

doi:10.3788/gzxb20144310.1006003

白光干涉解调光纤 MEMS 压力传感器

江小峰, 林春, 谢海鹤, 颜黄苹, 张建城, 黄元庆

(厦门大学 物理与机电工程学院 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要:为了在强电磁干扰、高温、高压等恶劣环境下实现压力的测量,进一步提高传感器的小型化并降低其制作成本,提出并设计了一种基于白光干涉解调的光纤法布里-珀罗压力传感器,实现了传感器的压力测量.基于微机电系统技术,采用光刻、阳极键合以及化学腐蚀的方法制作了以硅和玻璃构成的法布里-珀罗腔体,使用二氧化碳激光器对法布里-珀罗腔体与光纤进行焊接.基于白光干涉解调技术,利用斐索干涉仪与法布里-珀罗腔体的互相关关系对传感器进行了解调,并做了压力实验.实验结果表明:传感器在 120~300 kPa 范围内具有较高的腔长变化灵敏度和线性度,分别为 9.012 7 nm/kPa 和 99.9%;传感器分辨率为 0.1 nm,重复性为 0.1%.研究成果对低成本、高一致性光纤 F-P 传感器的批量制作具有一定的参考价值.

关键词:F-P 干涉;白光干涉;斐索干涉仪;MEMS;激光焊接

中图分类号:TP394.1;TH691.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)10-1006003-5

Optic Fiber MEMS Pressure Sensor Based on White Light Interferometry

JIANG Xiao-feng, LIN Chun, XIE Hai-he, YAN Huang-ping, ZHANG Jian-cheng,
HUANG Yuan-qing

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

Abstract: In order to achieve the measurement of the pressure in the harsh environment of strong electromagnetic interference, high temperature, high pressure, to further improve the miniaturization of sensors and reduce the cost of sensors, an optic fiber micro electro mechanical systems pressure sensor based on white light interferometry was produced. Fabry-Perot(F-P) cavity composed of silicon and glass was produced by the means of lithography, anodic bonding and chemical etching which was based on micro electro mechanical systems technology. F-P cavity with optical fibers were welded together through the carbon dioxide laser. The sensor was demodulated by the cross-correlation relationship between Fizeau interferometer and F-P cavity which is based on white-light interferometry techniques. Pressure sensor experimental was done, and the experimental results show that the sensor has a high sensitivity and linearity of 9.012 7 nm/kPa and 99.9%, respectively, the repeatability of sensor is 0.1%. The study has guiding significance for the production of low-cost and high-consistency fiber FP sensors.

Key words: F-P interference; White light interferometry; Fizeau interferometer; MEMS; Laser welding

OCIS Codes: 040.0040; 060.0060; 140.0140

0 引言

近年来,光纤法布里-珀罗(Fibry-Perot, F-P)传感器由于其重量轻、体积小、灵敏度高、动态响应范围大和抗电磁干扰能力强等特点,已经成为光纤传感研究

领域的重要研究方向之一,尤其是在强电磁干扰、高温、高压等恶劣环境下的应用更是具有传统传感器无法比拟的优势^[1-4].随着微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技术的逐渐成熟,该技术开始大量运用于 F-P 传感器的制作中,不仅降低了传

基金项目:福建省自然科学基金(No. 2013J01251)资助

第一作者:江小峰(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email: xiaofengjiang@yeah.net

导 师:黄元庆(1949-),教授,博导,主要研究方向为光电检测与传感器. Email: yqhuang@xmu.edu.cn

通讯作者:颜黄苹(1975-),讲师,博士,主要研究方向为光电集成、光电传感与检测. Email: hpyan@xmu.edu.cn

收稿日期:2014-02-26; **录用日期:**2014-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

传感器的制作成本,而且提高了传感器腔长可控性和批量制作时的一致性^[5-8].

目前光纤 F-P 传感器的解调方法主要可分为光强解调和相位解调.光强解调系统结构简单、成本较低、速度较快,适用于高速解调系统,但是解调准确度较低^[9-10].相位解调算法结构复杂、灵敏度大且准确度较高,主要有条纹计数法、离散腔长变换法、傅里叶变换解调法和互相关解调法^[11].其中,白光解调技术将斐索干涉仪与传感器输出光强进行互相关运算,在光程差为零的平衡位置处,输出一个幅值最大的光强,从而计算出腔长并以此获得被测物理量的绝对值.白光解调系统使用低相干的宽带光源,可以减少与半导体激光相关联的一些问题,如单模工作,具有线性度高、准确度高、成本低和结构简单的特点^[12-13].

本文提出一种基于白光干涉解调的光纤 F-P 压力传感器,该传感器灵敏度高、线性度好、成本较低.采用 MEMS 工艺完成了 F-P 腔体的制作,不仅大大降低了批量制作成本,而且提高了传感器的一致性、腔长与膜片的准确度可控性.该传感器为绝压式传感,使用真空键合技术制作了 F-P 腔体,一定程度上提高了传感器的热膨胀特性.使用基于白光干涉的互相关解调算法对传感器进行解调,结构简单且紧凑,准确度高,适用于绝对测量.

1 传感器结构与原理

1.1 传感器结构

传感器结构如图 1,硅膜作为压力敏感膜,玻璃上表面与硅膜下表面形成 F-P 腔体.光源输出光信号至传感器,光在 F-P 腔体中来回反射,形成了多光束干涉,反射光信号除去耦合损耗和吸收损失外由光纤传输回光谱接受装置.采用白光干涉解调方法,建立互相关器与反射光信号之间的互相关运算关系,对腔长进行解调.当硅膜受到外界压力作用时,敏感膜发生变

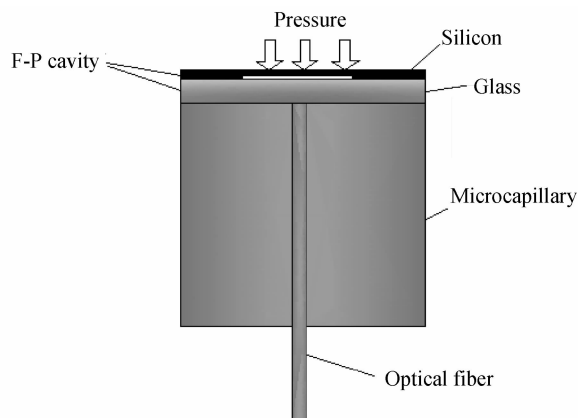


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure diagram

形,导致腔长变化,反射光信号也随之发生变化,这样便可通过对发射光信号的解调测量压力的变化^[14].

1.2 传感器的工作原理

根据弹性力学原理,在对硅膜施加压力后,敏感膜受压后中心挠度 L 与压力 p 关系可表示为

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

式中, L 为硅膜中心挠度, p 为硅膜所受压力, μ 为硅的泊松比, E 为硅的杨氏模量, h 为膜片厚度, R 为膜片半径, r 为膜片任意部位的半径.

膜片机械灵敏度 S 计算公式为

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

光纤 F-P 传感器的透射光函数为

$$T(\lambda, d) = \frac{1}{1 + F \sin^2(2\pi d/\lambda)} \quad (3)$$

d 为 F-P 腔长度, λ 为波长, F 为 F-P 腔精细度.考虑制作工艺的复杂性,采取不镀膜方案,这会在一定程度上降低传感器测量准确度.

在腔长一定的情况下,互相关函数为表示为

$$C(d) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} X(\lambda_0 + n\Delta\lambda) \cdot \frac{1}{1 + F \sin^2(2\pi d/(\lambda_0 + n\Delta\lambda))} \quad (4)$$

由式(4)可知,当互相关系数 $C(d)$ 最大时,即对应实际 F-P 腔长度.

斐索干涉仪是目前最为常用的光学互相干器之一,具有体积小、结构简单和计算简便等特点,使用斐索干涉仪作为互相关器,当经过 F-P 腔的透射光通过斐索干涉仪后,斐索干涉仪的两楔形块之间的距离为 d 处的位置,光强最大,对应 F-P 腔腔长.用 CCD 对斐索干涉仪输出光强分别进行获取,从而得到整个互相关函数.其中每个像素对应着每一个特定的 F-P 腔长,最大光强对应的像素位置即为实际 F-P 腔长度,即完成了对 F-P 腔长的解调^[15].

2 传感器制作方法

传感器制作主要分为 MEMS 工艺制作和激光焊接两个部分,采用 MEMS 工艺制作出 F-P 腔体,然后使用激光焊接将腔体与光纤进行焊接.所制作传感器硅膜厚度为 25 μm ,F-P 腔长为 18 μm ,传感头外围边长 1.5 mm,F-P 腔体直径为 1 mm.

MEMS 腔体工艺如图 2.首先将 4 寸硅片旋涂光刻胶,该光刻胶层可在较短时间内作为 ICP 刻蚀掩膜;然后对其光刻;ICP 刻蚀出硅腔体;腐蚀光刻胶;将腐蚀后的二氧化硅与 4 寸 7740 玻璃进行阳极键合;腐蚀硅至膜片厚度.

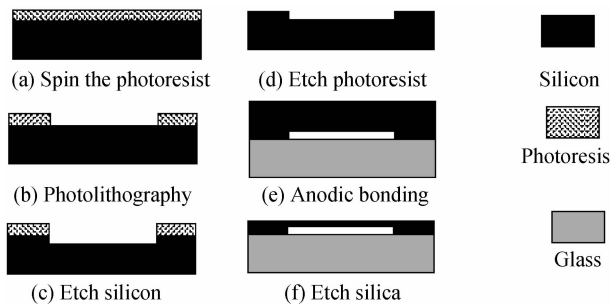


图 2 F-P 腔体制作流程
Fig. 2 Flow chart of F-P cavity

图 3 为键合过程电流、电压与时间的关系曲线图。键合完成后对膜片进行退火处理,提高传感器稳定性并降低膜片的热膨胀影响。使用划片机进行划片,即完成 F-P 腔的制作,划片后 F-P 腔如图 4。



图 3 键合过程
Fig. 3 Bonding process

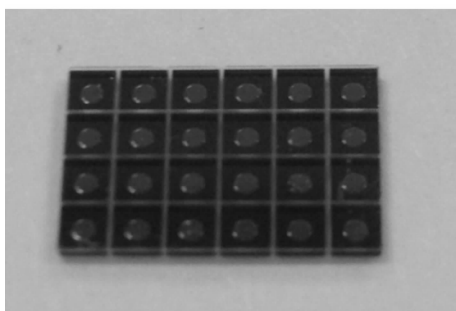


图 4 F-P 腔
Fig. 4 F-P cavity

搭建激光焊接系统对 F-P 腔与光纤之间实现焊接,激光焊接系统原理如图 5。

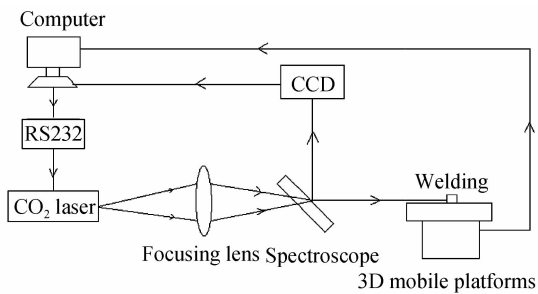


图 5 激光焊接系统
Fig. 5 Laser welding system

选用激光器为 SYNRAD 二氧化碳激光器波长

10.6 μm ,平均功率为 25 W,峰值功率为 75 W,能量稳定度小于 5%,出射光束直径为 3.5 mm. 二氧化碳激光器发射出激光后,经过激光聚焦透镜聚焦至分光棱镜,透射至待焊接物上. 而 CCD 则用来实施观察焊接图像,激光器焊接能量与脉冲时间则由串口控制,焊接物体通过夹具对准固定在三维平台上. 传感器实物如图 6。



图 6 传感器实物图
Fig. 6 Photo of sensor

3 实验数据与分析

3.1 解调系统

基于白光干涉的解调系统如图 7,实验中宽带光源选用卤钨灯,斐索干涉仪双面镀 30% 反射膜. 从光源中发出的宽带光通过耦合器(2×2)进入光纤 F-P 传感器,形成的反射光经过透镜准直后入射到斐索干涉仪上. 斐索干涉仪输出光光强分布实质上为 F-P 传感器反射光进行互相关运算后所呈的空间分布光强,将斐索干涉仪的输出光光强用 CCD 阵列进行光电转换并进行信号处理. 法拉第隔离器用来阻止反射光反馈进入光源,给后续解调增加噪音. 互相关信号中的最高峰值点位置对应的斐索干涉仪楔厚,即为传感器 F-P 腔长. 光纤 F-P 传感器受到压力 p 作用时,互相关信号上的峰值位置将随着 F-P 腔长大小的变化而移动,对传感器腔长进行标定,就可以完成对外界压力的测量. 传感器包括硅膜腔、玻璃腔和真空腔,由于采用白光,硅膜腔对传感器信号影响较小,而玻璃腔厚度远远大于真空干涉腔厚度,对解调几无影响。

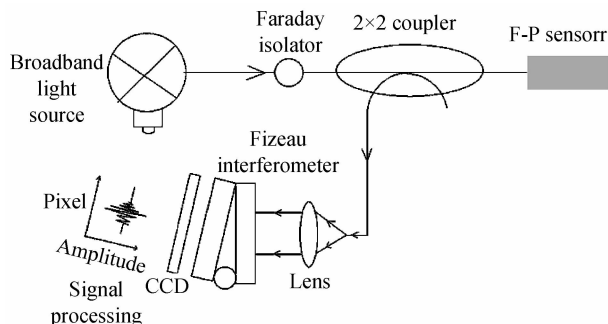


图 7 基于白光干涉的解调系统

Fig. 7 Demodulation system based on white light interference

3.2 实验数据

室温下,对传感器从 120 kPa 加压至 300 kPa,每 20 kPa 加压测量一次腔长. 测量数据与拟合曲线如图 8.

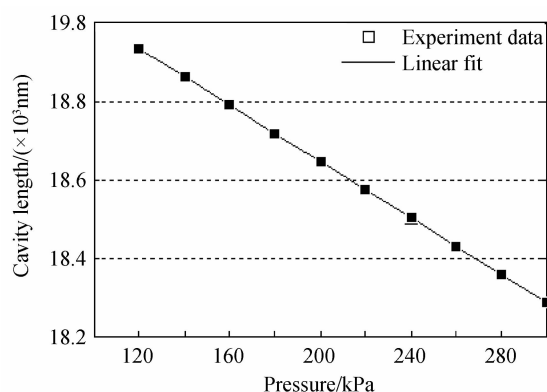


图 8 传感器腔长-压力标定

Fig. 8 Cavity length - pressure relationship of sensor

传感器分辨率为 0.1 nm,采用最小二乘法对数据进行直线拟合,拟合线性度 99.9%,灵敏度为 9.0127 nm/kPa. 拟合直线方程为

$$y = -9.0127x + 2.0918 \times 10^4 \quad (5)$$

在 120 kPa 至 300 kPa 范围内,对 F-P 传感器重复加压 3 次,测量传感器重复性,对数据进行分析,传感器在 300 kPa 范围内,有较高的重复性,达到 0.2%,如图 9.

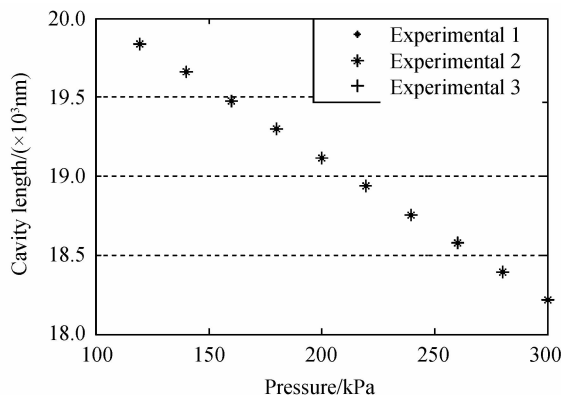


图 9 压力重复测量

Fig. 9 Pressure repeated measurement

图 10 为压力传感器的稳定性实验,72 h 的实时监控图显示,传感器腔长变化只有 2 nm.

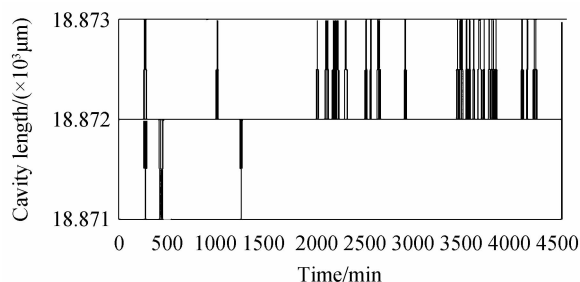


图 10 稳定性实验

Fig. 10 Stability measurement

在 25℃~65℃ 范围下,对传感器进行了温度测试,传感器在 35℃ 温度变化下,变化了 49 nm 左右,温度灵敏系数约为 1.4 nm/℃ (图 11).

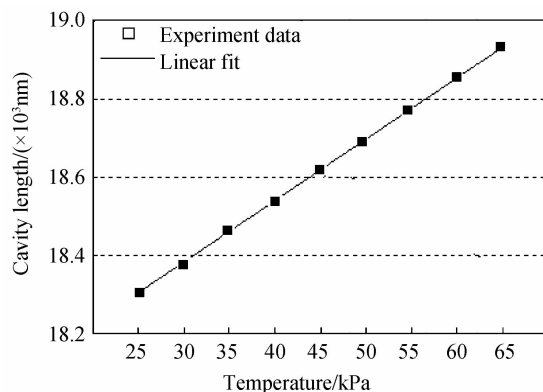


图 11 温度测量实验

Fig. 11 Temperature measurement

4 结论

基于 MEMS 和激光焊接技术研制了一种基于白光干涉解调的光纤 F-P 压力传感器,实现了在 0~300 kPa 内的高灵敏度测量,具有批量制作高一致性和低成本特点. 实验结果表明,传感器具有较高的灵敏度和线性度,分别为 9.0127 nm/kPa 和 99.9%,其重复性可达 0.2%. 由于传感器采用了二氧化碳激光器焊接,温度敏感系数较低,同时结合 MEMS 与白光解调提高了传感器的稳定性并降低了传感器制作成本. 研究成果对制作低成本、高一致性的光纤 F-P 传感器产量与推广应用具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] LAN Ruo-ming, JIANG Ming-shun. Optical fiber Fabry-perot refractive-index sensor fabricated by femtosecond laser etching [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(2): 221-225.
蓝若明, 姜明顺. 基于飞秒激光制备的光纤 Fabry-Perot 折射率传感器[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(2): 221-225.
- [2] WANG Q, WANG W, JIANG X, *et al.* Diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber pressure sensor[C]. 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. International Society for Optics and Photonics, 2010: 76564V.
- [3] LUO Bin-bin, ZHAO Ming-fu, ZHOU Xiao-Jun, *et al.* Study on characteristics of refractive index sensor based on Ganssi-anapodized fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(2): 201-206.
罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 高斯切趾光纤 Bragg 光栅折射率传感器特性研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(2): 201-206.
- [4] TANG Chang-ping, DENG Ming, ZHU Tao, *et al.* Photonic crystal fiber based M-Z interferometer for refractive index measurement[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(9): 1304-1308.
唐昌平, 邓明, 朱涛, 等. 基于光子晶体光纤 MZ 干涉仪的折射率传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(9): 1304-1308.
- [5] ZHANG Lei, YU Qing-xu. An improved demodulation

- method for F-P and FBG multiplexing system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(8): 1008-1011.
- 张磊, 于清旭. 光纤 F-P 腔与 FBG 复用传感器精确解调方法研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(8): 1008-1011.
- [6] LIU C. Foundations of MEMS[M]. Pearson Education India, 2006.
- [7] ZAOUK R, PARK B Y, MADOU M J. Introduction to microfabrication techniques [M]. *Microfluidic Techniques*. Humana Press, 2006: 5-15.
- [8] ZHAO Hong, LI Min, ZHANG Ying, *et al.* Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot acoustic sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6): 1018-1024.
- 赵洪, 李敏, 张影, 等. 非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 1018-1024.
- [9] GE Yi-xian, WANG Ming, CHENG Xu-xing, *et al.* A novel Fabry-Perot MEMS Fiber pressure sensor based on intensity demodulation method interferometry[J]. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 2006, **19**(05B): 1832-1834.
- 葛益娴, 王鸣, 陈绪兴, 等. 基于强度解调的 Fabry-Perot 型光纤 MEMS 压力传感器[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(05B): 1832-1834.
- [10] GE Yi-xian, WANG Ming, YAN Hai-tao, *et al.* MEMS pressure sensor based on a phased emodulation method[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(2): 472-475.
- 葛益娴, 王鸣, 闫海涛, 等. 基于相位解调的光纤 MEMS 压力传感器[J]. *功能材料与器件学报*, 2008, **14**(2): 472-475.
- [11] WANG Ting-ting, WANG Ming, LI Ming, *et al.* Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber fabry-pérot sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1297-1301.
- 王婷婷, 王鸣, 李明, 等. 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1297-1301.
- [12] BELLEVILLE C, DUPLAIN G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(1): 78-80.
- [13] LI Lei, LIU Tie-geng, JIANG Jun-feng, *et al.* Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Laser · Optoelectronics*, 2012, **23**(1): 67-73.
- 李磊, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤 FP 传感器偏振互相关解调中光楔参量的影响研究[J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(1): 67-73.
- [14] JIA Chun-yan, YU Qing-xu. Diaphragm based miniature fiber optic pressure sensor with F-P cavity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12): 2887-2892.
- 贾春艳, 于清旭. 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.
- [15] 江毅, 唐才杰. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用[M]. 国防工业出版社, 2009.