

# 高灵敏度的光纤光栅压强传感器\*

傅海威<sup>1,2</sup> 乔学光<sup>2</sup> 贾振安<sup>2</sup> 傅君眉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)  
(<sup>2</sup> 西安石油学院信息科学系, 西安 710065)

**摘要:** 基于光纤布拉格光栅传感模型,提出了一种等强度梁与波纹管相结合的高灵敏度的光纤布拉格光栅压强传感器,推导了光纤布拉格光栅反射波中心波长相对偏移量与压强之间的解析关系式,从理论和实验上给出了压强灵敏度系数。该传感器的理论和实验压强灵敏度系数分别是  $1.476 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ 、 $1.35 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ ,是裸光纤光栅的 7455 倍和 6808 倍,理论值与实验值吻合得很好。同时指出通过调节等强度梁和波纹管的参量,可以将该传感器的压强灵敏度系数做得很高,直至破坏了光纤布拉格光栅。

**关键词:** 导波与光纤光学; 光纤布拉格光栅; 光纤布拉格光栅压强传感器; 压强灵敏度系数

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## A High-Sensitivity in-Fiber Bragg Grating Pressure Sensor

Fu Haiwei<sup>1,2</sup> Qiao Xueguang<sup>2</sup> Jia Zhen'an<sup>2</sup> Fu Junmei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)  
(<sup>2</sup> Department of Information Science, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065)

(Received 19 June 2003; revised 25 September 2003)

**Abstract:** Based on in-fiber Bragg grating sensing model, a high-sensitivity in-fiber Bragg grating pressure sensor was proposed by using uniform strength beam and bellow. The analytical formulae between pressure and relative shift of Bragg wavelength of in-fiber Bragg grating were derived. The pressure sensitivity coefficients were also obtained by analytical formulae and experiment respectively. The theoretical and experimental pressure sensitivity coefficients could reach  $1.476 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$  and  $1.35 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ , which were 7455 and 6808 times of that of the bare-fiber grating respectively. The experimental result fits the theoretical one well. At the same time, it was pointed out that the pressure sensitivity coefficients of this kind of sensor could be very large by regulating the parameters of strength beam and bellow till the in-fiber Bragg gratings were damaged.

**Key words:** guided wave and fiber optics; in-fiber Bragg gratings (FBG); in-fiber Bragg grating pressure sensor; pressure sensitivity coefficient

## 1 引 言

光纤光栅是对应变和温度都很敏感的器件,由

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划,2002AA313150)、国家自然科学基金(69877025)、国家教育部科学技术重点项目(02190)、陕西省自然科学基金(2000C34)、陕西省教育厅科学技术项目(02JK158)和西安市科技攻关项目(GG200126)资助课题。

E-mail: hwfu7688@21cn.com; hwfu2@tom.com

收稿日期:2003-06-19;收到修改稿日期:2003-09-25

于其抗电磁干扰、耐腐蚀等诸多优异的特性受到了人们广泛的关注,已经在民用建筑、石油化工等领域得到应用<sup>[1~5]</sup>。有关压强传感器方面的文章已经很多<sup>[6~10]</sup>,其中文献[6]中给出了裸光纤光栅的压强传感系数为  $1.98 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ ,文献[7]将光纤光栅放在中空的玻璃球中,使得压强灵敏度增敏到  $2.12 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ,最近文献[10]通过将聚合物封装在一端封闭的空心圆柱中,使得压强灵敏度高达  $3.41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。

本文从光纤光栅应变传感模型出发<sup>[11]</sup>,提出并设计了一种高灵敏度的光纤光栅压强传感器,该传感器的灵敏度和测量范围可以根据不同的需要进行调节,从理论上讲可以将传感器的灵敏度做到很高。

## 2 基本理论

光纤布拉格光栅在轴向均匀应力作用下,中心波长相对变化量与应变之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中, $P_e$ 是有效弹光系数, $\epsilon$ 为光栅上所发生的应变。对于纯熔融石英, $P_e = 0.216$ 。

基于梯形梁、波纹管的光纤光栅压强传感器的原理如图 1 所示。将光纤光栅粘贴在梯形梁上,再安装在密闭容器中,密闭容器壁上装有波纹管,波纹管的移动端与悬臂梁相连。当外界压强变化时,波纹管会产生位移,从而将集中力作用在悬臂梁上,使光栅产生纵向的应变,导致布拉格波长发生漂移。

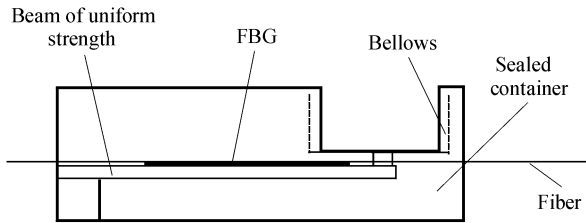


Fig. 1 Schematic diagram of the pressure sensor

当外界压强为  $p$  时,波纹管上所受的力  $F$  为

$$F = pS, \quad (2)$$

其中, $S$ 为波纹管的有效面积。在集中力的作用下,光栅处所产生的应变为<sup>[12]</sup>

$$\epsilon = \frac{hV_{\max}}{2CL^2} \frac{Z}{Lb_1/(b_2 - b_1) + Z}, \quad (3)$$

其中

$$V_{\max} = \frac{12F_1}{Eh^3} \frac{L^3C}{b_2 - b_1},$$

$b_1$ 、 $b_2$ 、 $h$ 、 $L$ 分别是梯形梁的上、下底、厚和长, $E$ 为材料的弹性模量, $V_{\max}$ 是梁自由端的挠度, $C$ 是由梁的参量决定的常数, $F_1$ 是梯形梁自由端所受的集中载荷。当  $b_2 \gg b_1$  时,梯形梁可以看作是等强度梁,对于如图 1 所示的压强传感器,经过简单推导可得布拉格波长相对偏移量与压强之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e) \frac{6LS}{Eh^2b_2 + 6kL^3/h} p = \eta p, \quad (4)$$

式中

$$\eta = (1 - P_e) \frac{6LS}{Eh^2b_2 + 6kL^3/h}, \quad (5)$$

这就是粘贴在等强度梁上的光纤光栅中心波长相对偏移量与压强之间的关系,而且可以看出两者之间是线性关系, $\eta$ 就是压强灵敏度系数。

由上式可以看出,压强灵敏度系数不仅取决于光纤光栅的弹光系数,同时也取决于悬臂梁的材料和尺寸以及波纹管的材料和尺寸。对于给定的光纤光栅,适当选择波纹管 and 悬臂梁的材料和尺寸就可以提高传感器的压强灵敏度系数。

## 3 实验结果与讨论

将光纤光栅分别粘贴在等强度梁上,当外界压强变化时,可以通过波纹管将压强变化转化为力,并传递到等强度梁上,使梁发生形变,从而引起光纤光栅中心波长发生偏移。使用 Anritsu 公司生产的 MS9710C 光谱分析仪测量光纤光栅中心波长偏移量(分辨力为 0.05nm),压强计测压强,就可以得到压强、中心波长相对偏移量之间的关系。

实验中所用梯形梁的参量:上下底边宽度分别为  $b_1 = 2$  mm,  $b_2 = 26$  mm;臂长  $L = 50$  mm;厚度  $h = 1.5$  mm;材料为铍青铜,杨氏模量  $E = 1.28 \times 10^{11}$  Pa。波纹管的弹性系数为  $k = 3.27 \times 10^3$  N/m,有效截面积为  $S = 5.7256$  cm<sup>2</sup>。

从理论上,中心波长相对偏移量与压强的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1.476 \times 10^{-2} p, \quad (6)$$

压强灵敏度系数为:  $1.476 \times 10^{-2}$  MPa<sup>-1</sup> (在 1550 nm 附近的灵敏度为 22.88 nm/MPa),比文献[10]中相应灵敏度大 4 倍多,是裸栅 ( $1.98 \times 10^{-6}$  MPa<sup>-1</sup>) 的 7455 倍。

将传感器放在压力容器中加压,用压力表和光谱仪分别测压强和布拉格反射波中心波长。测试中压强每增加 0.01 MPa 记录一组数据,并分别以压强和中心波长相对偏移量为纵轴和横轴,得两者之间的关系如图 2 所示。

图 2 中离散点为实验点,直线为拟合出的直线,该直线的方程为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1.35 \times 10^{-2} p + 1.76 \times 10^{-6}.$$

就压强灵敏度系数而言,实验值  $1.35 \times 10^{-2}$  MPa<sup>-1</sup> 和理论值符合得很好;所不同的是实验数据拟合出的直线的截距不为零,但该项要比一次项系数小三个数量级,对结果没有多大的影响。实验中所用的光栅中心波长为 1549.54 nm,则波长偏移量为

20.9 nm/MPa,是裸光纤光栅0.00307 nm/MPa的6808倍,压强灵敏度系数非常的高。

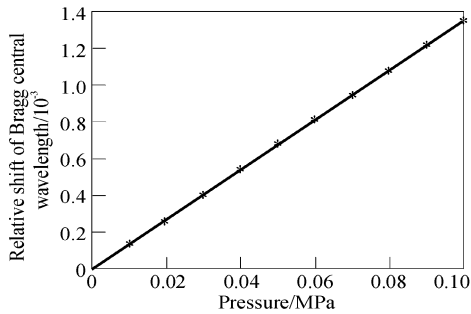


Fig. 2 Relation between pressure and relative central wavelength

但是,也应看到实验值和理论值之间还是有一定的差异,就灵敏度系数这一项来看,实验值小于理论值,这主要是由于光纤光栅与等强度梁的粘合不够紧密以及没有考虑密封容器中气体压缩要产生附加压强而引入的。

**结论** 本文提出了一种高灵敏度的光纤光栅压强传感器,其压强灵敏度系数的理论值高达  $1.476 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ ,实验值高达  $1.35 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ ,压强灵敏度要比裸光纤光栅的灵敏度以及相关文献中报道的同类传感器的灵敏度高很多倍。可以大大降低光纤光栅传感的解调难度,同时也可以提高压强测量的精度。从本文提出的传感器结构可以看出,通过改变波纹管的弹性系数和有效面积以及悬臂梁的材料和尺寸,就可以改变传感器的压强灵敏度系数以及传感器的测量范围。但在实际应用中,要注意灵敏度和量程之间有一定的折中,灵敏度高了,量程自然就小了,因为光纤光栅的应变有一个极限值,超过这个值光栅就会被破坏。总之,本文提出的传感器是一种非常灵活方便的压强传感器。

该传感器可以用于要求具有较高抗电磁干扰的环境中压强和压力测量,譬如用于石油工业中储油

罐压强检测,天然气、煤气管道压强以及泄漏检测等,具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Maaskant R, Alavie T, Measures R M *et al.*. Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring. *Cement and Concrete Composites*, 1997, **19**(1):21~33
- 2 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Novel sensing device of fiber Bragg grating with temperature active compensation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):999~1003 (in Chinese)
- 3 Spirin V V, Shlyagin M G, Miridonov S V *et al.*. Fiber Bragg grating for petroleum hydrocarbon leak detection. *Opt. Lasers in Engng.*, 2000, **32**(5):497~503
- 4 Sheng Qiuqin, Shi Kebin, Gao Limo *et al.*. Study on the method of matching detection of fiber grating vibration sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):847~851 (in Chinese)
- 5 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *IEEE J. Lighthwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 6 Xu M G, Reekie L, Chow Y T *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4):398~399
- 7 Xu M G, Ceiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2):128~129
- 8 Hocker G B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9):1445~1448
- 9 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating. *Electron. Lett.*, 2000, **26**(6):564~566
- 10 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A High-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1):89~91 (in Chinese)
- 11 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* (光纤光学). Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 3 (in Chinese)
- 12 Qin Zixiong, Zeng Qingke, Xiang Yang *et al.*. Grating wavelength shifter with a broad-range tunability by using a beam of uniform strength. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(12):1421~1425 (in Chinese)