

面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器

张伟航, 江俊峰*, 王 双, 刘 琨, 张学智, 丁振扬, 刘铁根

天津大学精密仪器与光电子工程学院光纤传感研究所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 研究了面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器, 通过建立有限元数值模型对传感器满量程腔长变化量进行分析。数值仿真显示, 有限元模型的满量程腔长变化量处于固支模型和简支模型之间, 且随着法布里-珀罗腔半径的减小和硅膜片厚度的增加而偏离固支模型。引入固支边界条件偏离度 β 对偏离程度进行量化分析。制作了三种不同规格的传感器进行压力实验研究。实验结果显示, 实际测量得到的传感器芯片满量程腔长变化量与有限元数值计算的结果基本吻合, 使用该有限元模型设计传感器芯片可将满量程腔长变化量误差降低到 13.4% 以下。传感器最大量程达到 105 MPa, 满量程测量精度均优于 0.100%。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 高压传感器; 有限元仿真; 法布里-珀罗腔; 海洋应用

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0206001

Fiber-Optic Fabry-Perot High-Pressure Sensor for Marine Applications

Zhang Weihang, Jiang Junfeng, Wang Shuang, Liu Kun,
Zhang Xuezhi, Ding Zhenyang, Liu Tiegeng

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of the Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract We investigated a fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications, and established a finite element method (FEM) numerical model to analyze the full scale cavity length variation of the sensor. The numerical simulation results showed that the full scale cavity length variation in the FEM model was between the value of the clamped model and that of the simply supported model. With the decrease of the cavity radius and the increase of the silicon diaphragm thickness, the length variation of the FEM model deviated from that of the clamped model. We introduced clamped boundary condition deviation degree β to quantify the deviation degree. We produced three types of sensors and carried out pressure experiments. The experimental results showed that the full scale cavity length variations of sensor chip obtained by measurement and the FEM numerical calculation were generally coincident. The error of the full range cavity length variation was reduced to less than 13.4% when we designed the sensor chips with the FEM model. The maximum measurement range of the sensor was up to 105 MPa, and the measurement accuracy in the full scale was within 0.100%.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; high-pressure sensor; finite element method simulation; Fabry-Perot cavity; marine applications

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 120.5475

收稿日期: 2016-07-21; **收到修改稿日期:** 2016-09-19

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(61227011, 61378043, 61475114, 61505139)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200, 16JCQNJC02000)、深圳市科技创新委员会项目(JCYJ20120831153904083)、海洋经济创新发展区域示范项目(CXSF2014-38)、中国空间技术研究院 CAST 创新基金

作者简介: 张伟航(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤法布里-珀罗压力传感器方面的研究。

E-mail: 619665639@qq.com

导师简介: 刘铁根(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: jiangfjxu@tju.edu.cn

1 引 言

海洋温盐深测量技术是海洋科学研究和深海资源开发不可缺少的基础,海洋深度作为海洋温盐深测量的重要组成部分^[1],是通过测量海水压力而获得的,其测量性能直接决定了海洋要素观测层次的定位精度。目前海洋压力传感测量主要采用电子式压力传感器,如硅压阻压力传感器^[2]和石英谐振压力传感器^[3]等。但电子式压力传感器在恶劣复杂的海洋环境中易受信号串扰,线缆进水也会导致短路等故障,从而影响海洋压力监测的可靠性。

光纤压力传感器中信号的传感与传输均以光为载体,具有灵敏度高、电绝缘、耐腐蚀、不受电磁干扰、体积小、耐久性强的优点^[4]。目前实现高压测量的光纤压力传感技术主要包括光纤光栅压力传感器和光纤法布里-珀罗压力传感器两类。由于光栅本身压力灵敏度较小,光纤光栅传感器用于压力传感时通常需设计复杂的增敏压力转换结构。Wei 等^[5]采用碳纤维层压复合材料对裸栅进行增敏,传感器压力测量范围达到 70 MPa; Schroeder 等^[6]采用边孔光纤光栅对传感器进行增敏,实现了 82 MPa 的最大压力测量量程。但是受光纤光栅抗拉极限的制约,设计光纤光栅压力传感器时较难兼顾量程和分辨率,从而限制了其在海洋观测中的进一步应用。在光纤法布里-珀罗高压传感方面,Wang 等^[7]采用毛细管和光纤构成法布里-珀罗空气腔,通过毛细管侧向受压改变腔长的方法进行压力传感,最大压力测量量程达到 41.4 MPa; Ma 等^[8]通过电弧熔接的方法在光纤端面制作可感受压力的微泡式法布里-珀罗腔,最大量程达到 40 MPa; Wu 等^[9]将实芯光子晶体光纤两端与单模光纤熔接,制作了法布里-珀罗腔,使得测压范围达到 40 MPa; Liu 等^[10]将双芯光子晶体光纤与单模光纤熔接,制作了法布里-珀罗腔,可实现 45 MPa 压力的测量。上述光纤法布里-珀罗高压传感器的法布里-珀罗腔制作难度较大,难以进行大规模生产,且压力测量范围仍然较小,难以满足未来深海探测的要求。

本文提出了一种面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器,采用微机电系统(MEMS)工艺构建传感器芯片,可实现批量生产。对不同半径、厚度组合的传感器芯片进行了有限元数值计算,结合周边固支和周边简支模型分析了传感器芯片的有限元腔长变化量随尺寸参数的变化趋势。制作了三种不同规格的传感器并进行压力测试实验,验证了仿真结果的有效性。最终获得的传感器线性度好,最大量程达到 105 MPa,满量程测量精度均优于 0.100%。

2 理论分析

图 1(a)所示的光纤法布里-珀罗高压传感器由单晶硅膜片、玻璃基底、插芯、多模光纤(MMF)构成。玻璃基底上表面中心腐蚀有微腔,与单晶硅膜片经阳极键合制成传感器芯片,微腔底面和单晶硅片构成法布里-珀罗腔。当外部压力施加于单晶硅膜片导致其变形时,压力变化被转换为法布里-珀罗腔的腔长变化。法布里-珀罗腔采用成熟的 MEMS 加工工艺制作,易实现传感器芯片的批量生产。

通常膜片压力传感器主要采用周边固支的膜片模型进行分析^[11],但玻璃基底的杨氏模量(64 GPa)较小,使压力作用下的硅膜片支撑边界不再是刚性条件,导致膜片边界条件偏离周边固支模型。同时,单晶硅

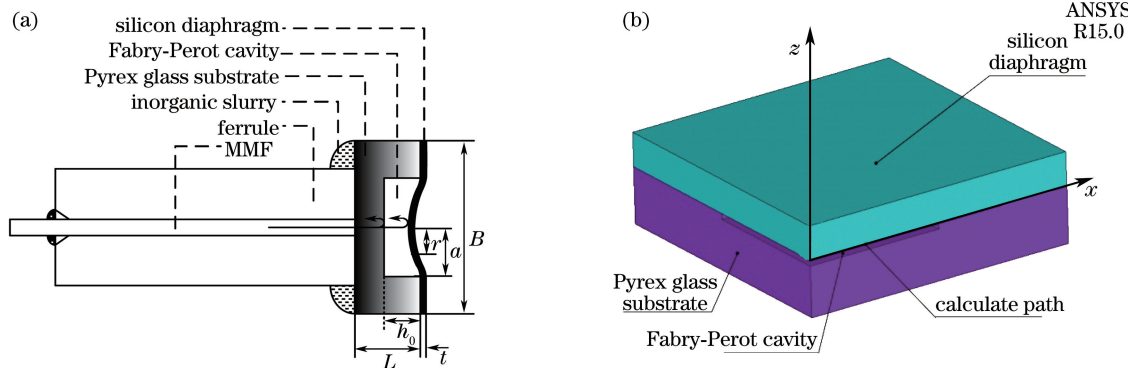


图 1 光纤法布里-珀罗高压传感器。(a)结构示意图;(b)有限元模型

Fig. 1 (a) Structure schematic and (b) finite-element model of fiber Fabry-Perot high-pressure sensor

膜片与玻璃基底间仅通过键合力单面连接而非双面夹支,使膜片边界条件接近周边简支的情况。因此,为了在传感器芯片设计时能准确地预估满量程下的腔长变化量,避免过大的设计偏差,需要对芯片偏离周边固支条件的情况进行分析。

承受均布载荷且周边固支的硅膜片挠度 y_c 可表示为

$$y_c = \frac{3(1-\nu^2)}{16Et^3}P(a^2 - r^2)^2, \quad (1)$$

式中 P 为外界压力, a 为法布里-珀罗腔半径, r 为离开中心的径向距离, t 为硅膜片厚度, E 和 ν 分别为单晶硅的杨氏模量和泊松比。

承受均布载荷且周边简支的硅膜片挠度 y_s 可表示为

$$y_s = \frac{3a^2(1-\nu^2)}{16Et^3}P(a^2 - r^2) \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} - \frac{r^2}{a^2} \right). \quad (2)$$

传感器芯片法布里-珀罗腔腔长变化量对应于硅膜片中心点挠度,因此两种边界条件下的法布里-珀罗腔腔长变化量分别为

$$\Delta L_c = \frac{3(1-\nu^2)}{16Et^3}a^4(P - P_0), \quad (3)$$

$$\Delta L_s = \frac{3(5+\nu)(1-\nu)}{16Et^3}a^4(P - P_0), \quad (4)$$

式中 ΔL_c 为周边固支条件下对应的腔长变化量, ΔL_s 为周边简支条件下对应的腔长变量, P 和 P_0 分别为当前和初始压力值。通过有限元建模的方法对多种厚度、半径、边长(B)组合的芯片的腔长变化量进行数值计算,并与解析公式计算值进行对比分析。硅膜片厚度 t 取值为 20, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 375 μm ; 法布里-珀罗腔半径 a 的取值范围为 450~1250 μm , 取值间隔为 50 μm ; 芯片边长 B 取值为 2500 μm 和 5000 μm 。剔除不满足薄板条件 $0.0125 < t/(2a) < 0.2$ 和尺寸条件 $2a < B$ 的参数组合后,共取得 105 个 $(t, a, 5000)$ 组合和 77 个 $(t, a, 2500)$ 组合。综合各组合芯片的抗压性能,将起止压力载荷设为 3 kPa 和 283 kPa。由于传感器芯片具有对称性,以硅膜片的底面中心点为坐标原点,按照相应尺寸建立芯片的 1/4 模型,如图 1(b) 所示。建模采用的单晶硅和 Pyrex 玻璃的杨氏模量分别为 130 GPa 和 64 GPa,泊松比分别为 0.278 和 0.2。为简化分析,假定键合强度足够大,键合面不发生分离,因此模型中通过硅膜片底面和玻璃基底上表面共用一面来模拟两者间的阳极键合单面连接。限制基底底面的全部自由度,在硅膜片顶面分别施加 3 kPa 和 283 kPa 压力,定义传感器芯片的有限元腔长变化量 ΔL_{ANS} 等于两压力下膜片形变量之差。对上述 182 个 (t, a, B) 参数组合进行有限元数值计算,得到相应的 ΔL_{ANS} , 如图 2 所示。

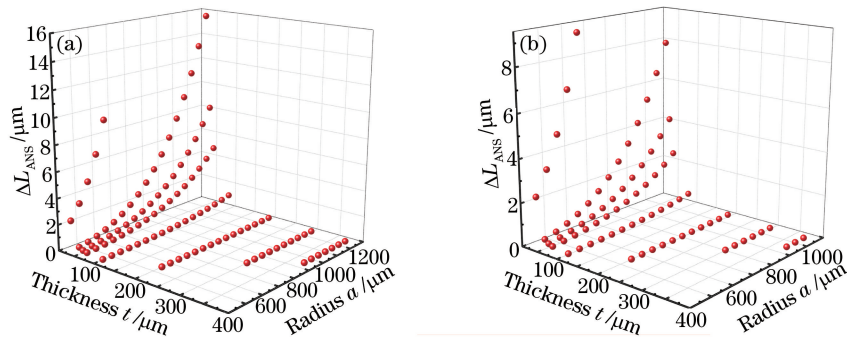


图 2 有限元腔长变化量 ΔL_{ANS} 随 (t, a, B) 参数组合的变化。(a) $B=5000 \mu\text{m}$; (b) $B=2500 \mu\text{m}$

Fig. 2 Variation in finite-element cavity length ΔL_{ANS} with (t, a, B) combination. (a) $B=5000 \mu\text{m}$; (b) $B=2500 \mu\text{m}$

为表征芯片的腔长变化量偏离固支边界公式解析值 ΔL_c 的程度,定义固支边界条件的偏离度 β 为

$$\beta = \frac{\Delta L - \Delta L_c}{\Delta L_s - \Delta L_c}. \quad (5)$$

当 ΔL 等于有限元腔长变化量 ΔL_{ANS} 时, β 为理论固支边界条件偏离度,记为 β_t ; 当 ΔL 等于实际测量结果 ΔL_m 时, β 为实测固支边界条件偏离度,记为 β_m 。

将各 (t, a, B) 参数组合及相应的 ΔL_{ANS} 代入(5)式计算得到各组合对应的 β_i 值,并绘制不同厚度硅膜片的 β_i - a 曲线,如图3所示,图中曲线自下而上分别对应厚度为20~375 μm 的硅膜片。可以看出,只有(375, 950, 2500)和(375, 1000, 2500)两个组合的 β_i 值大于1,这是由于这两个条件下的孔壁过薄。其他180个 (t, a, B) 组合的 β_i 值均小于1,即满足 $\Delta L_c < \Delta L_{ANS} < \Delta L_s$ 。同时由图3可以看出, β_i 随着 a 的减小和 t 的增大而单调递增,即 ΔL_{ANS} 逐渐远离 ΔL_c 而靠近 ΔL_s 。这是因为随着半径 a 的不断减小,硅片周边的键合部分增加,远离周边固支条件,从而使 ΔL_{ANS} 不断远离 ΔL_c 。当厚度 t 不断增大时,厚硅膜片越来越容易通过键合面带动玻璃基底变形,使边界条件接近简支,从而使 ΔL_{ANS} 不断靠近 ΔL_s 。

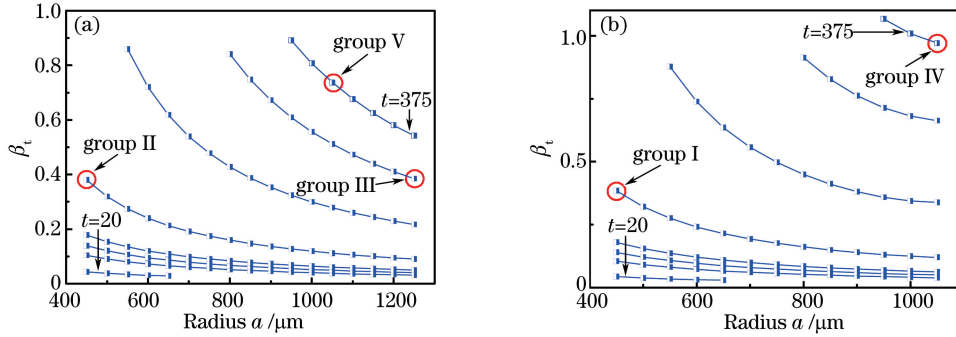


图3 不同厚度硅膜片的 β_i - a 曲线。(a) $B=5000 \mu\text{m}$; (b) $B=2500 \mu\text{m}$

Fig. 3 β_i - a curves for silicon diaphragms with different thicknesses. (a) $B=5000 \mu\text{m}$; (b) $B=2500 \mu\text{m}$

对低压进行传感测量时,设计传感器芯片时通常选用大法布里-珀罗腔半径、薄硅膜片,对应于图3中靠近右下角的 (t, a) 参数组合,其 β_i 值较小。例如(50, 1250, 5000)组合的硅膜片 β_i 仅为0.041, ΔL_{ANS} 与 ΔL_c 非常接近,可以直接采用周边固支解析公式计算。对高压进行测量时,需要减小法布里-珀罗腔半径并增大硅膜片厚度,对应于图3中靠近左上角的 (t, a) 参数组合,其 β_i 值较大,因此 ΔL_{ANS} 与 ΔL_c 的差值变大。例如(375, 1050, 2500)参数组合的偏离度 β_i 值为0.971,其 ΔL_{ANS} 已非常接近 ΔL_s ,此时采用周边简支解析公式更为合适。

为了进一步分析高压条件对传感器芯片的影响,在图3中选择5种高压仿真组合,其参数如表1所示。

表1 传感器芯片参数组合

Table 1 Parameters of sensor chips in different groups

Group	$t / \mu\text{m}$	$a / \mu\text{m}$	$B / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$
I	100	450	2500	500
II	100	450	5000	500
III	300	1250	5000	500
IV	375	1050	2500	500
V	375	1050	5000	500

对上述5种规格的芯片进行有限元仿真,压力范围为5~105 MPa,压力步进间隔为10 MPa。绘制各组芯片在各压力点下的 ΔL_{ANS} - P 曲线与 β_i - P 曲线,如图4所示。由图4(a)可见,在整个压力范围内芯片的 ΔL_{ANS} 呈现良好的线性变化;由图4(b)可见,传感器芯片模型的 β_i 值不随外界压力载荷发生变化,说明 β_i 值

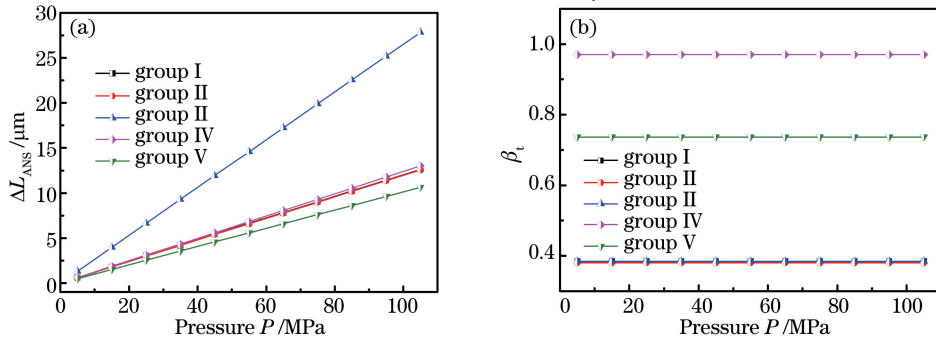


图4 5组传感器芯片的仿真结果。(a) ΔL_{ANS} - P 曲线;(b) β_i - P 曲线

Fig. 4 Simulation results of five groups of sensor chips. (a) ΔL_{ANS} - P curve; (b) β_i - P curve

仅由芯片结构参数决定,与外界压力载荷无关。

在 105 MPa 下的固支模型、简支模型和有限元模型沿 x 轴的挠度曲线如图 5 所示。可以看出各芯片的 ΔL_{ANS} 介于 ΔL_c 和 ΔL_s 之间,且由于 β_i 值不断增大,有限元模型给出的挠度曲线不断向简支模型挠度曲线靠近。图 5(c)中插图显示硅膜片在受玻璃基底支撑的部分($|r| \geq \pm a$)挠度并非为 0,说明基底支撑并非完全刚性。

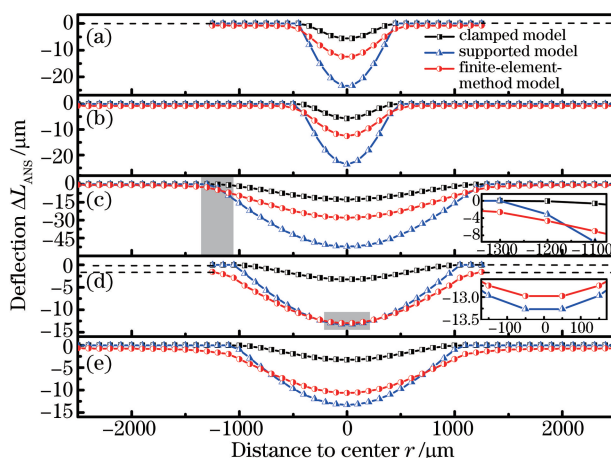


图 5 105 MPa 下各参数组合的挠度曲线。(a)组合 I ;(b)组合 II ;(c)组合 III ;(d)组合 IV ;(e)组合 V

Fig. 5 Deflection curves for different groups at 105 MPa. (a) Group I ; (b) group II ; (c) group III ; (d) group IV ; (e) group V

3 实验与结果分析

3.1 传感器制作及实验系统搭建

传感器芯片的制作流程包括镀膜、光刻、腐蚀、阳极键合等工艺,如图 6 所示。其中阳极键合通过静电力将硅膜片与玻璃基底牢固地黏结在一起,制作的传感器芯片阵列如图 7(a)、(b)所示。

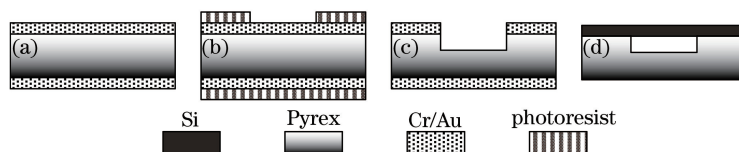


图 6 传感器芯片制作工艺流程图。(a)镀 Cr/Au 膜;(b)光刻;(c)腐蚀;(d)阳极键合

Fig. 6 Process flow of sensor chip fabrication. (a) Plating Cr/Au film; (b) photo etching; (c) wet etching; (d) anodic bonding

将制作完成的芯片熔焊固定在玻璃插芯上,然后从玻璃插芯后端插入多模光纤并固定,完成光纤法布里-珀罗高压传感器芯体的制作,制作完成的传感器芯体如图 7(c)所示。使用不锈钢 316L 材料制作传感器外壳,其前端制作 M20 标准螺纹接口,从后端放置光纤法布里-珀罗高压传感器芯体并通过环氧树脂结构胶固定,封装好的传感器如图 7(d)所示。

按参数组合 I、III、V 制作了三种传感器芯片并制作了三种规格传感器,其设计参数与实测的法布里-珀罗腔半径 a' 如表 2 所示。

表 2 三种规格传感器芯片参数

Table 2 Parameters of three types of sensor chips

Sensor No.	$t / \mu\text{m}$	$a / \mu\text{m}$	$a' / \mu\text{m}$	$B / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$
1	100	450	463.68	2500	500
2	300	1250	1263.39	5000	500
3	375	1050	1048.85	5000	500

搭建的压力实验系统如图 8 所示。白光发光二极管(LED)光源发出的低相干光束经过 3 dB 耦合器入射光纤法布里-珀罗高压传感器。入射光经传感器芯片法布里-珀罗腔反射后返回耦合器并发生低相干干涉,且干涉光携带的光程差信息受到压力测量系统施加的压力载荷调制。返回耦合器中的光进入空间扫描

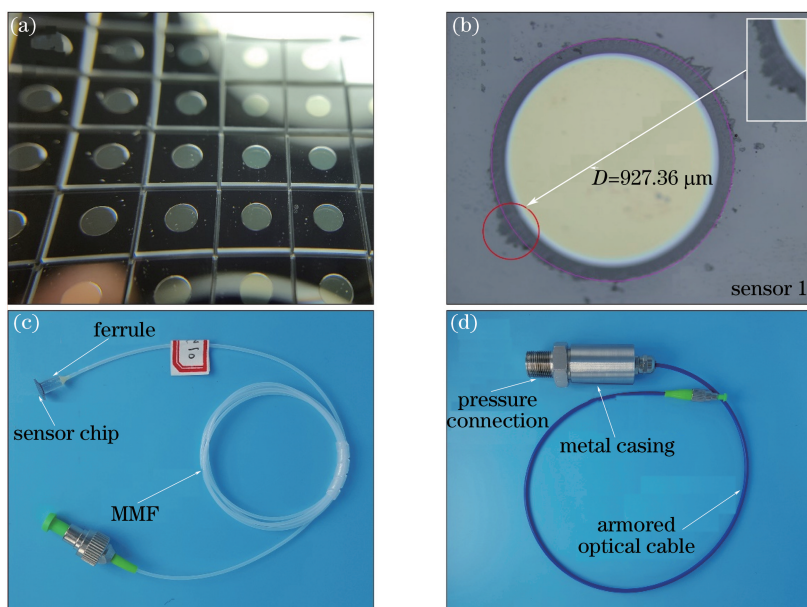


图 7 (a) 传感器芯片阵列; (b) 1 号传感器芯片显微照片; (c) 光纤法布里-珀罗高压传感器芯体;
(d) 加金属外壳后的光纤法布里-珀罗高压传感器

Fig. 7 (a) Sensor chip array; (b) micrograph of sensor chip 1; (c) fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor body;
(d) metal casing packaged fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor

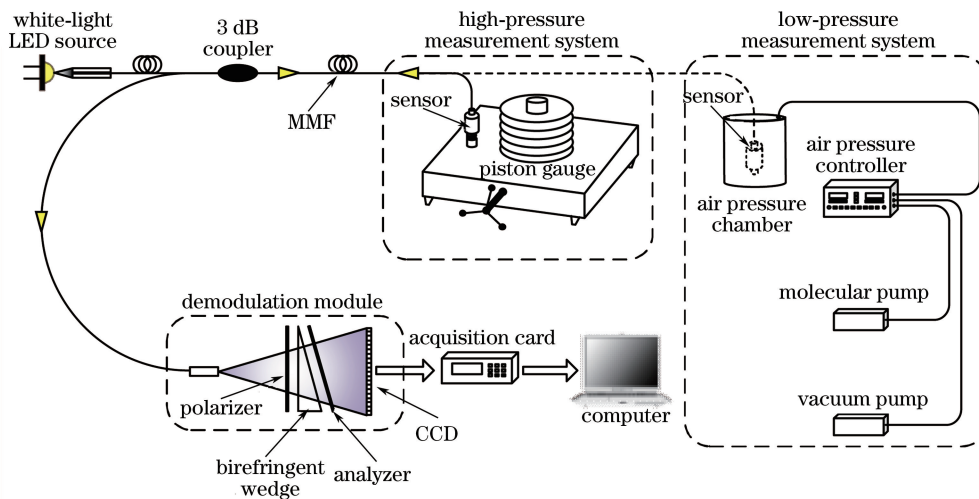


图 8 压力实验系统结构示意图

Fig. 8 Schematic of pressure experimental system

解调模块,依次经过起偏器、双折射光楔、检偏器后产生空间分布低相干干涉条纹,由线阵 CCD 接收并完成光电转换。转换的电信号通过数据采集卡输入计算机,采用单色频率绝对相位解调算法^[12]计算得到相应的绝对相位值,即可实现对待测压力的精确测量。

采用两个压力源进行施压,其中高压压力源为活塞压力计结构,压力精度为 0.01%,压力最大载荷为 105 MPa;低压压力源为气压结构,压力精度为 0.008%,压力范围为 3~283 kPa。

3.2 传感器压力实验结果

对制作的 1~3 号传感器进行施压实验。考虑到解调模块的光程差匹配范围和芯片的耐压程度,三种规格传感器的施压范围分别为 20~85 MPa、2~40 MPa、2~105 MPa,压力步进间隔为 1 MPa。另外,对 2 号传感器施加 3~283 kPa 的压力研究其低压响应特性。

图 9(a)为 3 号传感器的受压条纹包络漂移,图中绘制了 3 号传感器从 2 MPa 到 102 MPa 的信号包络漂移曲线,压力间隔为 10 MPa。可以看出,当压力不断加大时,传感器法布里-珀罗腔腔长不断减小,低相干干

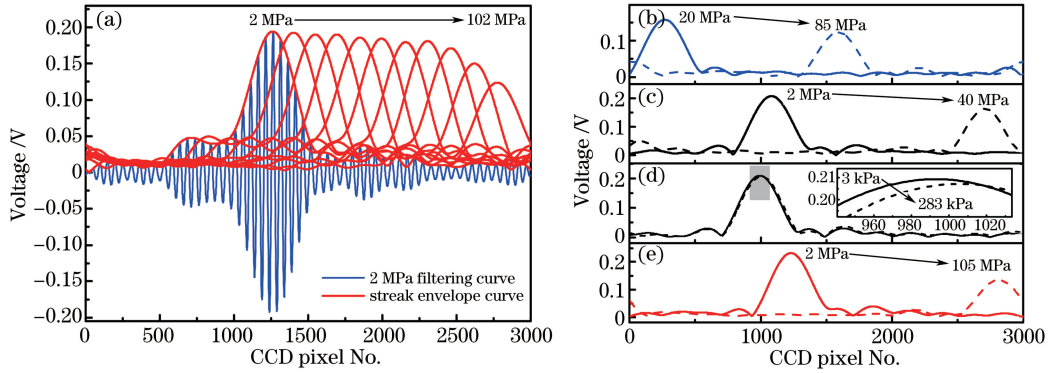


图 9 传感器滤波条纹包络随压力变化的漂移曲线。(a) 3号传感器条纹包络漂移曲线;(b) 1号传感器满量程条纹包络漂移曲线;(c) 2号传感器满量程条纹包络漂移曲线;(d) 2号传感器满量程条纹包络漂移低压响应;(e) 3号传感器满量程条纹包络漂移曲线

Fig. 9 Filtered streak envelope drift with pressure change. (a) Streak envelope drift of sensor 3; (b) full range streak envelope drift of sensor 1; (c) full range streak envelope drift of sensor 2; (d) full range streak envelope drift of sensor 2 under low pressure; (e) full range streak envelope drift of sensor 3

涉信号包络均匀向右漂移。图 9(b)~(e)为 1~3 号传感器在初始载荷和最高载荷下的包络曲线。

将实际测量得到的传感器满量程法布里-珀罗腔长变化量记为 ΔL_{MFS} 。1~3 号传感器的仿真数据与 ΔL_{MFS} 的值如表 3 所示。可以看出,实验测量结果 ΔL_{MFS} 与有限元法计算结果 ΔL_{ANS} 较为接近,表明理论分析中所建模型可以正确地分析本传感器的压力响应情况。

表 3 仿真与测量结果

Table 3 Results of simulation and measurement

Sensor No.	Pressure range /MPa	$\Delta L_{MFS}/\mu m$	$\Delta L_c/\mu m$	$\Delta L_{ANS}/\mu m$	$\Delta L_s/\mu m$
1	20-85	9.66	4.00	8.52	16.49
2	2-40	11.57	4.77	10.42	19.71
2	0.003-0.283	0.0835	0.0352	0.0769	0.1452
3	2-105	11.49	3.14	10.33	12.97

以初始压力点为基准,计算传感器在各压力点下的实测腔长变化量 ΔL_m ,并将 ΔL_m 代入(5)式计算传感器在各压力下的实测固支边界条件偏离度 β_m ,记 1~3 号传感器的理论和实测偏离度分别为 $\beta_{t1}, \beta_{t2}, \beta_{t3}$ 和 $\beta_{m1}, \beta_{m2}, \beta_{m3}$,结果如图 10 所示。可以看出, β_{m1}, β_{m2} 较为稳定,而 β_{m3} 随着压力增大而缓慢上升。同时,2 号传感器在 283 kPa 压力时 β_m 值为 0.439,表明仿真模型可正确反映传感器的低压响应。

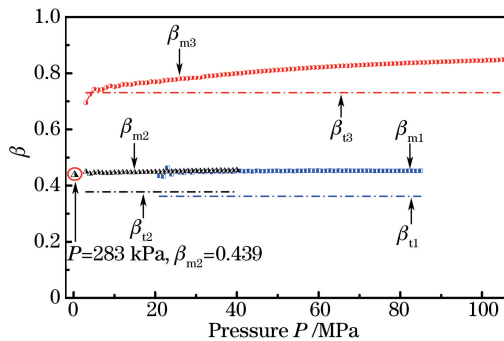


图 10 β - P 曲线

Fig. 10 β - P curves

由表 3 计算可得,1~3 号传感器 ΔL_{MFS} 与 ΔL_{ANS} 的差值分别为 1.53,1.61,1.62 μm 。造成仿真误差的原因是建模时玻璃基底底面的自由度全部被限制,即假设其受到刚性支撑,这与实际情况中基底底面受到玻璃插芯的非刚性支撑不同。同时,法布里-珀罗腔腐蚀边缘存在缺陷[图 7(b)],且阳极键合面各部分强度不均匀,这些因素均导致 ΔL_{MFS} 和 β_m 略大于数值计算结果。此外,3 号传感器的法布里-珀罗腔半径较小而硅膜

片最厚,使其更易通过键合面带动玻璃基底变形,造成 β_{m3} 值随压力的增大而略有增大。

若使用固支公式解 ΔL_c 设计 1~3 号传感器,其满量程腔长变化量误差将分别达到 141.5%、142.6%、265.9%。使用本模型数值计算解 ΔL_{ANS} 进行传感器设计时,满量程腔长变化量误差仅为 13.4%、11.0%、11.2%,与实际情况更为吻合。

3.3 传感器性能分析

解调得到的 1~3 号传感器的绝对相位-压力曲线如图 11 所示。可以看出,传感器绝对相位与压力间具有良好的单调线性关系(相关系数 $R^2 > 0.9998$),其压力灵敏度由尺寸参数决定,分别为 2.537, 5.190, 1.914 rad/MPa,传感器量程分别为 20~85 MPa, 2~40 MPa, 2~105 MPa。

1~3 号传感器的误差-压力曲线如图 12 所示,各传感器满量程测量精度均在 0.100% 以内。传感器的各项性能如表 4 所示。通过设计不同的传感器芯片尺寸参数,可以实现对不同量程压力的精确传感,以满足不同领域海洋压力精确探测的应用需要。

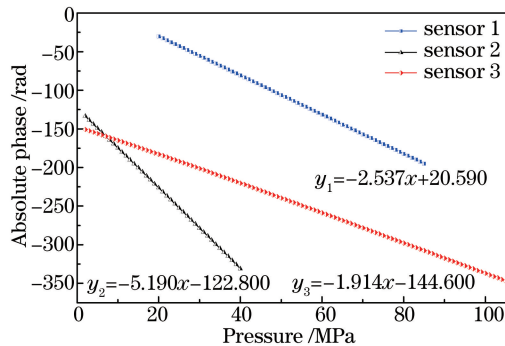


图 11 1~3 号传感器的绝对相位-压力曲线

Fig. 11 Absolute phase-pressure curves of sensors 1-3

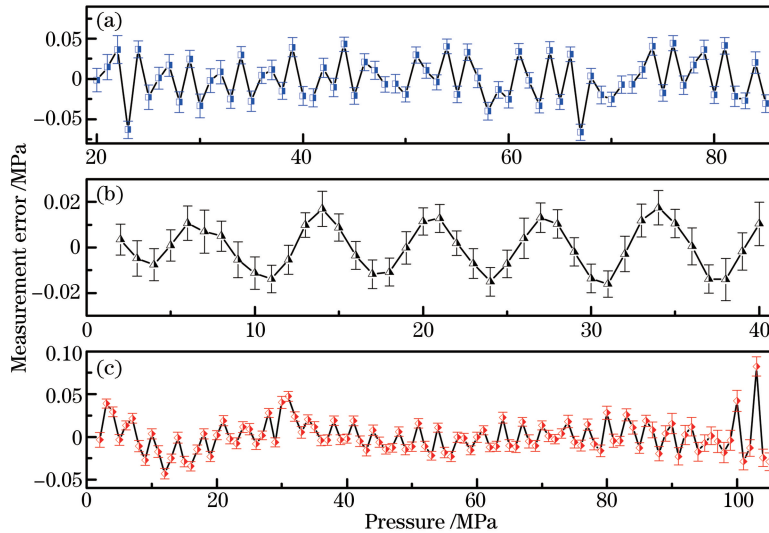


图 12 传感器的测量误差-压力曲线。(a) 1 号传感器;(b) 2 号传感器;(c) 3 号传感器

Fig. 12 Measurement error-pressure curves of sensors. (a) Sensor 1; (b) sensor 2; (c) sensor 3

表 4 1~3 号传感器性能

Table 4 Performance of sensors 1~3

Sensor No.	Range /MPa	R^2	Error /MPa	Accuracy (full scale) /%
1	20-85	0.9999	0.0664	0.100
2	2-40	0.9999	0.0174	0.046
3	2-105	0.9998	0.0823	0.079

4 结 论

针对海洋高压传感的应用需求,基于光纤法布里-珀罗传感技术及 MEMS 工艺研制了一种面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器。采用有限元数值计算方法对不同半径、厚度组合的传感器芯片进行了仿真分析,并引入固支条件偏离度 β_i 来表征有限元数值计算解偏离固支公式解的程度。仿真结果表明,传感器的有限元满量程腔长变化量处于固支模型和简支模型之间,且 β_i 随法布里-珀罗腔半径的减小和硅膜片厚度的增大而增大。为验证所建有限元模型的可靠性,制作了三种不同规格的传感器并对其进行施压实验。实验结果表明,采用本文建立的数值模型进行传感器设计时,可将满量程腔长变化量误差减小到 13.4%、11.0%、11.2%。同时,传感器工作稳定,线性度好,三种传感器的量程分别为 20~85 MPa, 2~40 MPa, 2~105 MPa, 满量程测量精度分别为 0.100%、0.046%、0.079%, 可满足不同领域海洋压力探测的需要。

参 考 文 献

- [1] Zhang Zhaoying. Discussion on CTD measurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(s4): 38-41.
张兆英. 海水电导率、温度和深度测量技术探讨[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(s4): 38-41.
- [2] Mohan A, Malshe A P, Aravamudhan S, *et al.* Piezoresistive MEMS pressure sensor and packaging for harsh oceanic environment[C]. IEEE Proceedings of 54th Electronic Components and Technology Conference, 2004: 948-950.
- [3] Cheng R J, Zhao Y L, Li C, *et al.* Design and fabrication of a resonant pressure sensor by combination of DETF quartz resonator and silicon diaphragm[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(3): 631-640.
- [4] Jiang Junfeng, Zou Shengliang, Wang Shuang, *et al.* Research on signal-to-noise ratio effect in spatial scanning optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1106003.
江俊峰, 邹盛亮, 王 双, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调中信噪比的影响研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1106003.
- [5] Wei Z X, Song D C, Zhao Q M, *et al.* High pressure sensor based on fiber Bragg grating and carbon fiber laminated composite[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(10): 1615-1619.
- [6] Schroeder R J, Yamate T, Udd E. High pressure and temperature sensing for the oil industry using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber[C]. SPIE, 1999, 3746: 42-45.
- [7] Wang A, Xiao H, Wang J, *et al.* Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 19(10): 1495-1501.
- [8] Ma J, Ju J, Jin L, *et al.* A compact fiber-tip micro-cavity sensor for high-pressure measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(21): 1561-1563.
- [9] Wu C, Fu H Y, Qureshi K K, *et al.* High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 412-414.
- [10] Liu Z Y, Tse M L V, Wu C, *et al.* Intermodal coupling of supermodes in a twin-core photonic crystal fiber and its application as a pressure sensor[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21749-21757.
- [11] Wu Zhenhai, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *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.
- [12] Jiang J F, Wang S H, Liu T G, *et al.* A polarized low-coherence interferometry demodulation algorithm by recovering the absolute phase of a selected monochromatic frequency[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 18117-18126.