

基于氧化锆陶瓷的光纤 F-P 腔压力传感器研究

肖磊¹, 邵宇鹰², 庞拂飞^{1*}, 刘奂奂¹, 彭鹏²

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 以高温环境压力传感器应用需求为背景, 提出了一种基于氧化锆陶瓷的光纤法布里-珀罗(F-P)腔传感器, 它以氧化锆套筒、LC 陶瓷插芯和标准单模光纤为传感器组件, 利用粘接胶对 3 个组件固定封装, 制备膜片式空气隙 F-P 腔压力传感器。在压力装置中对封装后的传感器进行 0.5~4.0 MPa 的压力测试, 追踪 1543.67 nm 反射光谱波谷处波长移动, 分别绘出升压和降压过程中的光谱响应曲线, 通过线性拟合后, 传感器灵敏度可达 9.5 nm/MPa, 具有较好的线性度。

关键词: 光纤法布里-珀罗腔传感器; 氧化锆陶瓷; 压力测试

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)08-0028-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the fiber-optic F-P cavity pressure sensor based on zirconia ceramic

XIAO Lei¹, SHAO Yuying¹, PANG Fufei^{1*}, LIU Huanhuan¹, PENG Peng²

(1. Key Lab of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Based on the background of pressure sensor applications in high temperature conditions, a fiber-optic Fabry-Perot (F-P) sensor based on zirconia ceramic is proposed and investigated. The sensor is made from a zirconia ceramic cap, LC ceramic ferrule, a standard single mode fiber. The three parts are fixed with adhesive to obtain a diaphragm-based F-P cavity pressure sensor. The packaged sensor is used for pressure testing under a pressure environment device over the range from 0.5~4.0 MPa. Through monitoring the resonant dip at 1543.67 nm in the reflection spectrum, the spectral response curves during boosting and lowering pressure are drawn respectively. After linear fitting, the sensitivity of the sensor can reach 9.5 nm/MPa, which has good linearity.

Key words: fiber-optic Fabry-Perot cavity sensor; zirconia ceramic; pressure test

0 引言

光纤法布里-珀罗(F-P)腔压力传感技术因具有灵敏度高、无源、易组网和抗电磁干扰等优点, 受到了国内外学者的深入研究并得到了广泛应用。近年来, 美国弗吉尼亚理工大学、英国赫瑞瓦特大学、德国光子技术研究所、成都电子科技大学、北京理工大学、西

安交通大学和南京大学等^[1-6]均开展了光纤 F-P 腔压力传感技术研究。基于膜片式的非本征型光纤 F-P 腔压力传感器通常由光纤和压力敏感膜片构成。此类型结构的压力传感器利用膜片直接感受外界气压变化, 当敏感膜片受到外界压力作用产生形变, 由此引起光纤 F-P 腔传感器的腔长改变, 进而使传感器反射光谱发生移动, 因此通过监测光谱的移动即可实现压力参量的传感。

现有的光纤 F-P 腔传感器制备中, 通常采用石英、单晶硅片及聚合物等材料制作敏感膜片^[7-10]。对于石英通常采用磨抛等工艺来控制膜片厚度, 传感器一致性控制较难; 对于单晶硅片可以采用微电子加工工艺制备, 对膜片厚度控制具有良好的一致性, 但是其微加工工艺及传感器封装工艺较复杂; 对于聚合物通

收稿日期: 2019-04-26。

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(520970170006)资助。

作者简介: 肖磊(1992-), 男, 硕士, 现就读于上海大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事二氧化碳激光器加工刚玉陶瓷和石英材料方面的研究, 制备膜片式空气隙光纤法-珀传感器, 以应用于高温高压环境领域。

* 通信作者: 庞拂飞(E-mail: ffpang@shu.edu.cn)。



常采用胶粘的方式进行 F-P 腔的制备,但是通常聚合物材料在耐高温性能方面不如石英和硅片,因此,应用场合具有一定的局限性。本文针对现有光纤 F-P 腔传感器膜片制备及材料的问题,提出基于氧化锆材料的压力敏感膜片^[11]。

1 光纤 F-P 腔传感器原理

光纤 F-P 传感器基于多光束干涉的原理,当一束入射光分别经过两平行放置的反射镜反射后将引起干涉,两反射镜的间距也即 F-P 传感器的腔长。膜片式光纤 F-P 腔传感器作为光纤 F-P 传感器的一种结构,具有结构简单、实用性强等特点^[12,13],其中传感膜片、光纤端面分别作为两平行反射镜面。本文所提出的光纤 F-P 腔压力传感器结构如图 1(a)所示。光纤端面与氧化锆压敏膜片构成 F-P 腔的 2 个反射腔镜,当光纤输出光束入射到 F-P 干涉腔后,在腔内形成了多光束干涉,当外界压力作用于传感膜片时,将引起膜片微形变进而改变传感器腔长。

压力传感器制备中,压强值与相位输出的线性度是衡量其性能的一个重要指标,对于一定厚度的圆形膜片(侧壁一圈被固定),考虑到膜片的形变量在弹性形变范围内,当均匀压力作用到膜片表面时,膜片将产生形变,其形变示意图如图 1(b)所示。图中 r 表示膜片上任意点距离中心点(半径)的位置,根据弹性力学的原理,该点处产生的形变量与外界压力变化之间的关系可表示为^[14]:

$$\Delta d = \frac{3(1-u^2)\Delta P}{16Eh^3} \cdot (R^2 - r^2)^2 \quad (1)$$

其中, Δd 表示任意点处膜片的变化量,它是关于半径 r 的函数, u 表示膜片材料的泊松比, E 代表材料杨氏弹性模量, h 表示膜片的厚度, R 表示膜片的有效感压半径, ΔP 为施加的压强。在制备工艺符合的条件下,尽可能选取厚度较薄的材料可以得到较高的压力灵敏度。

从式(1)中可知,在中心点处($r=0$)膜片的形变量将取得最大值:

$$\Delta d_{\max} = \frac{3(1-u^2)\Delta P}{16Eh^3} \cdot R^4 \quad (2)$$

由式(2)可知,圆形传感器膜片在中心处产生的形变量最大,使 F-P 腔长发生变化,从而引起其反射谱明显的移动。选取波谷处作为参考点,监测不同压力条件下反射谱的移动,即可得到波长随输入压力值变化的灵敏度曲线。

2 氧化锆陶瓷 F-P 腔传感器封装

氧化锆传感膜片套筒结构是通过传统陶瓷烧结工艺制备的,其外径为 3 mm、内径为 1.3 mm、长度为 10 mm,套筒内径尺寸和 LC 陶瓷插芯(外径、内径分别为 1.25 mm、126 μm ,长度为 10.5 mm)尺寸匹配,套筒的一端为通孔;另一端为封闭膜片用于感测外界压力,膜片的厚度为 100 μm ,并经过机械研磨抛光。整个传感器的制备主要包括两步:

◆光纤与 LC 陶瓷插芯的封装。①使用切割刀将去除涂覆部分的光纤切割至 12 mm,并将配比好的 353ND 光纤粘合剂涂抹到裸光纤表面;②把涂有粘合剂的裸光纤穿入 LC 陶瓷插芯,此时裸光纤漏出约 1.5 mm,并将样品放置烘盘进行暖烘,以去除粘合剂中的气泡和水分,设置温度固化程序,保持 60 $^{\circ}\text{C}$ 固化 0.5~1 h、80 $^{\circ}\text{C}$ 维持 15 min、100 $^{\circ}\text{C}$ 维持 5 min、120 $^{\circ}\text{C}$ 维持 2 min、150 $^{\circ}\text{C}$ 维持 1 min,待其充分脱水固化;③利用光纤研磨机对裸露出的 1.5 mm 光纤研磨抛光,直至和 LC 端面齐平,得到光滑的光纤端面并去除有可能残留在光纤端面的粘合剂。

◆氧化锆套筒和 LC 陶瓷插芯的封装。①将氧化锆套筒水平固定在三维调整架上,使用超强结构环氧胶(JLAB001 系列,常温 30~60 min 达到使用强度,24 h 达到最佳强度)涂抹在 LC 陶瓷插芯表面,同时避免胶水污染光纤端面;②夹持陶瓷插芯并插入氧化锆套筒,当裸露在套筒外部的插芯长度大约为 2~3 mm

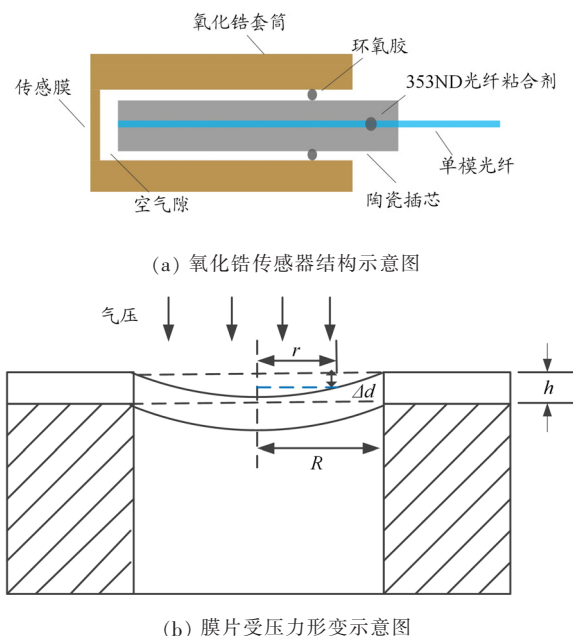


图 1 传感器结构及形变示意图

时,改用三维调整架进行微调节,如图 2(a)所示。将光纤固定在光纤夹具上,细调节三维调整架 X 轴方向,同时借助 MOI 公司生产的 SM125 光传感分析仪(波长范围为 1510~1550 nm,中心波长为 1550 nm,精度为 5 pm)实时监测反射谱波形,直至得到较好的反射谱对比度,如果波形不再漂移时则表明环氧胶已完全固化,也即完成了传感器的封装,传感器实物如图 2(b)所示。

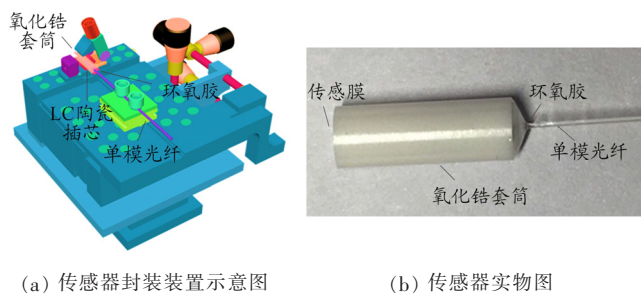


图 2 F-P 腔传感器封装

3 氧化锆膜片压力传感特性仿真

本文利用 Comsol 多物理场仿真软件对 100 μm 厚的氧化锆膜片进行压力仿真,结合固态力学物理场并设置稳态求解过程(压力范围为 0~4 MPa,间隔步长为 0.1 MPa),仿真结果如图 3(a)和图 3(b)所示,膜片在中心点处的形变量最大,约为 534.5 nm。将不同压力值下的形变量绘制后如图 3(c)所示,可知膜片形变量与压力值成正比。根据式(2)和氧化锆的物理参数可计算出 4 MPa 压力下膜片形变量为 536.44 nm (u 取

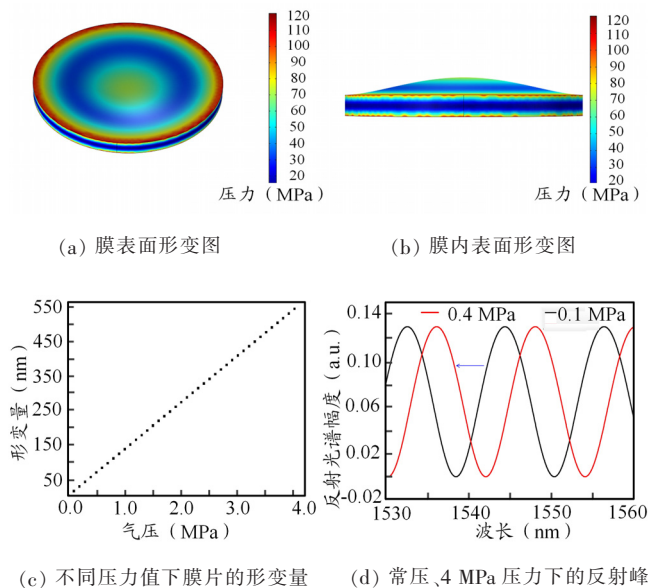


图 3 氧化锆膜形变仿真图

0.25, E 为 220 GPa, h 为 100 μm , 膜片的有效感压半径 R 为 625 μm),与仿真结果基本一致。为了观测由膜片产生的形变量引起的空气隙腔长变化,本文利用 Matlab 仿真常压和 4 MPa 压力下的反射峰如图 3(d)所示,可知升压之后,反射谱向短波长方向移动。

4 氧化锆 F-P 腔气压传感特性

图 4 为气压测试装置结构示意图,使用安特固 3-TON 速干环氧胶在氧化锆套筒均匀涂抹一周,并避免胶水污染传感器膜片,将传感器密封在 304 不锈钢管中(外径 6 mm、内径 4 mm),同时使用环氧胶充分填充金属管口,以避免管口漏气。由 10 L 的低纯氮气源提供压力输入,且可通过压力显示控制装置对气压进行设定,气压灵敏度为 0.02 MPa,并利用 SM125 对不同压力值下反射谱波形进行测试。

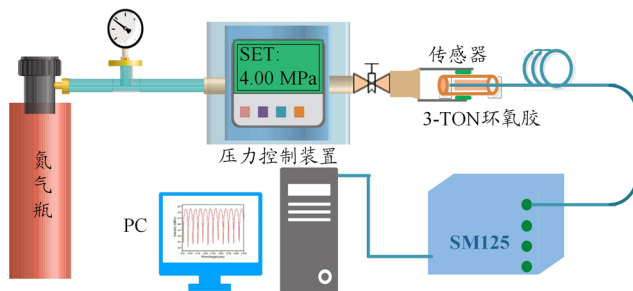


图 4 传感器气压测试装置结构示意图

设置升压/降压步长为 0.05 MPa,并在每一个气压值维持稳定后记下反射谱形数据,传感器封装之后反射谱如图 5(a)所示。0.5~1.0 MPa(间隔 0.05 MPa)下不同压力值下的反射谱波形如图 5(b)所示,在 0.50 MPa 反射谱波形中追踪 1543.67 nm 波谷处(红色圆圈标记点)的移动轨迹,从图中可知升压过程中反射谱波形向短波长方向移动,这与理论方向一致;继续升压至 4.0 MPa,将 0.5~4.0 MPa(间隔差 0.5 MPa)的几组数据点的反射谱波形绘制后如图 5(c)所示。由于在较高压力值下,波谷已经漂移出反射谱波形的自由光谱范围,为能直观体现升压过程波形的移动变化趋势,因此使用 Origin 数据分析软件将不同压力值对应的反射谱波形以纵坐标错位(offset)^[15]进行分层次绘制,其中每个反射谱波形均表现有 30 dBm 的对比度。

分别追踪光纤 F-P 腔传感器的反射谱波形在 1543.67 nm 处波谷移动情况,绘制出的波长漂移随压力变化的灵敏度曲线如图 6 所示。从拟合结果可以看出,升压、降压前后均达到 99.9% 的线性拟合度,平均压力灵敏度为 9.5 nm/MPa,这表明所制备的光纤压力

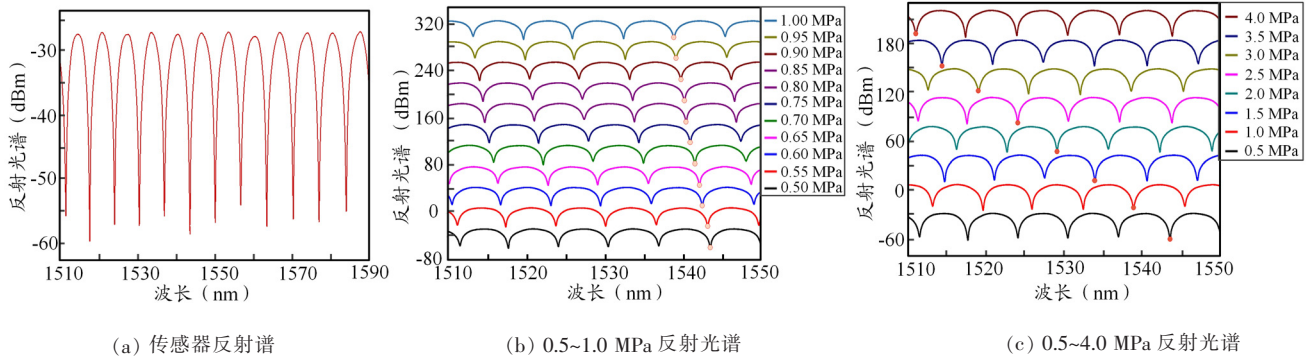


图5 传感器气压测试(纵坐标有30 dBm 错位)

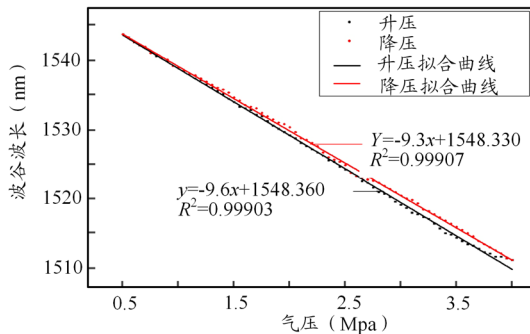


图6 压力灵敏度曲线图

传感膜片对气压变化敏感,且随着压力输入值变化表现为线性关系。但灵敏度较仿真的结果值偏大,其中可能的原因是:传感器封装过程中引入的黏合剂在压力作用下会产生挤压形变,由此带动光纤移动;使用的氧化锆膜片对压力比较敏感,因此实际产生的形变量比理论值偏大。

5 结束语

本文使用氧化锆陶瓷套筒作为传感膜片,制备了膜片-空气隙-光纤 F-P 传感器,借助填充粘合剂的方式完成了传感器的封装,通过了 0.5~4.0 MPa 的压力测试,并追踪反射谱波形在 1543.67 nm 波谷处的漂移变化,绘制出了升压、降压条件下的波长-压力曲线图,实现了 9.5 nm/MPa 的压力灵敏度。这表明本文所提出的光纤传感器有望应用于航空航天、井下作业等压力场景。由于引入粘合剂的成分,在温度场下会使材料失去性能,故而限制了传感器在温度场景下的应用,因此在后续研究工作中,可尝试利用激光器定位精确、微加工可控的优势实现不同材料间的焊接,以进一步改善传感器的封装过程。

参考文献:

[1] WANG X, XU J, ZHU Y, et al. All-Fused-Silica Miniature Optical Fiber

Tip Pressure Sensor[J]. Optics Letters, 2006, 31(7): 885-887.

[2] DYER T C, MACPHERSON W N, BROOKS S J, et al. Accelerated Through-Life Performance Evaluation of Fibre Fabry-Pérot Pressure Sensors [C]//Proceedings of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS2018), September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Piscataway: OSA, 2018.

[3] MARTA S F, JOERG B, LEHMANN H, et al. Fabry - Pérot Cavity Based on Hollow-Core Ring Photonic Crystal Fiber for Pressure Sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23): 2122-2124.

[4] LIU Q, RAN Z L, RAO Y J, et al. Highly Integrated FP/FBG Sensor for Simultaneous Measurement of High Temperature and Strain [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(17): 1715-1717.

[5] 刘跃辉, 张旭辛, 董玉明. 光纤压力传感器[J]. 光电子技术, 2005, 25(2): 125-132.

[6] 江毅, 马维一, 陈淑芬, 等. 微纳光纤高温压力传感器[J]. 光学技术, 2017(1): 15-18.

[7] DONLAGIC D, CIBULA E. All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO₂ diaphragm[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2071-2073.

[8] LIU G, HAN M. Fiber-optic gas pressure sensing with a laser-heated silicon-based Fabry - Perot interferometer[J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2461-2464.

[9] WANG A, XU J, COOPER K L, et al. Miniature all-silica fiber optic pressure and acoustic sensors[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3269-3271.

[10] HILL G C, MELAMUD R, DECLERCQ F E, et al. SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2007, 138(1): 52-62.

[11] 陈锡聪. 陶瓷砖莫氏硬度检测方法探讨[J]. 佛山陶瓷, 2017, 27(6): 44-47.

[12] LIU T, YIN J, JIANG J, et al. Differential-pressure-based fiber-optic temperature sensor using Fabry - Perot interferometry [J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1049-1052.

[13] GUO F, FINK T, HAN M, et al. High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry - Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1505-1507.

[14] 贾春艳. 微型低压光纤法布里-珀罗干涉传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[15] PENGCHENG C, XUEWEN S. Refractive-index-modified-dot Fabry-Perot fiber probe fabricated by femtosecond laser for high-temperature sensing [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5292-5299.