

文章编号: 0253-2239(2002)01-0089-03

# 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究\*

张 颖 刘志国 郭转运 袁树忠 冯德军 董孝义

(南开大学光子技术中心, 天津 300071)

姚春德

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用增敏罐封装的方法, 设计并研究了一种新型高灵敏度的光纤光栅压力传感器, 其压力灵敏系数可高达  $-3.41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$  (相应于灵敏度  $-5.277 \text{ nm/MPa}$ ), 压力灵敏系数较裸光纤提高了 1722 倍, 且线性度良好, 可应用于低压情况下物理量的传感测量。

关键词: 光纤光栅; 压力传感; 增敏封装

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 光纤光栅在光纤传感方面的应用<sup>[1, 2]</sup>越来越受到人们的重视, 光纤压力传感器在现代工业的许多领域有着重要的应用价值。1993 年, Xu 等首先对裸光纤光栅的压力传感特性进行了研究<sup>[3]</sup>, 发现裸光纤光栅对压力的敏感程度很低, 在 70 MPa 的高压下, 光纤光栅中心反射波长仅移动了 0.22 nm, 裸光纤光栅的压力灵敏系数为  $-1.98 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ 。1996 年, 他们又将光纤光栅固定于中空的玻璃球结构中, 压力敏感系数提高到  $-2.12 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ , 使其对压力的敏感度提高了一个数量级<sup>[4]</sup>。1998 年 Liu 等人<sup>[5]</sup>应用聚合物封装的方法将光纤光栅压力灵敏度系数提高到了  $-6.28 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 。

本文设计了一套新型光纤光栅传感器, 并对其压力传感特性进行了研究。研究表明, 该高灵敏度传感器可用于气压、液压、声压和振动的传感测量。

## 2 基本原理

由耦合模理论可知, 光纤布拉格光栅 (FBG) 中

心反射波长为

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

式中  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅的周期。当温度不变, 光纤光栅只受轴向应变作用时, 光纤光栅中心反射波长的相对变化为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon, \quad (2)$$

式中  $P_e = n_{\text{eff}}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]/2$  为光纤的有效弹光系数;  $\mu$  为纤芯材料的泊松比;  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为弹光系数;  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率。对于我们选用的光纤,  $n_{\text{eff}} = 1.46$ ,  $\mu = 0.16$ ,  $P_{11} = 0.12$ ,  $P_{12} = 0.27$ , 由此可以计算得  $P_e = 0.22$ <sup>[3]</sup>。

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[6]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

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

式中  $\mu$  和  $E$  分别为聚合物材料的泊松比和弹性模量,  $P$  为容器内压强, 因此光纤光栅中心反射波长的相对变化可以表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = -(1 - P_e)(1 - 2\mu)P/E. \quad (4)$$

对于我们采用的增敏罐封装方法, 由于金属套筒屏蔽了其它方向压力, 只容许开口方向的压力使聚合物弹性体产生轴向应变, 所以  $\mu = 0$  (4) 式就演化为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = -(1 - P_e)P/E = k_p P, \quad (5)$$

\* 国家攀登计划预选项目、天津科委科技攻关项目和国家博士点基金资助课题。

E-mail liu-zgh@eyou.com

收稿日期 2000-09-22; 收到修改稿日期 2001-01-10

式中  $k_p = -(1 - P_e) / E$  定义为压力灵敏系数, 是一个仅与基底材料弹性特征和光纤参数有关的常数。由 (5) 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, 其杨氏模量为  $E = 1.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。将  $E$  和  $P_e$  数值代入 (5) 式即可得到这种增敏罐封装的光纤光栅传感器的压力灵敏系数为  $k_p = -4.11 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。

### 3 实验结果与分析

在压力容器内, 光栅不但受轴向压力, 而且受径向压力, 径向压力的作用使得轴向压力引起的轴向应变和折射率的变化减小。在聚合物封装的光纤光栅的压力增敏实验中, 明显地观察到这种现象。

实验中, 为避免径向压力的影响, 设计了一种增敏罐封装方法, 将增敏有机聚合物固化于厚壁金属外套圆筒中, 光纤光栅置于圆筒轴线上, 并准直地固化于聚合物中。金属套筒屏蔽其它方向压力, 只容许开口方向的压力使聚合物弹性体产生轴向应变, 图 1 为传感器结构示意图。

假设聚合物材料与光纤光栅和金属圆筒紧密粘接, 由于光纤很细, 它对聚合物的弹性形变影响可以忽略不计, 光纤光栅的应变与弹性聚合物的应变可视为相同。

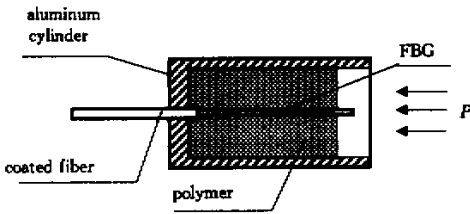


Fig.1 Schematic diagram of fiber grating pressure sensor element with polymer jacket

将上述压力传感器置于精密控制液压的压力容器中, 用低压压力表测量压强, 同时应用光谱仪 (Q8383 型) 测量波长的变化。在  $0 \sim 0.44 \text{ MPa}$  的压强范围内, 高灵敏度光纤光栅压力传感器的压力响应曲线如图 2 所示,  $0$  和  $0.44 \text{ MPa}$  状态下传感光栅的反射谱如图 3 和图 4 所示。由图 2 可知, 这种封装的传感头的压力响应曲线具有良好的线性度 ( $R^2 = 0.9992$ ), 由数据拟合得到其压力灵敏系数为  $-3.41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$  (相当于压力灵敏度为  $-5.274 \text{ nm/MPa}$ ), 是裸光纤光栅压力灵敏系数  $-1.98 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$  [13] (相当于压力灵敏度为  $-3.063 \times 10^{-3} \text{ nm/MPa}$ ) 的 1722 倍。

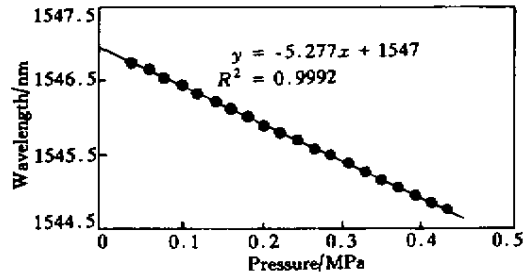


Fig.2 The pressure response curve

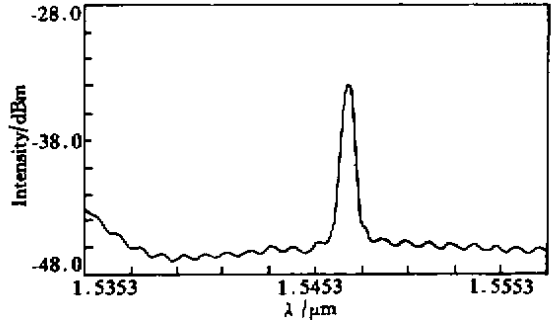


Fig.3 The spectrum response at 0 MPa.  $\lambda_1 = 1.546740 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 1.555300 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = -33.85 \text{ dBm}$ ,  $L_2 = -46.42 \text{ dBm}$ ,  $L_1 = -37.31 \text{ dBm}$ ,  $L_2 = -48.01 \text{ dBm}$

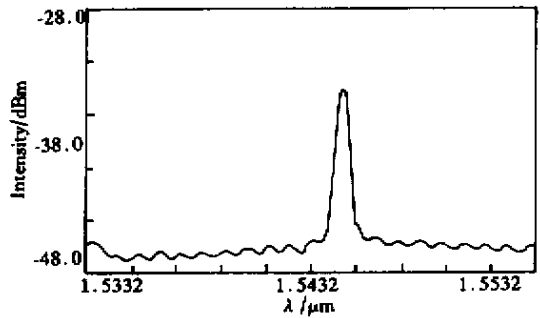


Fig.4 The spectrum response at 0.44 MPa.  $\lambda_1 = 1.544640 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 1.553200 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = -33.85 \text{ dBm}$ ,  $L_2 = -46.42 \text{ dBm}$ ,  $L_1 = -37.31 \text{ dBm}$ ,  $L_2 = -48.01 \text{ dBm}$

采用的封装聚合物比文献 [4] 中的杨氏模量要小很多, 为  $E = 1.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。当响应波长为  $1546.74 \text{ nm}$  时, 根据 (5) 式的计算, 光纤光栅的压力灵敏度的理论计算值为  $-6.350 \text{ nm/MPa}$  (即  $k_p = -4.11 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ ), 比实验值大。这是由于金属罐体边界的影响所致, 即一方面, 由于聚合物与金属圆筒壁紧密粘结, 产生的阻尼力使聚合物弹性体受外界轴向压力作用时的应变减小; 另一方面, 圆筒壁还限制了聚合物弹性体的径向变化, 使其泊松比  $\mu = 0$ , 因此弹性体的等效杨氏模量增大。

所以, 对于设计的传感器结构, 需要对 (3) 式进行必要的修正, 增加一个修正因子, 即压力传递因子  $\eta$ , 于是 (3) 式变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \eta k_p P. \quad (6)$$

经实验和理论比较,可算得压力传递因子为  $\eta = 0.83$ 。

实验表明增大金属罐直径,改进聚合物与光纤光栅和圆筒壁间的粘接工艺,可使实验测量与理论计算结果更加相符。

结论 采用增敏罐封装的方法,设计了一种新型高灵敏度光纤光栅压力传感器。并在  $0 \sim 0.44$  MPa 的压力范围内和  $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 71\text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内,对其压力特性进行了测量,测得其压力灵敏系数可高达  $-3.41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ ,较裸光纤光栅压力传感器的压力灵敏系数提高了约 1722 倍,其压力特性曲线具有良好线性度。这种增敏封装的光纤光栅压力传感头适用于低压情况下物理量的传感测量,包括水声、微振动和加速度等物理量的测量。通过改变传感头的结构及封装材料,可以设计出适合于不同需要的

光纤光栅传感器。

### 参 考 文 献

- [1] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors. *Proc. SPIE*, 1989, **1169**: 98 ~ 107
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442 ~ 1463
- [3] Xu M G, Reekie L, Chow Y T *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398 ~ 399
- [4] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2): 128 ~ 129
- [5] Liu Y, Guo Z, Zhang Y *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating. *Electron. Lett.*, 2000, **26**(6): 564 ~ 566
- [6] Hocker G B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9): 1445 ~ 1448

## A High-Sensitivity Fiber Grating Pressure Sensor and Its Pressure Sensing Characteristics

Zhang Ying Liu Zhiguo Guo Zhuanyun Yuan Shuzhong Feng Dejun Dong Xiaoyi  
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Yao Chunde

(*National Engine Combustion Laboratory of Tianjin University, Tianjin 300071*)

(Received 22 September 2000; revised 10 January 2001)

**Abstract:** A high sensitivity fiber grating pressure sensor using the enhance-sensitivity-coated jar has been designed and studied. The pressure sensitivity is up to  $-5.277 \text{ nm/MPa}$ , which is corresponding to the sensitivity coefficients of  $-3.41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ . The sensitivity is about 1722 times the value of the bare fiber. The linearity is very good. This kind of sensor has potential applications in the sensing measurement at low-pressure.

**Key words:** fiber grating; pressure sensing; enhance-sensitivity-coating