

聚合物封装的高灵敏度光纤光栅 压力传感器*

刘云启 郭转运 刘志国 葛春风 赵东晖 董孝义
(南开大学现代光学研究所 天津 300071)

郑建成
(香港城市大学电子工程系 香港)

提要 将光纤光栅封装于一种有机聚合物基底中,并对其压力传感特性和温度交叉敏感特性进行了研究,由于基底材料的带动作用,封装后的光纤光栅对于压力的灵敏度提高为裸光栅的 31.7 倍,压力灵敏系数可达 $-6.28 \times 10^{-5}/\text{MPa}$ 。这种技术不仅操作简单,而且同时具有压力增敏和保护光栅双重效果。

关键词 光纤布拉格光栅,弹性模量,压力传感器

1 引言

自从利用全息曝光法制作光纤光栅获得成功以来,国内外在光纤光栅制作技术、解调技术等方面开展了大量的工作。近年来,光纤光栅在光纤传感^[1,2]方面的应用研究越来越受到人们的重视。光纤压力传感器在现代工业生产中有重要的应用价值,但光纤光栅对压力的敏感度较低,M. G. Xu 等^[3]首先对裸露的光纤光栅的压力传感特性进行了研究,发现在 70 MPa 的高压下,光纤光栅中心反射波长仅移动 0.22 nm,因此需要设法提高光纤光栅的压力灵敏度。1996 年,M. G. Xu 等^[4]将光纤光栅固定于中空的玻璃球结构中,使其对压力的敏感度提高了一个数量级,压力灵敏系数提高到 $-21.2 \times 10^{-6}/\text{MPa}$,但是这种方法存在光纤光栅在压缩过程中容易损坏的缺点,因此具有一定的局限性。

我们采用一种新颖的封装技术,将光纤光栅封装于一种有机聚合物基底中,利用基底的带动作用,将光纤光栅对压力的灵敏度提高了 31.7 倍,在 10 MPa 的压力范围内,光纤光栅中心反射波长的相对变化与外界压力呈良好的线性关系。这种技术操作简单,不仅能够有效提高光纤光栅的压力灵敏度,而且聚合物可以对光栅起保护作用,从而有效地克服光纤光栅脆弱易损坏的缺点。

2 基本原理

由耦合模理论可知,光纤布拉格光栅(FBG)的中心反射波长为

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

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-10-12; 收到修改稿日期: 1998-12-18

式中 n_{eff} 为导模的有效折射率, Λ 为光栅的周期。当光纤光栅只受应变 ε 作用时, 其中心反射波长的相对变化为

$$\Delta \lambda_B / \lambda_B = (1 - P_e) \varepsilon \tag{2}$$

式中 $P_e = n_{\text{eff}}^2 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] / 2$ 为有效弹光系数; P_{11}, P_{12} 为弹光系数; ν 为纤芯材料的泊松比。将光纤光栅封装于有机聚合物基底中, 并假设基底材料与光纤光栅紧密结合, 由文献 [5] 的分析可知, 由外界压力引起的各向同性应力在光纤中产生的应变量为

$$\varepsilon = - p(1 - 2\mu) / E \tag{3}$$

式中 μ 和 E 分别为聚合物材料的泊松比和弹性模量。所以光纤光栅中心反射波长的相对变化可以表示为

$$\Delta \lambda_B / \lambda_B = - (1 - P_e)(1 - 2\mu)p / E = k_p p \tag{4}$$

其中 $k_p = - (1 - P_e)(1 - 2\mu) / E$, 定义为压力灵敏系数, 是一个仅与光纤参数和基底材料弹性特征有关的常数。由(4) 式可知, 光纤布拉格光栅中心反射波长的相对变化与压力呈线性关系。对于所选用的基底材料, $\mu = 0.35, E = 3.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2, P_e = 0.22$, 所以这种聚合物封装的光纤光栅传感器的压力灵敏度 $k_p = - 6.68 \times 10^{-5} / \text{MPa}$, 为相应裸光纤光栅的 33.7 倍。

3 实验与结果

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 1508.94 nm,

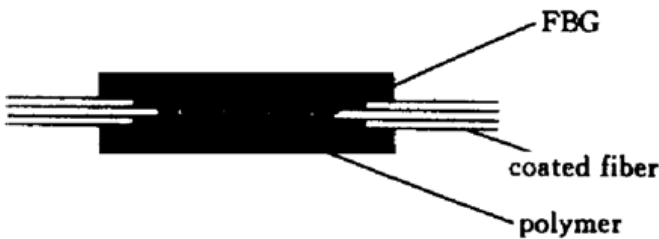


图 1 聚合物封装的光纤光栅压力传感头结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating pressure sensor element with polymer jacket

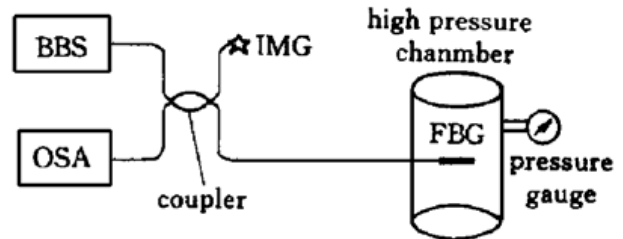


图 2 光纤光栅压力传感效应测试实验装置图
Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for pressure effect measurement

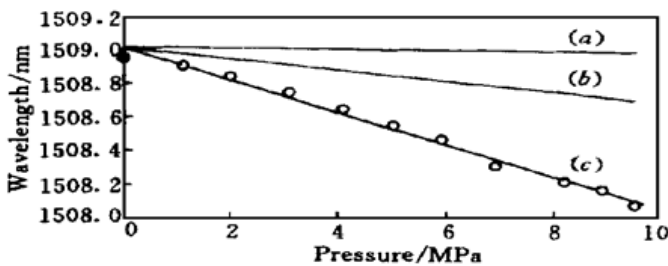


图 3 三种不同的光纤光栅压力传感器的压力响应曲线
(a) 裸光栅; (b) 玻璃球封装光栅; (c) 聚合物封装光栅
Fig. 3 Pressure response of three different FBG pressure sensor
(a) bare grating; (b) grating with glass bubble housing; (c) grating with polymer jacket

峰值反射率为 75%, 光栅长度约为 15 mm。如图 1 所示, 将光纤光栅封装于聚合物基底中, 聚合物做成 10 mm × 15 mm × 50 mm 的柱体形状, 光纤光栅位于柱体的中心, 封装后的光纤光栅就是一种新颖的压力传感头。图 2 为光纤光栅压力传感测试的实验装置示意图, 其中 BBS 为宽带光源, OSA 为光谱分析仪 (AV6361 型), IMG 为折射率匹配液。宽带光源发出的光入射到压力传感头中, 由光纤光栅 (FBG) 反射的光经 3 dB 耦合器进入光谱分析仪, 高压压力罐中压力的大小由 YQY-80 型压力表测量。

在 0~ 10 MPa 的压力范围内, 测得聚合物封装的光纤光栅压力传感器的压力响应曲线如图 3(c) 所示, 图 3(a), (b) 分别为文献报道的裸光栅^[3] 和用中空玻璃球固定的光纤光栅^[4] 的压力响应曲线。由图 3 可知, 传感头的压力响应曲线具有良好的线性度, 由数据拟合可知压力灵敏系数 $k_p = -6.28 \times 10^{-5} / \text{MPa}$, 为裸光栅的 31.7 倍^[3], 与理论分析的结果基本相符, 测量误差主要是由于压力表的读数误差所致。

4 分析与讨论

采用这种简单新颖的技术, 将光纤光栅封装于有机聚合物基底中, 利用基底的带动作用, 将光纤光栅对压力的灵敏度提高了 31.7 倍。但是光纤光栅压力传感器存在温度交叉敏感问题, 外界温度的变化将对压力的测量产生一定的影响, 因此在压力测量过程中必须进行温度补偿。

由文献[6]的分析可知, 当光纤光栅固定于与其热膨胀系数不同的基底中时, 其中心波长的相对变化与温度的关系为

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (k_T + Bk_\varepsilon) \Delta T \quad (5)$$

其中 k_T 为光纤光栅反射波长的温度灵敏系数, k_ε 为光纤光栅反射波长的应变灵敏系数, B 为基底的热膨胀系数。对于我们所选的聚合物材料, $B = 6.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 对于一般情况下的光纤光栅, $k_T = 6.72 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[3], $k_\varepsilon = 7 \times 10^7 / \mu\text{e}$ ^[7]。由以上数据可得, 光纤光栅的温度灵敏度将为裸光纤光栅的 7.9 倍。利用水浴加热的方法, 在 3~ 77 °C 的温度范围内测定了压力传感头的温度响应曲线, 如图 4 所示, 由数据拟合可知其温度灵敏系数为 0.081 nm/°C, 对应于光栅中心波长 1508.94 nm, 温度灵敏系数可以写为 $5.36 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 为相应裸光栅的 7.9 倍^[3], 与理论分析的结果基本相符。

由以上的分析可知, 聚合物封装的光纤光栅压力传感器在具有较高压力灵敏度的同时, 其温度交叉敏感性对压力测量的影响也有一定程度的增大, 但是封装技术改变了光纤光栅压力和温度灵敏度的相对大小, 因此将封装后的光纤光栅与裸光栅相结合, 通过矩阵运算即可实现压力和温度的同时测量^[8]。

参 考 文 献

- 1 W. W. Morev, G. Meltz, W. H. Glenn. Fiber optic Bragg grating sensors. *Proc. 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 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fibre 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 bub-

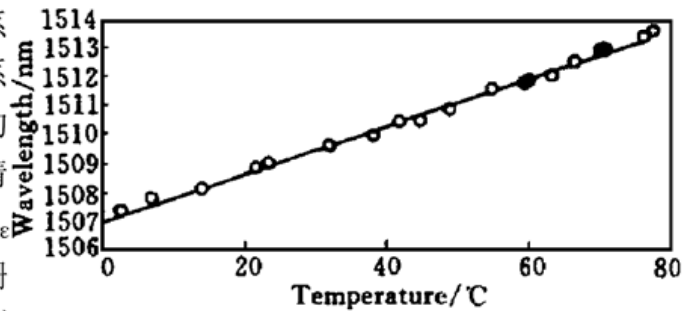


图 4 聚合物封装的 FBG 压力传感器的温度响应曲线

Fig. 4 Temperature response of FBG pressure sensor with polymer jacket

- ble housing. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2): 128~ 129
- 5 G. B. Hocker. Fiber optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9): 1445~ 1448
- 6 Du Weichongs, H. Y. Tam, M. S. Demokan *et al.*. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber Bragg grating. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(1): 75~ 77 (in Chinese)
- 7 G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette *et al.*. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30): 6859~ 6861
- 8 M. G. Xu, J.-L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13): 1085~ 1087

High-sensitivity Fiber Grating Pressure Sensor with Polymer Jacket

Liu Yunqi Guo Zhuanyun Liu Zhiguo

Ge Chunfeng Zhao Donghui Dong Xiaoyi

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

K. S. Chiang

(*Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong*)

Abstract The pressure and the cross-temperature properties of the fiber grating pressure sensor with a polymer jacket is studied. Because of the driving effect of the polymer substrate, the measured pressure sensitivity is increased by more than 31.7 times than that of a bare fiber grating.

Key words fiber Bragg grating, elasticity modulus, pressure sensor