

doi:10.3788/gzxb20124112.1488

# 基于 F-P 腔干涉的膜片式光纤微机电系统压力传感器

郑志霞<sup>1</sup>, 黄元庆<sup>2</sup>

(1 莆田学院 电子信息工程系, 福建 莆田 351100)

(2 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘 要:**基于法布里-帕罗腔的干涉原理,采用微机电系统技术加工制作了一种光纤微机电系统压力传感器.采用浓硼扩散自停止腐蚀和磁控溅射的方法,制备厚度为 6  $\mu\text{m}$ 、机械灵敏度为 0.502  $\mu\text{m}/\text{MPa}$  的传感器敏感膜.基于强度解调技术,利用干涉腔的反射功率与压力的关系对压力进行解调.分析了腔长变化对反射率的影响,确定传感器线性工作点的波长,建立稳定的压力传感测试系统.测试结果表明,该传感器压强最小分辨率为 62 Pa,灵敏度达到 0.51 nW/KPa,具有良好的线性度、灵敏度和重复性,适用于人体内压力测量和口腔义齿压力测量.

**关键词:**光纤 F-P 传感器; 硼硅薄膜; 机械灵敏度; 反射率; 强度解调

**中图分类号:** TP212 ; TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)12-1488-5

## 0 引言

光纤传感技术是伴随着光纤和通信技术而发展起来的新型传感技术,它集光纤技术、光电探测技术、激光技术、通信技术等于一体,已经成为传感器技术中的一个重要分支.光纤传感器被用于压力、应变、位移、加速度、流量、温度、湿度、浓度、电流、磁场等物理量的测量<sup>[1]</sup>,其应用范围非常广泛.基于法布里-帕罗(Fabry-Perot, F-P)腔的光纤压力传感器具有高可靠性、高灵敏度、耐恶劣环境、抗电磁干扰、温度交叉敏感性小等特点,应用在航空航天、桥梁建筑、高温油井和医疗等领域的压力监测<sup>[2-5]</sup>.

F-P 腔微型光纤压力传感器通常有石英毛细管结构和膜片式结构.石英毛细管结构的压力传感器由于毛细管壁较厚,对压力的感知灵敏度低,且由于腔内气体和石英管的热胀冷缩等因素的影响,对温度的敏感性强,所以适用于测量准确度要求不高的大范围的压力测量<sup>[6]</sup>.膜片式结构理论上可以获得较高的灵敏度,但是在光纤端面上制作高灵敏度的膜片存在着技术不成熟、工艺复杂、材料温度和力学特性差等不足<sup>[7-8]</sup>.在单模光纤端面上直接熔接毛细石英管,并在石英管的另一端面制作石英膜片或聚合物膜片的膜片式压力传感器,其压强测量分辨率达到 53 Pa,该传感器仅适用于室温下的压力测量<sup>[9]</sup>.本研究基于法布里-帕罗腔干涉的原理,结合微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems,

MEMS)高温压力传感器敏感元件的制备工艺<sup>[10]</sup>,研制了一种利用硼硅薄膜作为敏感膜的膜片式 F-P 腔光纤压力传感器.硼硅薄膜由重掺杂自停止腐蚀工艺制备,薄膜力学特性好、机械灵敏度高、热稳定性好、弹性好、与玻璃键合强度高、厚度可控性好.该传感器既具备硅电容式 MEMS 压力传感器的优点,同时又避免了电路噪音及电磁干扰,医学上可用于人体内压力检测和口腔义齿压力检测,工业上可用于高温环境下的压力检测.

## 1 传感器的结构及解调原理

### 1.1 传感器结构及薄膜的机械灵敏度

光纤 MEMS 压力传感器基于法布里-帕罗腔干涉原理,采用 MEMS 工艺加工而成,光纤传感器的结构如图 1. F-P 腔由硼硅玻璃腐蚀而成,敏感膜由硼硅薄膜表面溅射很薄的铝薄膜构成,溅射铝薄膜能有效提高敏感膜的反射率.

对于周边固支的圆形隔膜,受到压力作用时,其挠度为<sup>[11]</sup>

$$\omega(r) = \frac{3}{16} \frac{1-\nu^2}{Eh^3} P(R^2 - r^2)^2 \quad (1)$$

式中  $E$ 、 $\nu$  和  $h$  分别是薄膜的杨氏模量、泊松比和厚度,  $r$  表示到薄膜中心点的距离,  $R$  表示悬空薄膜的半径.敏感膜是硼硅薄膜溅射铝层后形成,但由于铝薄膜厚度很小,相对于硼硅薄膜其厚度可以忽略不

**基金项目:** 国家国际合作基金(No. 2011DFR11160)和福建省高校产学研合作重大项目(No. 3502Z20103012)资助

**第一作者:** 郑志霞(1972-),女,副教授,硕士,主要研究方向为 MEMS 传感器技术和半导体光电技术. Email: zzx72027@163.com

**导 师:** 黄元庆(1949-),男,教授,主要研究方向为激光仪器工程、光电子技术、光通信与光电测控技术. Email: yqhuang@xmu.edu.cn

**收稿日期:** 2012-07-09; **修回日期:** 2012-09-27

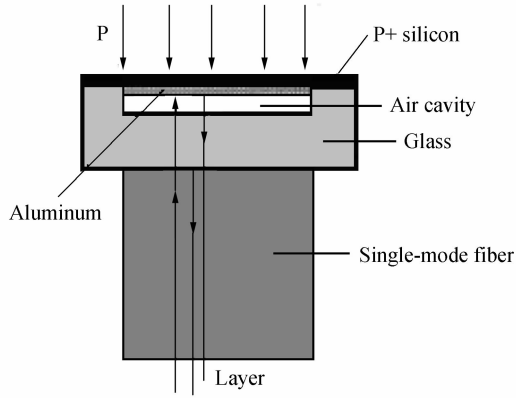


图1 光腔压力传感器结构

Fig.1 The structure of the optical fiber pressure sensor

计,所以式(1)中的参量是硼硅薄膜的参量.

通常薄膜的机械灵敏度定义为

$$S_m = \frac{d\omega_{\max}}{dP} \quad (2)$$

即单位载荷下所能产生的最大挠度,圆形膜的最大挠度为圆心处的挠度,即  $r=0$  时的挠度,所以圆形薄膜的机械灵敏度为

$$S_m = \frac{3}{16} \frac{1-\nu^2}{Eh^3} R^4 \quad (3)$$

从式(3)可知薄膜半径越大,厚度越小机械灵敏度越高.对于硼硅薄膜,若  $E=160$  GPa,  $h=6$   $\mu\text{m}$ ,  $R=100$   $\mu\text{m}$ ,  $\nu=0.22$ ,则可得薄膜的机械灵敏度为  $0.502$   $\mu\text{m}/\text{MPa}$ .

## 1.2 F-P 腔干涉解调原理

进入单模光纤的光,分别在光纤-硼硅玻璃、硼硅玻璃-空气、空气-铝层三个界面上发生反射,反射光之间彼此发生干涉,最后回到光纤的是复合腔的干涉信号.复合 F-P 腔由硼硅玻璃及空气腔组成,其反射率可以看成硼硅玻璃和空气腔构成的复合腔的反射率,表示为<sup>[12]</sup>

$$R_\lambda = \frac{I_R}{I_0} = \frac{r_1^2 + r_{23}^2 + 2r_1 r_{23} \cos(2\varphi_1)}{1 + r_1^2 r_{23}^2 + 2r_1 r_{23} \cos(2\varphi_1)} \quad (4)$$

$$r_{23} = \frac{r_2^2 + r_3^2 + 2r_2 r_3 \cos(2\varphi_2)}{1 + r_2^2 r_3^2 + 2r_2 r_3 \cos(2\varphi_2)} \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1, \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (6)$$

式(4)~(6)中  $r_{23}$  表示光从玻璃透射入空气腔,经铝层反射,又返回玻璃的等效反射系数.  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  分别表示光纤-玻璃、玻璃-空气及空气-铝介面的反射系数,表达式为

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}$$

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别表示硼硅玻璃及空气的位相厚度,  $d_1$ 、 $d_2$  分别为玻璃及空气层厚度.  $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  分别为光纤、硼硅玻璃、空气及铝介质的折射率.从式(4)~

(6)可知,光的反射率是腔长的周期函数,外界压力作用在膜片上,使膜片发生变形,腔长随着薄膜挠度的变化而变化,从而引起反射率的变化及反射光强的变化,通过探测反射光强的变化可以解调出压力.

## 2 传感器的尺寸设计及制作工艺

### 2.1 传感器尺寸设计

敏感膜的厚度与空气腔的长度是传感器的重要参量,F-P 腔的长度必须大于膜的最大挠度.为了保证在光源范围内腔长与反射率的一一对应关系,腔长存在一个最大值.设光源波长范围是  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ,那么最大腔长为<sup>[13]</sup>

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4(\lambda_1 - \lambda_2)}$$

为了保证复合腔的反射率与腔长之间有良好的线性,膜的最大挠度应不大于  $\lambda/4$ .不考虑光传输的损耗,通过对式(4)模拟计算得到复合腔反射率与空气腔腔长的关系,模拟参量为:激光波长为  $1532$  nm,单模光纤、硼硅玻璃的折射率分别为  $1.468$  和  $1.473$ ,铝的反射率为  $0.98$ ,硼硅玻璃的厚度为  $400$   $\mu\text{m}$ ,如图 2.

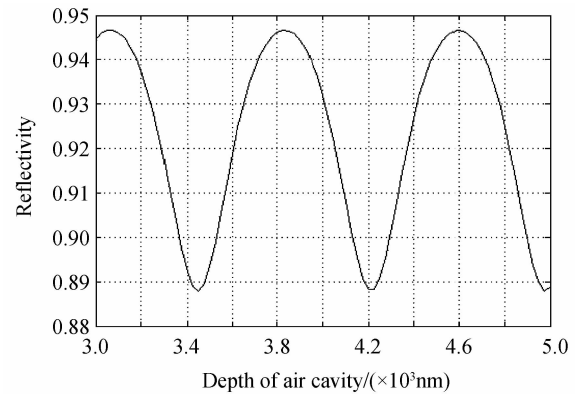


图2 复合腔反射率与腔长的关系

Fig.2 The relation between the composite cavity reflectance and the cavity length

从图2可以看出,在干涉信号的峰值和峰谷处,测量灵敏度几乎为零,而且条纹变化方向模糊.在波峰处,无论腔长增加或者减小,输出的信号反射率都是降低的,所以不能确定腔长的具体变化情况.因此,腔长的变化应处于图2所示的曲线接近线性的部分,不能包含曲线的最高点或最低点.从图2可以看出,腔长在一定范围内变化时,反射率与腔长的关系曲线具有较好的线性度.设初始腔长为  $4.18$   $\mu\text{m}$ ,当压强增加到  $0.3$  MPa,根据式(1)可算出膜的挠度为  $0.151$   $\mu\text{m}$ ,腔长缩短为  $4.029$   $\mu\text{m}$ ,落在线性度较好的区域内.所以当压力不超过  $0.3$  MPa时,腔长与反射率之间的关系曲线有良好的线性度.

### 2.2 传感器制备工艺

传感器的核心部件是敏感膜和空气腔,准确控

制敏感膜厚度和空气腔长度,才能保证传感器较高的灵敏度和线性度.敏感膜由硅重掺杂自停止腐蚀工艺制备,膜的厚度由掺杂结深和自停止腐蚀时间决定.如果传感器硼硅薄膜厚度为  $6\ \mu\text{m}$ ,则腐蚀前的 p-n 结结深应约为  $9\ \mu\text{m}$ .根据扩散余误差结深的定量表达式,可计算出浓硼扩散时间在  $1\ 175^\circ\text{C}$  时为  $6\ \text{h}$ <sup>[11]</sup>,准确掌握扩散温度和扩散时间,能准确控制传感器敏感膜的厚度.空气腔的长度由硼硅玻璃的腐蚀深度决定.传感器的主要制作工艺如下:

1)取双面抛光的硅片,标准清洗后湿氧氧化  $2\ \text{h}$ ,形成约  $800\ \text{nm}$  的氧化膜;2)在  $1\ 175^\circ\text{C}$  下浓硼扩散  $6\ \text{h}$ ,使硅片表面形成结深约为  $9\ \mu\text{m}$  的重掺杂硼硅膜,再进行化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP),除去硼硅膜表面附着的龟裂状的硼硅玻璃;3)光刻并在硼硅薄膜表面溅射  $200\ \text{nm}$  的铝薄膜;4)清洗硼硅玻璃,涂胶、光刻、显影,腐蚀,形成约  $4\ 180\ \text{nm}$  深的腔体,腔体的深度用 Dektak 台阶仪测量,玻璃腐蚀的腔体如图 3(a);5)玻璃的腐蚀面和硅片的重掺杂面键合,键合面在玻璃腔体处的 SEM 照片如图 3(b),腔体上方的硼硅膜成为周边固支的圆形膜;6)用四甲基氢氧化铵腐蚀液腐蚀硼硅膜上的硅,得到粘附在玻璃上的致密均匀的硼硅薄膜,如图 3(c);7)键合片切片;8)使用精密光纤切割刀切割光纤,并用 YAG 激光器将光纤端面与硼硅玻璃熔接,传感探头如图 3(d).

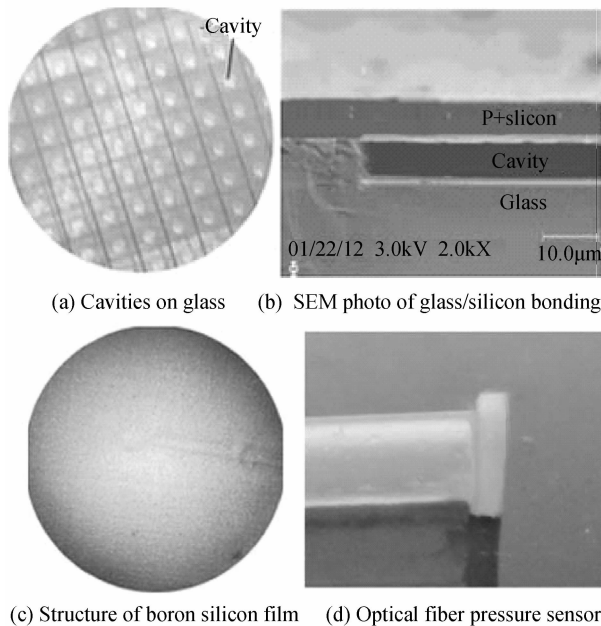


图 3 传感器制作过程照片

Fig. 3 The manufacturing process photos of the optical fiber pressure sensor

### 3 传感器定标实验

光从光纤进入 F-P 腔后,一部分光被光纤端面

反射回来,另一部分光进入腔内,被反射膜片反射回来,又耦合进入入射光纤,从而产生了干涉现象.光在传输和反射过程中存在各种损耗,如光与光纤轴线不垂直引起的发散损耗、反射光不能完全耦合入光纤产生的损耗、光纤切面与光纤轴线不垂直产生的损耗等.由于损耗的存在,光纤端面的反射率约为  $0.04$ ,银层表面的有效反射率远小于  $0.98$ ,使得光从硼硅薄膜反射回来并耦合进入光纤的光远小于理论值.由于反射光强度与理论值存在很大差异,而且传感器腔长可能由于工艺的偶然性与预设值之间发生偏差,所以需要传感器的对传感器的工作波长进行确定和对传感器进行定标.

#### 3.1 传感器工作波长的确定

实验装置如图 4,宽带光源发出的光经过环形器 1 端口进入 F-P 干涉腔,光经过光纤端面和膜片的反射,产生干涉效应,反射光从 2 端口进入 3 端口,干涉图谱能在光谱分析仪上显示出来.传感器的工作波长需在干涉谱的近似线性区内,利用光波测量系统 Agilent 8614A 的波长扫描模块扫描得到微型光纤压力传感器的干涉图谱,如图 5.从图 5 可以看出  $1\ 532\ \text{nm}$  附近, F-P 腔有较好的线性输出,为此选定可调激光器的工作波长为  $1\ 532\ \text{nm}$ .

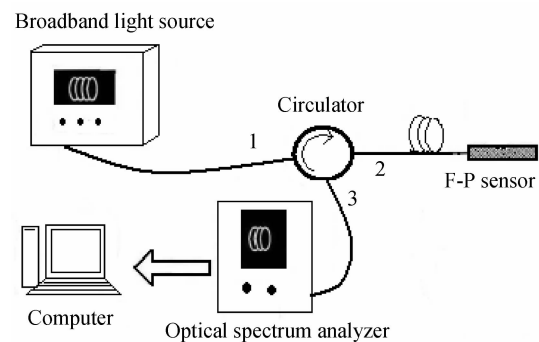


图 4 确定波长的实验装置

Fig. 4 The experimental apparatus for identifying the light wavelength

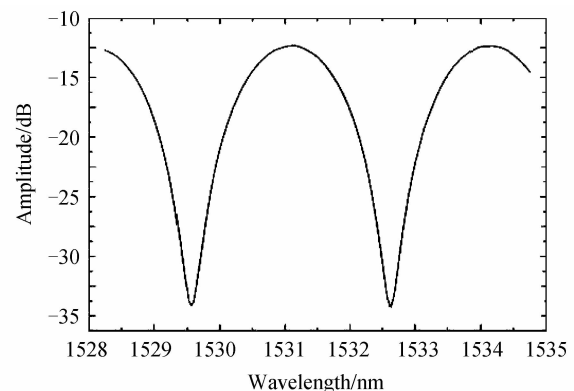


图 5 波长扫描干涉图谱

Fig. 5 The interference spectrum of wavelength scanning

#### 3.2 传感器定标

外界压力作用在传感器的敏感膜片上,使 F-P

腔的腔长发生变化,从而使反射光强度发生变化,通过测量反射光强度来确定外界压力,实现传感器的解调.光纤传感器的定标测量装置如图 6.

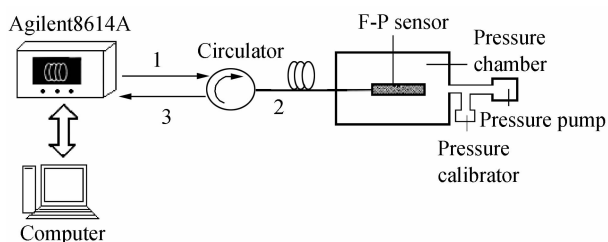


图 6 传感器定标实验装置图

Fig. 6 The experimental apparatus for sensor calibration

将 F-P 光纤压力传感器放在密封加压腔中,腔外接空压机及标准压力气压表.测试时,调节调压阀并用空压机缓慢加压,待压力稳定时,读出压力值.高稳定可调谐激光器输出 1 532 nm 的激光,通过 1 端口进入环行器,由 2 端口输入传感器探头,反射光从 2 端口到 3 端口输入到 Agilent 8614A 的功率模块中进行检测.改变密封腔的压力,检测出反射光的功率变化,并通过计算机进行最小二乘法直线拟合.图 7 给出了输出光功率与压强的关系及实验数据的直线拟合结果.

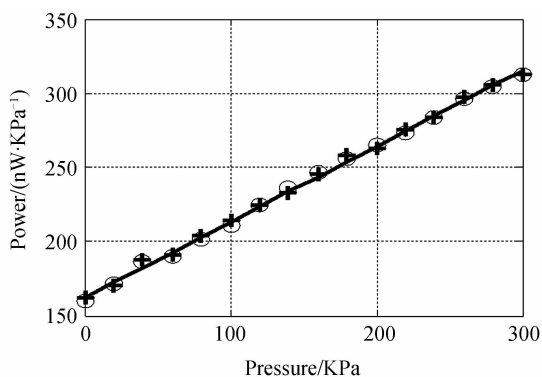


图 7 MEMS F-P 腔光纤压力传感器压强与输出光功率关系  
Fig. 7 The relation between the pressure and the optical output power

图 7 中圆圈表示压强从 0 KPa 增加到 300 KPa 时输出光功率的情况,加号表示回程测量情况.由拟合直线可知,当压强连续变化时,输出光功率也相应连续变化,且线性度和重复性好,回程误差小.拟合直线的斜率为 0.51 nW/KPa,使用标准差的两倍作为压强测量分辨率,所得测量压强最小变化量为 62 Pa.当标准压力表的示值达到 300 KPa 后,继续给密封腔加压,反射光的功率变化趋缓,拟合度变差,因此本测量装置的压强测量范围为 0~0.3 MPa.

由于温度对硼硅薄膜的影响,所以温度的变化给传感器带来误差.如果硼硅薄膜的热膨胀系数为  $2.6 \mu\text{m}/\text{C}$ ,  $6 \mu\text{m}$  厚的硼硅薄膜,当温度变化  $50\text{C}$ ,膜厚变化 0.8 nm.在 0.3 MPa 的压力作用下,其扰

度为 150.6 nm,也就是说,  $50\text{C}$  温度变化引起的硼硅膜膨胀相当于 0.3 MPa 压力下传感器腔长改变量的 0.52%.因此,当传感器使用于温度变化不太大或者压力变化范围较大时,温度引起的误差几乎可以忽略.

硼硅玻璃湿法腐蚀腔体时,选择合适的掩膜、腐蚀液配比和水浴温度,能很好地控制腔体底部及侧壁的光滑度<sup>[14]</sup>.但湿法腐蚀过程中不可避免存在钻蚀现象,使腔体底部与侧壁间存在一定的倾角,如图 3(b).入射光在敏感膜表面反射后,由于倾角的存在而产生较大的光损耗,使耦合回光纤的传感光光强减弱,双光束干涉后的对比度降低,反射光的输出功率减小,影响测量的效果.所以选择合适的腐蚀工艺条件,尽量减小钻蚀是有必要的.

## 4 结论

为了满足医疗领域体内压力和口腔义齿压力的测量,对微型光纤压力传感器进行研究.采用浓硼扩散自停止腐蚀、磁控溅射、激光熔接等技术,在单膜光纤上制作薄膜厚度为  $6 \mu\text{m}$ 、腔长约  $4.2 \mu\text{m}$  的膜片式 F-P 光纤 MEMS 压力传感器.传感器的解调基于强度解调技术,利用反射功率与压力的关系对压力进行解调,避免了光电器件的使用,消除电噪音的引入.对传感器进行定标实验,结果表明该传感器具有线性度高、重复性好、灵敏度高、解调简单等优点.传感器的压强最小分辨率可达 62 Pa,强度解调的灵敏度为 0.51 nW/KPa,测量范围为 0~0.3 MPa,能实现体内压力和口腔义齿压力的实时精确的测量.

**致谢:**感谢厦门大学物理机电学院的冯勇建教授提供的实验帮助,感谢厦门大学微机电中心的张春权、苏丽锦等老师提供 MEMS 工艺的支持.

## 参考文献

- [1] HE Hu-ling, ZHAO Chun-mei, CHEN Dan, *et al.* Present status of optic fiber[J]. *Laser and Optic Electronics Progress*, 2004, **41**(3): 39-42.  
何慧灵,赵春梅,陈丹,等.光纤传感器现状[J].激光与光电子学进展,2004,**41**(3):39-41.
- [2] YU Qing-xu, ZHOU Xin-lei. Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic fabry-perot interferometer[J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(1): 72-83.
- [3] JIANG Jun-feng. A research on theory and technique of demodulation of optical fiber sensors used for structure health monitoring[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.  
江俊峰.用于结构健康监测的光纤传感解调系统的理论与方法研究[D].天津:天津大学,2004.
- [4] YU Qing-xu, WANG Xiao-na, SONG Shi-de, *et al.* Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic fabry-perot interferometer for high temperature oil well measurement [J]. *Journal of Optic electronics 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.
- [5] WU Yi-ming, LI Ming, CHENG Guang-hua. Fabricating micro fiber Fabry-Perot sensor with femtosecond laser pulses [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2010, **39**(4): 585-587.  
吴易明, 李明, 程光华. 飞秒激光制造微型光纤法布里-珀罗干涉传感器[J]. 光子学报, 2010, **39**(4): 585-587.
- [6] GUO Zhen-wu, SUN Gui-ling, LI Wei-xiang. Temperature characteristics of optical fiber pressure sensor based on F-P interferometry[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(3): 418-422.  
郭振武, 孙桂玲, 李维祥. F-P 光纤压力传感器的温度特性研究[J]. 半导体光电, 2008, **29**(3): 418-421.
- [7] ZHANG T, QIANG S, LEWIS F, *et al.* An optical pressure sensor based on MEMS [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, **35**(3): 476-478.
- [8] HILL G C, MELAMUD R, DECLERCQ F E, *et al.* SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **138**(1): 52-62.
- [9] YU Qing-xu, JIA Chun-yan. Diaphragm based miniature fiber optic pressure sensor with F-P cavity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12): 2887-2891.  
于清旭, 贾春艳. 膜片式微型 F-P 腔光纤压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(12): 2887-2892.
- [10] FENG Yong-jian. MEMS high temperature touch-mode capacitive pressure sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(7): 804-807.  
冯勇建. MEMS 高温接触式电容压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(7): 804-807.
- [11] ZHENG Zhi-xia, FENG Yong-jian. Research on the preparation method of free-handing conductive membrane with high mechanical sensitivity [J]. *Journal of Xiamen University*, 2012, **51**(1): 51-54.  
郑志霞, 冯勇建. 高机械灵敏度悬空导电薄膜的制备方法研究[J]. 厦门大学学报, 2012, **51**(1): 51-54.
- [12] JIANG Li-juan, JIANG Jun-feng, LIU Tie-gen, *et al.* Demodulation of cascade optical fiber fabry-perot pressure sensor[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2012, **41**(3): 283-287.  
姜丽娟, 江俊峰, 刘铁根, 等. 具有复合式法布里腔的光腔压力传感器的解调[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 283-287.
- [13] CHEN Xu-xing, WANG Ming, RONG Hua, *et al.* The study of the optical fiber mems pressure sensor with a mesa structure diaphragm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(4): 819-823.  
陈绪兴, 王鸣, 戎华, 等. 台面结构硅基法珀型光纤 MEMS 压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2007, **20**(4): 820-823.
- [14] CUI Feng, XIAO Qi-jun, WU Xiao-sheng, *et al.* Wet etching pits of pyrex glass for metallization [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(1): 236-238.  
崔峰, 肖奇军, 吴校生, 等. Pyrex 玻璃金属化凹坑的湿法腐蚀[J]. 功能材料与器件学报, 2008, **14**(1): 236-238.

## Diaphragm Type Optical Fiber MEMS Pressure Sensors Based on F-P Cavity Interference

ZHENG Zhi-xia<sup>1</sup>, HUANG Yuan-qing<sup>2</sup>

(1 Department of Electronic Information, Putian University, Putian, Fujian 351100, China)

(2 School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** A kind of optical fiber MEMS pressure sensor was manufactured by micro electro mechanical systems technology according to the principle of Fabry-Perot cavity interference. A sensitive film which is 6  $\mu\text{m}$  in thickness and 0.502  $\mu\text{m}/\text{MPa}$  in mechanical sensitivity was fabricated by adopting the deep boron-diffusion self-stopped etching and magnetron sputtering technique. Based on the intensity-demodulation technology, this kind of pressure sensor makes use of the relation between reflected power and pressure to demodulate the pressure. The study explores the impact of the change of cavity length on reflectance, identifies the light wavelength of linear working point of the pressure sensor, and establishes a stable testing system of fiber Fabry-Perot pressure sensor. The test results show that this kind of sensor has a minimum pressure resolution of 62 Pa and a sensitivity of 0.51 nW/KPa, displaying good linearity, high sensitivity and remarkable repeatability. It can be used to measure the pressure in the human body and the power of the oral denture on the below structure.

**Key words:** Optical fiber F-P pressure sensor; Boron silicon film; Mechanical sensitivity; Reflectance; Intensity-demodulation technology