

文章编号: 0258-7025(2004)08-0997-04

# 基于长周期光纤光栅的压力传感器

高 侃, 周赢武, 林 峰, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 利用长周期光纤光栅(LPFG)对于弯曲敏感的特性,与应变膜片压力传感技术的机械结构相结合,报道了一种基于长周期光纤光栅的新型压力传感器。实验结果表明,在 0~0.13 MPa 的气压下,长周期光纤光栅透射谱的峰值波长向长波长方向移动了 1.8 nm;透射峰的幅度减小了 13 dB。通过检测其在固定波长处的光功率变化值就可以获得待测的压强值。该传感器的分辨率可以达到  $10^{-4}$  MPa,能够很好地满足实际应用的要求。

**关键词** 传感器技术;压力传感器;长周期光纤光栅;弯曲;应变膜片

**中图分类号** TP 212.12 **文献标识码** A

## A Novel Pressure Sensor Based on Long Period Fiber Grating

GAO Kan, ZHOU Ying-wu, LIN Feng, FANG Zu-jie

(Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A long-period fiber grating (LPFG) couples light from the core to the cladding, which is highly sensitive to micro-bends. In this paper a novel pressure sensor based on LPFGs incorporated with a strain diaphragm structure is proposed and demonstrated. It was found that when the pressure changed from 0 to 0.13 MPa, the resonant peak wavelength was red-shifted linearly about 1.8 nm, and the peak amplitude decreased uni-directionally up-to about 13 dB. By the method of detecting the change of the transmission output power at a fixed wavelength inside the rejection band, the value of pressure could be measured. The resolution of this device could reach to  $10^{-4}$  MPa, which is suitable for real applications.

**Key words** sensor technique; pressure sensor; long-period fiber grating; bending; strain diaphragm

## 1 引 言

传感器技术是现代测量和自动化系统的重要技术之一。在对气体或者液体的压力传感领域,近十几年发展起来的光纤式传感器以其精度高、灵敏度高、动态响应快、测量范围宽、无电磁干扰、耐恶劣环境、能够进行分布式遥测等优点受到广泛的重视<sup>[1,2]</sup>。

长周期光纤光栅(LPFG)作为一种新型的光纤无源器件,具有对外界条件变化反应灵敏的特点,被广泛应用于光纤传感领域<sup>[3,4]</sup>。本文结合传统的应变膜片传感技术和长周期光纤光栅对弯曲十分敏感的特点<sup>[5~7]</sup>,设计了一种新型的压力传感器,成功地用于对气体或液体压力的传感。

## 2 基本原理

长周期光纤光栅是一种基于把纤芯中传输的基模(LP<sub>01</sub>模)能量耦合到同向传输的包层模(HE<sub>1m</sub>模)中的损耗型光纤光栅。根据相位匹配条件可以求得长周期光纤光栅的谐振波长<sup>[8]</sup>

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}^p)\Lambda \quad (1)$$

式中  $n_{\text{core}}$  为纤芯中基模的有效折射率; $n_{\text{clad}}^p$  为  $p$  阶包层模的有效折射率; $\Lambda$  为光栅的周期。

同时,在谐振峰值波长处的透射率  $T$  可以通过解同向传输耦合模方程得出,它满足下面关系式

$$T = \cos^2(\kappa L) \quad (2)$$

其中  $L$  为光栅的长度, $\kappa$  为基模和包层模的耦合系

收稿日期:2003-05-13;收到修改稿日期:2003-06-20

作者简介:高 侃(1975—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室博士研究生,主要从事光纤光栅在光通信和光传感领域的应用研究。E-mail:gaokan@mail.siom.ac.cn

数,它与基模及包层模在纤芯内的重叠因子有关。

长周期光纤光栅对弯曲特别敏感,光栅微小的弯曲就会使其耦合特性发生很大的改变。Patrick 等对长周期光纤光栅的弯曲特性进行了详细的研究<sup>[5]</sup>。弯曲对于长周期光纤光栅耦合特性的影响,一是表现在谐振波长随曲率增加发生红移;二是谐振峰幅度的变化,在光栅不发生耦合的情况下表现为幅度随曲率增加而减小。

利用应变膜片来对压力进行传感是一种常用的技术。当气压或者是液压作用于应变膜片上的时候,由于两侧表面的压力差,应变膜片会产生相应的形变。应变膜片一般采用圆形的均匀结构,通过周边固定的方法固定在传感器外壳的端面上。

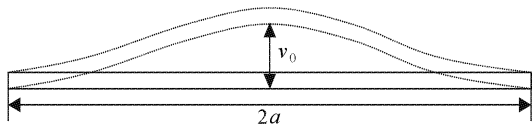


图 1 圆形金属膜片形变示意图  
Fig. 1 Deformation of clamped metal circular plate

图 1 为膜片形变的示意图,根据材料力学中圆板的弯曲理论,在压力均匀分布的情况下,周边固定金属膜片的挠度分布是一个径向距离  $r$  的函数<sup>[9]</sup>

$$v(r) = v_0(1 - r^2/a^2)^2 \quad (3)$$

式中  $a$  为膜片半径,  $v_0$  为膜片的中心挠度,可以按下式计算

$$v_0 + 0.58 \frac{v_0^3}{h^2} = \frac{3Wa^4(1 - \mu^2)}{16Eh^3} \quad (4)$$

$W$  为气压或者是液压,  $h$  为膜片的厚度,  $E$  为材料的弹性模量,  $\mu$  为材料的泊松比。

对于膜片形变量的检测已有多种方法,其中光学测量法在检测精度、抗干扰等方面有着很强的优势。由公式(3)和(4)可见,膜片在压力作用下,将由一个平面形变为一个旋转曲面。其中心处的曲率为

$$\rho(0) = -4v_0/a^2 \quad (5)$$

因此如果将长周期光纤光栅紧密粘贴在应变膜片的表面,那么压力差的大小就会转变为光栅弯曲程度的大小。这样利用长周期光纤光栅的弯曲响应,通过检测光栅透射谱的变化,就可以探测到压力的大小,实现传感的目的。

### 3 实验结果和讨论

所用长周期光纤光栅是用掩模板紫外激光辐照的方法制备的,周期为  $450 \mu\text{m}$ ,长度为  $4 \text{ cm}$ 。压力

传感实验装置如图 2 所示。实验采用的传感器由一个圆柱形的容器和一根长周期光纤光栅构成。容器由硬铝制成,在其一端贴有圆形应变膜片。膜片的材料为黄铜,厚度为  $0.2 \text{ mm}$ ,半径为  $33 \text{ mm}$ ,其弹性模量大约为  $1.06 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。利用少许的环氧胶将长周期光纤光栅贴在膜片上,其光栅中心对准膜片中心。该圆柱容器与氮气钢瓶的减压阀相连。用发光二极管(LED)和光谱分析仪(OSA)测量长周期光纤光栅的透射谱(OSA 的分辨率为  $0.07 \text{ nm}$ )。图 3 为测得的典型透射谱。根据峰值位置和光栅周期计算,所测的谐振峰对应于  $\text{LP}_{04}$  包层模。图 4 为谐振峰值波长和谐振峰幅度随容器内压强变化的曲线。

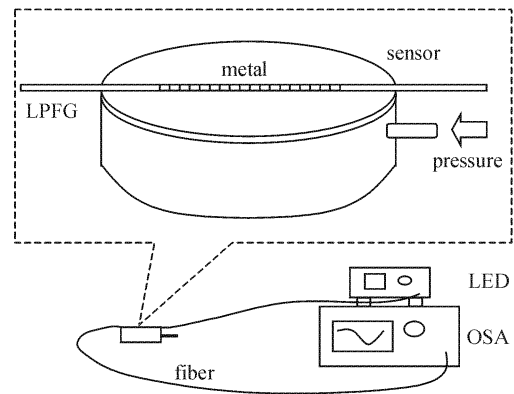


图 2 压力传感实验装置图  
Fig. 2 Schematic diagram of pressure sensor and the setup of the experiment

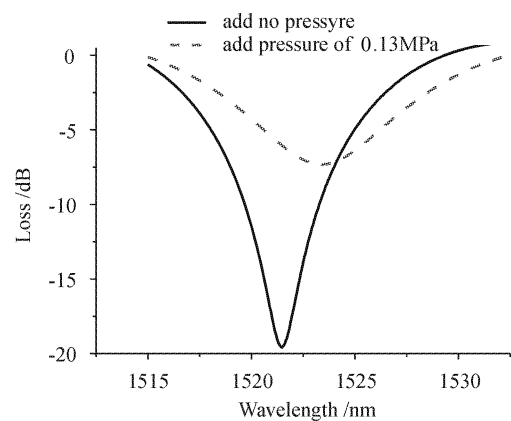


图 3 长周期光纤光栅的透射谱  
Fig. 3 Transmission spectrum of LPGF

由图 3 和图 4 可见,长周期光纤光栅的峰值波长随压强的变化呈现良好的线性关系,在  $0 \sim 0.13 \text{ MPa}$  的压强变化范围内,波长红移了  $1.8 \text{ nm}$ 。其响应度为  $13.84 \text{ nm/MPa}$ 。谐振峰的幅度变化也具

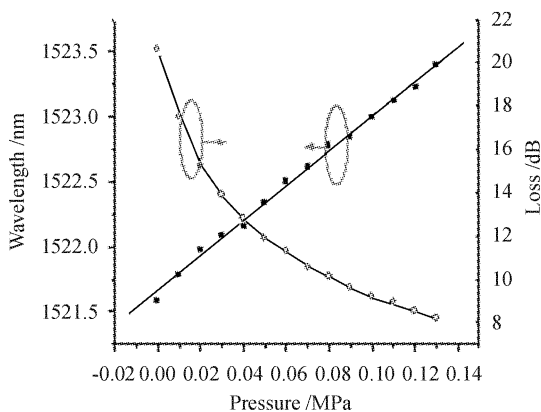


图 4 谐振峰值波长和幅度随压力变化曲线

Fig. 4 Dependence of peak wavelength and magnitude on the applied pressure

有很好的规律性,在这一压强范围内,峰高从 21 dB 下降到 8 dB。

根据所测得的压力响应特性,可以通过谐振波长的移动量来测定容器内压强的大小。由于长周期光纤光栅的谐振峰不是十分尖锐,线宽较大,测定峰值位置的精度不是很高。而且采用光谱仪的方法对于应用系统来说成本太高。利用长周期光纤光栅透射峰幅度的变化,采用在长周期光纤光栅线宽范围内的一个固定波长的激光器作为光源,测量其透射强度随压力的变化,可以获得高得多的分辨率。一般功率计容易达到 0.01 dB 的测量精度,本传感器可以获得 0.1 kPa 的压强测量分辨率。

从公式(3)中可以看出膜片的形变并不是均匀弯曲,其各点处的曲率是径向距离  $r$  的函数,如  $\rho(r) \approx -4(\nu_0/a^2)(1-3r^2/a^2)$ 。而且在  $r \approx a/\sqrt{3}$  的圆环上,曲率为零。由于光栅各处的曲率半径不一致,根据光栅耦合特性和光栅曲率的关系,此时的光栅不再是一个均匀光栅。实验中发现光栅弯曲不均匀性所带来的影响主要体现为谐振波长移动量的减小,也就是说在光栅不均匀弯曲的情况下,波长的移动量要小于均匀弯曲情况下(曲率取膜片中心的曲率值)的移动量。适当减小光栅长度与膜片半径的比例可以使在弯曲的时候光栅的曲率趋近一致,这样可以增加在同样压力条件下谐振波长的移动量,从而提高传感器的分辨率和精度。本实验条件下没有观测到光栅弯曲的不均匀性引起谐振峰对称性和其他特性的明显变化,见图 3。

由式(4)可见,压力传感器的灵敏度还取决于所采用的膜片的厚度和材料。如果采用弹性模量和厚

度小的膜片,将进一步提高灵敏度。但是此时膜片的极限载荷下降,压力传感器的测量量程将减小。根据 Mises 的屈服条件<sup>[10]</sup>,各种膜片的屈服条件因材料、半径和厚度的不同而不同。如果被测压力超过膜片的屈服条件,那么膜片产生的塑性形变会导致传感器的失效。在测量大压强的时候,比如测量油井深处的油压或者是高压容器中的气体压强,应选用刚性比较好的材料,比如钢或合金材料,并选用较厚的膜片。本实验所采用的铜膜片的屈服强度  $\sigma_y = 320$  MPa,通过计算得到铜膜片弹性形变所能承受的最大压强为 0.22 MPa,所对应的膜片中心的挠度值为 1.52 mm。

该压力传感器也可以应用于液体流速的传感。根据 Bernoulli 方程,液体的流速与压力成反比。此时一般压力变化比较小,采用较薄的膜片可以提高灵敏度,满足这一类型的应用要求。

研究如何改善长周期光纤光栅本身的特性,例如提高其弯曲灵敏度,用尽可能短的光栅来获得合适的谐振峰等,也能提高该传感器的灵敏度。另外,长周期光纤光栅的透射谱一般随温度的变化而变化。为了提高其温度稳定性,消除传感过程中温度的波动所带来的影响,可以通过采用特殊掺杂的光纤<sup>[11]</sup>,也可以采用温度补偿的方法。有关的实用化研究正在继续进行中。

## 4 结 论

设计了一种利用长周期光纤光栅的弯曲特性来进行压力传感的传感器,并在 0~0.13 MPa 的条件下对其传感特性进行了实验研究。实验表明,长周期光纤光栅谐振波长的移动范围大,波长移动量同所测的压力大小有着较好的线性关系,谐振强度的变化也有着很好的规律性,响应度分别达到 13.4 nm/MPa 和 0.1 dB/kPa。该方案具有灵敏度高、可靠性好、结构简单、制作方便等特点。通过适当地改变其结构和材料,传感器可以满足不同应用的要求。为了将研究结果应用于实际传感系统,要进一步研究改进长周期光纤光栅的温度稳定性,根据实际应用要求设计合适的应变膜片和压力容器。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Yong, Liao Yanbiao. Research on the laser fiber-optic pressure measurement technique for offshore oil exploration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):955~958  
赵 勇,廖延彪. 激光光纤压力检测技术在海洋石油勘探中的应用研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):955~958

- 2 Zhou Shengjun, Zhang Hucheng, Li Yuquan. Research on high precision fiber magnetic field sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):1011~1014  
周胜军,张虎城,李玉权. 高精度光纤磁场传感器的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):1011~1014
- 3 Vikram Bhatia, Ashish M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- 4 Tong Zhi, Wei Huai, Wang Muguang *et al.*. Effect of change of ambient refractive index on characteristics of long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9):1088~1091  
童 治,魏 淮,王目光 等. 环境折射率变化对长周期光栅特性影响的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9):1088~1091
- 5 H. J. Patrick, C. C. Chang, S. T. Vohra. Long period fibre gratings for structural bend sensing [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18):1773~1775
- 6 Y. Liu, L. Zhang, J. A. R. Williams *et al.*. Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):531~533
- 7 Y. G. Han, B. H. Lee, W. T. Han *et al.*. Fibre-optic sensing applications of a pair of long-period fiber gratings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**:778~781
- 8 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judlins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):58~65
- 9 L. W. Lin, H. C. Chu, Y. W. Lu. A simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, **8**(4):514~522
- 10 Xu Hao *et al.*. *Machine Design Handbook* [M]. Beijing: Machinical Industry Press, 2001. 195~197  
徐 灏 主编. *机械设计手册*[M]. 北京:机械工业出版社, 2001. 195~197
- 11 K. Shima, K. Himeno, T. Sakai *et al.*. A novel temperature-insensitive long-period fiber gratings using a boron-codoped-germanosilicate-core fiber [C]. *OFC'97 Technical Digest*, 1997, **FB2**:347~348