

一种高精度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器

张韬杰**, 江毅*, 马维一

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 提出并通过实验研究了一种高精度微机电系统(MEMS)光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感器。该传感器基于 MEMS 技术,将硅片与 Pyrex#7740 玻璃片阳极键合并镀上高反介质膜构成一个高精度的 F-P 腔。当外界压力发生变化时,F-P 腔长会发生变化;采用高灵敏度光纤白光干涉测量技术,通过测量 F-P 腔长就可获得被测压力。实验结果表明,该传感器压力测量分辨率高,线性度高,并具有低温漂特性。

关键词 光纤传感器; 压力测量; 微机电系统; 法布里-珀罗腔

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170625

A High Fineness Optical Fiber F-P Pressure Sensor Based on MEMS

Zhang Taojie**, Jiang Yi*, Ma Weiyi

School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In this paper, a high-fineness optical fiber Fabry-Perot (F-P) pressure sensor based on micro-electro-mechanical system (MEMS) is proposed and experimentally demonstrated. The sensor is a high-fineness F-P interferometer formed by a silicon diaphragm and a Pyrex#7740 glass sheet both coated with high-reflection film. The change of pressure causes the length change of F-P cavity. Thus, based on the high-sensitive optical fiber white light interferometry, the pressure can be obtained by measuring the cavity length of the F-P. Experimental results show that the pressure sensor has properties of good measurement resolution, high linearity and low temperature drift characteristics.

Key words optical fiber sensors; pressure measurement; micro electro-mechanical system; Fabry-Perot cavity

OCIS codes 060.2370; 280.5475; 230.4000

1 引言

微机电系统(MEMS)是由微小元器件组合而成,并将光学和机械功能相结合的综合集成系统^[1]。MEMS 的光纤传感器是将 MEMS 工艺与光纤传感技术相结合的一种新型光纤传感器。在众多类别的光纤传感器中,基于 MEMS 的光纤传感器不仅具有结构简单、体积小、功耗低和易于实现大规模生产等优点,更具备线性度高、测量精度高及动态测量范围大等良好特性^[2]。

目前国内外构造 MEMS 的光纤压力传感器有很多方法。其一是使用体硅工艺制作得到光纤法

布里-珀罗(F-P)干涉型 MEMS 压力传感器^[3],在玻璃上用氢氟酸(HF)缓冲溶液腐蚀出浅薄圆柱腔体,然后用阳极键合工艺将单晶硅膜与玻璃紧密地键合在一起(单晶硅膜作为压力敏感膜),从而形成 F-P 腔。其二是在 Pyrex 玻璃晶圆片上腐蚀圆形浅坑,然后将其与单晶硅晶圆片键合在一起,玻璃浅坑底面与硅膜片内表面可形成 F-P 干涉腔^[4]。此类传感器都是基于双光束干涉原理,通过检测从 F-P 腔返回的干涉光谱中波峰或波谷的漂移来获取腔长变化,从而获知压力^[5]。然而,此类传感器由于硅片反射率和玻璃反射率低,干涉光谱呈正弦分布,所以在确定波峰或波谷位置时漂移的随机性大,限制了压

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-03-29; 录用日期: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61575021,61775020)、国家重点研发计划(2018YFB1107200)、国家高技术研究发展计划(2015AA504)

* E-mail: bitjy@bit.deu.cn; ** E-mail: zhangtaojie958@foxmail.com

力测量分辨率。

本文选用稳定性好,且热膨胀系数与光纤相近的硅作为压力传感膜片,然后利用刻蚀工艺在硅片上刻蚀出微型凹槽,并在底面镀上高反膜,然后在 Pyrex#7740 玻璃片的两面分别镀上高反膜与增透膜,并通过阳极键合技术将硅片与玻璃键合,硅片凹槽底面与镀高反膜的玻璃内表面可构成封闭的 F-P 腔,最后将带 F-P 腔的传感头与光纤准直器进行粘结制成完整的压力传感器。通过实验测试其压力特性与温度特性,结果显示其具有优良的压力测量性

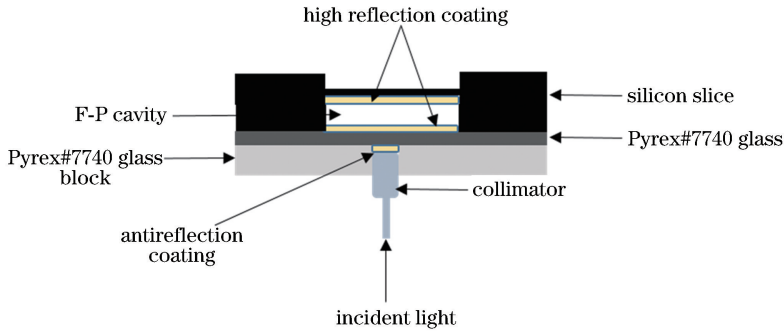


图1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic of sensor structure

传感器 F-P 腔的硅片凹槽底面及相对硅片的玻璃片内表面镀上 95% 反射率的高反膜,而玻璃片外表面镀上增透膜,入射光通过光纤进入传感器,在 F-P 腔体内多次反射形成多光束干涉,硅膜片在外界压力作用下发生形变,使得 F-P 腔的空气间隙发生变化,即腔长发生改变,这会导致 F-P 腔反射回的干涉光谱发生变化,此时可通过检测反射光谱中波峰或波谷的漂移来获取腔长变化,从而获知压力。根据白光干涉测量技术,传感器腔长 $d = \lambda_2 \lambda_1 / [n(\lambda_2 - \lambda_1)]$, λ_2 、 λ_1 为光谱中相邻波峰(相位相差 2π)的波长, n 为介质折射率。反射光谱中反射光强 I_r 与投射光强 I_t 分别为^[6-7]

$$I_r = \frac{F \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (1)$$

$$I_t = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (2)$$

式中: $\delta = 4\pi nd / \lambda$ 为相邻光线之间的光程差,其中 λ 为真空中的光波长, n 为 F-P 腔的介质折射率, d 为 F-P 腔腔长; $F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$ 为精细度,与反射率 R 有关,反射率越高,精细度越高。如图 2 所示,不同精细度

能与低温漂特性。

2 传感器结构及基本原理

光纤 F-P 压力传感器基本结构如图 1 所示,带凹槽的硅膜片与 Pyrex#7740 玻璃片通过阳极键合,由此形成硅片/空气和空气/玻璃两个平行界面,从而构成 F-P 腔,再将带通孔的 Pyrex#7740 玻璃块与带 F-P 腔的传感头用紫外固化胶(UV 胶)粘接,最后将光纤准直器插入玻璃块通孔,并用 UV 胶粘接固定,从而完成整个传感器的制作。

的 F-P 腔其相应的反射光强分布也不同。从图中可以发现,精细度越高,则干涉程度越深,干涉条纹越尖锐,故在测量干涉条纹波峰或波谷漂移时的精确度与分辨率更高。可见,通过提高 F-P 腔反射面的反射率,可以提高光纤 F-P 压力传感器的测压精确度与分辨率。

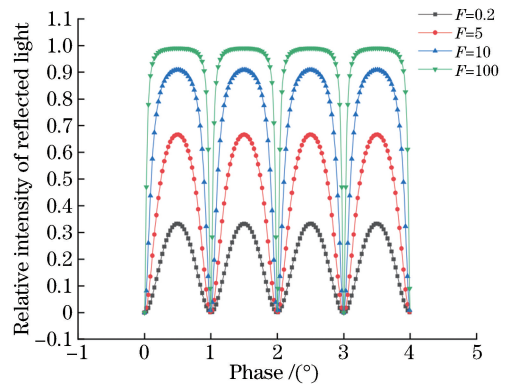


图2 反射光强随精细度和相位的变化

Fig. 2 Change of reflected light intensity with fineness and phase

光纤 F-P 压力传感器弹性膜片形变公式为^[8]

$$W(l) = \frac{3P(1-u^2)}{16Eh^3} (r^2 - l^2)^2, \quad (3)$$

式中: $W(l)$ 为膜片挠度; P 为膜片处所受压力; u 为泊松比(实验中所用硅的泊松比为 0.22); E 为杨

氏模量(190 GPa); h 为膜片厚度; r 为薄膜的有效半径; l 为硅膜任意部位的半径。在膜片的中心点处,即 $l=0$ 处,可得到压力灵敏度表达式为

$$Y = \frac{3(1-u^2)r^4}{16Eh^3} \quad (4)$$

由(4)式可知,灵敏度 Y 与传感膜厚度 h 、有效半径 r 有关。图 3 给出了理想情况下不同膜厚时灵敏度与半径的关系,可以看出当膜厚越小,半径越大时,灵敏度越高。

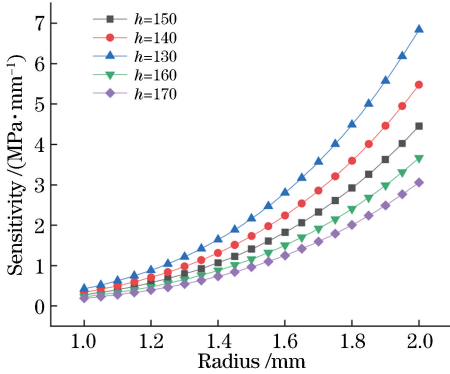


图 3 不同膜厚下半径与灵敏度的关系

Fig. 3 Relationship between the radius and the sensitivity at different film thicknesses

根据实际需求以及 MEMS 加工水平,文中光纤



图 4 传感头制作工艺流程图。(a)氧化沉积保护层;(b)光刻;(c)刻蚀;(d)镀膜;(e)去除保护层;(f)键合

Fig. 4 Process flow of sensor head fabrication. (a) Oxidative deposition protective layer; (b) lithography; (c) etching; (d) coating; (e) remove the protective layer; (f) bond

将 F-P 腔与边长为 5 mm、厚度为 3 mm、带直径为 2.5 mm 通孔的 Pyrex # 7740 玻璃块通过 UV 胶粘合,最后把光纤准直器插入玻璃块通孔并用 UV 胶粘接固定。实验中采用规格为 C-lens2.4 × 10 的光纤准直器,其作用是把光纤输出的光准直为光斑较大而发散角较小的准直光^[10]。粘接时使用定制夹具将 F-P 腔体和光纤准直器分别固定在两个水平相对的六轴超精密移动平台上,宽带光源发出的光经耦合器进入光纤准直器,经准直后进入 F-P 腔发生多次反射,反射光经原路返回传输至光谱仪。之后调节六轴超精密移动平台,并同时观察光谱仪上的干涉光谱,对准后将光纤准直器与玻璃块用 UV 胶粘结,完成整个传感器的制作。传感器的

F-P 压力传感器选用的硅膜片厚度为 $h=150 \mu\text{m}$,薄膜的有效半径为 $r=1.5 \text{ mm}$,得到此时灵敏度的理论值为 $Y=1.408 \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。

3 传感器制作

材料采用边长为 5 mm、厚度为 300 μm 的硅膜片,以及边长为 5 mm、厚度为 500 μm 的 Pyrex # 7740 玻璃片。传感器制作步骤如下: 1) 对硅片打磨抛光后利用标准工业湿法清洗工艺(RCA)进行清洗,然后采用热氧化工艺在其两面制备一层二氧化硅,再沉积一层氮化硅; 2) 利用光刻工艺,经过涂胶、软烘、曝光、显影、后烘等工艺,将制定好尺寸的掩模板上的图形转移到光刻胶膜上; 3) 利用反应离子刻蚀技术在硅片一面刻蚀一个深为 30 μm 、半径为 1.5 mm 的圆形凹槽,另一面中心处刻蚀一个深为 120 μm 、半径为 1.5 mm 的圆形凹槽,中间留 150 μm 厚的承压膜片; 4) 利用磁控溅射技术将高反射率膜镀在 F-P 腔底面上; 5) 利用反应离子刻蚀技术及氢氟酸、氟化氨和水配制的腐蚀溶液(BOE)去除保护层; 6) 利用阳极键合工艺将硅片与镀膜 Pyrex # 7740 玻璃片键合构成 F-P 腔^[9-10]。传感头制作工艺如图 4 所示。

光谱图如图 5 所示^[11-12]。

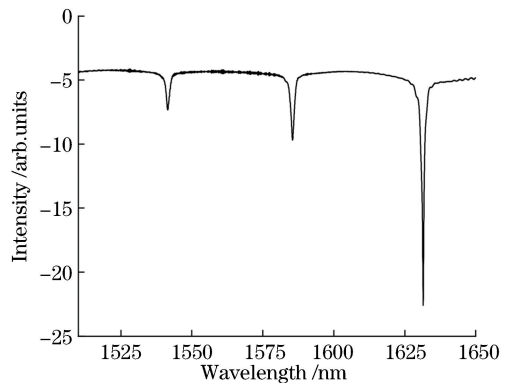


图 5 传感器光谱图

Fig. 5 Sensor spectrogram

4 实验结果及讨论

实验过程中采用实验室研制的光纤白光干涉解调仪,它适用于 F-P 腔类传感器的解调,测量范围为 20~10000 μm ,分辨率为 0.1 μm ,最高测量分辨率可达 0.1 nm。通过测量传感器干涉图谱的波谷漂移,并计算光纤 F-P 压力传感器的腔长变化,可以获得待测压力^[11]。压力控制系统由压力腔、气压表和氮气罐构成,其中压力测试腔可加压范围为 0~10 MPa,其气密性良好并具有两路光纤传感器连接口,压力表精度为 $\pm 0.06\%$ F.S.

在室温无压下对传感器的稳定性进行测试,测量传感器的初始腔长,结果如图 6 所示。可以看出在无压情况下腔长最小值为 27.7368 μm ,最大值为 27.7378 μm ,密集分布在 27.7373 μm ,随时间变化腔长变化只有 0.5 nm,故认定初始腔长为 27.7373 μm 。

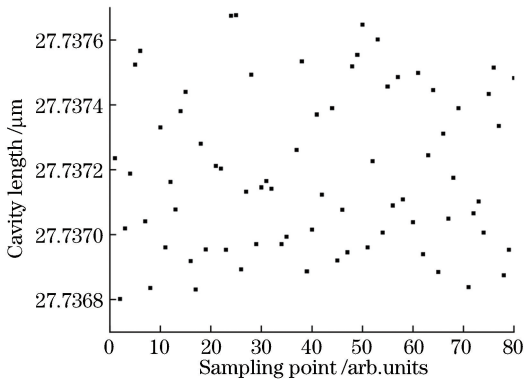


图 6 光纤 F-P 压力传感器初始腔长

Fig. 6 Initial cavity length of optical fiber F-P pressure sensor

对传感器进行测压实验,压力由 0 逐级增压至 1 MPa,在增压过程中每增压 0.1 MPa 记录一次数据,实验结果如图 7 所示。由图可知,腔长随压力增大呈线性递减,拟合直线表达式为 $y = -1.4401x + 27.743$,腔长变化灵敏度为 $1.4401 \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$,线性度为 0.9998。对传感器重复进行压力特性实验,压力由 1 MPa 逐级减压至 0,在减压过程中每减压 0.1 MPa 记录一次数据,实验结果如图 7 所示。由图可知,腔长随压力减小呈线性递增,拟合直线表达式为 $y = -1.4699x + 27.737$,腔长变化灵敏度为 $1.4699 \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$,线性度为 0.9998。两次实验中绘制的腔长-压力拟合直线重合,证明该 F-P 压力传感器具有相当好的重复性,能够保证测量结果的可靠性。实验结果取多次实验的平均值,腔长变化灵

敏度为 $1.445 \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$,与理论计算值 $1.4080 \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 基本吻合,误差主要来源于膜的实际直径测量和膜厚加工精度。

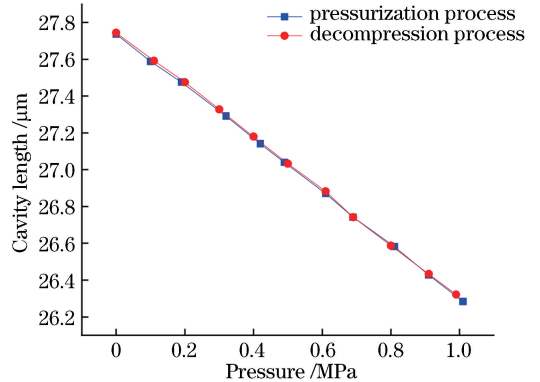


图 7 压力与腔长的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of pressure and cavity length

再对传感器进行温度特性实验,将传感器置于恒温槽中,温度由 30 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐升至 70 $^{\circ}\text{C}$,每加温 2 $^{\circ}\text{C}$ 记录一次实验数据,实验结果如图 8 所示。由图可知,初始腔长为 27.7373 μm ,温度由 30 $^{\circ}\text{C}$ 升至 70 $^{\circ}\text{C}$,腔体增长 0.013 μm ,因此传感器腔长灵敏度为 $0.325 \text{ nm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。腔长变长主要源于温度升高,从而引起 F-P 热膨胀及腔体空气热膨胀。结合压力特性实验可知,温度交叉灵敏度为 $224.913 \text{ Pa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$,在 0~1 MPa 的测量范围内,温度变化 100 $^{\circ}\text{C}$ 所引起的误差为 0.2%,故该传感器在此范围内受温度影响很小,具有低温漂特性^[13-14]。

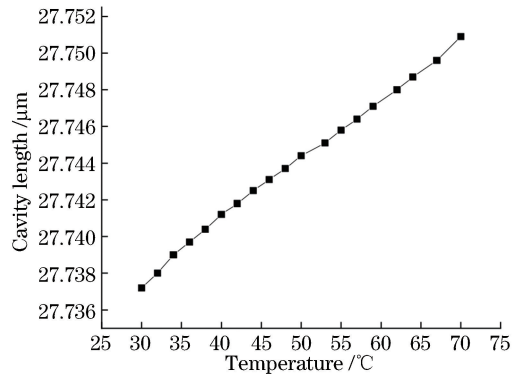


图 8 光纤 F-P 压力传感器温度特性

Fig. 8 Temperature characteristics of optical fiber F-P pressure sensor

5 结论

提出一种基于 MEMS 技术的高精细度 F-P 压力传感器。该传感器通过 MEMS 技术加工硅-空气-Pyrex # 774 玻璃的键合结构并镀上高反介质膜形成高精细度的 F-P 腔。通过分析膜厚、半径对传

感器灵敏度的影响,及不同精细度对传感器反射光谱干涉程度的影响,给出了提高传感器压力测量分辨率和精确度的方案。实验结果表明,该传感器的测压范围为 $0 \sim 1$ MPa,腔长变化灵敏度为 $1.445 \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1}$,温度的交叉影响灵敏度为 $224.913 \text{ Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。说明该传感器具有体积小、响应速度快、抗电磁干扰、可靠性高和低温漂等特性,在航天航空、汽车工业和桥梁监测等领域具有很大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Chen W M, Lei X H, Zhang W, *et al.* Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328010.
- [2] Ye C. Research on demodulation methods of optical fiber MEMS Fabry-Perot sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 9-19.
叶晨. 光纤 MEMS 法布里-珀罗传感器解调方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 9-19.
- [3] Zhou J, Dasgupta S, Kobayashi H, *et al.* Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(4): 598-604.
- [4] Wu Z H, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Effect of thermal stress and residual gas pressure on the thermal response of optical fiber Fabry-Perot pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328005.
吴振海, 刘铁根, 江俊峰, 等. 热应力和残余气压对光纤法布里-珀罗压力传感器温度性能的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328005.
- [5] Liu J P, Wang Y, Liu J H. Temperature characterization of extrinsic fiber Fabry-Perot interferometric sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110601.
刘加萍, 王彦, 刘吉虹. 非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110601.
- [6] Ben Y H. Design and manufacture of low temperature coefficient optical fiber MEMS pressure sensor [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008: 1-28.
贲玉红. 低温度系数光纤 MEMS 压力传感器的设计与制造[D]. 南京: 南京师范大学, 2008: 1-28.
- [7] Zhang S, Jiang Y. Optical fiber high-temperature pressure sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(1): 10-12, 70.
张硕, 江毅. 一种光纤高温压力传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(1): 10-12, 70.
- [8] Jiang Y, Tang C J. Principle and application of optical fiber Fabry-Perot interferometer[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 3-16.
江毅, 唐才杰. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 3-16.
- [9] Jiang X F, Lin C, Xie H H, *et al.* MEMS F-P interferometry pressure sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2257-2262.
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. MEMS F-P 干涉型压力传感器[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2257-2262.
- [10] Li H T, Li Y C. Research of silicon bonding technology[J]. *Sensor World*, 2002, 8(9): 6-10.
李和太, 李晔辰. 硅片键合技术的研究进展[J]. *传感器世界*, 2002, 8(9): 6-10.
- [11] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0206001.
张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0206001.
- [12] Hu L F. Investigation on the mechanism and microstructure and mechanical properties of the anodic bonding for the Pyrex glass to metals [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007: 50-75.
胡利方. Pyrex 玻璃与金属阳极键合机理及界面结构和力学性能的分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2007: 50-75.
- [13] Jiang Y. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1413-1420.
江毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1413-1420.
- [14] Ge Y X, Zhao W J, Zhang P. Design of an optical fiber MEMS pressure sensor based on F-P cavity[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(6): 788-791, 797.
葛益娴, 赵伟绩, 张鹏. F-P 腔式光纤 MEMS 压力传感器的设计[J]. *半导体光电*, 2017, 38(6): 788-791, 797.