

# 波纹膜片式光纤法布里-珀罗压力传感器

陈 露 朱佳利 李泽焱 王 鸣

南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023

**摘要** 设计并研制了一种新型的波纹膜片式光纤法布里-珀罗压力传感器,运用仿真软件对波纹膜片进行膜片参数的优化,完成了波纹膜片式法布里-珀罗压力传感器的结构设计与制备,同时用搭建的微压传感器测试系统对压力传感器进行了测试。实验结果表明,本传感器在0~0.1 MPa的压力范围内,线性度好,重复性好,灵敏度高。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 微压; 法布里-珀罗; 波纹膜片

中图分类号 TN491 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0306002

## Optical Fiber Fabry-Perot Pressure Sensor Using Corrugated Diaphragm

Chen Lu Zhu Jiali Li Zeyan Wang Ming

*Jiangsu Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology,  
Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** A novel optical fiber Fabry-Perot pressure sensor using a corrugated diaphragm is presented. The mechanical model of corrugated diaphragm is analyzed and the parameters are optimized by simulation. The structures of the sensor and the production methods are elaborated. Pressure tests are carried out by employing the micro-pressure sensor testing system. Experimental results demonstrate that the sensor has reasonable linearity, sensitivity and repeatability in the range of 0 to 0.1 MPa.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensor; micro-pressure; Fabry-Perot; corrugated diaphragm

**OCIS codes** 060.2370; 060.4005; 230.3990

## 1 引 言

光纤压力传感器具有抗辐射、抗电磁干扰、耐高温、耐腐蚀、灵敏度高等优点<sup>[1-3]</sup>,适合用于工程建设、石油钻井、大型变电设备等高辐射、高电磁干扰、高温高压等极端环境。为了更安全、准确、便捷地获取传感器的压力信息,提高测量精度,需要开发新的材料或进行新的结构设计<sup>[4-5]</sup>。微型法布里-珀罗(F-P)压力传感器通常有毛细管结构和膜片结构2种。毛细管结构的压力传感器对压力感知敏感度低,可用于大压强范围的测量,但不适于对精度要求高的微压测量<sup>[6]</sup>。膜片式法布里-珀罗腔结构理论上可以获得较高的灵敏度,成为最常用的干涉型光纤压力传感器,它具有损耗低、抗干扰、灵敏度高、线性度好、测量精度高、动态范围大等优良特性<sup>[7-9]</sup>。为了进一步提高膜片式F-P压力传感器的灵敏度,本文设计并研制了波纹膜片式光纤F-P压力传感器,与本课题组发表的文献[10]相比,该传感器灵敏度提高了2个数量级,且传感器结构简单、重复性好、成本低廉,适宜批量生产。

## 2 传感器的结构分析与设计

### 2.1 传感器的结构分析

压力传感器由波纹膜片、玻璃圆环、光纤法兰盘和光纤插头等构成,如图1所示,其中d波纹膜片即为压

收稿日期: 2015-09-09; 收到修改稿日期: 2015-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(61178044)、江苏省普通高校研究生实践创新培养工程(KYLX\_0723, SJLX15\_0297)

作者简介: 陈 露(1992-),女,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: June\_0623@126.com

导师简介: 王 鸣(1950-),男,博士生导师,教授,主要从事光电子和激光应用方面的教学与研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn(通信联系人)

力敏感膜。1) 将波纹膜片与玻璃圆环的一个端面粘合,使波纹膜片的同心圆中心与玻璃圆环的圆心重合; 2) 将玻璃圆环另一端的外壁与光纤法兰盘的凹槽粘结并将外部封装固化,封装前压力传感器的端面如图2所示; 3) 将光纤插头旋接于光纤法兰盘,即构成一个压力传感器。光纤插头的端面与波纹膜片的下表面形成法布里-珀罗(F-P)腔。光经光纤垂直入射,一部分被光纤端面反射,另一部分光经过空气腔,被波纹膜片下表面反射,2束光在光纤内部发生干涉。当外界压力发生变化,波纹膜片将发生形变,从而改变F-P腔的腔长,引起反射谱的相位移动。对反射光谱进行解调,可以得到腔长的大小,从而计算得出作用于波纹膜片上的压力。

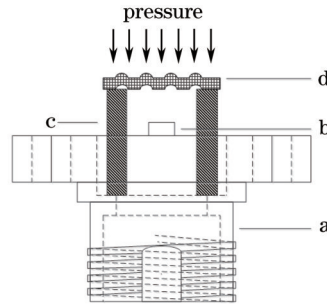


图1 传感器结构示意图 (a: 光纤法兰盘; b: 陶瓷插针; c:玻璃圆环; d:波纹膜片)

Fig.1 Schematic diagram of the pressure sensor (a: fiber flange; b: ceramic ferrule; c:glass ring; d: corrugated diaphragm)

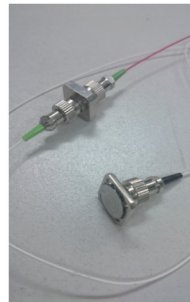


图2 未封装传感器的端面

Fig.2 End face of pressure sensor before packaging

对于一个周边固支的圆形薄板,中心挠度 $y$ 与压力 $P$ 的关系<sup>[11]</sup>:

$$\frac{Pr^4}{Eh^4} = \frac{16}{3(1-\nu^2)}\left(\frac{y}{h}\right) + \frac{7-\nu}{3(1-\nu)}\left(\frac{y}{h}\right)^3, \quad (1)$$

式中 $P$ 为施加在圆形薄板上的压力, $r$ 为敏感膜的半径, $E$ 为316L不锈钢的杨氏模量, $h$ 为敏感膜厚度, $\nu$ 为泊松比, $y$ 为敏感膜中心挠度。该传感器中,敏感元件为周边固支的波纹膜片,同等压力下形变量大于无波纹膜片。

## 2.2 传感器在不同压力下的模态分析

图3是波纹膜片的结构图。设置波纹膜片的参数:工作半径为4600  $\mu\text{m}$ ,厚度为30  $\mu\text{m}$ ,波高为60  $\mu\text{m}$ ,波纹宽度为750  $\mu\text{m}$ ,杨氏模量为200 GPa,泊松比为0.3,材料为316 L不锈钢。

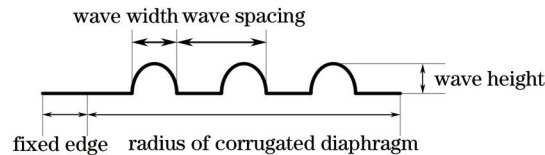


图3 波纹膜片结构图

Fig.3 Structure chart of the corrugated diaphragm

仿真计算波纹宽度为500、600、750、1000  $\mu\text{m}$ 时挠度随压力的变化曲线,结果如图4所示。在同等压力下,波纹宽度越大,挠度越大。但从图中可以看出,当波纹宽度高于750  $\mu\text{m}$ 时,压力-挠度曲线的线性度变差。为了得到挠度变化较大且线性度较好的值,选择波纹宽度为750  $\mu\text{m}$ 的波纹膜片。

仿真计算波高为 10~90  $\mu\text{m}$  时挠度的变化情况,结果如图 5 所示。当波高为 30~80  $\mu\text{m}$  时,挠度有较高的变化量,在挠度相同、线性度近似的情况下,综合考虑波纹膜片的加工成本,选择波纹高度为 60  $\mu\text{m}$  的波纹膜片。

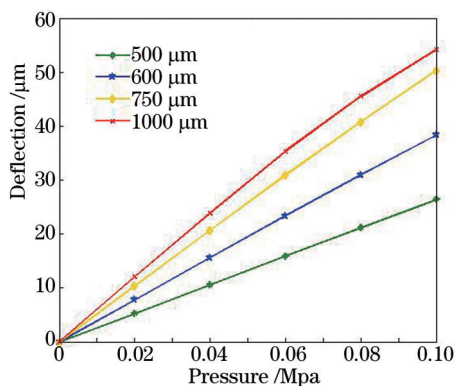


图 4 不同波纹宽度下压力对挠度的影响  
Fig.4 Influence of pressure on the deflection under different wave widths

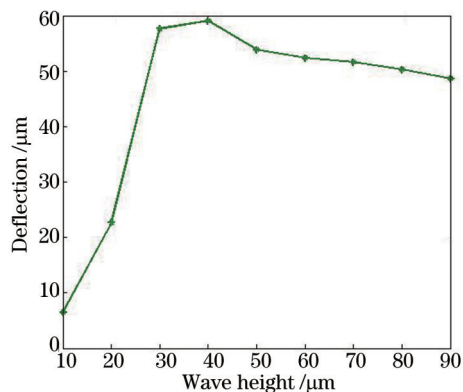


图 5 波高对挠度的影响  
Fig.5 Influence of wave height on the deflection

利用 CoventorWare 软件进行仿真,设置敏感膜的厚度为 30  $\mu\text{m}$ ,波高为 60  $\mu\text{m}$ ,波纹宽度为 750  $\mu\text{m}$ ,结果如图 6 所示。在敏感膜上施加 0.1 MPa 的压力,波纹膜挠度为 55  $\mu\text{m}$ 。

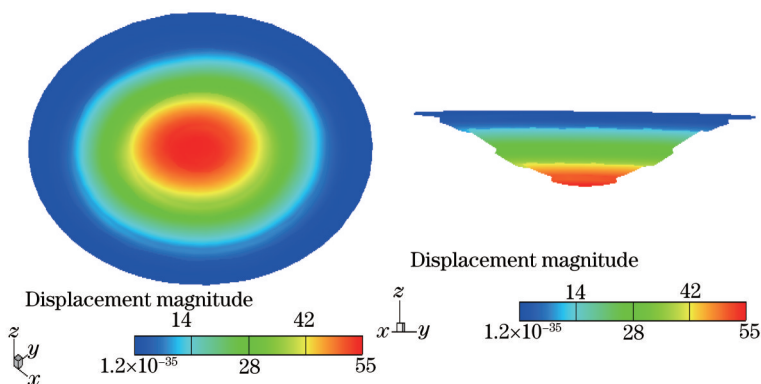


图 6 敏感膜仿真图。(a)正视图;(b)侧视图  
Fig.6 Simulation results of the sensitive membrane. (a) Front view; (b) side view

### 3 实验结果分析

图 7 为传感器测试系统的实验装置图,图中光纤传感分析仪采用美国 Micron Optics,Inc 公司生产的光纤传感分析仪 Si720。Si720 的光源与探测系统是各自独立的,且具有 2 个通道,每个通道可以检测 100 个传感器,全部传感器以 5 Hz 同步扫描,波长分辨率为 0.25 pm,精度为  $\pm 1$  pm。2 个通道采用高功率扫描激光器作为光源,输出波长为 1510~1590 nm,光源输出的光通过一个 2x2 光纤耦合器被分成强度相等的 2 束光<sup>[12]</sup>。一束光被接

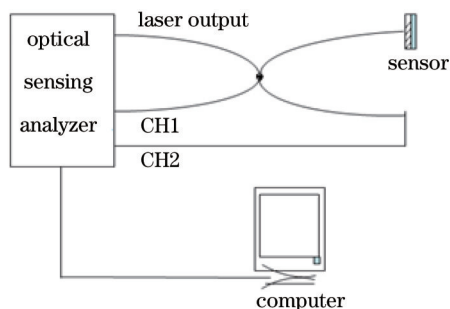


图 7 传感器压力测试系统  
Fig.7 Pressure testing system of sensor

回到CH2检测通道,作为入射参考光;另一束光传输经过F-P微腔形成干涉信号,再通过光纤耦合器接回到CH1检测通道,作为反射测量光;2束光同时进行扫描并传入计算机。由于波纹膜挠度和压力呈线性关系,因此压力的大小可由对应腔长的变化量来确定。传感分析仪得到的反射光谱如图8所示。

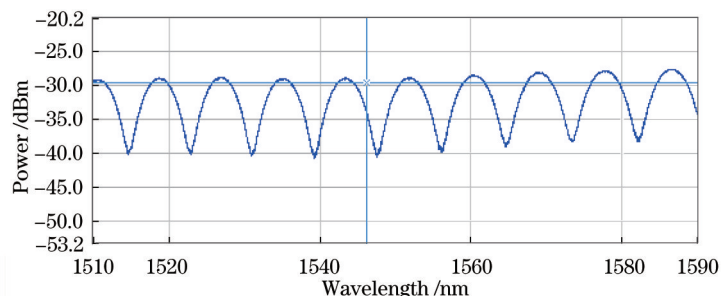


图8 传感器反射光谱

Fig.8 Reflectance spectra of the sensor

用YS-2.5型活塞压力计对传感器从0~0.1 MPa进行均匀升压,每隔0.01 MPa标定一次,25℃时,微压传感器的初始腔长为137.11 μm,腔长总变化量为51.8 μm,并用LabView软件仿真得到传感器的腔长随压力变化曲线如图9所示,Matlab计算得到的腔长拟合方程为 $L=518.0188P+137.1081$ ,均方根误差为0.9991,传感器精度为1.05%F.S.(F.S.表示全量程范围),灵敏度为518.02 μm/MPa,与仿真结果一致。图10显示了连续4 d对压力传感器进行4次升降压的测试结果,可以看出,各次测量曲线非常接近,传感器重复性能好。

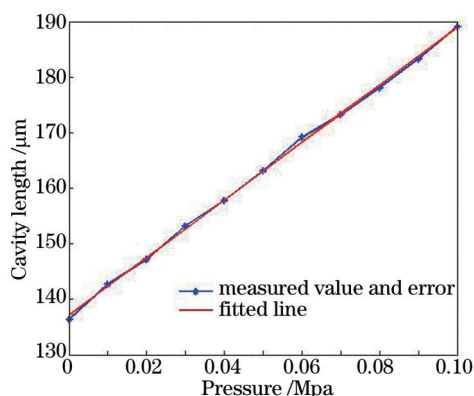


图9 传感器腔长随压力变化曲线

Fig.9 Relationship between pressure and cavity length of the sensor

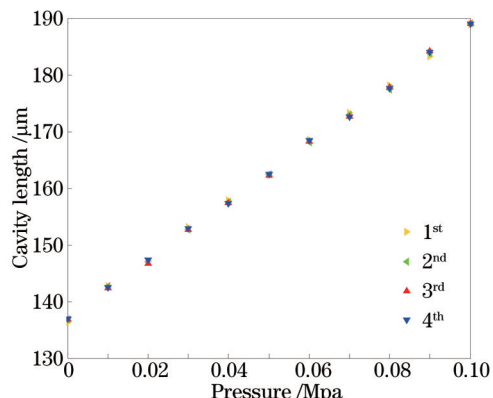


图10 传感器重复性

Fig.10 Repeatability of the sensor

迟滞性是反映传感器在正反行程过程中输出-输入曲线的不重合程度的指标。先对压力传感器从0均匀升压至0.1 MPa,再均匀降压至0,测得腔长变化如图11所示,可以看出传感器升降压曲线几乎重合,计算得到相对迟滞误差为0.4%,迟滞效应很弱。

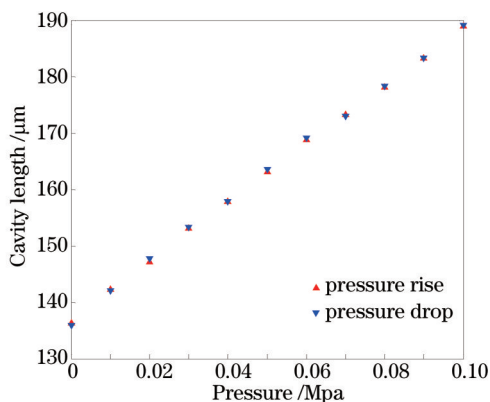


图11 传感器升压、降压过程的腔长变化曲线

Fig.11 Cavity length change during pressure rise and drop

## 4 结 论

设计并制作了膜片式光纤 F-P 压力传感器,对波纹膜片进行了力学结构的仿真以及结构参数的优化,运用商用光纤和法兰盘制作的传感器解决了光纤对准问题,提高了信号解调的精度。对传感器压力敏感特性的测试结果表明,该微压传感器具有良好的迟滞性和重复性,且灵敏度高,达到 518.02  $\mu\text{m}/\text{MPa}$ ,制作工艺简单,取材便捷,成本低廉,适宜批量生产。

## 参 考 文 献

- 1 D C Abeyinghe, S Dasgupta, J T Boyd, *et al.*. A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 993-995.
- 2 D Dwen, R Yunjiang, H Yusong, *et al.*. Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement[J]. Applied Optics, 2012, 51(8): 1033-1036.
- 3 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.*. High precision fiber Bragg grating pressure sensor[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605003.  
何少灵,郝凤欢,刘鹏飞,等.温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J].中国激光,2015,42(6):0605003.
- 4 Lou Jun, Xu Hongzhi, Huang Jie, *et al.*. Novel segmented structure optic fiber evanescent wave sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105006.  
楼俊,许宏志,黄杰,等.新型的分段结构光纤倏逝波传感器[J].中国激光,2014,41(11):1105006.
- 5 X Feng, R Dongxu, S Xiaolong, *et al.*. High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 133-135.
- 6 Yu Qingxu, Jia Chunyan. Diaphragm micro-F-P optical fiber pressuresensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 2887-2892.  
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.
- 7 Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.  
田石柱,张国庆,王大鹏.表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J].中国激光,2014,41(8):0805005.
- 8 Zhu Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, *et al.*. Fiber Fabry-Perot micro-pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.  
朱佳利,王鸣,蔡东艳,等.光纤法布里-珀罗微压传感器[J].光学学报,2014,34(4):0428002.
- 9 Yang Chundi, Wang Ming, Ge Yixian, *et al.*. A miniature extrinsic fiber Fabry-Perot pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1358-1361.  
杨春弟,王鸣,葛益娴,等.微型非本征光纤法布里-珀罗压力传感器[J].光学学报,2010,30(5):1358-1361.
- 10 Ge Yixian, Wang Ming, Yan Haitao. Optical MEMS pressure sensor based on a mesa-diaphragm structure[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21746-21752.
- 11 Gregory T A Kovacs. Micromachined Transducers Sourcebook[M]. Zhang Wendong, Transl. Beijing: Science Press, 2003: 181-190.  
格雷戈里.微传感器与微执行器全书[M].张文栋,译.北京:科学出版社,2003:181-190.
- 12 Luo Xiaodong. Long Distance Optical Fiber Sensing System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 47-52.  
罗小东.长距离光纤传感系统[D].成都:电子科技大学,2008:47-52.

栏目编辑:王晓琰