

文章编号: 0258-7025(2004)10-1266-03

光纤布拉格光栅压力增敏的实验研究

刘丽辉, 张伟刚, 郭宏雷, 曹 晔, 金 龙, 张 昊, 杨亦飞, 赵启大, 开桂云, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 近年来光纤光栅作为压力、温度、应变等传感器已经成功地应用于光纤传感领域中。然而裸露的光纤光栅对于外界物理参量的变化灵敏度不高,因此有必要对光纤光栅进行增敏封装,以提高其对外界环境变化的灵敏度。采用两种聚合物材料均匀混合,将其对布拉格光纤光栅进行封装。在 23℃ 情况下对封装后的光栅进行了压力实验,实验表明用两种聚合物封装后的光栅对压力有很高的灵敏性,在 0~10 MPa 范围内压力灵敏度为 -1.22×10^{-4} /MPa,是裸光栅压力灵敏度的 62 倍。

关键词 光电子学;压力传感;封装;聚合物;光纤光栅

中图分类号 TN 253;TN 247 **文献标识码** A

Study on Experiment of Fiber Bragg Grating Pressure Sensitivity

LIU Li-hui, ZHANG Wei-gang, GUO Hong-lei, CAO Ye, JIN Long,
ZHANG Hao, YANG Yi-fei, ZHAO Qi-da, KAI Gui-yun, DONG Xiao-yi

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

Abstract Fiber Bragg gratings (FBG) using as pressure, temperature, and strain sensors are triumphantly applied in optical sensing fields in recent years. However, the sensitivity of a bare FBG is insensitive to the ambient environment. So it is necessary to package FBG to enhance its sensitivity. Two polymers are mixed together to package fiber grating. Pressure experiments are studied at 23℃. It can be seen that fiber grating packaged with polymers is high sensitivity for pressure in the range from 0 MPa to 10 MPa. The measured pressure sensitivity is -1.22×10^{-4} /MPa, more than 62 times than that of a bare fiber grating.

Key words optoelectronics; pressure sensor; package; polymer; fiber grating

1 引 言

自从 K. O. Hill 等利用紫外光曝光法写出第一根光纤光栅以来,光纤光栅因其具有抗干扰能力强(特别是对强电磁场等情况下)、附加损耗小、小巧、使用寿命长、易于与光纤耦合等优点,已经广泛地应用于光纤通信和光纤传感等领域中^[1~3]。尤其在传感领域里,光纤光栅已成功地用作压力、应变和温度的传感器。然而裸露的光纤光栅对于外界物理参量的变化灵敏度并不很高,比如对压力灵敏度只有 2.05×10^{-6} /MPa^[4],这对于压力传感器来说难以满

足设计要求,因此十分有必要对光纤光栅进行增敏封装,以提高其对外界环境变化的灵敏度,这是光纤光栅实用化的一项关键技术。

对光纤光栅封装的方法有许多种,有管式封装,聚合物封装等^[5~8]。利用不同的热膨胀系数材料作为基底的原理,采用一种新颖的聚合物封装技术对 Bragg 光纤光栅进行封装,这种方法简单易行,不仅能对裸光纤起到保护作用,并且能大幅度提高光纤光栅对压力的灵敏度。

收稿日期:2003-07-02;收到修改稿日期:2003-10-05

基金项目:国家 863 计划(2002AA313110),教育部博士点基金(20020055036),国家自然科学基金(69977006,60077012),天津市自然科学基金(013800511)以及南开大学人事处科研启动基金资助项目。

作者简介:刘丽辉(1975—),男,河北保定人,南开大学现代光学研究所博士研究生,主要从事光纤光栅传感器与光纤通信技术的研究。E-mail:hdliulihui@eyou.com

2 实验原理

根据耦合模方程可以推出布拉格光纤光栅的反射波长^[4]

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

其中, n_{eff} 为光纤芯的有效折射率, Λ 为光栅的布拉格周期。如果只考虑压力产生的应变情况, 并对(1)式求导数, 则可变为

$$\lambda_P/\lambda_B = (1 - P_\epsilon)\epsilon \quad (2)$$

其中 λ_P 为光栅反射波长变化量, ϵ 为应变, P_ϵ 为光纤中的有效弹光系数, 典型的石英光纤 $P_\epsilon = 0.22$ 。

对于用聚合物封装后的布拉格光纤光栅来说, 由于压力导致光纤光栅轴向的应变可以写成^[9]

$$\epsilon = -P(1 - 2\mu)/E \quad (3)$$

其中 P 为压强, μ 和 E 分别为聚合物的泊松比和弹性模量。代入(2)式可得

$$\lambda_P/\lambda_B = -(1 - P_\epsilon)(1 - 2\mu)P/E = K_P P \quad (4)$$

式中 $K_P = -(1 - P_\epsilon)(1 - 2\mu)/E$ 为传感器的压力灵敏度。考虑到压力对聚合物的应变作用在光纤光栅上有一个衰减, 则(4)式可写成

$$\lambda_P/\lambda_B = \eta K_P P \quad (5)$$

η 为聚合物传递系数。我们用两种不同的聚合物按不同的比例均匀混合后进行封装, 其聚合物材料的泊松比 μ 和弹性模量 E 分别约为 0.4 和 1.11×10^9 N/m²。根据理论计算的结果, 封装后的光纤光栅压力传感器的灵敏度为 -1.41×10^{-4} /MPa。

3 实验结果与讨论

采用如图 1 的装置, 其中布拉格光纤光栅是在高掺锗的光纤中用相位掩模法研制的, 其布拉格发射波长为 1558.92 nm, 峰值反射率为 90%, 带宽约为 0.7 nm。用两种聚合物(按 1:1 的比例)均匀混合后对光纤光栅进行封装。封装好的压力传感头长、宽、高分别为 50 mm, 10 mm 和 15 mm。在封装前先将光纤光栅施加预应力防止封装后的光栅产生啁啾现象, 经过十几个小时的固化后, 光栅压力传感头呈白色半透明状。

图 2 是实验装置原理图, 将压力传感器与 3 dB 耦合器相连接。耦合器有四个端口(1, 2, 3, 4 端), 其中 1 端口接我们自行研制的宽带光源(BBS), 2 端口接入 ADVANTEST Q8383 型光纤光谱仪(OSA)进行测量, 光谱仪的波长最小分辨率为 0.1 nm, 扫描平均次数为 5 次, 3 端口接匹配液(IMG), 防止 3 端口光纤的端面反射。4 端口接光纤 Bragg 光栅压力

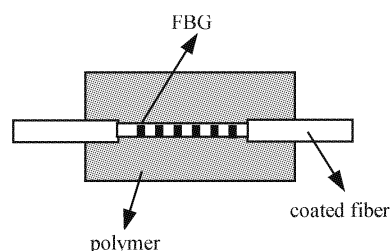


图 1 封装后的光纤光栅结构图

Fig. 1 Schematic diagram of mixed polymer packaged fiber grating

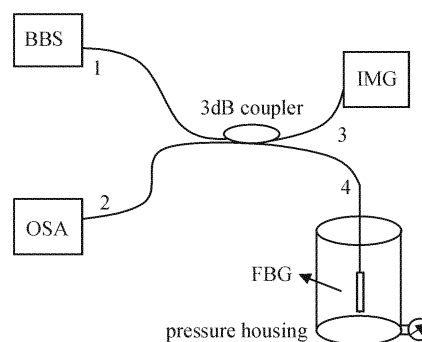


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

传感器, 将其放入自行设计的压力罐中进行测量。当宽带光源发出的信号光经 3 dB 耦合器入射到光栅压力器中时, 符合布拉格条件的光被反射回来, 再经过 3 dB 耦合器耦合到光谱分析仪中。

图 3 是在室温(23℃)恒定情况下测量到不同压力下的反射布拉格光谱图。其中曲线 a 表示压力为 0.1 MPa 时的反射峰, 中心反射波长是 1558.92 nm。曲线 b 表示压力增至 10 MPa 时中心反射波长变化的情况。由于压力的增加, 使得压力传感头的体积减小, 因此带动布拉格光纤光栅的栅格间距和有效折射率发生变化, 使光栅发射波长向短波漂移。从图上可以明显地看出当压力升至 10 MPa 时波长向短波漂移了 1.92 nm, 中心反射波长为 1557.00 nm。

图 4 是在 0~10 MPa 的压力范围内测得两种聚合物封装后的光纤光栅压力传感器的压力响应曲线。经多次测量可知, 随着压力的增加, 封装后的光纤光栅反射波长逐渐向短波长方向漂移, 这与理论上推导的(4)式变化趋势相一致。其波长变化了 1.92 nm, 由数据拟合得到相应的压力灵敏度为 -1.22×10^{-4} /MPa, 是文献[4]中所报道裸光栅压力灵敏度的 62 倍, 也是文献[6]中用聚合物封装后光纤光栅的约 2 倍, 线性拟合度为 0.987。将实验

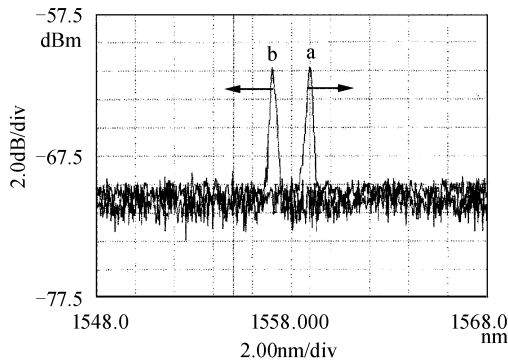


图 3 不同压力下的光谱图

Fig. 3 Spectrum of the sensing grating with different pressures

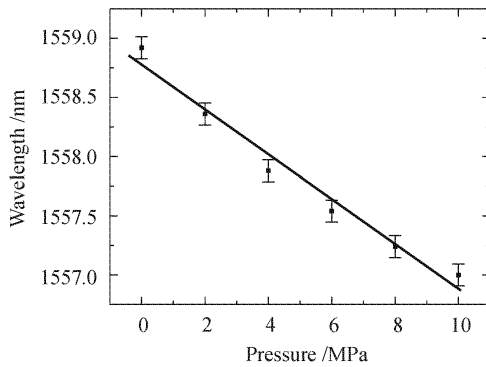


图 4 波长与压力变化曲线

Fig. 4 Measured wavelength shift of pressure sensor with polymer

结果代入(5)式,可以求得聚合物传递系数 $\eta = 0.87$ 。在封装前,由于光纤光栅表面不完全清洁使得光栅和聚合物不能充分接触,光栅和聚合物之间不能产生较强的摩擦力,并且由于在封装过程中聚合物内部有一些气泡同样影响了测量的线性度。另一方面由于压力表读数产生误差造成压力增长不太均匀以及光谱仪的扫描误差使得测量中引入了一定的误差。理论与实验之间的差值主要是由于封装条件不同和理论值不精确所造成的。由此可见,用两种聚合物均匀混合后封装的压力传感器有比裸光栅压力传感器和一般聚合物封装的压力传感器灵敏度大的特点,其线性度较好,并具有较好的重复性。

4 结 论

实验表明,选用泊松比较大,弹性模量较小的材料作为封装材料,可以大幅度提高光栅对压力的灵敏度,封装材料的选取和封装技术则是提高光栅封装元件质量的关键。实验中采用两种聚合物均匀混合后对光栅封装,可以较大程度地提高光栅压力灵敏度,达到 $-1.22 \times 10^{-4} / \text{MPa}$,这种材料是一种比较好的封装材料。分析表明,此传感器可望应用于气压、液压等领域。

参 考 文 献

- 1 Qinghe Mao, John W. L. Lit. Widely tunable L-band erbium-doped fiber laser with fiber Bragg gratings based on optical bistability [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(9):1335~1337
- 2 Chi Ronghua, Lü Kecheng, Chen Shengping *et al.*. Research on lasing wavelength of fiber grating laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11):1315~1319
迟荣华,吕可诚,陈胜平等. 光纤光栅激光器激光波长的研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11):1315~1319
- 3 Qian Jing-ren, Liang Ming. Analysis of the fiber Bragg grating Sagnac loops and the optical envelope bandpass filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):159~162
钱景仁,梁明. 光纤光栅 Sagnac 环特性及包络带通滤波器的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):159~162
- 4 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fibre grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4):398~399
- 5 Hsi-Hsun Tsai, Win-Yann Jang, Fen-Fen Yeh. Central wavelength tunable mechanism for temperature compensated package of fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2001, **24**(1):86~90
- 6 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. High-sensitivity fiber grating pressure sensor with polymer jacket [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3):211~214
刘云启,郭转运,刘志国等. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3):211~214
- 7 G. W. Yoffe, Peter A. Krug, F. Ouellette *et al.*. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30):6859~6861
- 8 Zhang Ying, Guan Bai-ou, Dong Xin-yong *et al.*. A novel fiber grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature based on prestrain technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):729~731
张颖,关柏鸥,董新永等. 一种新颖的基于预应变技术的光纤光栅应变温度传感器 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):729~731
- 9 G. B. Hocker. Fiber-optic sensing of pressure and temperature [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9):1445~1448