

文章编号: 0253-2239(2007)01-0080-5

平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度 补偿压强传感*

尉 婷^{1,2} 乔学光^{1,2} 贾振安² 傅海威² 王宏亮²

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068
² 西安石油大学陕西省光电传感测井重点实验室, 西安 710065)

摘要: 报道了利用光纤布拉格光栅反射波谱带宽展宽技术实现温度补偿的压强传感新方案。结合平面圆形膜片应变调谐的特点,采用膜盒式结构,将光纤光栅中心对准平面圆形膜片零应变半径并沿径向粘贴,利用反射波谱带宽对应变敏感而对温度不敏感的特性解调压强,成功地实现了温度补偿的压强传感测量。基于光谱分析仪 0.05 nm 的光谱分辨力,实验测得带宽随压强响应灵敏度为 0.34 nm/MPa,压强精度为 ±0.15 MPa,压强测量范围为 0~7.5 MPa。实验结果与理论分析基本一致。

关键词: 光传感; 光纤光栅; 温度补偿压强传感测量; 啁啾效应; 带宽; 平面圆形膜片

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Temperature-Insensitive Fiber Bragg Grating Pressure Sensing with Plane Round Metal Diaphragm

Wei Ting^{1,2} Qiao Xueguang^{1,2} Jia Zhen'an² Fu Haiwei² Wang Hongliang²

(¹ *Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xian 710068*
² *Shaanxi Key Laboratory of Photoelectric Sensing Logging, Xian Shiyou University, Xian 710065*)

Abstract: A novel temperature-insensitive pressure sensor based on fiber Bragg grating (FBG) broadened bandwidth technique using a plane round metal diaphragm is studied theoretically and experimentally. Considering the strain modulating trait of the diaphragm, the smart box structure is adopted and FBG is affixed radially, with the axis center of FBG aiming at the zero strain zone of the diaphragm. Temperature-independent pressure sensing is measured by bandwidth of FBG due to the bandwidth is sensitive to strain but temperature. This approach shows a pressure resolution of ±0.15 MPa and a pressure sensitivity of 0.34 nm/MPa in the range 0~0.75 MPa, with the spectral resolution of the spectral analyzer of 0.05 nm. The experimental results match the theoretical analysis well.

Key words: optical sensing; fiber Bragg grating; temperature-insensitive pressure measurement; chirped effect; bandwidth; plane round metal diaphragm

1 引 言

光纤光栅作为一种新型的无源光器件,因其抗电磁干扰、体积小、与光纤系统兼容等特性,受到越来越多的关注。利用光纤布拉格光栅对波长绝对编码的优良特性,可以实现对应变、应力、位移、温度等各种物理量的精确测量。光栅布拉格波长对应变和

温度都是敏感的,为了克服交叉敏感问题,实现应变或温度的单独测量,人们提出了一些解决方案^[1~7],这些方案有的是采用多个光纤光栅组合,有时需要两套解调系统,有的两个参量仍存在无法避免的交叉敏感,这无疑给光纤光栅传感的实际应用带来不便,而且大大地增加了成本。

* 国家自然科学基金(69877025)、国家 863 计划(2002AA313150)、国家教育部科学技术重点项目(02190)和西安石油大学青年创新科技基金(40)资助课题。

作者简介:尉 婷(1975—),女,山东聊城人,讲师,博士研究生,主要从事光纤传感与检测方面的研究。

E-mail: yolandemm@sohu.com

导师简介:乔学光(1955—),男,陕西佳县人,教授,博士生导师,主要从事光纤传与检测方面的研究。

E-mail: qiaoxueguang@xysu.edu.cn

收稿日期: 2006-03-10; 收到修改稿日期: 2006-05-12

本文提出了一种新颖有效的温度补偿压强传感方案:将光纤光栅中心对准平面圆形膜片零应变半径并沿径向粘贴,利用压强作用时膜片零应变半径附近的梯度应变传递到光纤光栅上,从而使产生温度补偿带宽展宽的啁啾效应用于压强传感测量。

2 光纤光栅温度补偿压强传感原理

采用对光纤光栅轴向施加梯度应力或应变的办法来实现对均匀光纤光栅的啁啾化。研究表明,温度不变时,光纤布拉格光栅的反射波长变化 $\Delta\lambda$ 与其轴向应变 ϵ_{ax} 满足^[8]

$$\Delta\lambda = (1 - p_e)\epsilon_{ax} \cdot \lambda_c, \quad (1)$$

式中 λ_c 为光纤光栅没有应变时的布拉格中心反射

波长, $p_e = 0.216$ ^[8] 为光纤的有效弹光因数。

沿光纤光栅轴向施加梯度变化的应变,使光栅各部分的布拉格波长变化不同,可有效改变光栅的反射带宽,即可有效地改变光栅的啁啾度 C 。为此,利用平面圆形膜片上各点的径向应力分布^[9](如图 1 所示),设计出膜盒式机械调节机构,如图 2 所示。图 1(a)为膜盒式传感器的侧剖图,其中 R 为膜片半径, h 为膜片厚度, s 为在自下而上均匀应力作用下膜片中心向上的位移(位移非常小,肉眼不能分辨), x 为距离膜片中心的径向距离($x=0.58R$ 对应的半径为圆形膜片的零应变半径), ϵ_{ax} 曲线是对膜片施加向上的均匀应力后圆形膜片上表面沿径向方向的应力分布曲线。

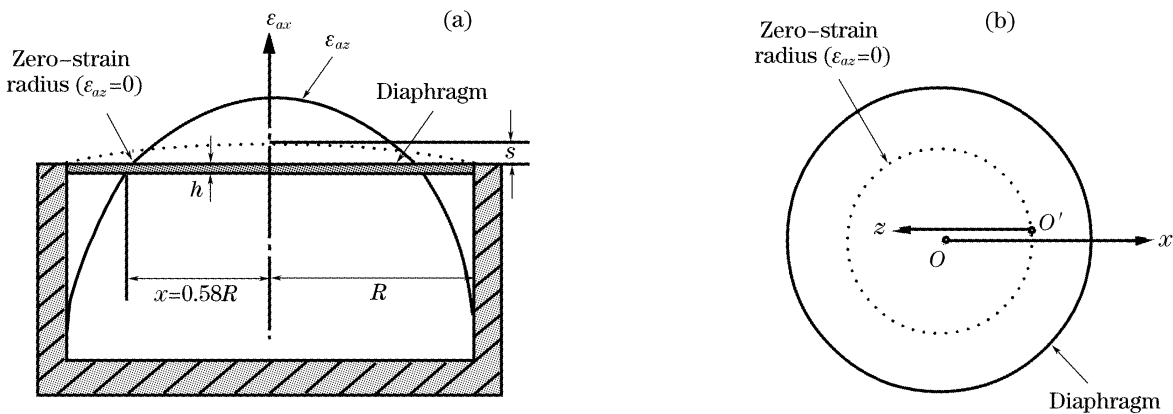


图 1 平面圆形膜片各点径向应力分布图。(a)侧剖图,(b)俯视图

Fig. 1 Radial strain distribution of the plane round metal diaphragm. (a) Profile, (b) top view

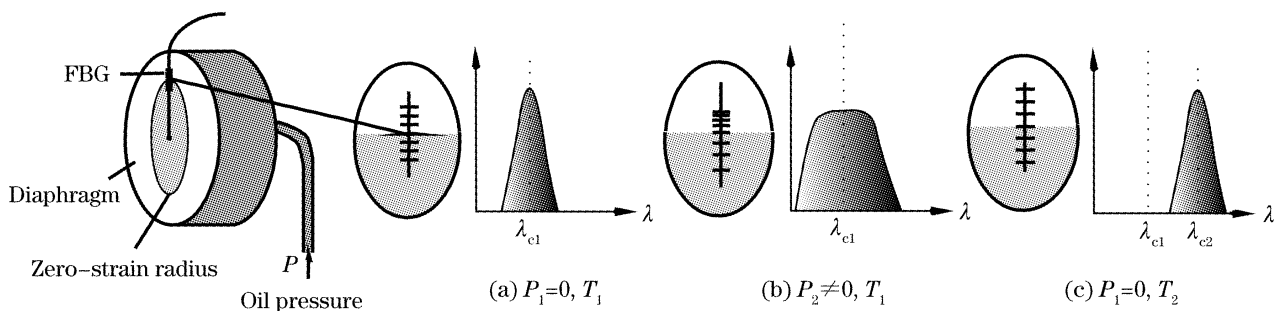


图 2 平面圆形膜片产生光栅啁啾化示意图

Fig. 2 Chirped fiber grating by using metal diaphragm

如图 1(b)建立坐标系 ox 轴,在 $0 < x < R$ 区域,膜片上表面应变 ϵ_{ax} 分布满足以下规律^[9]:

$$\begin{cases} 0 < x < 0.58R, & \epsilon_{ax} > 0 \text{ 即拉伸应变} \\ x = 0.58R, & \epsilon_{ax} = 0 \\ R > x > 0.58R, & \epsilon_{ax} < 0 \text{ 即压缩应变} \end{cases}$$

在 $0 > x > -R$ 区域 ϵ_{ax} 如图 1(a)所示对称分布。

实验中膜盒外为大气压强并保持不变,可以通过调节膜盒内的油压对平面圆形膜片均匀施加压力,从而使得在粘贴有光纤光栅的膜片表面产生应变,并通

过刚性粘贴将应变传递给光栅。图 2(a)和图 2(b)为温度保持不变,油压增加导致反射波谱中心波长不变而带宽展宽的传感原理示意图。如图 2(a)所示,光纤光栅的中点恰好位于膜片的径向零应变半径处,油压为 1 个大气压,即传感器内外压强平衡 $P_1=0$ 时,光纤光栅为均匀光栅。然后,保持温度 T_1 不变升高油压,如图 2(b)所示,膜片在油压作用下径向零应变半径以内($0 < x < 0.58R$)产生梯度拉伸应变,带动刚性粘贴于膜片上的光栅栅距梯度增大

导致反射波谱向长波方向展宽,而径向零应变半径以外($R > x > 0.58R$)膜片表面产生梯度压缩应变,带动光栅栅距梯度减小导致反射波谱向短波方向展宽。在膜盒内压强作用下,零应变半径附近一定的范围内,膜片表面应变沿径向呈线性变化,因此膜片拉伸应变造成的反射光谱向长波方向的带宽展宽幅度与膜片压缩应变造成的反射光谱向短波方向的带宽展宽幅度相同,从而整个光栅的中心反射波长稳定不变,这就是光纤光栅布拉格反射波随外界压强增加无波长漂移地展宽的基本原理。

传感器温度补偿的原理为:温度对整个膜片的作用是均匀的,因此从图 2(a)与图 2(c)中可以看出,在压强差 $P_1=0$ 保持不变的条件下,温度由 T_1 升高至 T_2 ,膜片均匀膨胀,从而导致光栅栅距均匀增大,其啁啾度不变即带宽不变而中心波长 λ_{c1} 红移到 λ_{c2} ,即温度仅影响光栅中心反射波长,对带宽不敏感。因此这种结构能够实现温度补偿的压强传感。

由材料力学可知,当应力不超过弹性限度时,对于平面圆形膜片表面上的一点 x ,材料的径向应变 ϵ_{ax} 可以表示为^[9]

$$\epsilon_{ax} = \frac{3P}{8h^2E}(1-\mu^2)(R^2-3x^2), \quad (2)$$

其中 E 为膜片材料的弹性模量, μ 为膜片材料的泊松比, P 为膜盒内外所施油压差的大小。由(2)式可以看出,当 $x = R/\sqrt{3} \approx 0.58R$ 时,应变 $\epsilon_{ax} = 0$,即 $x = 0.58R$ 为零应变半径。由于主要研究光栅覆盖区域的应变情况,为简化表达式建立新的坐标系 $o'z$ 轴如图 1(b)所示,以零应变半径为中心,沿膜片径向方向为 z 轴方向(取指向膜片圆心方向为正向方向),即有 $x = 0.58R - z$ ($-l/2 < z < l/2$), l 为光栅长度,实验中 $l = 4 \text{ mm}$ 。则(2)式变为

$$\epsilon_{ax} = \frac{3P}{8h^2E}(1-\mu^2)(3.5Rz - 3z^2), \quad (3)$$

由于工程上 $z/R \leq 0.1$,就可以认为 $z \ll R$ 。计算应变值所引入的误差将小于 3%。实验中采用的膜片尺寸为 $R = 25 \text{ mm}$,可认为远远大于零应变半径两侧光栅长度 $l/2 = 2 \text{ mm}$,因此(3)式可简化为

$$\epsilon_{ax} = \frac{1.3P}{h^2E}(1-\mu^2)Rz, \quad (4)$$

$(-2 \text{ mm} < z < 2 \text{ mm})$

由(4)式可知,当对平面圆形膜片施加作用力时,在膜片零应变半径两侧产生的应变 ϵ_{ax} 就沿膜片径向 z 呈线性变化: $-2 \text{ mm} < z < 0$ 时 ϵ_{ax} 为负应变; $0 < z < 2 \text{ mm}$ 时 ϵ_{ax} 为正应变。由于光栅刚性粘贴于膜片,

膜片应变 ϵ_{ax} 即光栅应变 ϵ_{ax} 。因此,当把均匀光纤光栅沿膜片径向贴于外表面,光栅中心对准膜片的零应变半径,并对膜片施加压力时,一根均匀光纤光栅将变为线性啁啾光纤光栅。即当 P 一定时,光纤光栅轴向应变将随 z 梯度变化。对于长度为 l 的光纤光栅,将其分为很多小段,每相邻两段的长度差为 δz 。假设在每一小段上的应变是相同的,利用(1)式和(4)式,可得相邻两小段光栅的布拉格波长差为

$$\delta\lambda = \frac{1.3P\lambda_B}{h^2E}(1-\mu^2)(1-p_e)R\delta z. \quad (5)$$

整个光栅的带宽是各小段光栅波长变化的总和,对上式积分,可得到光栅带宽展宽 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 与压强 P 的关系为

$$\Delta\lambda_{\text{chirped}} = \int_{-l/2}^{l/2} \delta\lambda = \frac{1.3Rl\lambda_B}{h^2E}(1-\mu^2)(1-p_e)P, \quad (6)$$

显然,调谐后的光纤光栅反射谱的带宽与平面圆形膜片所受油压 P 成线性关系,带宽、压强响应灵敏度理论公式为 $\frac{1.3Rl\lambda_B}{h^2E}(1-\mu^2)(1-p_e)$, 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、膜的厚度、光栅的长度等。

由于光栅栅距随外界温度变化同时增大或减小,温度影响的只是光纤光栅的中心波长,带宽对温度不敏感。因此,这种结构可以实现温度补偿的压强传感测量。

将实验得到的带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 代入(6)式,即可方便地求出相应的压强 P ;反之亦然。

3 实验装置

光纤光栅温度补偿压强传感的实验装置如图 3 所示。

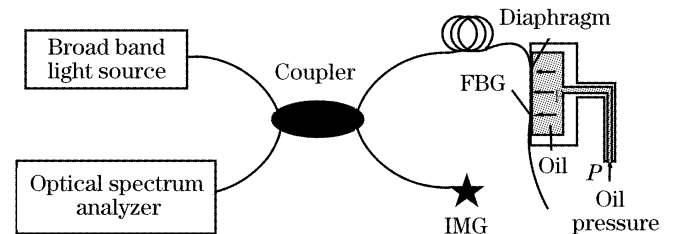


图 3 光纤光栅温度补偿压强传感的实验装置

Fig. 3 Schematic diagram of FBG temperature-insensitive pressure measurement system

实验中使用的光纤光栅初始中心波长为 1549.35 nm ,带宽为 0.22 nm ,光栅长度 $l = 4 \text{ mm}$ (因为完整光栅 $l = 10 \text{ mm}$,所用的是一支完整光栅截断后的一部分,根据两段光栅连接到光谱分析仪

得出的反射波谱功率的分光比为 4:6, 所以认为所采用部分为 $l=4$ mm)。实验中采用弹性滞后小, 弹性稳定性高的特种金属材料自制膜片, 膜片的半径 $R=25$ mm, 厚度 $h=1.5$ mm, 弹性模量 $E=1.28 \times 10^{11}$ N/m², 泊松比 $\mu=0.306$ 。采用几何尺寸的量度和应变片检测确定圆形膜片的零应变半径后, 通过尖头烙铁测试反射波谱漂移情况再次确定栅区, 并将光纤光栅精确确定的栅区中心对准膜片的零应变半径, 沿径向用特种胶牢固粘贴耦联以保证应力尽可能无损耗地传递到光纤光栅。在 20 °C, 膜片的两侧的压强差为 0 时, 也就是膜片处于自由状态不发生形变时, 光纤光栅中心波长为 1547.0 nm, 5 dB 阈值对应带宽为 0.86 nm。将传感器安装于加压设备。

从宽带光源发出带宽 $\Delta\lambda=40$ nm, 功率 $P_0=10$ mW 的光通过耦合器入射到光纤光栅内, 耦合器的另外一端放入匹配液 (IMG) 中, 用以消除光纤端面反射光。经光纤光栅反射的光通过耦合器进入多功能光谱分析仪 (Anritsu MS9710C), 通过光谱分析仪测量光纤光栅反射谱的带宽变化, 分析光栅的压强响应特性。由于光栅在压力作用下反射波漂移的同时波形将随之有规律地展宽, 窄带阈值将无法覆盖整个展宽波形, 实验中以 5 dB 阈值反射波的中

心值 λ_c 及带宽宽度 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 为记录数据以消除上述问题。传感器的油压由压力泵控制, 传感器中膜片内外压强差值由插在加压阀门上的压力表读出。实验采用逐步加压, 在 0~7.5 MPa 压强测量范围内, 以 0.5 MPa 为测量间隔, 绘制出了光栅在整个过程中中心反射波长 λ_c 和带宽宽度 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 的压力变化曲线及其线性拟合曲线, 如图 4 所示。图 5 给出了 0、7.5 MPa 时布拉格反射波光谱图。整个测试是在 20 °C 恒温和一个大气压环境中进行的。

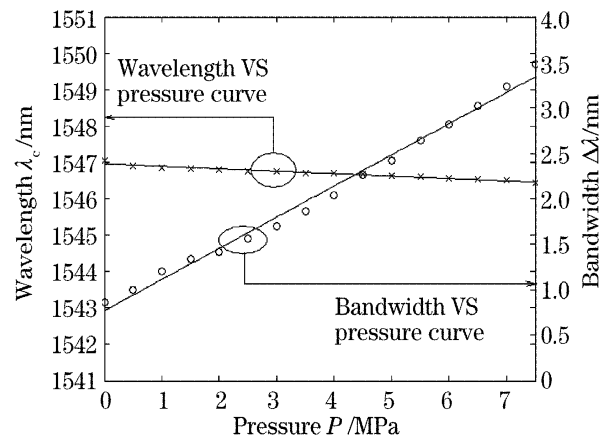


图 4 中心反射波长、反射带宽与压强响应曲线图
Fig. 4 Central reflection wavelength and reflection bandwidth versus pressure measured at 20 °C

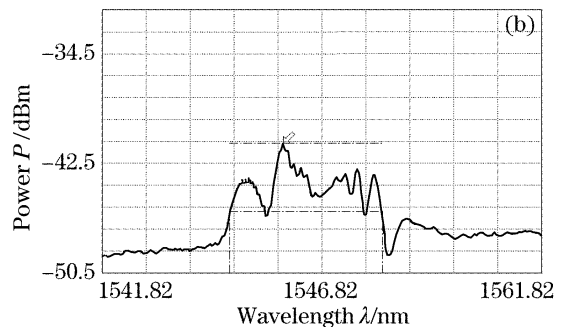
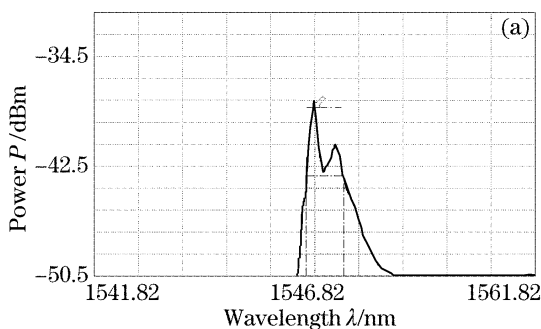


图 5 压强为 0 (a) 和 7.5 MPa (b) 时光纤光栅反射谱图 (室温 20 °C)

Fig. 5 Reflection spectrum of fiber Bragg grating at 0 (a) and 7.5 MPa (b)

4 实验结果

4.1 实验结论

光纤光栅在 20 °C 下的中心波长 λ_c 、带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 随压强 P 的响应曲线如图 4。图中可以看出光纤光栅的反射谱带宽从 0.86 nm 展宽到 3.48 nm 的过程中, 带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 与压强 P 之间呈现非常好的线性关系, 线性拟合度 $R^2=0.9909$, 实验数据线性拟合后代入 (6) 式可得

$$\Delta\lambda_{\text{chirped}} = 0.34P, \quad (7)$$

曲线的斜率即温度补偿压强传感测量系统的反射波谱带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirped}}$ 随压强 P 变化的灵敏度, 其线性拟合

值为 0.34 nm/MPa。

实验中, 中心波长 λ_c 随压强 P 增大发生了线性漂移, 分析认为是由于光栅中心与膜片零应变半径并没有严格对准, 而是光栅中心在膜片零应变半径以外, 导致光栅压缩部分大于拉伸部分, 因而中心波长没有稳定不变而是向短波方向稍有漂移, 这种误差可以通过更严密的定位方法加以改进。由 (6) 式可以看出, 光栅中心未对准零应变半径只是积分的上下限发生变化, 并不影响压强、带宽的线性响应特性及灵敏度。

基于光谱分析仪 0.05 nm 的光谱分辨力, 传感

装置的带宽测量压强精度为 ± 0.15 MPa。重复实验,压强响应几乎保持不变。实验中响应特性好,线性拟合度(相关系数)为0.9909。拟合直线中非零截距项与仪器分辨力相比较小,可以忽略不计。非线性度对实验结果的影响主要表现为重复性较差,由于这种平面圆形膜片结构光纤光栅压力传感器借鉴了金属材料性能稳定等优点,多次测量展宽波型稳定,可用于测量精度要求高的场合。

由图5可见,光纤布拉格光栅反射波的带宽从0.86 nm展宽到了3.48 nm,而整个压强测试过程中,中心波长向短波漂移量小于0.59 nm,峰值反射率从-38.16 dBm线性下降到了-41 dBm。

由图5可以看出,反射波谱的不均匀啁啾在最初耦联粘贴光栅时就已经出现,分析认为是由于使用的特种胶比较黏稠,粘贴光栅过程中未能绝对均匀涂抹,固化过程中光栅上各部分的特种胶厚度分布不均匀,导致光栅各部分收缩不均匀从而产生了不均匀啁啾,可以通过调研性能更优良的粘贴耦联剂来加以改进。

同时通过温控设施在不同的温度环境下对传感器进行检测,发现在20℃,28℃和57.8℃温度下,其反射波谱带宽随压强变化的响应灵敏度分别为0.34 nm/MPa,0.34 nm/MPa和0.35 nm/MPa,压强、带宽响应测试数据及拟合曲线几乎完全重合。

因此,此传感器结构可实现温度不敏感带宽对压强的测量。

4.2 误差分析

理论分析得到的光纤光栅带宽与压强的斜率为(压强灵敏度)0.49 nm/MPa。造成理论值与实验值有差异的主要原因是由于光纤光栅与平面圆形膜片之间是非刚性连接,油压引起的膜片应变在传递过程中受损,不能完全作用于光纤光栅,因此导致实验测试所得出的系统灵敏系数小于理论值。

使用能够将光纤光栅刚性粘贴于平面圆形膜片的高性能的胶、采用成熟的膜片锻造技术,及改进实验设备是保证理论模型与实验结论相吻合的重要途径。

4.3 传感器实用设计

通过建立理论模型和数学模型[(2)式~(6)式],得出设计温度补偿的压强传感系统的灵敏度、分辨力和测试动态范围的方案。通过设计合适的膜片厚度、直径以及选择合适材料、提高光栅粘贴质量、控制光纤光栅的写入长度等优化设计,获得测试

场对系统压强灵敏度和动态测量范围的实际要求。

5 结 论

采用新颖的膜盒式结构,将光纤光栅粘贴于平面圆形膜片上,利用膜片零应变半径附近内侧线性拉伸外侧线性压缩特性,实现了温度补偿压力传感。压强测量灵敏度为0.34 nm/MPa,分辨力达到 ± 0.15 MPa,压强动态测量范围为0~7.5 MPa。该传感器保留了光纤光栅传感器波长编码的特点,结构简单,线性好,重复性好,性能稳定度高,操作简便,因此具有十分广阔实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongliang, Qiao Xueguang, Zhou Hong *et al.*. Development of optimizing system of two-parameters for sensing pressure and temperature with dual-fiber Bragg grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 875~880 (in Chinese)
王宏亮,乔学光,周红等.压力与温度双参量传感优化系统的研制[J].*光学学报*, 2005, **25**(7): 875~880
- 2 V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov *et al.*. Temperature-insensitive strain measurement using differential double Bragg grating technique[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**: 43~46
- 3 Xinyong Dong, Yunqi Liu, Zhiguo Liu *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement with cantilever-based fiber Bragg grating sensor[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **192**: 213~217
- 4 C. Fernandez-Valdivielso, I. R. Matias, F. J. Arregui. Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material[J]. *Sensors and Actuators*, 2002, **101**: 107~116
- 5 Y. J. Chiang, L. Wang, W. F. Liu *et al.*. Temperature-insensitive linear strain measurement using two fiber Bragg gratings in a power detection scheme[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**: 327~330
- 6 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fiber grating element[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1116~1120 (in Chinese)
饶云江,王义平,冉曾令等.单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量[J].*中国激光*, 2003, **30**(12): 1116~1120
- 7 Wang Muguang, Li Tangjun, Zhuo Feng *et al.*. Research of fiber grating sensor for simultaneous measuring strain and temperature[J]. *J. Transducer Technology*, 2001, **20**(9): 10~15 (in Chinese)
王目光,李唐军,卓锋等.应变和温度同时测量光纤光栅传感器的研究[J].*传感技术学报*, 2001, **20**(9): 10~15
- 8 Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Displacement and temperature simultaneous measurement with single fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2005, **18**(2): 358~362 (in Chinese)
尉婷,乔学光,贾振安等.单光纤光栅实现位移、温度同时区分测量[J].*传感技术学报*, 2005, **18**(2): 358~362
- 9 Xue Guofu, Liu Ruifu, Tian Dachao *et al.*. *Coulometric Electromotive Engineering Manual* [M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 1987. 293~296 (in Chinese)
徐国福,刘瑞复,田大超等.电量电测工程手册[M].北京:机械工业出版社,1987. 293~296