

文章编号: 0253-2239(2010)05-1358-04

# 微型非本征光纤法布里-珀罗压力传感器

杨春弟 王 鸣 葛益娴 戴丽华

(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 210097)

**摘要** 设计并研制了一种新的微型非本征光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感器。传感器采用普通的商用单模光纤和多模光纤制作。全石英结构,能长期使用,且稳定性好。传感器制作过程仅通过切割光纤、腐蚀光纤和光纤熔接实现,基于 F-P 多光束干涉原理测量压力。分析了 F-P 腔的直径、膜厚与灵敏度的关系,确定了传感器的膜厚和腔深等参量,设计了传感器的加工步骤,讨论了氢氟酸腐蚀多模光纤与熔接光纤的关键技术。用单峰谱峰波长法解调出传感器的腔长。建立了实验解调系统,实验结果表明,在 0~0.1 MPa 范围内,传感器线性好。

**关键词** 光学测量;压力传感器;法布里-珀罗干涉;波长法解调;石英膜

中图分类号 TN491 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1358

## A Miniature Extrinsic Fiber Fabry-Pérot Pressure Sensor

Yang Chundi Wang Ming Ge Yixian Dai Lihua

(Jiangsu Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology,  
Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097, China)

**Abstract** A new miniature extrinsic Fabry-Pérot (F-P) fiber optical pressure sensor based on fiber fusion and F-P interference is developed. It is made of commercial single-mode fiber and graded-index multimode fiber. Its all-silica structure has good stability for long-term use. The sensor is fabricated by simple techniques involving only cleaving, wet chemical etching and fusion splicing. The relation among the diaphragm thickness, the different cavity radius and the sensitivity is simulated, and the diaphragm thickness and the cavity depth are obtained. The processing step is designed. The key technologies, fiber etching and fiber splicing are discussed. By tracing a peak point in the interference spectrum, the gap length of the sensor can be demodulated. The demodulation system 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.

**Key words** optical measurement; pressure sensor; Fabry-Pérot interference; wavelength demodulation; silica diaphragm

## 1 引 言

近年来,光纤法布里-珀罗(F-P)传感器的迅速发展,使之成为了光纤传感器研究领域的一个重要分支,已应用于强电磁干扰、高温等恶劣环境。目前,光纤传感器正在朝微型化、低成本、耐恶劣环境和实用化方面发展<sup>[1~8]</sup>。目前光纤 F-P 传感器有多种制作方法:在毛细管中对接两根光纤,两端面形成

F-P 腔,该方法制作简单,但腔长难以精确控制<sup>[9]</sup>;通过熔接多层单模光纤和多模光纤制成的 F-P 传感器,方法也很简单,但是多层光纤膜结构形成的多重 F-P 干涉,会影响信号的解调<sup>[10]</sup>;而用飞秒激光器在光纤上刻腔制作 F-P 传感器,则是最新的方法,但是加工系统的成本较高<sup>[11]</sup>。

本文设计并完成了一种全光纤的压力传感器,

收稿日期: 2009-06-12; 收到修改稿日期: 2009-07-09

基金项目: 江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2008138)资助课题。

作者简介: 杨春弟(1979—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感与微纳技术等方面的研究。

E-mail: yangchundi1@163.com

导师简介: 王 鸣(1950—),男,博士生导师,主要从事光电技术和微纳技术等方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn

该传感器仅需普通商用的单模光纤和一种多模光纤:直接用多模光纤腐蚀出凹腔,然后熔接到单模光纤上,制作的过程中仅用到光纤的切割、腐蚀、熔接和研磨等工艺。该传感器具有体积小、成本低、制作简单和材料有生物适应性等优点。

## 2 传感器的设计

如图 1 所示,整个传感器是由单模光纤和多模光纤制作成的,F-P 腔是多模光纤经过 HF 酸腐蚀后再熔接到单模光纤上形成的,敏感膜通过研磨多模光纤形成的。对于周边固定的圆形薄膜,当外界的压力变化,敏感膜会发生形变,从而导致 F-P 腔的腔长发生变化;当腔中有光通过的时候,腔深发生变化会导致干涉光强发生变化,检测干涉光谱,解调出腔长,进而就可以求出外界的压力  $P$ 。敏感膜的中心挠度  $y$  与压力  $P$  的关系为<sup>[12]</sup>

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

式中  $P$  为施加的压力,  $r$  为薄膜半径,  $E$  为杨氏模量,  $h$  为薄膜厚度,  $\nu$  为泊松比。



图 1 传感器的结构  
Fig. 1 Structure of the sensor

设计传感器必须要考虑的重要参量有:F-P 腔的半径,腔深和敏感膜的膜厚。从(1)式可以得到灵敏度为

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

对于石英材料,  $E$  为  $73.73 \times 10^9$  Pa,  $\nu$  为 0.17。

图 2 仿真模拟了不同半径条件下灵敏度与膜厚的关系,从图中可以看出,敏感膜的半径会影响传感器的灵敏度:半径越大,灵敏度越高。考虑到实际情况,选择 62.5/125 多模光纤制作敏感膜。

图 3 仿真模拟了不同膜厚的条件下压力与挠度的关系,从图中可以看出,敏感膜的厚度会影响传感器的灵敏度:敏感膜越厚,传感器的灵敏度越低。想要获得高灵敏度的传感器,敏感膜必须很薄,考虑到制作过程和解调精度,选择膜厚为  $5 \mu\text{m}$  左右,至此可以得到压力灵敏度为  $18.8 \text{ nm/Mpa}$ 。

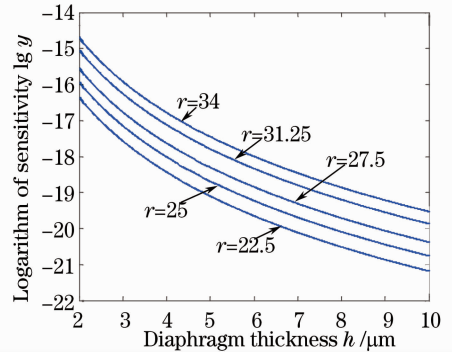


图 2 不同半径时灵敏度与膜厚的关系  
Fig. 2 Relation between sensitivity and diaphragm thickness under different cavity radius

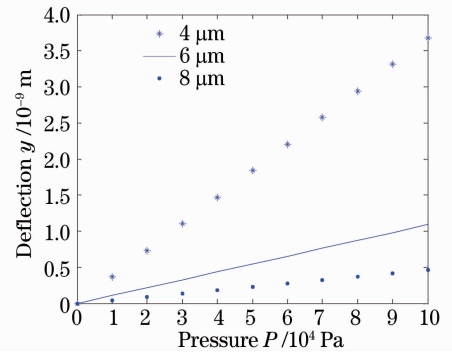


图 3 不同膜厚时挠度与压力的关系  
Fig. 3 Relation between deflection and pressure under different diaphragm thickness

还有一个重要参量是腔深。这种传感器的 F-P 腔是采用腐蚀多模光纤的办法得到的,腐蚀时间越长,腔越深。但是,如果腐蚀时间过长,膜的支撑壁会很薄,这样会使得传感器能够承受的压力很小;而且,腐蚀时间越长,腔底部的反射率越低,接收到的光强越弱,影响解调结果,所以腔深不能太大。选择腔深在  $50 \mu\text{m}$  左右。图 4 所示为仿真模拟腔深  $50 \mu\text{m}$  时的归一化干涉光强。

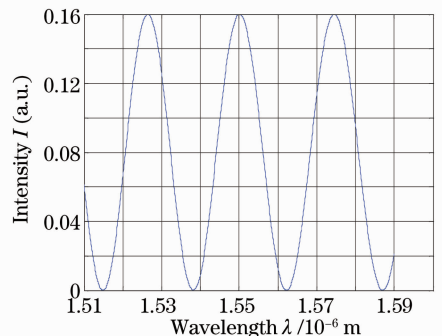
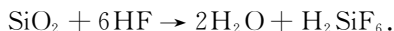
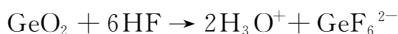


图 4 腔深  $50 \mu\text{m}$  时的干涉光强  
Fig. 4 Theoretical interference output spectrum when the cavity depth is  $50 \mu\text{m}$

### 3 传感器的制作

#### 3.1 HF 酸溶液腐蚀光纤

光纤的主要成分是  $\text{SiO}_2$ , 实验腐蚀采用的是 62.5/125 多模光纤, 这种光纤的纤芯掺锗, Ge-O 断开的能量为  $662 \text{ kJ/mol}$ , 而 Si-O 为  $799 \text{ kJ/mol}$ <sup>[13]</sup>。当多模光纤被放到氢氟酸溶液中腐蚀的时候, 纤芯的腐蚀速率比包层的速率大得多, 因此在纤芯部位就形成了凹腔, 反应的化学方程式可以表示为<sup>[14]</sup>



经过多次实验, 可以得到腐蚀的优化参量: 40% 的 HF 溶液, 温度  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此时纤芯的腐蚀速率  $17 \text{ }\mu\text{m/min}$ , 包层的腐蚀速率  $1 \text{ }\mu\text{m/min}$ 。实验时, 将氢氟酸溶液盛放在聚苯乙烯容器中, 通过控制腐蚀时间来控制腔深。

#### 3.2 传感器的制作步骤

传感头的制作过程如图 5 所示, 主要步骤为

1) 将单模光纤的一端剥去涂覆层, 将光纤擦拭干净, 用切割刀将剥去涂覆层的一端切平;

2) 取一段长约 10 cm 的 62.5/125 多模光纤, 将其一端剥去涂覆层, 用酒精将光纤擦拭干净, 用切割刀将剥去涂覆层的一端切平;

3) 在聚苯乙烯容器中倒入 40% 的氢氟酸加热到  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 将步骤 2) 得到的多模光纤放入到氢氟酸中浸泡腐蚀出凹腔, 取出后放入去离子水中超声震荡清洗;

4) 用熔接机将步骤 3) 得到的多模光纤和步骤 1) 得到的单模光纤用手动熔接的方法熔接好, 熔接时多模光纤应稍远离电极<sup>[15]</sup>。熔接参数: 电流强度  $50 \text{ mA}$ , 预熔时间  $170 \text{ ms}$ , 熔接时间  $1000 \text{ ms}$ ;

5) 在显微镜下切短多模光纤, 再通过腐蚀将多模光纤加工到所需要的敏感膜的厚度。实验完成的传感头如图 6 所示。

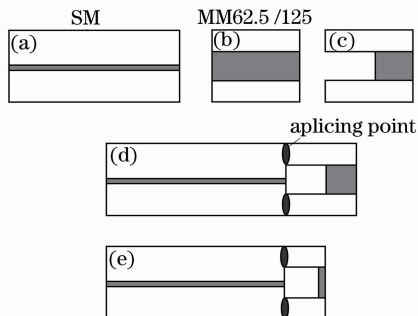


图 5 传感头制作过程

Fig. 5 Fabrication process

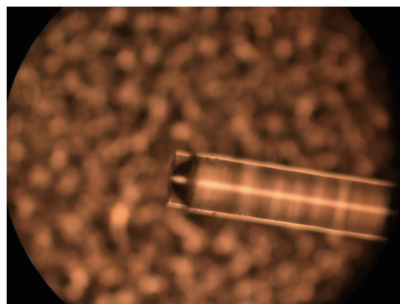


图 6 传感头显微照片

Fig. 6 Photo of sensor of the sensor

### 4 实验结果分析

压力测试系统如图 7 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微型非本征光纤 F-P 压力传感器, 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。

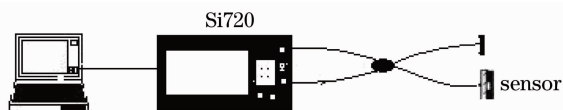


图 7 压力测试系统示意图

Fig. 7 System setup for pressure test

微型非本征光纤 F-P 压力传感器采用气压标定, 改变传感器的压力环境, 用传感分析仪监测压力的变化, 由传感分析仪扫描的反射光的光谱图如图 8 所示。对比图 8 和图 4 可以看出, 实验得到的干涉峰间距和仿真模拟的一致。

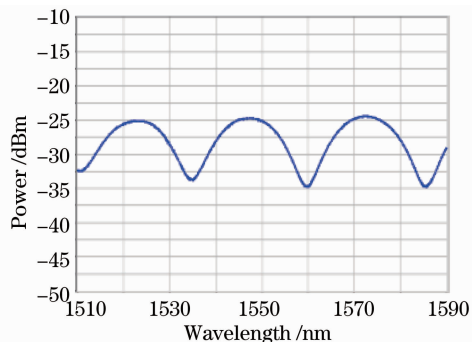


图 8 传感分析仪接收到的反射光谱

Fig. 8 Reflected signals of the EFPI sensor received by optical sensing analyzer

结合单峰和双峰测量方式, 由输出光谱可以解调出腔长。干涉光强可以表示为  $I = 2R[1 -$

$\cos(4\pi L/\lambda)$ , 所以, 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  $L$  之间有如下关系存在<sup>[16]</sup>:

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

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

结合(3)式和(4)式求出  $m$  后, 再通过(3)式可得到腔长  $L$ 。

图 9 给出了压力定标结果, 显示了腔长大小与压力大小的关系, 横坐标是利用压力计测得的压力值, 纵坐标是对应的 F-P 腔长值。拟合方程为  $L = 49513.65 - 18.38 P$ , 拟合度为 0.99925。结果表明, 当压力变化 0.1 MPa 左右时, 腔长  $L$  从 49513.63 ~ 49511.78 nm, 减小了 1.85 nm, 腔长-压力灵敏度为 18.5 nm/MPa, 灵敏度与理论计算的结果比较一致。

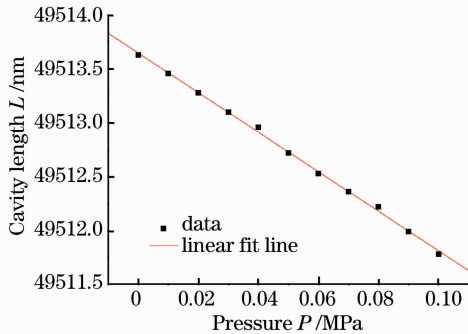


图 9 传感器压力与腔长的关系

Fig. 9 Relation between pressure and cavity length of the sensor

## 5 结 论

利用单模光纤和多模光纤制作的微型非本征光纤 F-P 压力传感器, 具有取材方便, 结构小巧, 制作方便的优点。制作过程只需用到光纤的切割、腐蚀、熔接和研磨。根据 F-P 腔的干涉理论, 改变了腔长就改变了干涉光强, 通过测量这个变化可以解调出压力的大小。整个系统为全光路设计, 抗电磁干扰, 结构小巧, 制作简单, 成本低廉。

## 参 考 文 献

- Xiaodong Wang, Baoqing Li, Onofrio L. Russo *et al.*. Diaphragm design guidelines and an optical pressure sensor based on MEMS technique[J]. *Microelectronics Journal*, 2006, **37**(1): 50~56
- D. C. Abeyinghe, S. Dasgupta, J. T. Boyd *et al.*. A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 993~995

- N. E. Demagh, A. Guessoum, H. Aissat. Chemical etching of concave cone fibre ends for core fibre alignment [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(1): 119~122
- Xiong Xiancai, Zhu Yong, Fu Yumei *et al.*. Fiber Fabry-Pérot sensor and its application for monitoring bridge strain[J]. *J. Chongqing Jianzhu University*, 2007, **29**(3): 48~50, 60
- 熊先才, 朱永, 符欲梅等. 光纤法珀传感器及其在桥梁应变监测中的应用[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, **29**(3): 48~50, 60
- Yixian Ge, Ming Wang, Xuxing Chen *et al.*. An optical MEMS pressure sensor based on a phase demodulation method [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, **143**(2): 224~229
- Yixian Ge, Ming Wang, Haitao Yan. Optical MEMS pressure sensor based on a mesa-diaphragm structure[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21746~21752
- Wang Wei, Rao Yunjiang, Tang Qingtao *et al.*. Micromachining of an in fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor by using a femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1660~1664
- 王 维, 饶云江, 唐庆涛等. 飞秒激光加工的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1660~1664
- Zhang Guiju, YU Qingxu, Song Shide. Fiber optic temperature sensor based on F-P cavity interferometric/intensity modulation mechanism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 228~231
- 张桂菊, 于清旭, 宋世德. 基于 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 228~231
- Yu Qingxu, Wang Xiaona, Song Shide *et al.*. Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic Fabry-Pérot interferometer for high temperature oil well measurement [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(3): 299~302
- 于清旭, 王晓娜, 宋世德等. 光纤 F-P 腔压力传感器在高温油井下的应用研究[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(3): 299~302
- Yizheng Zhu, K. L. Cooper, G. R. Pickrell *et al.*. High-temperature Fiber-Tip pressure sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(2): 861~869
- Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- Yizheng Zhu, Anbo Wang. Miniature fiber-optic pressure sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 447~449
- V. R. Machavaram, R. A. Badcock, G. F. Fernando. Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Pérot sensors in silica fibers using hydrofluoric acid etching [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **138**(1): 248~260
- H. Nakanishi, T. Nishimoto, R. Nakamura *et al.*. Studies on SiO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> bonding with hydrofluoric acid [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, **79**(3): 237~244
- Limin Xiao, M. S. Demokan, Wei Jin. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11): 3563~3574
- Zhang Peng, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Demodulation of the optical fiber Fabry-Pérot sensor based on Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 186~189
- 章 鹏, 朱 永, 唐晓初等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 186~189