变时,固定端的弯矩所引起的基板连接处表面的应变要远小于梁固定端的应变,而且随着与连接面的距离增大而迅速衰减。若这部分 FBG 的长度比较长,使光栅的大部分不受此应变的影响,则其中心反射波长也不会受其影响。在此条件下,可以认为基板上的 FBG 的波长移动不受位移  $f$  的影响,只与温度变化有关。设基板材料的热膨胀系数为  $\alpha'_{\text{sub}}$ ,则该部分 FBG 的 Bragg 波长随温度的变化关系可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B'}{\lambda_B'} = [\zeta_s + (1 - p_e)\alpha'_{\text{sub}}]\Delta T \quad (7)$$

梁和基板材料不同,热膨胀系数差别较大,因此 FBG 两部分的位移灵敏系数和温度灵敏系数都不同,分别按不同的规律变化,而且互不影响。两部分光栅的位移和温度响应可表示为如下矩阵形式

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_B/\lambda_B \\ \Delta\lambda_B'/\lambda_B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_f & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中,  $K_f = 3h(1 - p_e)/2L^2$ ,  $K_{T1} = \zeta_s + (1 - p_e)\alpha_{sub}$ ,  $K_{T2} = \zeta_s + (1 - p_e)\alpha'_{sub}$ 。通过实验测得两部分光栅 Bragg 波长的变化, 代入(9)式可方便地求出相应的位移和温度变化。

### 3 实验结果与讨论

实验中悬臂梁采用矩形截面的有机玻璃平板, 梁长为 6.1 cm, 厚度为 0.3 cm, 宽度为 0.5 cm。基板材料为铝, 厚度和宽度都是 1.0 cm。为进一步减小悬臂梁形变对基板的影响, 铝基板的上平面高出有机玻璃梁约 0.1 cm, 通过刻槽使光栅粘贴部分与有机玻璃梁平行。实验所用 FBG 的长度为 2.4 cm(其中悬臂梁部分的长度为 1.0 cm), 在自由状态下的 Bragg 波长为 1547 nm。整个光栅传感头放在温控室内, 其形变由自由端的精密位移给进装置步进调节。实验装置如图 2 所示, 宽带光源(BBS)发出的光经 3 dB 耦合器入射到 FBG, 被 FBG 反射的光回经 3 dB 耦合器, 然后输入 ADVANTEST Q8383 光谱分析仪(OSA), 通过光谱分析仪测量 FBG 的 Bragg 波长变化。

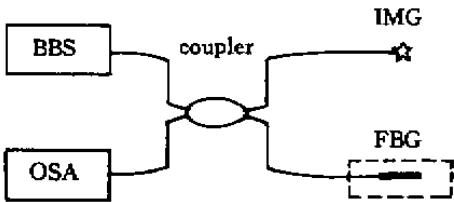


图 2 位移和温度传感测量系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of displacement and temperature sensing system

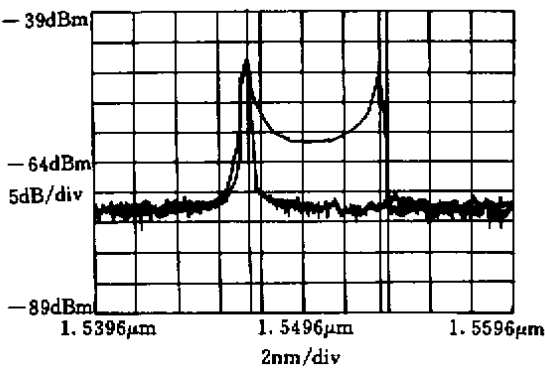


图 3 光谱分析仪上观测到的 FBG 反射谱 ( $f = 0$  和  $f = 5$  mm)

Fig.3 Reflective spectrum of FBG observed by spectrum analyzer( $f = 0, f = 5$  mm)

图 3 为室温下在  $f = 5.0$  mm 观测到的光纤光栅反射谱与自由状态下光栅反射谱的比较。从图中可以看出, 两个反射峰中的一个与原来的反射峰重合, 波长没有变化, 而且两个峰并没有完全分离开, 两个峰的中间有一定的反射分布。这是由悬臂梁与基板连接处附近的光栅反射造成的, 它们在两反射峰分开后并不影响两个反射峰的中心波长位置。

图 4(a) 为 18℃ 下悬臂梁自由端侧向位移  $f$  变化时两反射峰  $\lambda_B$  和  $\lambda_{B'}$  的响应曲线。在侧向位移从 -5.5 mm 变化到 5.0 mm 的过程中,  $\lambda_B$  从 1539.88 nm 增大到了 1553.24 nm, 而  $\lambda_{B'}$  没有发生变化。由数据拟合的结果可知,  $\lambda_B$  的位移灵敏系数为  $8.22 \times 10^{-4}/\text{mm}$ , 曲线的线性拟合度为 0.9998。图 4(b) 为  $f = -2$  mm 时, 温度  $T$  与两反射峰波长的关系曲线, 数据拟合得  $\lambda_B$  和  $\lambda_{B'}$  的温度灵敏系数分别为  $8.86 \times 10^{-5}/\text{℃}$  和  $2.06 \times 10^{-5}/\text{℃}$ , 曲线的线性拟合度分别为 0.9976 和 0.9961。在不同位移下分别测量  $\lambda_B$  和  $\lambda_{B'}$  的温度灵敏系数, 结果十分相近, 误差小于 2%。将以上参数代入(8)式可得

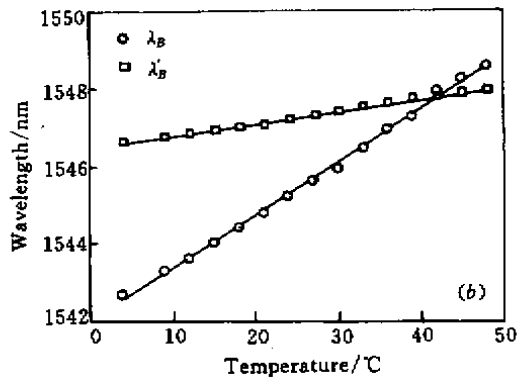
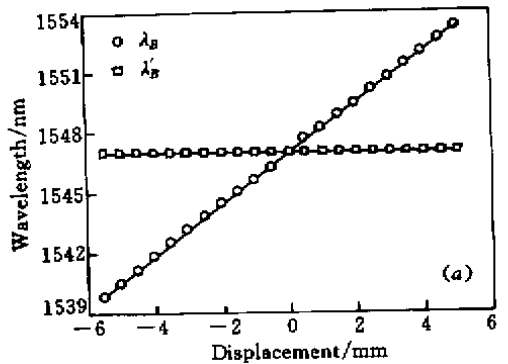


图 4 FBG 的位移响应曲线 ( $T = 18\text{℃}$ ) (a) 和温度响应曲线 ( $f = -0.2$  cm) (b)

Fig.4 Displacement response curves of FBG ( $T = 18\text{℃}$ ) (a) and temperature response curves of FBG ( $f = -0.2$  cm) (b)

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_B/\lambda_B \\ \Delta\lambda_{B'}/\lambda_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.22 \times 10^{-4} & 8.86 \times 10^{-5} \\ 0 & 2.06 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (9)$$

将(9)式中由实验数据拟合得到的位移和温度灵敏系数与由(8)式理论计算所得的系数相比较,可发现前者小于后者。如铝的线膨胀系数为  $\alpha'_{\text{sub}} = 23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 将其与  $p_e$  和  $\zeta_s$  代入(8)式,得  $\lambda_{B'}$  的温度灵敏系数  $K_{T2} = 2.49 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ , 而实验值仅为  $2.06 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。理论值和实验值之间的这种差异是由于光纤光栅的粘贴不理想造成的。由于光纤光栅与基底材料之间的非刚性连接,当基底受热发生膨胀或形变时,并不能引起光纤光栅同等程度的轴向形变,因此导致实际的灵敏系数小于理论值。

实验中在  $f = 1 \text{ mm}$ ,  $T = 30^\circ\text{C}$  条件下测得  $\lambda_B$  和  $\lambda_{B'}$  的中心反射波长分别为  $1547.4 \text{ nm}$  和  $1549.96 \text{ nm}$ , 根据(9)式计算得相应的位移和温度应为  $0.98 \text{ mm}$  和  $12.5^\circ\text{C}$ , 理论计算与实际情况基本一致。另外,由(8)式可知,  $K_f$  与悬臂梁厚度  $h$  及梁长  $L$  有关,所以可通过改变  $h$  或  $L$  的方法得到合适的位移测量范围和分辨率。在本实验中,基于光谱分析仪  $0.1 \text{ nm}$  的光谱分辨率,传感装置位移测量的分辨率为  $0.08 \text{ mm}$ , 温度测量的分辨率为  $3.1^\circ\text{C}$  (位移不变时可达  $0.73^\circ\text{C}$ )。位移测量的最大范围基于不损坏光栅的原则可达  $10.5 \text{ mm}$ 。

## 4 结 论

本文采用新颖的悬臂梁设计,实现了单个光纤

光栅对位移和温度的同时测量,位移测量和温度测量的分辨率分别达到  $0.08 \text{ mm}$  和  $3.1^\circ\text{C}$ , 位移测量范围可达  $10.5 \text{ mm}$ 。如果将悬臂梁的梁长减小,厚度增大,可得到更高的位移分辨率;反之,则可得到更大的位移测量范围。将基板改用热膨胀系数比铝高的合适材料,或采用高分辨率的光谱仪,可有效地提高温度测量的分辨率。

## 参 考 文 献

- 1 W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn. Fiber optic Bragg grating sensors. *SPIE*, 1989, **1169**: 98 ~ 107
- 2 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442 ~ 1463
- 3 D. A. Jackson, A. B. L. Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192 ~ 1194
- 4 Yunqi Liu, Zhuanyun Guo, Ying Zhang *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6): 564 ~ 566
- 5 S. Magne, S. Rougeault, M. Vilela *et al.*. State-of-strain evaluation with fiber Bragg grating rosettes: application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(36): 9437 ~ 9447
- 6 N. E. Fisher, D. J. Webb, C. N. Pannell *et al.*. Probe for measuring ultrasonic fields using short in-fiber Bragg gratings. *SPIE*, 1998, **3555**: 451 ~ 456
- 7 Guan Bai 'ou, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. Fiber Bragg grating displacement sensor based on a cantilever beam. *ACTA Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(11): 983 ~ 985 (in Chinese)