

# 光纤法布里-珀罗微压传感器

朱佳利 王 鸣 蔡东艳 贾晟

(南京师范大学物理科学与技术学院江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要** 设计并研制了一种新型光纤法布里-珀罗压力传感器,通过光刻、硅片刻蚀、阳极键合等微机电系统技术制作而成,适合恶劣环境下、狭小空间内的微压环境压力测量。详细阐述了传感器的结构设计和制作方式。该设计巧妙地利用了光纤法兰盘,保证了光纤端面与敏感膜的平行,从而形成高质量的法布里-珀罗干涉腔。该结构也有利于初始腔长的稳定,减小了传感器误差。建立了实验解调系统,对其压力、温度等特性进行了详细的测试。实验结果表明,在 0~0.1 MPa 的压力范围内,传感器线性度好,重复性高,灵敏度达到了 61.6  $\mu\text{m}/\text{MPa}$ 。

**关键词** 传感器;微压传感;光纤传感器;法布里-珀罗;微机电系统技术

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0428002

## A Fiber Fabry-Perot Micro Pressure Sensor

Zhu Jiali Wang Ming Cai Dongyan Jia Sheng

(*Jiangsu Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China*)

**Abstract** A novel fiber Fabry-Perot pressure sensor is presented, which is fabricated by photoetching, silicon etching, anodic bonding and other micro-electromechanical system technologies. It is suitable for micro-pressure measurement in harsh environments and confined spaces. The structure of the sensor and the production methods are elaborated. In this structure, with the help of fiber flange, the end face of fiber can be in parallel with sensitive membrane, thus a high quality Fabry-Perot interferometer cavity is formed. The structure is also conducive to the stability of the initial cavity length, reducing the sensor's error. The demodulation system for the testing of pressure characteristics and temperature property is set up. Experimental results demonstrate that a high linear response in the range of 0 to 0.1 MPa is obtained in this sensor. The repeatability is good and the sensitivity reaches 61.6  $\mu\text{m}/\text{MPa}$ .

**Key words** sensors; micro-pressure sensor; fiber optics sensor; Fabry-Perot; micro-electromechanical system technology

**OCIS codes** 120.5475; 060.2370; 120.2230; 220.4000

## 1 引 言

微压传感器是工业实践中最为常用的一种压力传感器,广泛应用于各种工业自控环境,涉及石油管道、水利水电、铁路交通、智能建筑、生产自控和机床等众多行业<sup>[1,2]</sup>。但在工业安全领域,针对恶劣环境下、狭小空间内的微压测漏及管道微流的检测需求还未能满足,急需尺寸小、抗干扰性高、灵敏度高、

线性测量范围广且不失精度的微压传感器产品。近年来,微压传感器的发展方向开始转向新材料、新机理和新结构,正在经历由硅微压传感器<sup>[3,4]</sup>向光学微压传感器发展的阶段。

同时,光纤法布里-珀罗(F-P)传感器正在迅速发展,现已应用于强电磁干扰、高温等恶劣环境。光纤 F-P 干涉型压力传感器结构简单,成本低廉,

收稿日期: 2013-11-06; 收到修改稿日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(91123015,61178044)、江苏省科技厅产学研前瞻性联合研究项目(BY2012005)、江苏省光电技术重点实验室开放基金(1640703061-2)

作者简介: 朱佳利(1988—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: kittly18790@126.com

导师简介: 王 鸣(1950—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子和激光应用方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn(通信联系人)

是目前最常用的干涉型光纤压力传感器。它不仅具有一般光纤传感器可靠性好、抗电磁干扰、抗腐蚀等特点,还具有测量精度高、动态范围大、线性度好等优良特性<sup>[5-8]</sup>。

本文设计并研制了一种光纤 F-P 微压传感器,充分利用光纤传感器的优势,克服了传统微压传感器在狭小空间和强电磁环境下无法工作等弊端,且线性度好,灵敏度高。传感器采用微机电系统 (MEMS) 技术制作,适合大批量生产。

## 2 传感器的设计

传感器的结构如图 1 所示,其中 a 是光纤法兰盘, b 是光纤和陶瓷插针, c 是玻璃环, d 是单晶硅片,即传感器的压力敏感膜。光经由光纤垂直入射,一部分在光纤端面发生反射,另一部分光经过空气腔,被硅敏感膜反射回光纤中,两束光在光纤内发生干涉,即光纤端面与敏感膜下表面形成了 F-P 干涉腔。当外部压力发生变化,敏感膜在压力的作用下发生形变,从而改变了 F-P 腔腔长,促使反射光谱的相位发生改变。通过对其反射光谱的解调,可以得到 F-P 腔的腔长。

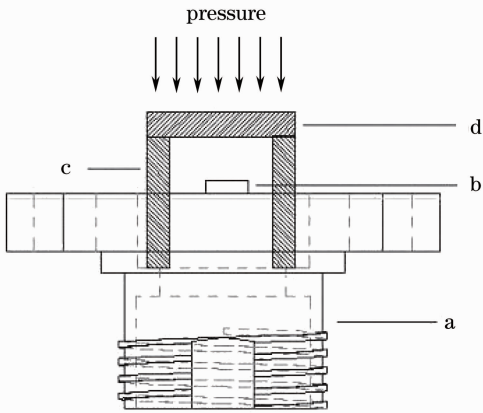


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor structure

传感器的结构制作均采用 MEMS 技术,主要包括光刻、硅片刻蚀和阳极键合等步骤,如图 2 所示。步骤为:1)光刻,即利用掩模板上的几何图形,通过光化学反应,将图案转移到覆盖在硅片上的感光薄膜上。经过涂胶、前烘、曝光、显影和后烘等工艺,在硅片表面形成光刻胶图形,如图 2(a)、(b)所示;2)对涂有光刻胶保护层的硅片进行湿法腐蚀,使用一定浓度的 KOH 溶液<sup>[9-10]</sup>,将(100)晶向的硅片刻蚀成所需形状及厚度,如图 2(c)所示,并进行去胶及表面清洁处理,如图 2(d)所示;3)将所得到的硅片

与事先经过光学抛光、长度精密控制的玻璃环进行阳极键合,如图 2(e)所示,键合温度选取是关键。温度太低无法达到玻璃熔融点,而温度太高则会因为材料热膨胀系数不同产生较大应力,影响传感器的稳定工作;4)将键合好的硅片和玻璃环倒扣在 FOCI 型光纤法兰盘上进行固定,最后插入陶瓷插针。整个传感器的制作过程成本低廉,适合批量生产。

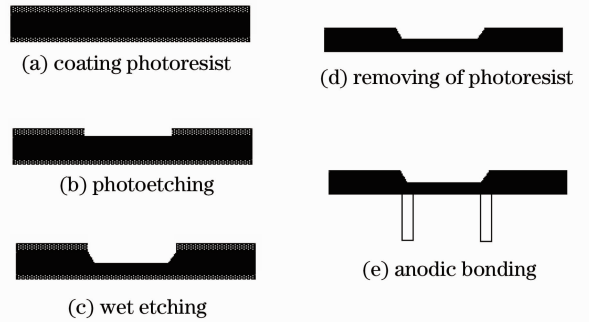


图 2 传感器制作流程

Fig. 2 Sensor production process

本传感器中,与玻璃环键合的硅敏感膜其力学模型可抽象为半径为  $r$ ,周边固支的圆形板,表面承受均匀分布的压力  $P$ ,那么硅膜中心挠度与压力  $P$  的关系为<sup>[11]</sup>

$$\frac{Pr^4}{Eh^4} = \frac{16}{3(1-\nu^2)}\left(\frac{y}{h}\right) + \frac{7-\nu}{3(1-\nu)}\left(\frac{y}{h}\right)^3, \quad (1)$$

式中  $h$  为敏感膜厚度,  $y$  为敏感膜中心挠度。在一般情况下 ( $y < h/2$ ), (1) 式可以近似为线性方程:

$$y = \frac{3Pr^4(1-\nu^2)}{16Eh^3}, \quad (2)$$

式中  $P$  为外界施加的压力,  $r$  为敏感膜半径,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比。对于单晶硅材料,  $E$  为 160 GPa,  $\nu$  为 0.22。取  $r=3800 \mu\text{m}$ ,  $h=200 \mu\text{m}$ , 施加 0.1 MPa 的压力,用软件进行仿真,结果如图 3 所示,图中不同颜色代表不同的挠度,具体数值由图中标尺给出,可见圆膜中心挠度为  $5.9 \mu\text{m}$ 。

## 3 实验结果分析

微压传感器的压力测试系统如图 4 所示,用光纤传感分析仪 Si720 自带的宽带光源作为传感器的光源。光经过耦合器后分成相等的两路,一路作为入射光进入光纤 F-P 微压传感器,由传感器反射的光再经过同一耦合器进入传感分析仪。由传感分析仪采集到反射光的光谱信号求出一定压力下的腔长。由于膜的挠度与压力是线性关系,因此根据腔长的变化就可以确定出对应的压力。

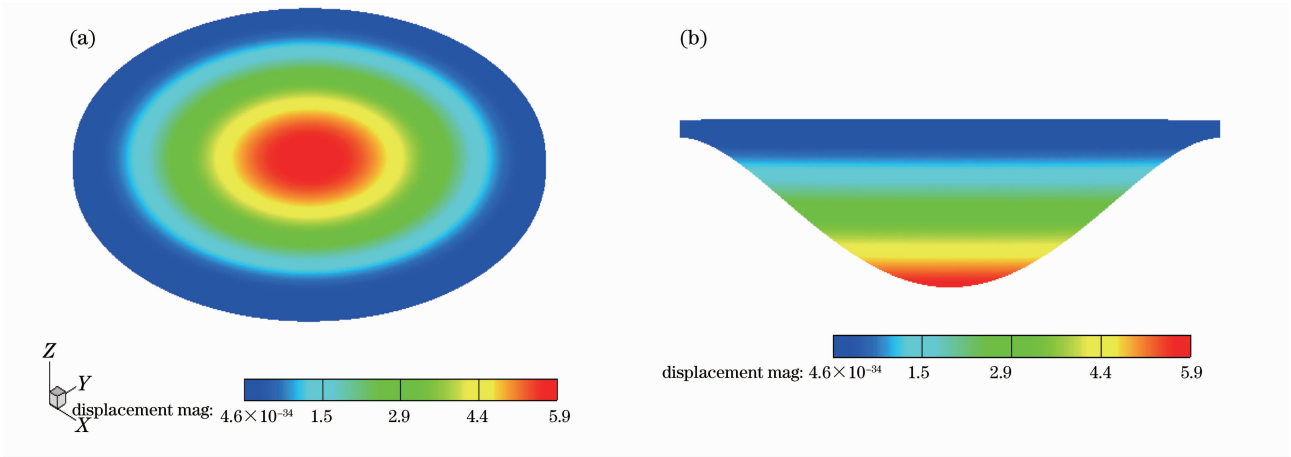


图 3 敏感膜仿真图。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 3 Simulation results of the sensitive membrane. (a) Front view; (b) side view

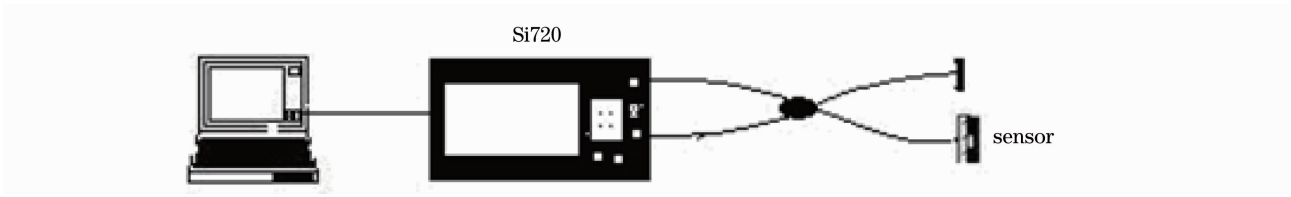


图 4 微压传感器的压力测试系统

Fig. 4 Pressure test system of the micro sensor

传感分析仪得到的反射光谱如图 5 所示。

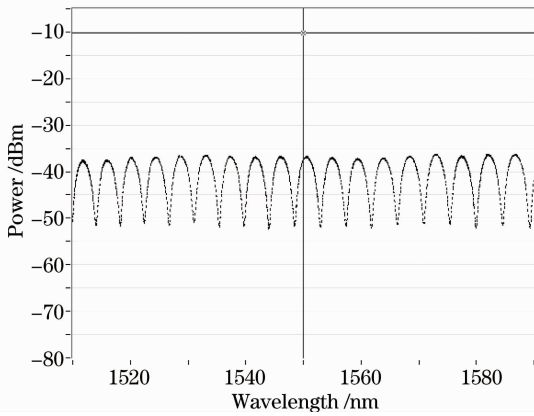


图 5 微压传感器反射光谱

Fig. 5 Reflectance spectra of micro pressure sensor

对于光谱中相邻级次  $m, m + 1$ , 其谱峰对应的波长  $\lambda_m, \lambda_{m+1}$  和腔长  $L$  之间存在下列关系:

$$\frac{4\pi L}{\lambda_m} = (2m + 1)\pi, \quad (3)$$

$$\frac{4\pi L}{\lambda_{m+1}} = [2(m + 1) + 1]\pi. \quad (4)$$

通过(3), (4)式即可求出 F-P 腔腔长, 得到腔长的变化量, 从而换算出外界压力的大小。

制作完成的微压传感器用 YS-2.5 型活塞式压力计进行标定, 压力由 0 均匀增加到到 0.1 MPa。

微压传感器初始腔长为  $208.36 \mu\text{m}$ , 腔长变化用 Matlab 软件计算, 结果如图 6 所示, 腔长拟合方程  $G = 208.4 + 61.79P$ , 拟合误差 0.9999, 均方根误差 0.02033, 传感器灵敏度为  $61.6 \mu\text{m}/\text{MPa}$ 。由仿真结果图 3 可以看出, 外界压力变化 0.1 MPa, 圆膜中心挠度变化  $5.9 \mu\text{m}$ , 实验中变化了  $6.1 \mu\text{m}$ , 实验结果与仿真结果较为符合。

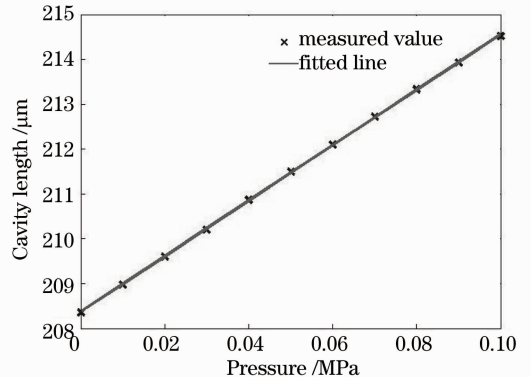


图 6 微压传感器腔长随压力变化曲线

Fig. 6 Relationship between pressure and cavity length of the micro pressure sensor

为检验传感器的迟滞性能, 将压力由 0 增加至 0.1 MPa 再均匀降至 0, 升压、降压过程中的腔长变化对比如图 7 所示。可以看出微压传感器迟滞效应很弱, 升压降压曲线几乎重合。

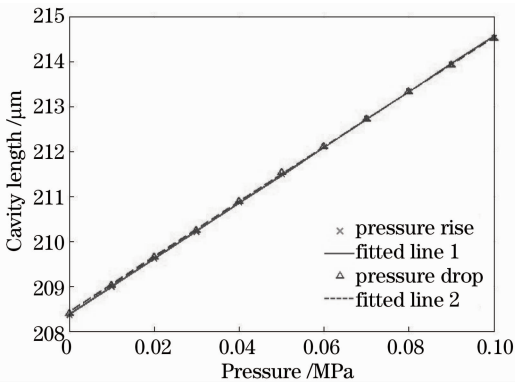


图 7 传感器升压、降压过程腔长变化

Fig. 7 Cavity length changes during pressure rising and dropping

表 1 传感器重复性

Table 1 Repeatability of the sensor

Pressure /MPa	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
1st day	-0.0002	0.0101	0.0201	0.0298	0.0405	0.0508	0.0606	0.0706	0.0806	0.0903	0.1000
2nd day	0.0005	0.0106	0.0209	0.0305	0.0409	0.0508	0.0608	0.0707	0.0806	0.0901	0.0999
3rd day	-0.0002	0.0099	0.0199	0.0298	0.0403	0.0507	0.0606	0.0705	0.0805	0.0900	0.0997
4th day	0.0000	0.0101	0.0202	0.0299	0.0403	0.0506	0.0606	0.0706	0.0807	0.0899	0.0996

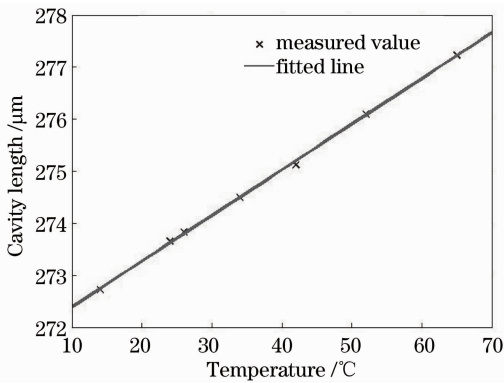


图 8 传感器温度特性

Fig. 8 Temperature characteristic of the sensor

## 4 结 论

设计制作了光纤 F-P 微压传感器,并进行了多项测试。结果表明该微压传感器工作稳定、迟滞性好、灵敏度高,且具有取材方便、结构小巧、制作成本低廉等优点,适合批量生产。

## 参 考 文 献

- Gregory T A Kovacs. Micromachined Transducers; Sourcebook [M]. Boston: WCB, 1998.
- Minxin Zhou, Qingan Huang, Ming Qin. Modeling, design and fabrication of a triple-layered capacitive pressure sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 117(1): 71-81.
- E G Bakhom, M H Cheng. Capacitive pressure sensor with very large dynamic range [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging, 2010, 33: 79-83.

实验组也对压力传感器的重复性进行了测试,连续四天对传感器进行压力测试,所得结果如表 1 所示,计算的平均相对误差为 0.7%,对传感器灵敏度影响很小。

另外,对微压传感器的温度特性进行了研究。将一个制作完成的传感器置于高低温试验箱中,控制温度由 10 ℃ 上升至 65 ℃,得到的腔长曲线如图 8 所示。可见传感器腔长随温度变化也表现出线性的特点,温度灵敏度计算值为 80 nm/℃。在压力测试中,良好的温度线性度也利于对传感器进行温度补偿,从而得到更为精确的测试结果。

- Zhenhai Chen, R C Luo. Design and implementation of capacitive proximity sensor using microelectromechanical systems technology [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 45: 886-894.
- Yang Chundi, Wang Ming, Ge Yixian, et al.. A miniature extrinsic fiber Fabry-Perot pressure sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 30(5): 1358-1361.
- 杨春弟,王 鸣,葛益娴,等. 微型非本征光纤法布里-珀罗压力传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1358-1361.
- Wang Lihua, Wang Ming, Rong Hua, et al.. Design and simulation of miniature shear stress sensor based on Fabry-Perot interference [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s128003.
- 戴丽华,王 鸣,戎 华,等. 微型法布里-珀罗干涉剪应力传感器的设计及仿真[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s128003
- Ni Xiaoqi, Wang Ming, Chen Xunxing, et al.. Wavelength multiplexing of optical fiber microelectromechanical system Fabry-Perot pressure sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 0776-0780.
- 倪小琦,王 鸣,陈绪兴,等. 光纤微机电系统法布里-珀罗压力传感器的波分复用[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 0776-0780.
- Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang, et al.. Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 171-175.
- 柯 涛,朱 涛,饶云江,等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 171-175.
- Yanfeng Jiang, Qingan Huang. A physical model for silicon anisotropic chemical etching [J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(6): 524-531.
- Nacer Eddine Demagh, Assia Guessoum, Hind Aissat. Chemical etching of concave cone fibre ends for core fibre alignment [J]. Meas Sci Technol, 2006, 17: 119-122.
- Gregory T A Kovacs. Micromachined Transducers Sourcebook [M]. Zhang Wendong et al. Transl. Beijing: Science Press, 2003. 181.
- 格雷戈里. 微传感器与微执行器全书[M]. 张文栋等译. 北京: 科学出版社, 2003. 181.