

# 基于平面膜片的光纤光栅传感研究\*

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

(1 西安交通大学电信学院, 西安 710049)

(2 西安石油大学理学院, 西安 710065)

**摘要** 提出了一种基于平面膜片的光纤光栅压强传感器. 讨论了该传感器反射谱展宽、峰值波长变化与压强之间的关系. 指出将光纤光栅沿径向粘贴在膜片中心附近时, 反射谱的峰值波长与压强之间具有良好的线性关系, 可以通过检测峰值波长来检测压强. 该传感器的压强响应灵敏度系数的实验值为 0.3964 nm/MPa, 是裸光纤光栅压强灵敏度系数的 132.1 倍. 该传感器的灵敏度系数与压强测量范围可以通过改变膜片的尺寸、材料的弹性模量、泊松比等参量来调节.

**关键词** 导波与光纤光学; 光纤光栅传感; 光纤光栅压强传感; 压强响应灵敏度

**中图分类号** TN253; TP212

**文献标识码** A

## 0 引言

光纤光栅是应变温度都很敏感的器件, 当光纤光栅受到应力作用或环境温度发生变化时, Bragg 波长都会发生偏移, 通过检测波长偏移量就可以得到压强和温度的值. 由于光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、便于复用等诸多优点受到人们广泛的关注<sup>[1-3]</sup>, 并且已经被用于工程实践中<sup>[4,5]</sup>. 当直接用裸光纤光栅进行压强传感测量时, 其压强响应灵敏度系数为  $1.98 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$  (当所用的光纤光栅中心波长为 1550 nm 时, 对应的压强响应灵敏度为  $0.003 \text{ nmMPa}^{-1}$ )<sup>[6]</sup>, 一个兆帕 (MPa) 的压强变化仅引起 0.003 nm 的波长偏移量, 压强响应灵敏度较低. 要想实现对压强的高精度传感测量, 就必须提高光纤光栅对压强的响应灵敏度, 对光纤光栅压强响应进行增敏. 在光纤光栅压强增敏中, 大多通过对光纤光栅进行适当的封装来实现<sup>[5,7]</sup>. 文献[7]将光纤光栅封装在聚合物中, 实现了压强响应的增敏.

本文将光纤光栅沿径向粘贴在圆形金属平面膜片的中心附近, 分析了反射谱峰值波长与膜片两侧压强差值之间良好的线性关系, 实现了压强响应的增敏. 为兼顾量程的需要, 本文所实现的压强传感器的压强响应灵敏度系数为 0.3964 nm/MPa, 是裸光纤光栅压强响应灵敏度 0.003 nm/MPa 的 132.1

倍, 量程的理论值可达 10 MPa. 与聚合物封装相比, 本文所提出的传感器制作工艺简单, 性能稳定, 重复性好, 同时通过适当选择膜片的尺寸和材料的力学参量可以方便的调节传感器的量程和压强响应灵敏度.

## 1 原理

### 1.1 光纤光栅应变响应

根据光纤布拉格光栅的耦合模理论, 均匀光纤 Bragg 光栅 Bragg 波长  $\lambda$  为<sup>[8]</sup>

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

式中  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率,  $\Lambda$  为光纤光栅周期. 当光纤光栅受到外力作用时, 由于弹光效应和栅距的变化, 使得光纤光栅 Bragg 波长发生偏移, 即

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{d\varepsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$  为光纤 Bragg 光栅上所发生的应变.

利用应力和轴向应变与光栅周期的关系, 以及有效折射率的变化与光纤光栅弹光系数和应变张量之间的关系, 可得 Bragg 波长相对偏移量与其轴向应变之间的关系为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = (1 - p_e)\varepsilon \quad (3)$$

式中,  $\lambda_0$  为自然状态下光纤光栅的 Bragg 波长,  $\varepsilon$  为光纤光栅的轴向应变,  $\lambda$  是光纤光栅上的应变为  $\varepsilon$  时的 Bragg 波长,  $p_e$  为光纤光栅的有效弹光系数, 对于熔石英光纤  $p_e = 0.216$ .

### 1.2 光纤光栅压强传感器

图 1 为基于膜片的光纤光栅压强传感器的原理示意图. 整个传感器是一个密闭的空腔圆柱体, 圆形金属平面膜片是圆柱的一个底面, 圆柱体的另一个底面和侧面要比膜片厚得多, 空腔内是压强为一

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

Tel: 029-88382746 Email: hwf2@tom.com

收稿日期: 2004-02-24

个大气压的空气. 光纤光栅沿膜片的径向粘贴在膜片中心两侧. 当均匀压强作用在膜片上时, 由于膜片两侧的压强差的存在, 使得膜片发生形变, 带动粘贴其上的光纤光栅发生形变, 从而导致光纤光栅反射波峰值波长发生偏移. 因为传感器中的膜片是小位移膜片, 所以可以认为膜片变形对密闭容器的容积影响不大, 其内压强与外界大气压相等. 通过检测反射谱的峰值波长就可以测得膜片两侧压强差的大小, 也就测得了相对于大气压的压强大小.

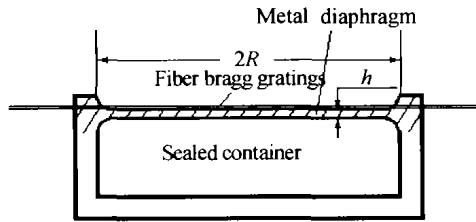


图1 传感器原理图

Fig. 1 Schematic of the sensor

在均匀压强  $p$  作用下, 也就是膜片上所受的相对于大气压的压强为  $p$  时, 平面膜片上半径为  $r$  的圆周上任意一点的径向应变为<sup>[9]</sup>

$$\varepsilon_r = \frac{3p}{8h^2E}(1-\mu^2)(R^2-3r^2) \quad (4)$$

式中,  $E$ 、 $\mu$  为膜片材料的弹性模量、泊松比,  $h$  为膜片的厚度,  $R$  为膜片的半径. 由式(4)可以看出, 在膜片中心附近很小的范围内, 即当  $R \gg r$  时, 径向应变可以近似表示为

$$\varepsilon_r = \frac{3p}{8h^2E}(1-\mu^2)R^2 \quad (5)$$

工程上, 当  $r/R \leq 0.1$  时, 就认为  $R \gg r$ , 用式(5)代替式(4), 计算应变值所引入的误差将小于 3%; 当  $r/R \leq 0.05$  时, 用式(5)代替式(4)计算应变值所引入的误差将小于 2.5%。

式(4)两边对半径  $r$  求导数可得径向应变随半径  $r$  的变化率

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial r} = -\frac{9p}{4h^2E}(1-\mu^2)r \quad (6)$$

式(6)表明, 径向应变随半径的变化率与半径成线性关系, 半径越大, 径向应变的变化量越大.

将式(4)代入式(3), 经整理可得

$$\lambda = \frac{3\lambda_0}{8h^2E}(1-p_e)(1-\mu^2)(R^2-3r^2)p + \lambda_0 = \eta p + \lambda_0 \quad (7)$$

式中

$$\eta = \frac{3\lambda_0}{8h^2E}(1-p_e)(1-\mu^2)(R^2-3r^2) \quad (8)$$

可见, 压强响应灵敏度系数  $\eta$  是半径  $r$  的二次函数, 压强响应灵敏度取决于膜片的弹性模量、泊松比、膜片的大小、膜片的厚度、光纤光栅粘贴的位置等. 灵

敏度的改变必然会引起测量范围的变化. 式(8)两边对半径  $r$  求偏导数可得压强响应灵敏度系数随  $r$  的变化率

$$\frac{\partial \eta}{\partial r} = -\frac{9\lambda_0}{4h^2E}(1-p_e)(1-\mu^2)r \quad (9)$$

在一定压强下, 波长偏移量随  $r$  的变化率可以通过式(7)对  $r$  求偏导数得到

$$\frac{\partial(\lambda-\lambda_0)}{\partial r} = -\frac{9\lambda_0}{4h^2E}(1-p_e)(1-\mu^2)r p \quad (10)$$

式(10)表明, 在同一均匀压强作用下, 膜片中心处波长偏移量的增量为 0, 越远离膜片中心的地方, 波长偏移量的变化量越大, 而且是向短波方向偏移. 这样, 光纤光栅反射波谱在漂移过程中将展宽. 靠近膜片中心部分栅的反射谱偏移量大, 但带宽展宽较小, 反射率较高; 远离膜片中心部分栅的反射谱漂移相对要小, 带宽展宽较大, 反射率也要低一些.

粘贴于膜片径向上的某一很小部分光纤光栅可以看作是均匀光栅, Bragg 波长与压强之间的关系仍然可以看作是线性关系, 压强响应灵敏度取决于膜片的弹性模量、泊松比、膜片的大小、膜片的厚度、光纤光栅粘贴的位置等. 但整体而言, 反射波谱在定向漂移的同时, 带宽也要展宽, 而且带宽的展宽与压强成线性关系.

对于粘贴于膜片中心两侧的光纤光栅而言, 除整个反射波谱定向漂移以外, 带宽也会展宽, 同时反射波谱会有确定的峰, 通过检测峰值波长或带宽就可以测量压强.

## 2 实验结果与分析

实验中所用膜片的半径  $R = 17 \text{ mm}$ , 厚度  $h = 1.5 \text{ mm}$ , 弹性模量  $E = 1.28 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 泊松比  $\mu = 0.306$ . 光纤光栅沿径向粘贴于膜片中心附近, 在中心的一侧栅区长度约 2 mm, 其余在另一侧. 在  $19.1^\circ\text{C}$ , 膜片的两侧的压强差为 0 MPa 时, 也就是膜片不发生形变时, 光纤光栅反射波峰值波长为 1547.2 nm. 将传感器置于压力容器罐中, 用压力表校正仪给压力罐加压, 用压力表测出压力容器中的压强, 压力表的读数就是罐内压强相对于大气压的值也就是, 也就是作用于传感器中膜片两侧的压强差, 用 MS9710C 型光谱分析仪测量传感器在不同压强下的波长值, 得到峰值波长随压强的变化关系如图 2 所示, 整个测试是在  $19.1^\circ\text{C}$  恒温和一个大气压环境中进行的.

图 2 中的离散点为实验数据点, 实线为最小二乘拟合直线, 其方程为

$$\lambda = 0.3964p + 1547.2 \quad (11)$$

式中压强单位为兆帕(MPa),波长单位为纳米(nm). 相应压强的灵敏度系数为 0.3964 nm/MPa,是裸光纤光栅灵敏度系数 0.003 nm/MPa 的 132.1 倍,在 3.4 MPa 压强作用下的波长偏移量为 1.4 nm. 实验数据点的线性度为 0.9995,线性度很好.

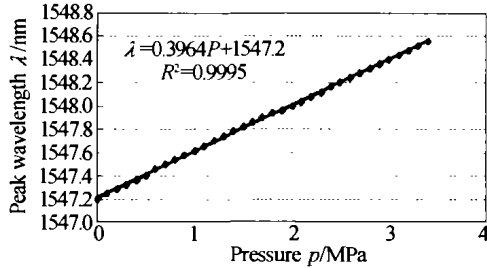


图2 压强与峰值波长关系曲线

Fig. 2 Curve of the peak wavelength versus the pressure

图3,图4,分别为0 MPa,3 MPa 压强下,也就是膜片内外压强差为 0 MPa,3 MPa 情况下的光谱图. 与 0 MPa 压强下的反射谱相比,3 MPa 压强下的反射波谱发生了较大的啁啾,但在图4中反射谱的峰明显的存在,并且是唯一的,在整个测量过程中,该峰是稳定的,始终在反射谱的长波长端. 这一现象可以从理论上给以解释. 实验中光纤光栅粘贴在膜片中心附近,一侧有 2 mm 长,另一侧稍长些. 这样以膜片中心为中心的 4 mm 范围内的光栅相当于两个完全相同的光栅,而且中央 2 mm 范围内的光栅部分在压强变化过程中可以认为不发生啁啾,这一部分栅的反射波谱将形成整个反射波谱中的峰,对应于光谱图中的峰. 远离中心部分的栅的反射波的带宽将展宽,反射率也低一些,这样就使整个反射波谱的带宽展宽,而且产生了一个与膜片中心部分光

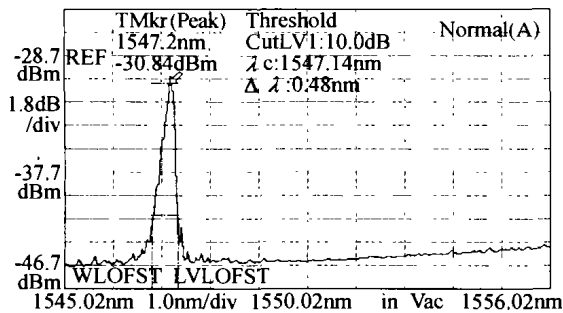


图3 0 MPa 时的光谱图

Fig. 3 Spectrogram of the sensor at the pressure of 0 MPa

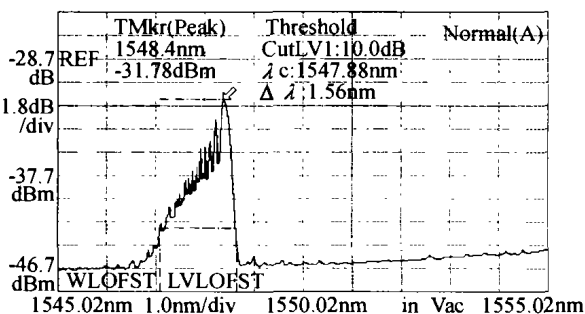


图4 3 MPa 时的光谱图

Fig. 4 Spectrogram of the sensor at the pressure of 3 MPa

栅相对应的反射波谱中的峰. 两图中的峰值反射功率分别为 -30.84 dBm、-31.78 dBm,变化不大.

取  $r=0$  时,将其它相关参数代入式(7),可得膜片中心处部分光栅的反射波峰值波长与压强的关系为

$$\lambda = 0.4137p + 1547.2 \quad (12)$$

同样,方程中压强的单位为兆帕(MPa),波长的单位为纳米(nm). 压强响应灵敏度系数的理论值为 0.4137 nm/MPa,是裸光纤光栅压强响应灵敏度 0.003 nm/MPa 的 137.9 倍.

比较由式(11)给出的压强响应灵敏度的实验值和由式(12)给出理论值,可以得到压强灵敏度实验值的相对误差为 4.2%. 引起误差的主要原因是光纤光栅是否紧紧粘贴在膜片上,使得膜片表面所发生的应变传递到光栅上;再者式(4)中给出的是膜片表面的应变,实验中粘贴在膜片上的光纤光栅中心线到膜片表面还有一段距离,公式本身就有误差,尤其是膜片为薄膜片时影响更大.

实验测得的反射波谱带宽展宽与压强之间的关系由图5给出,图中的点为实验数据点,直线为最小二乘拟合直线. 由图可以看出,带宽随着压强的增大而增大. 拟合直线的方程为  $\Delta\lambda = 0.3665p + 0.416$ ,式中, $\Delta\lambda$  为带宽,单位为纳米(nm); $p$  为压强,单位为兆帕(MPa). 实验数据的线性度为 0.9913,表明带宽与压强之间存在良好的线性关系,这与前面的理论分析也是一致的.

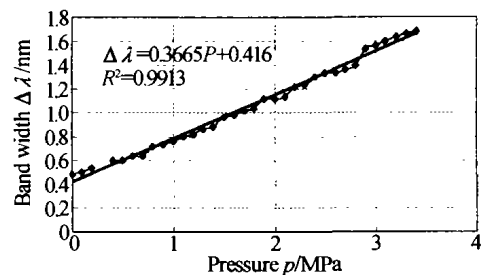


图5 带宽与压强的关系曲线

Fig. 5 Curve of the band width versus the pressure

### 3 结论

本文提出了一种基于平面膜片的光纤光栅压强传感器. 该传感器将光纤光栅沿径向直接粘贴在膜片中心附近,通过检测反射波峰值波长的方法实现压强传感测量. 分析讨论了该传感器反射谱展宽与光纤光栅粘贴位置、压强之间的关系,指出反射谱中的峰是由膜片中心部分光栅决定的,采用该文所提出的光栅粘贴方法可以提高峰值反射功率. 同时指出,通过调节膜片的大小、厚度、弹性模量、泊松比等参数,就可以调节该传感器的压强响应灵敏度和压强测量范围. 利用峰值波长来检测压强时,压强响

应灵敏度系数的理论值和实验值分别为0.4137 nm/MPa、0.3964 nm/MPa,分别是裸光纤光栅压强响应灵敏度系数的137.9、132.1倍. 实验中的压强的测量值达到3.4 MPa,按照应变与波长漂移之间的关系以及材料的弹性性能,该传感器的量程可达10 MPa,特别适用于油气输运管线中的压强检测.

### 参考文献

- 1 Kersey A D, Davis M A, Heather J, et al. Fiber grating sensors. *IEEE J of Lighthwave Tech*, 1997, **15**(8): 1442 ~ 1463
- 2 曾祥楷, 饶云江, 余般梅, 等. 光纤应变、温度、振动同时测量新技术的研究. *光子学报*, 2001, **30**(10): 1254 ~ 1258  
Zeng X K, Rao Y J, Yu B M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(10): 1254 ~ 1258
- 3 贾振安, 乔学光, 李明, 等. 光纤光栅温度传感的非线性现象. *光子学报*, 2003, **32**(7): 844 ~ 847  
Jia Z A, Qiao X G, Li M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **32**(7): 844 ~ 847
- 4 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
- 5 Zhou Yong, Liao Yanbiao, Lai Shurong. Simultaneous measurement of down-hole high pressure and temperature with a bulk-modulus and FBG sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(11): 1584 ~ 1586
- 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 Zhang Ying, Feng Dejun, Guo Zhuanyun, et al. High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(6): 618 ~ 619
- 8 廖延彪. 光纤光学. 北京:清华大学出版社, 2000. 197 ~ 205  
Liao Y B. *Fiber Optics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 197 ~ 205
- 9 徐国富, 刘瑞复, 田大超. 非电量电测工程手册. 北京:机械工业出版社, 1987. 293 ~ 296  
Xu G F, Liu R F, Tian D C. *Handbook of Electrical Measurement Engineering for Non-electrical Measurands*. Beijing: Chinese Machine Press, 1987. 293 ~ 296

## Studying on the Plat Metal Diaphragm Based Fiber Bragg Gratings Pressure Sensing

Fu Haiwei<sup>1,2</sup>, Qiao Xueguang<sup>2</sup>, Fu Junmei<sup>1</sup>

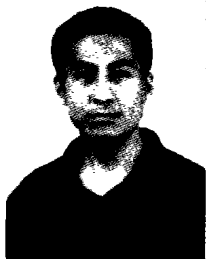
<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

<sup>2</sup> School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065

Received date: 2004-02-24

**Abstract** A kind of plat diaphragm based fiber Bragg grating pressure sensor is proposed. The relations of the spectral broadening, peak wavelength shift and the pressure are analyzed. It is indicates that the peak wavelength of the sensor and the pressure has good linearity when the FBG is attached radially to the diaphragm near the center. The pressure applied on the diaphragm can be measured by the peak wavelength measured. The experimental value of the pressure sensitivity coefficient is 0.3964 nm/MPa. It is 132.1 times of that of the bare FBG. It is also indicated that the pressure sensitivity of the sensor varies with the size and Young's modulus and Poisson's ratio of the diaphragm.

**Keywords** Guided and fiber optics; Fiber Bragg grating sensing; Fiber Bragg grating pressure sensing; The pressure sensitivity of the sensor



**Fu Haiwei** was born on August 8, 1966, in Shaanxi Province. He earned bachelor degree in physics from Northwest University in 1989, and obtained master degree in electronic engineering from Northwest Polytechnic University in 1996. Now he is a Ph. D. candidate in School of Electronics and Information Engineering of Xi'an Jiaotong University. He works at School of Science of Xi'an Shiyou University as an associate professor. His major research fields include theory and technology of fiber Bragg grating sensing element and system.