

# 单个光纤光栅压力和温度的同时测量\*

刘云启 郭转运 张颖 刘志国 董孝义

(南开大学现代光学研究所 天津 300071)

谭华耀

(香港理工大学电机工程系 香港)

**提要** 采用特殊聚合物封装技术设计的小体积光纤光栅传感头具有压力和温度同时测量功能,能够有效地解决温度交叉敏感问题,利用封装过程出现的两个压力和温度灵敏系数不同的光栅反射峰,实现了压力和温度的单个光栅同时测量。

**关键词** 光纤光栅,同时测量,聚合物

## 1 引言

近年来,有关光纤光栅(FBG)传感器的研究工作已经越来越引起人们的重视<sup>[1,2]</sup>,利用光纤光栅可以实现对应变、温度等各种物理量的测量,M. G. Xu 等<sup>[3,4]</sup>对光纤光栅的压力传感特性进行了研究,并且利用玻璃球的放大作用将光纤光栅对压力的敏感度提高了一个数量级。但是光纤光栅压力传感器存在交叉敏感问题,即传感器对于压力和温度都是敏感的,当光纤光栅用于传感测量时,无法分辨出压力和温度所分别引起的波长改变,因此解决光纤光栅的应力和温度同时测量问题对于光纤光栅传感器的实际应用具有重要的意义,人们提出了多种解决交叉敏感问题的方案<sup>[5]</sup>,如:双光栅矩阵运算法、布喇格光栅和长周期光栅结合法、不同包层直径光纤光栅串接法、光纤光栅法布里-珀罗腔法<sup>[6]</sup>等,这些方法各有其优缺点和不同的适用范围,但是多数同时测量方案都需要两个具有不同应变和温度灵敏系数的光纤光栅构成传感头,因此对光栅的选取提出较高的要求,从而限制了其在实际测量中的应用。

我们曾经采用聚合物封装法提高光纤光栅的压力灵敏度<sup>[7,8]</sup>,但是这种封装仍然无法解决光纤光栅的温度交叉敏感问题,本文采用特殊的封装工艺,设计的小体积光纤光栅传感头具有同时测量压力和温度功能,能够有效地解决温度交叉敏感问题,实现压力和温度的单个光栅同时测量,克服了以往同时测量技术需要两个光栅构成传感头的缺点。

## 2 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  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ ,其中  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率, $\Lambda$  为栅格周期。光纤光栅的中心反射波长  $\lambda_B$  随  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  的改变而改变,由于应力和温度的变化都将导致  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  发生改变,因此 FBG 对于应力和温度都是敏感的,应力影响

\* 国家自然科学基金(69878001)资助项目。

收稿日期: 1999-07-09; 收到修改稿日期: 1999-09-27

$\lambda_B$  是由弹光效应和光纤光栅周期  $\Lambda$  的变化引起的, 而温度影响  $\lambda_B$  则是由热光效应和热膨胀效应引起的。

假设应力和温度分别引起的光栅中心波长的变化是相互独立的, 则在应变  $\epsilon$  和温度变化  $\Delta T$  情况下, 光纤光栅中心反射波长的变化可以表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = k_\epsilon\epsilon + k_T\Delta T \quad (1)$$

其中  $k_\epsilon$  为光纤光栅反射波长的应变灵敏系数, 为与光纤泊松比、弹光系数和纤芯有效折射率有关的常数,  $k_T$  为光纤光栅反射波长的温度灵敏系数, 为与热膨胀系数和热光系数有关的常数。由 (1) 式可知, 仅测量一个波长变化无法实现同时测量, 因此以往的多数同时测量方案一般采用两个光栅作为传感头, 分别测量其中心波长的变化, 然后由矩阵运算求得待测应力和温度的变化。由 (1) 可知, 两个不同波长的 FBG 的中心反射波长变化可以表示为

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

(2) 式有解的条件是  $\frac{k_{\epsilon 1}}{k_{\epsilon 2}} \neq \frac{k_{T1}}{k_{T2}}$ , 所以这种同时测量方法要求两个 FBG 具有不同的应力和温度灵敏系数。

我们采用特殊的工艺封装光纤光栅, 首先采用一种对弹性和温度较为敏感的聚合物封装光栅的一半, 然后采用另一种只起保护作用的聚合物封装整个光栅(这种聚合物并不改变光栅的压力和温度灵敏度), 由于两种聚合物不同的力学特性, 封装后的布喇格光栅将出现两个反射峰。

假设基底材料与光纤光栅紧密结合, 当环境温度不变时, 光纤光栅中心反射波长的相对变化与外界压力  $P$  的关系为<sup>[7]</sup>

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = -k_\epsilon(1-2\mu)p/E = k_p p \quad (3)$$

式中  $k_p = -k_\epsilon(1-2\mu)/E$ , 定义为压力敏感系数, 是一个仅与光纤参数和基底材料弹性特征有关的常数,  $\mu$  和  $E$  分别为聚合物材料的泊松比和弹性模量。

当环境温度发生变化时, 封装于聚合物中的光纤光栅的中心波长相对变化与温度的关系为<sup>[9]</sup>

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (k_T + Bk_\epsilon)\Delta T \quad (4)$$

式中  $B$  为基底材料的热膨胀系数。由 (3), (4) 两式可知, 封装后的光纤光栅中心反射波长的相对变化与压力及温度呈线性关系, 选用不同的聚合物就可以得到不同的压力和温度灵敏度。因此经以上方法封装后的光纤光栅的两个反射峰具有不同压力和温度灵敏度, 只须分别测得两个峰的波长位移, 就可以由 (2) 式求得外界压力和温度的变化。

### 3 实验结果与分析

实验所用的光纤布拉格光栅是利用位相掩模法制作的, 其中心反射波长为 1550.39 nm, 峰值反射率为 80%, 谱宽为 0.33 nm, 光栅长度约为 10 mm。如图 1 所示, 将光纤光栅的一半封装于聚合物基底 A 中, 聚合物做成 3 mm × 3 mm ×

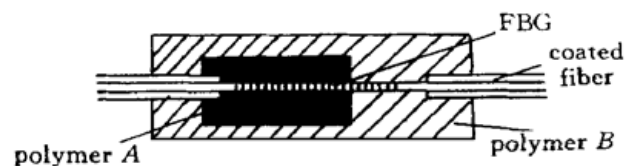


图 1 聚合物封装的光纤光栅传感头结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating sensor head with polymer packaged

20 mm 的柱体形状, 光纤光栅位于柱体的中心, 然后将整个光栅封装于 4 mm × 4 mm × 50 mm 的柱状聚合物 B 中。为清楚起见, 图中将光纤直径及 FBG 进行了放大。图 2 为封装前后光纤光栅的反射谱, 由图可知, 封装后的光纤光栅在 1540.5 nm 和 1550.3 nm 处出现两个反射峰 (分别命名为峰 1 和峰 2), 图中光栅的啁啾正通过改进封装技术加以克服。

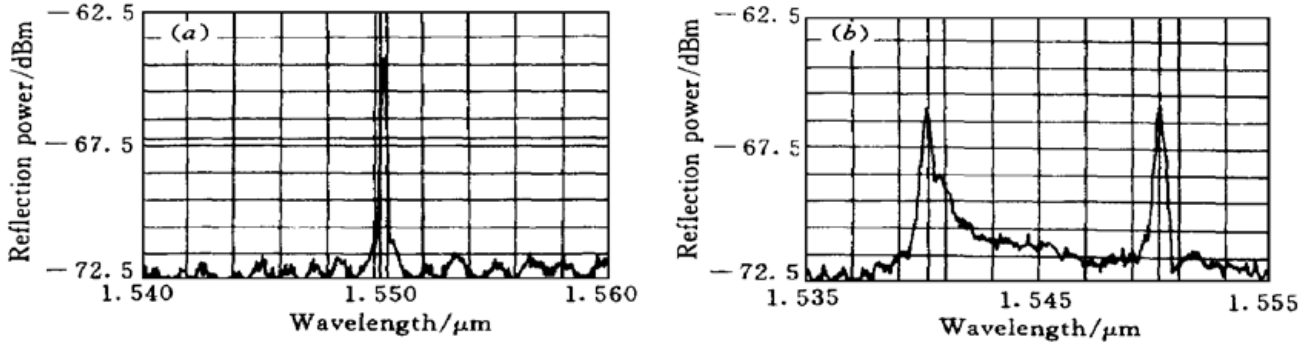


图 2 聚合物封装前 (a) 和封装后 (b) 光纤光栅的反射谱

Fig. 2 Reflective spectrum of the fiber grating sensor before (a) and after (b) being packaged

(a)  $\lambda_0 = 1.550386 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0.332 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda_1 = 1.540240 \mu\text{m}$ ,  $I_1 = -65.99 \text{ dBm}$ ;  
 $\lambda_2 = 1.550200 \mu\text{m}$ ,  $I_2 = -66.00 \text{ dBm}$ ;  $L_1 = -72.50 \text{ dBm}$ ,  $L_2 = -72.50 \text{ dBm}$

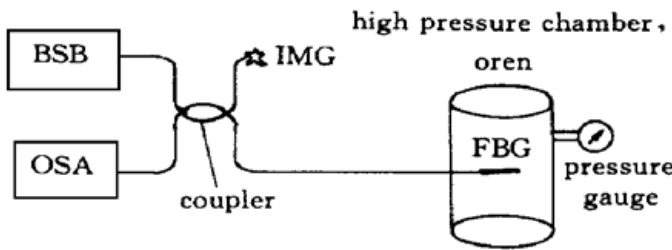


图 3 光纤光栅压力和温度特性测试实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for pressure and temperature properties measurements of FBG

图 3 为压力和温度测量的实验装置示意图, 由宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器入射到封装后的光纤光栅中, 其反射光经耦合器进入光谱分析仪 (ADVANTEST Q8383 型), 测量光栅两个反射峰的波长变化。实验中光纤光栅的温度由电子加热炉控制, 压力从氧气钢瓶中气体的气压得到, 压力大小由 YQY-80 型压力表测量。

图 4 为光纤光栅的压力响应曲线, 由数据拟合结果可知, 反射峰 1 的压力灵敏系数为  $-5.24 \times 10^{-5} / \text{MPa}$ , 为裸光栅的 26.5 倍<sup>[3]</sup>; 在实验测量误差范围内, 反射峰 2 的中心波长基本不随外界压力而变化, 即当压力变化 10 MPa 时, 反射峰 2 的波长位移小于 0.04 nm (我们所用光谱分析仪的波长分辨率为 0.04 nm), 这主要是由于裸光栅对压力的灵敏性较低所致。根据文献[3]的报道, 取反射峰 2 的压力灵敏系数为  $-1.98 \times 10^{-6} / \text{MPa}$ 。图 5 为传感器的温度响应曲线, 由数据拟合结果可知, 反射峰 1, 2 的温度灵敏系数分别为  $5.69 \times 10^{-5} / \text{°C}$  和  $6.58 \times 10^{-6} / \text{°C}$ , 其中反射峰 1 的温度灵敏系数为裸光栅的 8.5 倍, 而峰 2 的温度灵敏系数与文献报道的基本一致<sup>[3]</sup> (这也可以验证聚合物 B 并不改变光栅的灵敏性)。将以上实验参数分别代入 (2) 式可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.24 \times 10^{-5} & 5.69 \times 10^{-5} \\ -1.98 \times 10^{-6} & 6.58 \times 10^{-6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

由以上实验结果可知, 封装后的光纤光栅具有压力和温度同时测量功能, 只要分别测得两个反射峰的波长位移, 即可由 (6) 式求得待测的压力和温度的变化。由于光纤光栅传感器的测量灵敏度由传感头和波长检测系统共同决定, 因此这种同时测量技术的压力和温度测量分辨率还

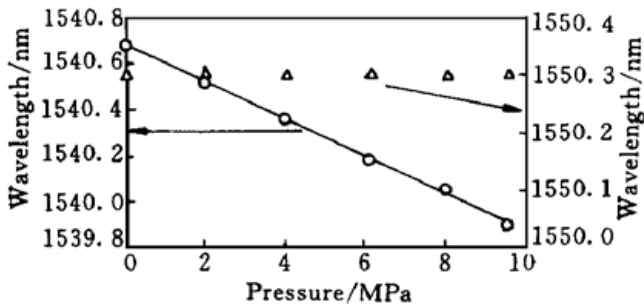


图 4 光纤光栅两个反射峰的压力响应曲线

○: 峰 1; △: 峰 2

Fig. 4 Pressure response curve of the two reflective peaks of FBG

○: grating 1; △: grating 2

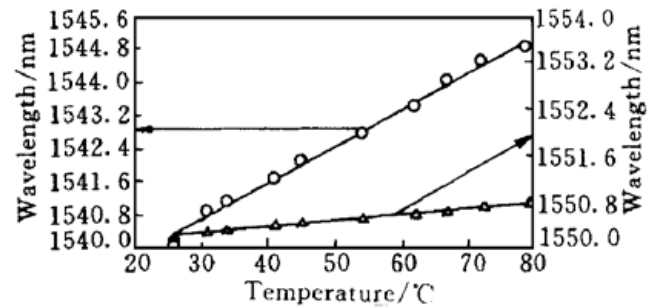


图 5 光纤光栅两个反射峰的温度响应曲线

○: 峰 1; △: 峰 2

Fig. 5 Temperature response curve of the two reflective peaks of FBG

○: grating 1; △: grating 2

与波长检测设备的分辨率有关,在实际测量中,必须设计适用于工程应用的高分辨率波长位移检测仪器。我们曾经设计了一种高灵敏度的光纤光栅传感测试仪<sup>[10]</sup>,基于其 0.002 nm 的波长分辨率,压力和温度同时测量技术的压力分辨率为 0.36 MPa,温度分辨率为 0.3°C,实际的测量精度则要传感测试仪的精度决定。

我们对封装光栅的压力和温度特性进行了多次测量,重复性良好,封装光栅在高灵敏度压力温度同时测量和保护光栅方面有很高的可靠性,有望成为一种实用的光纤光栅传感头。

## 4 结 论

采用特殊封装工艺设计的小体积光纤光栅传感器,具有同时测量压力和温度的功能,能够有效地解决温度交叉敏感问题,实现压力和温度的单个光栅同时测量,克服了以往同时测量技术需要两个光栅构成传感头的缺点,结合高灵敏度的波长位移检测仪器,同时测量可以取得很高的压力和温度测量分辨率。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~ 1463
- 2 Y. J. Rao. In-fiber Bragg grating sensors. *Meas. Sci. & Technol.*, 1997, **8**(4): 355~ 375
- 3 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398~ 399
- 4 M. G. Xu, H. Geiger, J. P. Dakin. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2): 128~ 129
- 5 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. The mechanism and solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensor measurements. *J. Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 1999, **10**(2): 179~ 182 (in Chinese)
- 6 W. C. Du, X. M. Tao, H. Y. Tam. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 1999, **11**(1): 105~ 107
- 7 Liu Yunqi, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. High-sensitivity fiber grating pressure sensor with polymer jacket. *Chinese J. Lasers* (中国激光), (accepted, in Chinese)
- 8 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. Pressure properties of fiber Bragg grating. *Acta Photonica*

- Sinica* (光子学报), 1999, **28**(5): 443~ 445 (in Chinese)
- 9 Du Weichong, H. Y. Tam, M. S. Demokan *et al.*. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber Bragg gratings. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **24**(1): 75~ 77 (in Chinese)
- 10 Liu Zhiguo, Liu Yunqi, Guan Bai'ou *et al.*. High-sensitivity fiber grating sensor measurement instrument. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(2): 138~ 141 (in Chinese)

## Research on the Simultaneous Measurements of Pressure and Temperature Using One Fiber Grating

Liu Yunqi Guo Zhuanyun Zhang Ying Liu Zhiguo Dong Xiaoyi

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

H. Y. Tam

(*Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*)

**Abstract** The small volume fiber Bragg grating (FBG) sensor head designed by using especial package technique with polymer material has the function of simultaneous measurements of pressure and temperature, which can solve the temperature cross-sensitivity of FBG effectively. Simultaneous measurements of the pressure and temperature using only one grating based on the two reflective peaks with different pressure and temperature sensitivity coefficients through the process of packaging FBG are demonstrated.

**Key words** fiber grating, simultaneous measurements, polymer