

文章编号: 0258-7025(2001)08-0729-03

# 一种新颖的基于预应变技术的光纤光栅 应变温度传感器\*

张颖<sup>1</sup> 关柏鸥<sup>1</sup> 董新永<sup>1</sup> 刘志国<sup>1</sup> 郭转运<sup>1</sup> 开桂云<sup>1</sup> 董孝义<sup>1</sup> 苏万华<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南开大学现代光学研究所 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** 报道了采用预应变技术制作的一种结构简便而新颖实用的光纤光栅传感探头及其对温度和应变的响应特性。该方法能使一根光纤光栅产生两个以上的反射峰,因此能解决温度和应变测量时存在的交叉敏感问题。在测量范围内,应变和温度响应曲线具有良好的线性。

**关键词** 预应变, 温度传感, 应变传感

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A

## A Novel Fiber Grating Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Based on Prestrain Technique

ZHANG Ying<sup>1</sup> GUAN Bai-ou<sup>1</sup> DONG Xin-yong<sup>1</sup> LIU Zhi-guo<sup>1</sup>

GUO Zhuan-yun<sup>1</sup> KAI Gui-yun<sup>1</sup> DONG Xiao-yi<sup>1</sup> SU Wan-hua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

<sup>2</sup>National Engine Combustion Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072

**Abstract** A simple and practical fiber grating sensor for strain and temperature measurement is presented in this paper. By using prestrain technique, two Bragg wavelengths were created by one fiber Bragg grating, and the cross-sensing effect was eliminated. Linear responds to strain and temperature were achieved in the measurable ranges.

**Key words** prestrain, temperature sensing, strain sensing

近年来,光纤光栅在光传感领域的研究越来越引起人们的重视,光纤光栅不仅可以作为温度和应变传感器,通过设计敏感结构,也可实现非光学量的光学测量,如压力、振动、电流、电压、磁场传感等。但由于光纤光栅对温度与应变同时敏感,即温度和应变可同时引起光纤光栅布喇格波长的移动,而通过检测光纤光栅响应波长的移动无法反映温度与应变各自引起的波长变化。为了克服交叉敏感问题,人们提出了一些解决方案,其中大部分是采用多个光纤光栅组合来克服交叉敏感问题<sup>[1-5]</sup>,也有采用光纤光栅 F-P 腔实现温度和应变同时测量的<sup>[6]</sup>。这些方案有的需要两套解调系统,这无疑给光纤光栅

传感的实际应用带来不便,而且大大地增加了成本。

本文提出了一种更加简便实用的新技术,采用预应变方法,即在同一种光纤上写入光纤光栅,在加有一定应力的状态下,先将光纤光栅的一部分(约为整个光栅的一半)牢固地粘于铝片上,待应力释放后,裸光纤光栅部分形变恢复,其中心反射波长不变;而粘在铝片上的部分光纤光栅,由于存在应变,其栅格周期  $\Lambda$  发生了变化,从而导致这部分光纤光栅的中心反射波长改变,因此整个光纤光栅就具有两个反射峰,而且这两个反射峰具有不同的温度和应变响应,从而可实现温度和应变的同时测量。利用这种技术制作的光纤光栅应变温度传感探头,不仅保留了光纤光栅传感器波长编码的特点以及对应变和温度的响应具有良好的线性,又避免了采用多个光栅组合带来的光纤光栅需求量大、解调系统数多、不利于传感头小型化等缺点,也克服了在两种不

\* 国家自然科学基金(编号: 69878007)和国家“863 计划”(863-307-15-5(11))资助项目。

收稿日期: 2000-05-18; 收到修改稿日期: 2000-06-23

同光纤连接处写入的光栅易坏断的不足。

### 1 基本原理

由耦合模理论可知, 光纤光栅的中心反射波长满足布喇格条件  $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$ , 其中  $n_{eff}$  为纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  为栅格周期。由上式可知, 光纤光栅的中心反射波长  $\lambda_B$  随  $n_{eff}$  和  $\Lambda$  的改变而改变, 由于温度和应变的变化都将导致  $n_{eff}$  和  $\Lambda$  发生改变, 因此光纤光栅对于应变和温度都是敏感的, 应变影响  $\lambda_B$  是由弹光效应和光纤光栅周期  $\Lambda$  的变化引起的, 温度影响  $\lambda_B$  是由热光效应和热膨胀效应引起的。

图 1 为用于应变和温度同时传感测量的光纤光栅结构示意图。假设应变和温度所引起的光纤光栅中心反射波长的变化是相互独立的, 当应变和温度同时发生变化时, 光纤光栅中心反射波长的变化为

$$\Delta \lambda_{Bi} = k_{\epsilon_i} \Delta \epsilon_i + k_{T_i} \Delta T_i \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中  $k_{\epsilon_i} = \partial \lambda_{Bi} / \partial \epsilon_i$  为与光纤材料的泊松比、弹光系数和有效折射率有关的常数;  $k_{T_1} = \partial \lambda_{B1} / \partial T_1$  为与光纤的热膨胀系数和热光系数有关的常数;  $k_{T_2} = \partial \lambda_{B2} / \partial T_2$  为与基底材料的热膨胀系数和热光系数有关的常数。

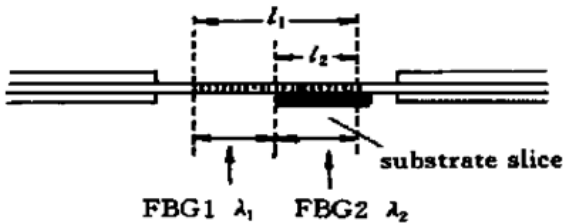


图 1 粘贴基底的光纤光栅结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating stuck on the substrate

当整个光纤光栅区域发生应变  $\Delta \epsilon$  时, 由于一部分光栅粘于基底材料上, 两段光栅所产生的应变是不同的, 分别为  $\Delta \epsilon_1$  和  $\Delta \epsilon_2$ , 令  $\alpha = \Delta \epsilon_2 / \Delta \epsilon_1$ , 则有

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{l_1}{l_1 + (\alpha - 1) l_2} \Delta \epsilon \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_2 = \frac{\alpha l_1}{l_1 + (\alpha - 1) l_2} \Delta \epsilon \quad (3)$$

将(2), (3)式代入(1)式中, 即可得到光纤光栅的反射波长变化与整个光栅区域的应变与温度变化之间的关系式

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $K_{\epsilon 1} = k_{\epsilon 1} l_1 / [l_1 + (\alpha - 1) l_2]$ ,  $K_{\epsilon 2} = k_{\epsilon 2} \alpha l_1 / [l_1 + (\alpha - 1) l_2]$ ,  $K_{T_i} = k_{T_i} (i = 1, 2)$ 。由(4)式可知, 只要先测定常数  $K_{\epsilon}$  和  $K_{T_i}$ , 便可根据光纤光栅反射波长的变化量  $\Delta \lambda_{Bi}$  来确定  $\Delta T$  和  $\Delta \epsilon$ 。

### 2 实验结果与讨论

实验中所用的光纤光栅是自行设计制作的。普通单模光纤经载氢处理后, 通过紫外侧直写入, 在加有一定应力的状态下, 将光纤光栅的一部分(约为整个光栅的一半)牢固地粘于铝片上。待应力释放后, 裸光栅部分形变恢复, 其中心反射波长不变; 而粘在铝片上的部分光纤光栅, 由于存在预应变, 其栅格周期  $\Lambda$  发生了变化, 从而导致这部分光栅的中心反射波长改变, 因此整个光纤光栅就具有两个反射峰。在室温(20℃)条件下, 两个反射峰的中心反射波长分别为 1558.80 nm 和 1560.04 nm, 其透射谱如图 2(a)所示。其中, 中心反射波长为 1558.80 nm 的峰为裸光纤光栅的透射损耗峰, 中心反射波长为 1560.04 nm 的峰为粘于铝片上的光纤光栅的透射损耗峰。图 2(b)是应变为 1834.7  $\mu\epsilon$  状态下的光谱图, 此时两个透射损耗峰重合, 其中心反射波长皆为 1560.04 nm。

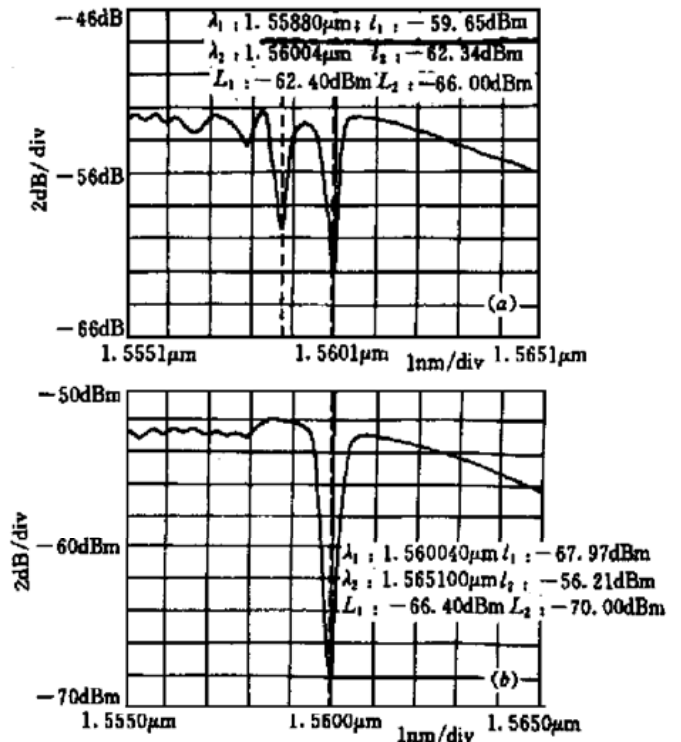


图 2 不同应变状态时的应变传感光谱图  
(a) 应变为 0  $\mu\epsilon$  时的光谱图; (b) 应变为 1834.7  $\mu\epsilon$  时的光谱图  
Fig. 2 Spectrum of the sensing grating with different strain  
(a) the strain is 0  $\mu\epsilon$ ; (b) the strain is 1834.7  $\mu\epsilon$

在测量光纤光栅的应变响应时, 将光纤光栅的两端分别固定于一精密的位移控制装置上, 通过精确地控制光纤光栅一端的位移来改变光纤光栅的应变。我们在 0~ 1834.7  $\mu\epsilon$  的范围内进行了应变响应测量, 得到的两个反射峰中心反射波长的应变响应曲线如图 3 (a) 所示。从中可以看出, 光纤光栅的预应变(粘铝片)部分的中心反射波长对应变基本没有响应, 即其应变灵敏度接近于 0, 而裸光纤光栅部分的中心反射波长随应变基本呈线性变化(线性度为 0.996), 其应变灵敏度为  $7 \times 10^{-4}$  nm/ $\mu\epsilon$ 。

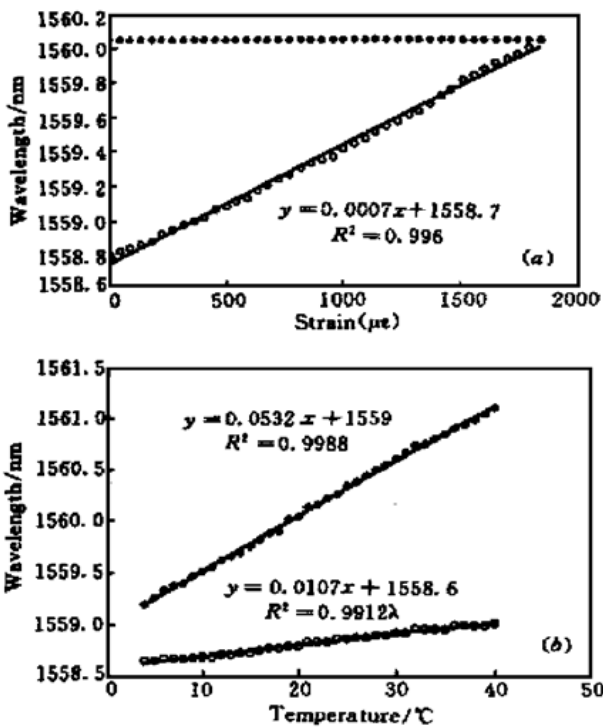


图 3 应变 (a) 和温度 (b) 响应曲线

Fig. 3 Measured wavelength in response to strain change (a) and to temperature change (b)

在测量光纤光栅的温度响应时, 将光纤光栅置于一温控器中, 由宽带光源(BBS)发出的光经光纤光栅后进入光谱分析仪(OA), 并利用光谱分析仪监测光纤光栅中心反射波长的变化。我们在 4~ 40  $^{\circ}\text{C}$  的温度范围内, 对光纤光栅的温度响应进行了测量, 得到的两个反射峰中心反射波长的温度响应曲线如图 3 (b) 所示。光纤光栅预应变部分的反射峰和裸光纤光栅的反射峰的温度灵敏度分别为  $5.32 \times 10^{-2}$  nm/ $^{\circ}\text{C}$  和  $1.07 \times 10^{-2}$  nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。图 4 (a), (b) 为不同温度状态下的光纤光栅透射谱。

由上述实验测量结果, 可以得到(4)式中的关系常数  $K_{e1} = 7 \times 10^{-4}$  nm/ $\mu\epsilon$ ,  $K_{e2} = 0$ ,  $K_{T1} = 1.07 \times 10^{-2}$  nm/ $^{\circ}\text{C}$ ,  $K_{T2} = 5.32 \times 10^{-2}$  nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。知道了这些

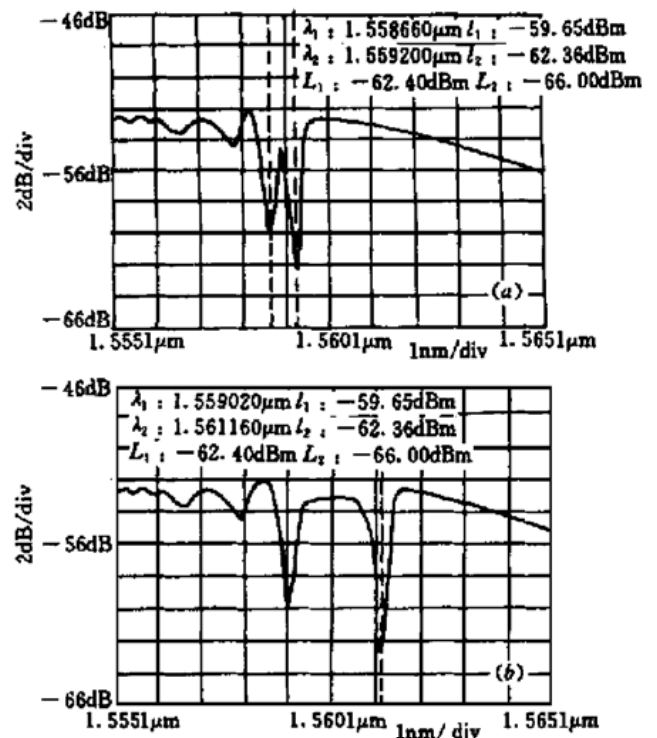


图 4 不同温度状态时的光纤光栅温度传感光谱图 (a) 温度为 4  $^{\circ}\text{C}$  时的光谱图; (b) 温度为 40  $^{\circ}\text{C}$  时的光谱图

Fig. 4 Spectrum of the sensing grating with different temperature

(a) the temperature is 4  $^{\circ}\text{C}$ ; (b) the temperature is 40  $^{\circ}\text{C}$

关系常数, 就可根据光纤光栅中心反射波长的移动  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2$ , 通过(4)式来确定应变  $\Delta\epsilon$  和温度变化  $\Delta T$ , 从而实现应变和温度的同时测量。

### 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Fiber optic Bragg grating strain sensor with drift compensated high resolution interferometric wavelength shift detection. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 72~ 74
- 2 H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey et al.. Hybrad fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9): 1223~ 1225
- 3 M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie et al.. Discrimination between strain and temperature effects using dual wavelength fiber grating sensors. *Electron Lett.*, 1994, **30**(13): 1085~ 1087
- 4 S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Simultaneous independent temperature and strain measurement using ir-fiber Bragg grating sensors. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12): 1133~ 1134
- 5 S. E. Kanellopoulos, V. A. Handerek, A. J. Rogers. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated ir-fiber gratings. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3): 333~ 335
- 6 Wei chong Du, Xiao ming Tao, Hwa Yaw Tam. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 105~ 107