# MEMS F-P 干涉型压力传感器

江小峰,林 春,谢海鹤,黄元庆,颜黄苹

(厦门大学 物理机电学院,福建 厦门 361005)

摘 要:为了满足工业、航天、国防等领域对微型化压力传感器的需求,提出了基于微机电系统 (MEMS, Micro electromechanical System)技术制作的非本征型光纤法布里--珀罗(F-P)压力传感器,该 传感器传感头由全玻璃材料构成。主要研究了 MEMS 技术制作全玻璃结构式压力传感器工艺,结合 溅射、光刻、腐蚀等工艺在7740 wafer 基底上制作出 F-P 腔体,利用低压化学气相沉积(LPCVD)的方 法在基底上沉积一层 40 nm 的非晶硅作为中间层。通过阳极键合技术在温度 400℃下完成玻璃与玻璃的 键合,并搭建了该传感器的压力测量平台。实验结果表明:在压力线性范围 0~400 kPa 内传感器具有 很高的重复性,达到 0.3%。灵敏度达到 1.764 nm/kPa;在传感器使用范围 0~80℃内,热敏感系数为 0.15 nm/℃。该传感器的研究对设计制作改善了该类传感器的热膨胀失配问题,对低温漂型压力传感 器的研究有一定参考价值。

关键词:光纤传感器; MEMS; 全玻璃材料; F-P 腔制作 中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2014)07-2257-06

## **MEMS F-P interferometry pressure sensor**

Jiang Xiaofeng, Lin Chun, Xie Haihe, Huang Yuanqing, Yan Huangping

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

Abstract: In order to meet the requirements of industry, aerospace and defense for miniature pressure sensors, an optical F –P interferometry pressure sensor which was made from all-glass material was presented, the sensor head of which was made from all-glass material. The processing steps of MEMS craft for fabrication of the all-glass optical pressure sensor were studied mainly, F–P cavity was made on 7 740 wafer based on sputtering, photolithography and etching technology, a 40 nm thick amorphous silicon layer deposited by low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) on this wafer was used as an intermediate layer. Then glass-to-glass anodic bonding was finished under the temperature of  $380^{\circ}$ . Finally, the pressure measurement system was established. The experiment result shows that a high repeatability in the range of 0-400 kPa pressure and a reasonable sensitivity of 1.764 nm/kPa have been obtained in this pressure sensor. The temperature-sensitivity coefficient of the sensor was about 0.15 nm/°C in the range of 0-80 °C. The study of the pressure sensor would be of utility value for design and fabrication of low temperature drift typed pressure sensor.

Key words: optical sensor; MEMS; all-glass material; fabrication of F–P cavity

导师简介:黄元庆(1949-),男,教授,博士,主要从事仪器科学与技术方面的研究。Email:yqhuang@xmu.edu.cn

通讯作者:颜黄苹(1975-),女,讲师,博士,主要从事光电集成、光电传感与检测方面的研究。Email:hpy@xmu.edu.cn

收稿日期:2013-11-20; 修订日期:2013-12-23

基金项目:福建省自然科学基金(2013J01251)

作者简介:江小峰(1986-),男,博士生,主要从事光纤传感技术方面的研究。Email:xiaofengjiang@yeah.net

## 0 引 言

与传统传感器相比,光纤传感器具有抗电磁干 扰、电绝缘性能良好、灵敏度高、测量对象广等优点, 尤其在某些恶劣环境下的现场使用,光纤传感器起 到了不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。在光纤传感器中,F-P干 涉式传感器最突出的特点是高分辨率,且由于其体 积小、抗干扰能力强等优点,该类传感器已成为目前 最有前景的一种光纤传感器<sup>[3-4]</sup>。F-P干涉式传感器 分为本征型和非本征型两种,本征型光纤传感器由 全光纤构成,抗环境干扰较强且体积较小,但是腔体 加工难度很大且较难解决双参数的区分问题。非本 征型光纤 F-P传感器是目前应用最广泛的一种光纤 F-P传感器,它具有腔长易控、灵敏度可调、温度特 性优良等优点<sup>[5-7]</sup>。

近年来微机电加工技术已广泛运用于光纤传感 器制作,使得产品体积小巧、一致性高,易于实现批 量制作,使用 MEMS 工艺制造光纤 F-P 传感器是发 展的趋势之一。目前报道的 MEMS 光纤 F-P 压力传 感器主要为硅-玻璃类 F-P 传感器,优势在于 MEMS 工艺容易实现和解调干扰较小, 但是由于硅 与玻璃热膨胀系数不同,传感器温度敏感系数较大, 这在一定程度上限制了其在大温度范围环境下的使 用<sup>[8-9]</sup>。文中设计并制作了一种 MEMS 制作的玻璃-玻璃结构的光纤 F-P 压力传感器,并搭建了传感 器压力测量的平台,实验结果表明,该传感器在 0~400 kPa 压力范围内具有较高的重复性,达到了 0.3%, 灵敏度为 1.764 nm/kPa; 传感器热敏感系数为 0.15 nm/℃。该全玻璃结构传感器改善了该类传感器 的热膨胀失配问题,对低温漂型压力传感器的研究 有一定参考价值。

### 1 传感器结构与基本原理

光纤 F-P 压力传感器结构如图 1 所示。传感器 由传感头、光纤和毛细管三部分构成,其中传感头包 括玻璃隔膜、F-P 腔体、玻璃基底三部分。传感头由 MEMS 工艺制成,通过毛细管辅助准直与光纤粘结 构成 F-P 压力传感器。光源发出入射光通过光纤耦 合进入传感器内,在传感器 F-P 腔体的上下表面来 回反射,形成多光束干涉,部分反射光束沿原路返回, 并相遇产生干涉。干涉信号与腔长 L 有关,当隔膜的 形变导致腔长 L 变化时,干涉信号发生变化,通过测 量干涉信号的变化,则可导出腔长 L 的变化从而得 到压力的变化<sup>[10-11]</sup>。为了完成键合,在玻璃基底上沉 积了一层非晶硅,在键合后,非晶硅与玻璃形成了硅 氧化合物。这层硅氧化合物对透射率与反射率几无 影响。





在小挠度情况下,根据弹性力学原理,玻璃隔膜 受到压力后变形情况如公式(1):

$$w = \frac{3p(1-\mu^2)}{16Eh^3} (R^2 - r^2)^2 \tag{1}$$

式中:w为玻璃隔膜挠度;p为玻璃隔膜所受压力;µ 为泊松比;E为玻璃的杨氏模量;h为玻璃隔膜厚度; R为隔膜半径;r为隔膜任意部位的半径。

对应灵敏度表达式为:

$$S = \frac{d\omega_{max}}{dp} = \frac{3p(1-\mu^2)R^4}{16Eh^3}$$
(2)

该传感器设计目标是在 0~400 kPa 压力范围内 设计一种交叉灵敏度小于 5%的用于测量干燥气体 气压的光纤压力传感器,该传感器的使用范围是 0~80℃,灵敏度为 1.8 nm/kPa。

由于玻璃反射率较小,该F-P干涉传感器反射 光强可表示为:

$$I_r = 2RI_0 \left( 1 - \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \right) \tag{3}$$

式中:*L*为 F-P 腔腔长;*I*<sub>0</sub>为入射光光强;*I*,为反射光 光强;*R*为玻璃反射率;λ为光源波长。

由于 λ=c/v,该式可表达为:

$$I_r = 2RI_0 \left( 1 - \cos \frac{4\pi v L}{c} \right) \tag{4}$$

从公式(4)可以看出,反射光光强与光频率成余 弦关系,对公式(4)进行傅里叶变换可得:

$$F(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\nu} e^{-j\Omega v} dv = \int_{-\infty}^{\infty} 2R I_0 \left( 1 - \cos \frac{4\pi v L}{c} \right) e^{-j\Omega v} dv =$$

$$2\pi R I_0 \left[ 2\delta(\Omega) - \delta \left( \Omega + \frac{4\pi L}{c} \right) - \delta \left( \Omega - \frac{4\pi L}{c} \right) \right]$$
(5)

从公式(5)可以看出,除去负频率后,反射光光 强频谱只含有直流分量谱线和角频率分量谱线。只 要找到频谱最大值点,便可得到传感器腔长。即当  $\Omega_0 = \frac{4\pi L}{2}$ 时,对应腔长即为 F-P 腔长:

$$L = \frac{c\Omega_0}{4\pi} \tag{6}$$

#### 2 传感器制作

#### 2.1 传感器制作工艺难点分析

文中重点研究了全玻璃材料式光纤压力传感器 MEMS制作工艺,即传感器结构隔膜和基底均为玻 璃,而传统的硅-玻璃结构则以硅为隔膜、玻璃为基 底,二者在 MEMS 制造工艺上主要区别在于:

(1) 传统的硅-玻璃结构式传感器隔膜的减薄工 艺为硅的减薄,腐蚀溶液为 KOH 溶液;而全玻璃结 构式传感器隔膜减薄为玻璃的减薄,腐蚀溶液为 HF 与 HCL 的混合溶液,为了达到较好的表面粗糙度, 对腐蚀溶液的混合比例、温度、搅拌速率有非常严格 的要求<sup>[12]</sup>。

(2) 传统的硅-玻璃结构式传感器,硅隔膜与玻 璃基底可直接进行阳极键合;而全玻璃结构式传感 器玻璃隔膜与玻璃基底的阳极键合几乎是不可能 的,如果采用热压键合,高温不仅会使7740 wafer 软 化,也容易导致 F-P 腔体坍塌。需用化学气相沉积 的方法沉积一层非晶硅薄膜作为中间层,且这一层 非晶硅在键合后,生成的硅氧<sup>[13-14]</sup>。

(3) 传统的硅--玻璃结构式传感器由于硅与玻璃 的腐蚀溶液不会交叉腐蚀(KOH 对玻璃的腐蚀极小), 较容易进行选择性减薄;而全玻璃结构式传感器的 减薄需考虑交叉腐蚀问题,实验表明,金属掩膜在超 过 10 min 的 HF 腐蚀下,会逐渐疏松直至脱落,为 此,该实验设计并制作了以特氟龙为材料的单面腐 蚀减薄夹具<sup>[15]</sup>。

#### 2.2 光纤压力传感器制作关键工艺设计

图 2 为 F-P 光纤压力传感器传感头 MEMS 制 作工艺。该传感器制作使用衬底为 4 in(1 in=2.54 cm) 康宁 7 740 玻璃 wafer,厚度为 500 µm,制作前 wafer 经过标准清洗以及退火处理。首先使用磁控溅射的 方法在玻璃表面溅射一层 30 nm 的 Cr 和 200 nm 的 Au, Au 是最常见的玻璃腐蚀掩膜,具有很好的耐 HF 酸腐蚀能力,Cr增加了Au与晶圆的粘附性(如图2(a) 所示):运用光刻的方法光刻出设计图形(如图 2(b)所 示);腐蚀未被光刻胶保护的 Cr、Au(如图 2(c)所示); 使用玻璃腐蚀溶液(HF+HCl)氢氟酸缓冲溶液腐蚀出 F-P 腔体<sup>[16]</sup>(如图 2(d) 所示);腐蚀光刻胶、Cr 和 Au (如图 2(e)所示);使用 LPCVD(低压化学气相沉积)沉 积一层 40 nm 的非晶硅(如图 2(f)所示);将玻璃隔膜 与玻璃基底在真空键合机中阳极键合<sup>[14-16]</sup>(如图 2(g) 所示):使用同样的玻璃腐蚀溶液分别对玻璃隔膜以 及玻璃基底进行腐蚀,为了达到设计尺寸,设计了单 面腐蚀夹具,可选择性腐蚀隔膜与基底(如图 2(h)所 示)。制作的光纤 F-P 传感器,玻璃隔膜厚度为 50 µm, 腔长 50 µm,基底厚度 180 µm。最后,使用划片机进行 划片,即制成传感头,传感头为方形,直径1.8mm,传 感头如图3所示。



图 2 光纤压力传感器 MEMS 制作过程

Fig.2 Processing steps of MEMS craft for fabrication of optical pressure sensor



图 3 传感头 Fig.3 Sensing head

玻璃腐蚀表面质量参数主要为表面粗糙度和深 宽比,由环境温度、搅拌速率和溶液配比决定。为了 获得较好的表面腐蚀质量,文中做了大量实验,实验 结果表明,在搅拌速率为每8分钟1次、温度22℃ 条件下,使用体积比为10:1的HF(49%):HCl(37%) 的混合溶液腐蚀表面质量最佳。图4为不同混合配 比腐蚀溶液下的腐蚀表面质量对比图,测量仪器为 台阶仪:





etchant solution 玻璃的键合最主要方式有热压键合和阳极键

合。由于 7 740 玻璃 wafer 软化点温度较低,约为 500℃,热熔键合中的高温不仅会使 wafer 变形,甚 至导致 F-P 腔体的坍塌,而且玻璃与玻璃直接阳极 键合是很难进行的,因此使用 LPCVD 沉积一层40 nm

的非晶硅作为中间层。阳极键合也称场助键合,在 380℃温度下使用1200V的电压,在真空度 mbar、 加压100N的条件下完成了键合。使用拉力测试机, 将键合隔膜的顶部与底部与测试机粘结,缓慢加力 至键合部位断裂。经过测试,键合强度约为12kPa, 键合过程电压-电流曲线图5。



图 5 玻璃-玻璃阳极键合电流-电压曲线 Fig.5 Current-voltage curve of glass-to-glass anodic bonding

该传感器制作光纤选用康宁公司的 SMF-28 单 模光纤,使用光纤切割刀切割光纤并与准直毛细管 进行粘结,固化后将光纤端面进行机械抛光。方形膜 片与毛细管的对准主要依靠设计的工装夹具来保 证,将与传感器隔膜与抛光后的毛细管进行对准粘 结,该过程中,选用与玻璃折射率非常接近的光刻胶, 减少了后续解调噪声。传感器实物图如图 6 所示。



图 6 MEMS 光纤 F-P 干涉型压力传感器传感器实物图 Fig.6 MEMS optical F-P interferometry pressure sensor

#### 3 实验结果与分析

#### 3.1 解调系统

实验采用的标准压力是航天空气动力技术研究 院生产的活塞式加压设备 TS-5B/AK-2,测量范围 为 0~500 kPa,准确度等级为 0.5 级,配备同公司生产 的压力电信号解调设备,光谱解调仪采用 MOI 公司 生产的 SM125 便携式静态光纤光栅解调仪。将传感

(8)

器至于密封加压腔中,腔外接活塞式加压设备。测试 时,缓慢增压,待压力稳定时,压力值可以从该压力 电信号解调设备读出。该解调仪使用内置激光器作 为光源,实验解调系统原理图如图7所示。



图 7 光纤传感器压力测量实验系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of experiment platform for the optical pressure system

通过合理的设计腔长,使干涉光谱出现两个干 涉极大峰,则两个反射面的光程由下式确定:

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \tag{7}$$

λ1、λ2为干涉谱的相邻极大峰,即一个自由光谱 区。随着腔长减小,自由光谱区增大。

3.2 实验数据与分析

通过逐步增压 51 次,采样 51 个点,加压至 406.4kPa,压力测量曲线与线性拟合曲线如图 8 所示。



Fig.8 Results of the pressure measurements and its linear fit

拟合直线表达式为:y=54.3163-0.00176413x

拟合的残差为 2.609 56E-5,线性度为 99%。隔 膜的形变量为1.764 nm/kPa,符合第设计指标。

该实验通过3次加压测量,获得腔长变化曲线如 图9所示,通过计算,三次测量的结果重复性达到0.3%。



Fig.9 Pressure repeated measurement

从图 10 中可以分析出,在温度变化 40℃下,腔 长变化了大约6nm,为0.15nm/℃,温度敏感系数较 低。测试点分布有一定离散型,主要与解调算法有关。

对传感器进行了稳定性实验,做了72h的零位 漂移实验,零点漂移计算公式如公式(8)。由曲线图11 可以看出,随着时间的变化,腔长变化只有1nm,主要 由噪声造成,计算得 D<0.1%。









## 4 结 论

文中设计并制作了一种基于 MEMS 工艺的光 纤 F-P 压力传感器,在 0~400 kPa 压力测量范围内 具有很高的线性度以及较低的标准误差、灵敏度达 到 1.764 nm/kPa。该传感器的传感头是用全玻璃结 构制成的,与传统的硅-玻璃结构相比,具有较低的 温度敏感系数,为0.15 nm/℃。该传感器的研究对设 计制作低温漂型压力传感器有一定指导意义。

#### 参考文献:

- [1] Jiang Y. Advanced Optical Fiber Sensing Technology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 147-169. (in Chinese)
- [2] Liao Y B, Li M, Yan C S. Modern Optical Information Sensing Principle [M]. Beijing: Tsinghua Science and Technology Press, 2009: 201-208. (in Chinese)

[3] Lee C E, Taylor H F, Markus A M, et al. Optical-fiber Fabry-Perot embedded sensor[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(21): 1225–1227.

- [4] San H S, Song Z J, Wang X, et al. Piezoresistive pressure sensors for harsh environments [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 550–555. (in Chinese)
- [5] Jia C Y. Study on miniature low pressure Fabry-Perot interferometric fiber optic sensor[D]. Dalian: Dalian Uiversity of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] Chen Chinhsing, Chen Minchih, Liu Wenfung. Electrical power sensor based on fiber Bragg grating and piezo-electric transducer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2255. (in Chinese)
- [7] Xiao S R, Zhu P, Ben F L. Analysis on characteristics of optical fiber sensor for atmospheric pressure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 1042–1047. (in Chinese)
- [8] Li M, Wang M, Li H. Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry [J]. *Optics Express*, 2006, 14(4): 1497–1504. (in Chinese)
- [9] Franssila S. Introduction to Microfabrication [M]. US: Wiley, 2010: 230-246.
- [10] Zhang Z P. Optical Fiber Sensor Principle [M]. Beijing: China Metrology Press, 1991: 1304–1308. (in Chinese)

- Jiang Y, Tang C J. Principles and Applications of Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 1803–1807. (in Chinese)
- [12] Iliescu C, Miao J, Tay F E H. Stress control in masking layers for deep wet micromachining of Pyrex glass [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 117(2): 286–292.
- [13] Kutchoukov V G, Laugere F, Van Der Vlist W, et al. Fabrication of nanofluidic devices using glass-to-glass anodic bonding [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 114(2): 521–527.
- [14] Berthold A, Nicola L, Sarro PM, et al. Glass-to-glass anodic bonding with standard IC technology thin films as intermediate layers [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 82(1): 224–228.
- [15] Zheng Z X, Lin Y F, Fen Y J. Research of 7740 Glass wet etching grooves and slot lithography graphic [J]. *Journal of Xiamen University: JCR Science Edition*, 2005, 44 (3): 370–372. (in Chinese)
- [16] Iliescu C, Jing J, Tay F E H, et al. Characterization of masking layers for deep wet etching of glass in an improved HF/HCl solution [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 198(1): 314–318.