

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

吴振海 刘铁根 江俊峰* 刘琨 王双 尹金德 邹盛亮 秦尊琪 吴凡

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

摘要 针对光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感器,建立了考虑热应力和残余气压的F-P腔长变化模型,进行了热应力和残余气压对传感器温度性能影响的理论分析。分析表明,热应力和残余气压的引入使F-P腔长改变量与温度的线性关系发生了变化,在外界施加100 kPa压力,当腔内残余气压小于0.87 kPa时,热应力起主要影响作用;当腔内残余气压大于0.87 kPa时,残余气压起主要影响作用。制作了三种不同残余气压的光纤F-P压力传感器,在-20 ℃~70 ℃温度范围进行了实验研究,结果显示测量的腔长及其温度灵敏度随温度变化关系与理论分析基本一致。

关键词 传感器;光纤压力传感器;热应力;残余气压

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0328005

Effect of Thermal Stress and Residual Gas Pressure on the Thermal Response of Optical Fiber Fabry-Perot Pressure Sensor

Wu Zhenhai Liu Tiegeng Jiang Junfeng Liu Kun Wang Shuang Yin Jinde
Zou Shengliang Qin Zunqi Wu Fan

College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Optical Fiber Sensing Research Institute of Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A new model for optical fiber Fabry-Perot (F-P) pressure sensor with thermal stress and residual gas pressure is presented, then their impacts on thermal response of the F-P sensor are analyzed. It shows that the linear relationship between the change of cavity length and temperature has changed when thermal stress and residual gas pressure are considered. In the condition that the applying outer pressure is 100 kPa, the thermal stress plays a major influence on the sensor when the initial residual gas pressure is less than 0.87 kPa, otherwise the residual gas pressure plays the major influence on the sensor. Three kinds of optical fiber F-P sensors with different residual gas pressures are produced, then the experimental system in the temperature range from -20 ℃ to 70 ℃ is built. The result shows that the cavity length and the thermal sensitivity varying with the temperature from the experimental data agrees well with the theoretical analysis.

Key words sensors; optical fiber pressure sensor; thermal stress; residual gas pressure

OCIS codes 280.4788; 080.2740; 260.3160; 310.6860

收稿日期: 2014-10-24; 收到修改稿日期: 2014-12-05

基金项目: 国家973计划(2010CB327802)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家自然科学基金(61227011, 61378043, 61475114, 61108070, 11004150)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市科技支撑计划(11ZCKFGX01900)、深圳市科技研发基金(JCYJ20120831153904083)

作者简介: 吴振海(1990—),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: zhenhai@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,博士,教授,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: jiangjfxu@tju.edu.cn

1 引 言

基于微机电系统(MEMS)技术的膜片式压力传感器是近年发展迅速的压力传感器。以往主要通过电容、电阻和谐振频率等方式提取载有压力信息的膜片变形量^[1-3]。2001年,Zhou等^[4]将光纤技术和MEMS技术结合,采用光学干涉的方法提取膜片变形量。此后,Wang等^[5]研制了基于MEMS技术的高灵敏度光纤压力传感器,实现了局部放电检测度;Ge等^[6]改进膜片结构,研究了具有凸台结构的膜片,减小了采用平膜片时因光纤压力传感器膜片中心变形而产生的影响;Wang等^[7]通过腐蚀带氧化层的硅晶圆片得到0.75 μm二氧化硅膜片,然后和光纤直接热键合制成微型光纤压力传感器;杨春弟等^[8]直接用多模光纤腐蚀凹腔,然后熔接到单模光纤(SMF)上,制作成全光纤式压力传感器。基于MEMS技术的膜片型光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感器既具备了MEMS制作优势,同时又具有光纤传感器抗电磁干扰、电无源、耐恶劣环境等优点,在航空航天等领域有着广泛应用前景^[9-10]。

由于除了膜片变形量提取方法外,传感器性能主要受到膜片自身形变特性的影响,因此研究人员对影响膜片形变的因素作了探索研究。Chau等^[11]研究了电容式和压阻式硅压力传感器的膜片内应力与膜片形变的关系;Eaton等^[12]分析了压阻式传感器圆形膜片内热应力对压力传感器性能的影响;Mack等^[13]分析了键合后残留在密闭腔内的气体组成及来源。在膜片型光纤F-P压力传感器研究中,膜片变形一般采用理想力学模型,由于没有考虑键合工艺导致的热应力和微腔内残余气压等因素,导致了膜片型光纤F-P压力传感器实际性能与预期存在一定差距。

本文研究了光纤F-P压力传感器膜片热应力和微腔内残余气压的影响,建立了考虑热应力和残余气压的F-P腔长变化模型,在此基础上分析了光纤F-P压力传感器温度特性。制作了残余气压分别为1、10、70 kPa的三种光纤F-P压力传感器,在-20℃~70℃温度范围进行了实验研究,结果显示测量的腔长及其温度灵敏度随温度变化关系与理论分析一致。

2 理论模型

光纤F-P压力传感器结构如图1所示,在Pyrex玻璃晶圆片上腐蚀圆形浅坑,然后与单晶硅晶圆片键合在一起,浅坑底面与硅膜片内表面形成F-P腔,当气体压力施加在F-P腔上时,硅膜片产生形变,从而导致F-P腔长的改变。F-P腔为真空时,周边固定圆形膜片上某一点的形变量 $\omega^0(r)$ 与外界施加的气体压力 P 的关系可表示为^[14]

$$\omega^0(r) = \frac{R^4}{64D} \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right)^2 P, \quad (1)$$

式中 r 为研究点距膜片中心的距离, $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$,为板的抗弯刚度, h 是膜的厚度, E 和 ν 分别是杨氏模量和泊松比, R 为浅坑半径。

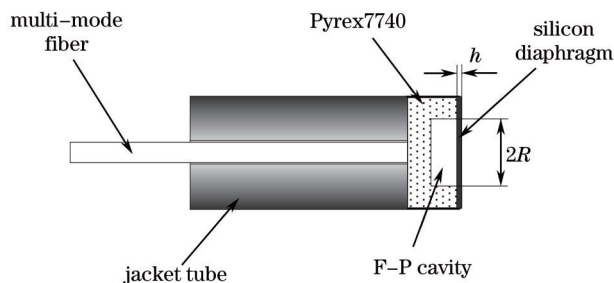


图1 光纤F-P压力传感器简图

Fig.1 Schematic diagram of the optical fiber F-P pressure sensor

膜片中心形变量即光纤F-P压力传感器腔长的改变量,可以表示为

$$w^0 = \frac{PR^4}{64D}. \quad (2)$$

当考虑膜片横向载荷导致的内应力和腔内的残余气压时,(2)式需要进行修正。

2.1 热应力对膜片形变的影响

硅片和玻璃基底需要在较高的键合温度 T_0 下进行阳极键合连接, 由于硅片和玻璃热膨胀系数不同, 当光纤 F-P 压力传感器工作温度与键合温度不同时, 键合界面相互约束会在膜片产生热应力, 膜片上的热应力 σ 可表示为^[15]

$$\sigma = \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{E_1 (1 + \nu_2) + E_2 (1 - \nu_1)}, \quad (3)$$

式中 E_1 、 ν_1 、 α_1 分别表示硅膜片的杨氏模量、泊松比和热膨胀系数, E_2 、 ν_2 、 α_2 分别表示玻璃基底的杨氏模量、泊松比和热膨胀系数。

硅的热膨胀系数 α_1 随温度的升高而增加, Pyrex7740 玻璃的热膨胀系数 α_2 随温度变化很小, 可近似成一个常值^[16], 在温度 $T=164.5$ °C 时, $\alpha_1=\alpha_2$, $\sigma=0$, 硅片无键合导致的热应力; 当 $T>164.5$ °C 时, $\alpha_1>\alpha_2$, $\sigma>0$, 硅片受到的是拉应力; 当 $T<164.5$ °C 时, $\alpha_1<\alpha_2$, $\sigma<0$, 硅片受到的是压应力。

当考虑膜片内部的热应力时, 膜片的形变量 $w^1(r)$ 修正为^[17]

$$w^1(r) = \frac{w^0(r)}{1 + \xi}, \quad (4)$$

式中 $\xi = \sigma R^2 / (14.68D)$, 代入(2)式, 则含热应力的腔长改变量 w^1 可表示为

$$w^1 = \frac{R^4}{64D - 4.36\sigma R^2} P. \quad (5)$$

2.2 残余气压对膜片形变的影响

由于 Pyrex7740 玻璃和硅片键合过程抽气不充分, 以及键合过程自身产生少量氧气、氢气等使得 F-P 腔内残余少量气体^[13]。这将在 F-P 微腔内形成残余气压 P_1 , 且其大小依赖于 F-P 腔的体积和温度, 当工作温度和外界压力改变时, F-P 腔内的残余气压也会随之相应地改变。由于膜片的变形取决于膜片两侧的压差, 因此 F-P 腔长变化将受 F-P 腔体积和温度的影响。

F-P 腔内初始残余气压可通过双光纤紧贴于 Pyrex 玻璃晶圆片底面构成双 F-P 腔结构实现测量。通过在室温下扫描外界气压, 当两根光纤测得的腔长相同时, 即硅膜片平坦无形变, 此时腔内的残余气压与外界气压相同, 并定义其为 F-P 腔的初始残余气压^[18]。

对于周边固定的圆弹性膜片, 在外界压力 P 的作用下, 膜片会产生形变, 导致 F-P 腔体积的变化, 即

$$\Delta V = \int_0^R \omega(r) \cdot 2\pi r \cdot dr. \quad (6)$$

由于 F-P 腔是密闭空间, F-P 腔体积变化前的腔内气压 P_0 、工作温度 T_0 以及腔体积 V_0 和变化后的 P_1 、 T_1 以及 V_1 满足等式 $P_0 V_0 / T_0 = P_1 V_1 / T_1$ 。联立(4)式和(6)式, 得到在外界压力 P 和工作温度 T 下, 腔内残余气压为

$$P_1 = \frac{\beta P - V_0 + \sqrt{(\beta P - V_0)^2 + 4\beta P_0 V_0 \frac{T}{T_0}}}{2\beta}, \quad (7)$$

式中 $\beta = \pi R^6 / [192D(1 + \xi)]$ 。在测得 F-P 腔内初始残余气压后, 便可通过(7)式计算得出任意外界压力和工作温度下腔内的残余气压 P_1 , 以及膜片上受到的压力差 $P - P_1$, 因此在考虑热应力和残余气压的情况下, 腔长的改变量与外界气压的关系为

$$w = \frac{R^4}{64D - 4.36\sigma R^2} P - \frac{R^4}{64D - 4.36\sigma R^2} P_1, \quad (8)$$

式中第二项由 F-P 腔内残余气压引入, 由于 P_1 与外界压力 P 和工作温度 T 呈非线性关系, 从而导致在温度 T 一定时, 腔长改变量 w 与 P 之间不再是线性关系。

为了降低 F-P 腔内的残余气压, 在键合前要加热 Pyrex 玻璃晶圆片和单晶硅晶圆片一段时间, 在充分蒸干水分后抽真空, 对于键合过程中产生的气体需要进一步采用吸气剂去除, 吸气剂可采用具有多层膜结构的纳米吸气剂^[19]或金属 Ti 膜^[20]。

2.3 传感器温度特性理论计算

图2是在外界压力 $P=100\text{ kPa}$ 下三种模型理论计算结果,计算参数为:浅坑半径 $R=900\text{ }\mu\text{m}$,硅膜片厚度 $h=25\text{ }\mu\text{m}$,F-P腔初始腔长为 $30\text{ }\mu\text{m}$,初始残余气压为 10 kPa 。其中图2(a)为腔长改变量随温度的变化曲线,图2(b)为温度灵敏度随温度的变化曲线。从图中可以看到,理想模型的腔长改变量与温度呈线性关系,并且随温度的升高而增大,主要是因为材料的热膨胀系数和杨氏模量随温度变化而引起,其温度灵敏度在 $0.2327\sim 0.2336\text{ nm}/\text{C}$ 之间随温度小幅度波动,平均值为 $0.2333\text{ nm}/\text{C}$,温度灵敏度变化量是三种模型中最小的;热应力模型中,腔长改变量随温度的升高先减小后增大,其温度灵敏度在 $-0.2617\sim 0.1816\text{ nm}/\text{C}$ 之间随温度波动,当温度 $T'=27.4\text{ C}$ 时过零点,在温度小于 T' 时为负值,温度大于 T' 时为正值,其绝对值是三种模型中最小的;综合模型考虑了热应力和残余气压,其腔长改变量随温度升高而减小,并且其值要明显低于理想模型和热应力模型,温度灵敏度在 $-2.336\sim -1.919\text{ nm}/\text{C}$ 之间随温度大幅度波动,其绝对值和波动范围在三种模型中都是最大的,说明残余气压的引入对传感器温度性能的影响非常大。

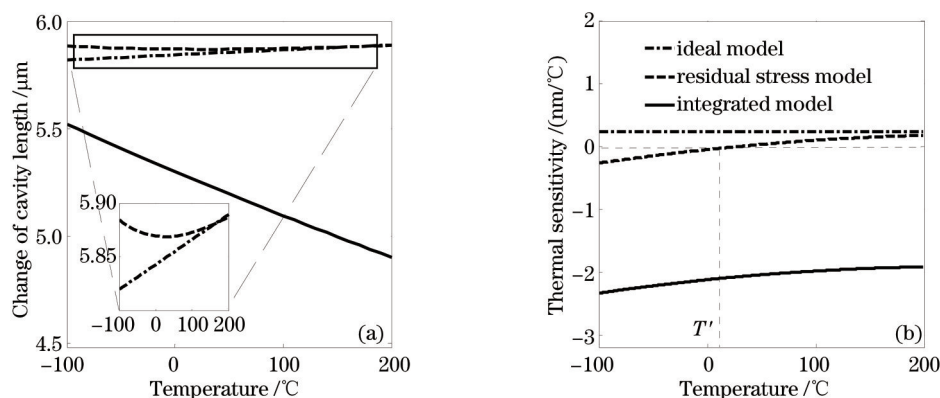


图2 理想模型、热应力模型和综合模型在不同温度下的(a)腔长改变量和(b)温度灵敏度

Fig.2 (a) Change of cavity length and (b) thermal sensitivity as a function of temperature for ideal model, thermal stress model and integrated model

通过将初始残余气压设置在 $0\sim 110\text{ kPa}$ 之间,研究分析了残余气压对传感器温度特性的影响,温度设置为 $-100\text{ C}\sim 200\text{ C}$,其他计算参数不变,计算结果如图3所示。从图中发现,在温度一定的条件下,腔长改变量和温度灵敏度随初始残余气压的增加而减小,但随温度灵敏度的绝对值增大。图3(a)中显示,当温度足够高和初始残余气压足够大的情况下,腔长的改变量为负值,此时F-P腔内的残余气压大于外界压力 P 。图3(b)局部放大图表明,若初始残余气压很小,高温下的温度灵敏度是正值,低温下的温度灵敏度是负值,与图2(b)中热应力模型曲线匹配,说明此时热应力对传感器起主要的影响作用;待初始残余气压增大,则接近图2(b)中的综合模型曲线,热应力的作用越来越小,直至残余气压起主要作用。

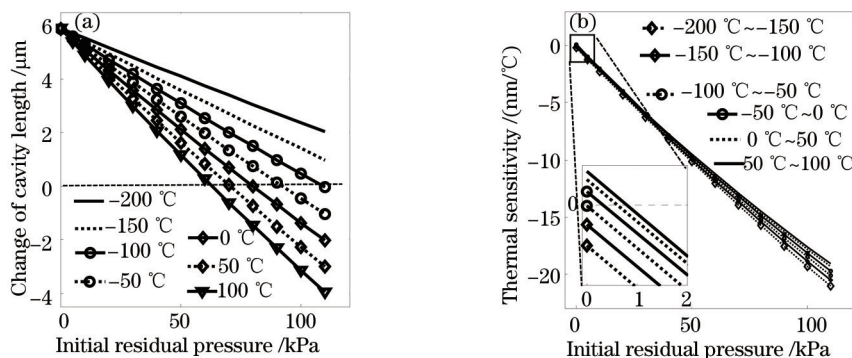


图3 (a)不同温度区间内的腔长改变量和(b)平均温度灵敏度随初始残余气压的变化趋势

Fig.3 (a) Change of cavity length and (b) mean thermal sensitivity as a function of initial residual gas pressure at different temperatures

图4(a)中的曲面是温度灵敏度等于0时初始残余气压、工作温度和外界压力三者之间的关系,曲面下方区域具有正温度灵敏度,曲面上方区域具有负温度灵敏度。图4(b)是图4(a)中外界压力为 100 kPa 时的截

取曲线,从图4(b)看到,初始残余气压小于0.87 kPa,并且温度大于27.4 °C时,会出现温度灵敏度为0时的状态,如图2(b)中热应力模型曲线,说明此时热应力对传感器起主要的影响作用,当初始残余气压大于0.87 kPa时,温度灵敏度为负,如图2(b)中的综合模型曲线,残余气压逐渐起主要影响作用,且气压越大,影响越大。

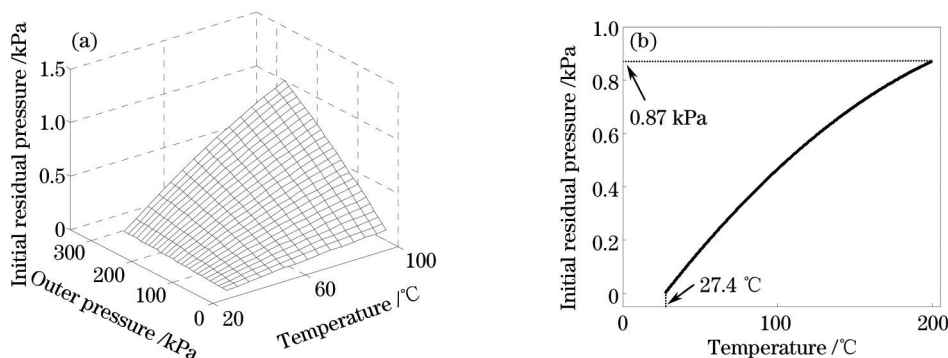


图4 (a)初始残余气压、工作温度 and 外界压力的关系;(b)初始残余气压和工作温度的关系

Fig.4 (a) Relationship among initial residual gas pressure, temperature and outer pressure; (b) Relationship between initial residual gas pressure and temperature

3 实验验证

采用图5所示的光纤F-P压力传感器实验系统进行实验^[21]。发光二极管(LED)发出的光经过3 dB耦合器后进入光纤F-P压力传感器被F-P腔调制,反射的调制信号经过耦合器、起偏器、双折射光楔和检偏器,在检偏器后形成低相干干涉条纹,被线阵CCD转成电信号,经过采集卡采集输入到计算机,采用基于单色频率的相位解调算法^[22]进行F-P腔长解调。光纤F-P压力传感器放置在气室内,压力变化范围为25~275 kPa,压力控制精度为0.02 kPa;气室被置于温箱中,实验中温箱控温范围-20 °C~70 °C,温度控制精度为0.5 °C。

制备的三种规格光纤F-P压力传感器参数如表1所示,键合温度均为310 °C。

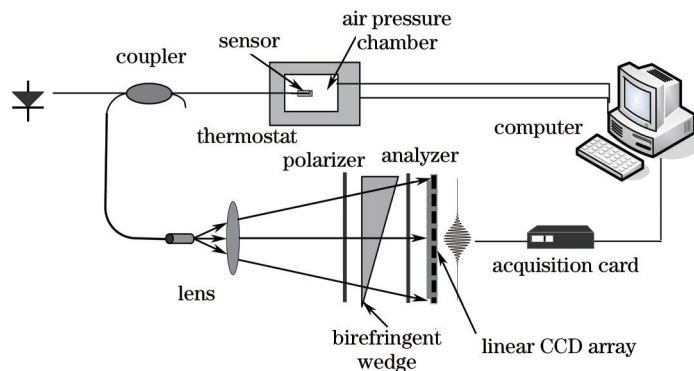


图5 光纤F-P压力传感器实验系统

Fig.5 Experimental setup of optical fiber F-P pressure sensor

表1 实验中光纤F-P压力传感器的参数

Table 1 Parameters of optical fiber F-P pressure sensors in the experiments

	Radius of hole $R/\mu\text{m}$	Diagram's thickness $h/\mu\text{m}$	Initial F-P cavity length $d/\mu\text{m}$	Initial residual gas pressure P_0/kPa
Sensor1	642.150	21	26.193	1
Sensor2	643.860	21	25.905	10
Sensor3	909.335	25	30.001	70

图6是三种传感器在外界压力100 kPa下的实验和计算结果。图6(a)显示Sensor1的腔长随温度的变化曲线,由于初始残余气压较小,其对传感器的影响也较小,但热应力影响不能忽略,所以温度响应曲线呈非线性;图6(b)显示实验测量腔长和理论计算腔长之间的差值在0.4~2.9 nm之间,其平均值为1.43 nm, Sensor1

的温度灵敏度实验测量平均值和理论计算平均值分别为 $-0.1001 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-0.0696 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,实验测量值和理论计算值差异小;图 6(c)显示了 Sensor2 的实验结果,由于初始残余气压远大于 0.87 kPa ,其对传感器起主要影响作用,热应力的影响则很小;图 6(d)显示实验测量腔长和理论计算腔长之间的差值在 $6.2\sim 14.5 \text{ nm}$ 之间,其平均值为 8.80 nm ,Sensor2 的温度灵敏度实验测量平均值和理论计算平均值分别为 $-0.9378 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-0.8429 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,实验测量值和理论计算值差异比 Sensor1 稍大;图 6(e)显示了 Sensor3 的实验结果,由于初始残余气压很大,热应力的影响可忽略,与 Sensor1 和 Sensor2 相比,同在 $-20 \text{ }^\circ\text{C}\sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,其腔长改变量范围较大;图 6(f)显示实验测量腔长和理论计算腔长之间的差值在 $7.1\sim 26.1 \text{ nm}$ 之间,平均值为 18.6 nm , Sensor3 的温度灵敏度实验测量平均值和理论计算平均值分别为 $-13.2967 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-13.4005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,实验测量值和理论计算值差异比 Sensor2 稍大,主要是因为对所建模型做了理想条件的近似引起的,并且初始残余气压越大,差别越大,但与实验结果基本一致。

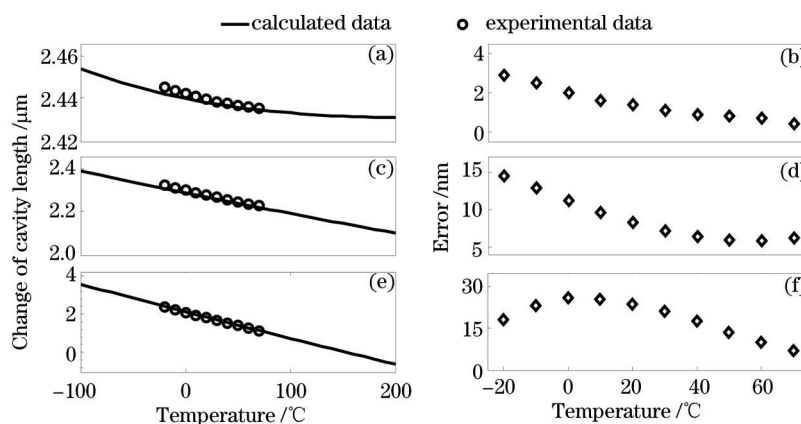


图 6 (a) Sensor1、(c) Sensor2、(e) Sensor3 的腔长改变量与温度的关系;(b) Sensor1、(d) Sensor2、(f) Sensor3 的理论计算值与实验数据的误差

Fig.6 Changes of cavity length with temperature for (a) Sensor1,(c) Sensor2 and (e) Sensor3; errors between calculated and experimental data for (b) Sensor1, (d) Sensor2 and (f) Sensor3

4 结 论

针对光纤 F-P 压力传感器,建立了考虑热应力和残余气压的 F-P 腔长变化模型,数值计算分析外界压力为 100 kPa 时的热应力和残余气压对传感器温度性能的影响。计算结果表明:理想模型中,腔长改变量与温度呈线性关系,并且随温度升高而增大,温度灵敏度为 $0.2333 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;热应力模型中,腔长改变量随温度升高先减小后增大,拐点温度为 $27.4 \text{ }^\circ\text{C}$,温度灵敏度在 $-0.2327\sim 0.2336 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 变化;综合模型中,当初始残余气压小于 0.87 kPa 时,热应力起主要作用,当初始残余气压大于 0.87 kPa 时,残余气压起主要作用,腔长改变量随温度升高而减小,但其绝对值增大,温度灵敏度的绝对值随初始残余气压的增大而增大。对初始残余气压分别为 $1、10、70 \text{ kPa}$ 的三种光纤 F-P 压力传感器进行了实验研究,在 $-20 \text{ }^\circ\text{C}\sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,测得传感器的平均温度灵敏度分别为 $-0.1001、-0.9378、-13.2967 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,实验测量值与理论计算值基本一致。该研究为深入了解传感器性能以及传感器设计打下了基础。

参 考 文 献

- 1 A Mohan, A Malshe, S Aravamudhan, *et al.*. Piezoresistive MEMS pressure sensor and packaging for harsh oceanic environment [C]. Electronic Components and Technology Conference, 2004, 1: 948-950.
- 2 N Jithendra, J Palasagaram, R Ramadoss. MEMS- capacitive pressure sensor fabricated using printed- circuit- processing techniques [J]. Sensors Journal, 2006, 6(6): 1374-1375.
- 3 H Chiang, T Chou, C Lin, *et al.*. Investigation of the hysteresis phenomenon of a silicon-based piezoresistive pressure sensor [C]. Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology, 2007. 165-168.
- 4 J Zhou, S Dasgupta, H Kobayashi, *et al.*. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications [J]. Optical

- Engineering, 2001, 40(4): 598–604.
- 5 X Wang, B Li, Z Xiao, *et al.*. An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection [J]. Journal of Micromechanics and Micro Engineering, 2005, 15(3): 521–527.
- 6 Y Ge, M Wang, H Yan. Optical MEMS pressure sensor based on a mesa-diaphragm structure [J]. Opt Express, 2008, 16(26): 21746–21752.
- 7 W Wang, N Wu, Y Tian, *et al.*. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm [J]. Opt Express, 2010, 18(9): 9006–9014.
- 8 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.
- 9 Zhao Ziwen, Wang Weiyu, Zhang Min, *et al.*. A new temperature compensation method by optimizing the structure of extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 090605.
赵子文, 王为宇, 张 敏, 等. 通过改进非本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器结构实现温度补偿的新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090605.
- 10 Zhu Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, *et al.*. A 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.
- 11 H Chau, K Wise. Scaling limits in batch-fabricated silicon pressure sensors [J]. Transactions on Electron Devices, 1987, 34(4): 850–858.
- 12 W Eaton, F Bitsie, J Smith, *et al.*. A new analytical solution for diaphragm deflection and its application to a surface-machined pressure sensor [C]. International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, 1999. 19–21.
- 13 S Mack, H Baumann, U Gösele, *et al.*. Analysis of bonding-related gas enclosure in micro machined cavities sealed by silicon wafer bonding [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(3): 1106–1111.
- 14 R Schellin, G Hess, W Kühnel, *et al.*. Measurements of the mechanical behaviour of micromachined silicon and silicon-nitride membranes for microphones, pressure sensors and gas flow meters [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1994, 41(1): 287–292.
- 15 Xu Jinqun. The Mechanics of Interface [M]. Beijing: Science Press, 2006. 187–188.
许金泉. 界面力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 187–188.
- 16 J A Dziuban. Bonding in Microsystem Technology [M]. New York: Springer, 2007. 170–179.
- 17 S Timoshenko, S Woinowsky-Krieger. Theory of Plates and Shells [M]. New York: McGraw-hill, 1959. 391–393.
- 18 J Yin, T Liu, J Jiang, *et al.*. Self-referenced residual pressure measurement method for fiber-optic pressure sensor chip[J]. Photon Technol Lett, 2014, 26(10): 957–960.
- 19 R Douglas, S Sparks, A Massoud, *et al.*. Chip-level vacuum packaging of micromachines using nanogetters [J]. Transactions on Advanced Packaging, 2003, 26(3): 277–282.
- 20 L Byeungleul, S Seonho, C Kukjin. A study on wafer level vacuum packaging for MEMS devices [J]. Journal of Micromechanics and Micro Engineering, 2003, 13(5): 663–669.
- 21 Jiang Junfeng, Wu Fan, Liu Tiegeng, *et al.*. Research on LED effect in spatial scanning optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0223002.
江俊峰, 吴 凡, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调中LED光源的影响研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0223002.
- 22 J Jiang, S Wang, T Liu, *et al.*. A polarized low-coherence interferometry demodulation algorithm by recovering the absolute phase of a selected monochromatic frequency [J]. Opt Express, 2012, 20(16): 18117–18126.

栏目编辑: 王晓琰