

引用格式: ZHANG Yutong, JIANG Yi, CUI Yang, et al. Research on the Micro Optical Fiber Fabry-Perot Ultra-low Temperature Pressure Sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0551315

张雨彤, 江毅, 崔洋, 等. 微纳光纤 Fabry-Perot 超低温压力传感器研究[J]. 光子学报, 2022, 51(5):0551315

# 微纳光纤 Fabry-Perot 超低温压力传感器研究

张雨彤<sup>1,2</sup>, 江毅<sup>1</sup>, 崔洋<sup>1</sup>, 冯新星<sup>1</sup>

(1 北京理工大学 光电学院 信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081)

(2 包头师范学院 物理科学与技术学院, 内蒙古 包头 014030)

**摘 要:**提出了一种用于超低温环境的微纳光纤非本征法布里-珀罗干涉仪压力传感器。单模光纤端面通过飞秒激光刻蚀出微孔, 与无芯光纤熔接形成密闭的法珀腔。通过将无芯光纤切割、研磨等步骤, 制作出微纳光纤压力传感器。利用飞秒激光微加工, 可以加工出不同孔径的微孔及不同厚度的膜片, 得到不同灵敏度及测量压力范围的压力传感器。实验结果表明, 提出的传感器在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 5\text{ MPa}$ 的压力范围内表现出良好的线性度, 压力升高和降低过程中腔长-压力灵敏度分别为 $110.33\text{ nm/MPa}$ 和 $110.68\text{ nm/MPa}$ 。该传感器能够满足超低温环境下的压力测量需求。

**关键词:**非本征法布里-珀罗干涉仪; 光纤传感器; 飞秒激光微加工; 超低温; 压力测量

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20225105.0551315

## 0 引言

超低温压力传感器是指在 $4\sim 110\text{ K}$ 温度范围内能稳定工作的压力传感器。如今, 液氢和液氧被广泛用于航天器的燃料, 这对超低温环境下的压力参数测量提出了需求。目前, 已有报道采用电子传感器来测量超低温环境下的压力, 如压阻式传感器<sup>[1-2]</sup>和电容式传感器<sup>[3]</sup>。但是, 电子传感器存在电磁干扰和安全隐患等问题, 使其无法应用于恶劣和危险等场合中。

由于具有本征安全、能够远距离测量、抗电磁干扰、体积小、重量轻等优点, 光纤传感器已广泛应用于各种特殊环境下的物理量的测量<sup>[4-6]</sup>。其中, 光纤非本征法布里-珀罗干涉仪 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI) 非常适合制作压力传感器, 主要分为膜片式和无膜片式两种。无膜片式的光纤压力传感器只能测量气体压力并且灵敏度受温度影响大<sup>[7-8]</sup>。对于膜片式的压力传感器, 要在超低温环境下测量压力, 传感器的整体结构及材料需要耐低温。通过在光纤尖端上制造聚合物薄膜可以获得高灵敏度的压力传感器<sup>[9-10]</sup>。但这种压力传感器只能在较窄的压力范围内工作, 而且聚合物薄膜在超低温环境下容易脱落。另一种是蓝宝石压力传感器<sup>[11]</sup>。但这种传感器制作过程复杂耗时, 信号质量相对较差。由于没有其他材料的引入, 全光纤膜片式的压力传感器具有机械强度高、温度稳定性好等特点, 研究人员对制作方法进行了探索。一种方法是对纤芯进行选择性蚀刻形成微孔<sup>[12-13]</sup>。文献<sup>[13]</sup>展示了一种膜片厚度 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ 的全二氧化硅压力传感器, 在 $0\sim 7\text{ kPa}$ 的压力范围内, 其灵敏度为 $11\text{ nm/kPa}$ , 但蚀刻时使用的氢氟酸具有极强的腐蚀性且在室温下易挥发, 如在传感器制作中处理不当会对人体产生危害, 并且该方法无法灵活的控制微孔尺寸。与化学蚀刻方法相比, 飞秒激光微加工由于具有高精度的材料加工能力, 是一种安全的制造空气腔和薄膜的方法<sup>[14-15]</sup>。文献<sup>[14]</sup>所提出的压力传感器的膜片外表面被飞秒激光减薄和粗糙化, 膜片厚度达到 $2.6\text{ }\mu\text{m}$ , 灵敏度为 $0.28\text{ nm/kPa}$ , 测量压力范围较窄, 限制在 $698.5\text{ kPa}$ 内。光纤传感器已经用于在超低温环境下的温度测量<sup>[16-17]</sup>, 证明了纯石英是耐低温的。目前, 用于超低温环境下的全光纤压力传感器少有报道。

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61775020, U20B2057)

第一作者: 张雨彤 (1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术。Email: yutong67890@126.com

导师 (通讯作者): 江毅 (1967—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术。Email: bitjy@bit.edu.cn

收稿日期: 2021-11-04; 录用日期: 2021-12-26

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

为了在超低温环境下测量压力,本文提出了一种全光纤膜片式压力传感器。为了提高压力灵敏度,光纤膜片通过飞秒激光进一步减薄。依据膜片形变与所受压力呈线性关系,通过监测腔长测量压力。搭建实验系统测试了传感器在超低温环境下的压力响应。实验结果表明,该传感器可在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 5\text{ MPa}$ 压力范围内稳定工作。

## 1 传感器制作

传感器的制作过程和显微照片如图1。首先,用剥线钳剥掉单模光纤的涂覆层,切割刀切割光纤得到平整的光纤端面,然后将光纤端面竖直向上固定在六维微动平台(M-840, Physik Instruments)。第二步,使用飞秒激光在光纤端面刻出一个微孔。飞秒激光的中心波长为 $800\text{ nm}$ 、脉冲宽度为 $35\text{ fs}$ 、重复频率为 $1\text{ kHz}$ 。激光束通过放大倍数为 $20\text{ X}$ 、数值孔径为 $0.45$ 的物镜垂直聚焦在单模光纤端面。通过控制六维微动平台可以制作出不同尺寸的微孔。根据聚焦的光斑大小,调整合适的刻线间距,使刻线间没有缝隙,对内表面慢速扫描,清理碎屑,形成平整的内表面,微孔内表面与空气折射率不同,形成反射面。第三步,将加工的含有微孔的单模光纤与无芯光纤熔接形成密闭的法珀腔。然后在距熔接点 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内切割无芯光纤。在显微镜的帮助下,用研磨纸将无芯光纤的厚度研磨到约 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。最后,通过飞秒激光刻蚀进一步减小膜片的厚度,增大刻线间距及刻线深度来粗糙化无芯光纤膜片的外表面以消除反射光。膜片内表面成为另一个反射面。两个反射面的反射光形成双光束干涉。

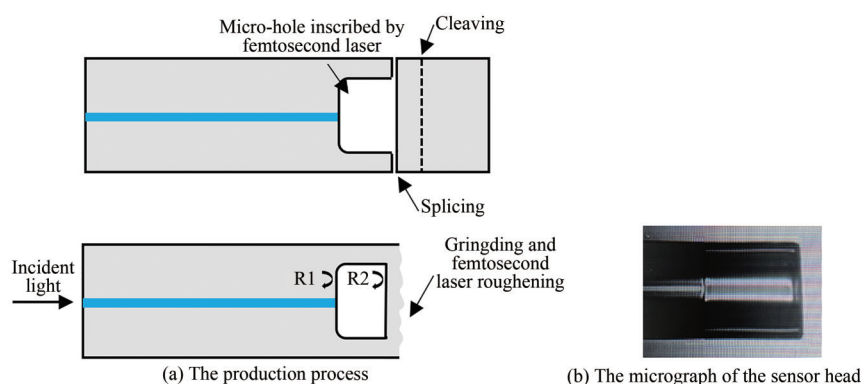


图1 传感器结构

Fig.1 The structure of the sensor

在研磨光纤膜片的过程中需要时刻监测厚度。为此,将传感器连接到自制的光纤白光干涉解调仪,膜片外表面粗糙化之前其反射率相对较高,来自膜片两个表面的反射光能够形成双光束干涉,可以使用峰值法计算膜片两表面的间距<sup>[18-19]</sup>,这样能够精确控制膜片的厚度。

经过上述步骤,制作出全光纤膜片式EFPI压力传感器。根据灵敏度和测量压力范围的要求,可以用飞秒激光加工不同孔径的微孔和不同厚度的膜片。通过解调仪得到的传感器在常温常压条件下的反射光谱如图2。

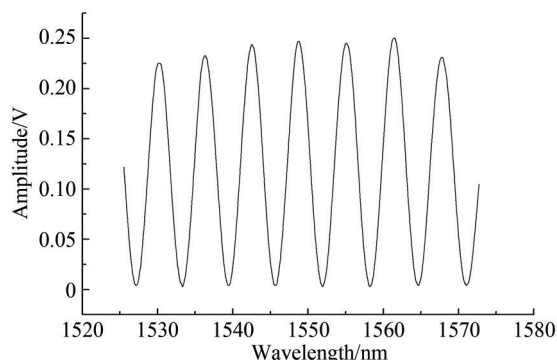


图2 传感器反射光谱

Fig.2 The reflection spectrum of the sensor

## 2 工作原理

光纤端面与空气之间的反射率非常低,小于4%。透射光中几乎看不到干涉条纹。图1(a)中的两束反射光形成双光束干涉,EFPI的干涉条纹可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (1)$$

式中, $I$ 是干涉条纹的光强, $I_1$ 和 $I_2$ 是两个光纤端面和空气界面反射光的光强, $\varphi$ 是相位,可表示为

$$\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2)$$

式(1)和式(2)表明 EFPI 的反射光谱是一个与腔长相关的余弦函数,可以通过峰峰值法进行实时解调。腔长  $L$  由膜片中心点的形变决定,可用挠度  $\omega$  表示,即

$$\omega = \frac{3P(1-\mu^2)}{16Eh^3} r^4 \quad (3)$$

式中, $E$ 是杨氏模量, $\mu$ 是材料的泊松比, $P$ 是压强, $r$ 和 $h$ 分别是膜片的半径和厚度。从式(3)可知膜片的形变与压强成正比。因此,可以通过监测腔长的变化来测量压力的变化。由式(3)推导出 EFPI 传感器的压力灵敏度为

$$S_p = \frac{d\omega}{dP} = \frac{3(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3} \quad (4)$$

降低膜片厚度、增大微孔尺寸能够使传感器的灵敏度提升,但随着膜片厚度降低,膜片能够承受的最大压力也将降低,微孔尺寸过大会使膜片的熔接强度降低。本文传感器的参数为: $r=40\ \mu\text{m}$ , $h=3.9\ \mu\text{m}$ ,保证了传感器的结构强度,经计算传感器的灵敏度为  $109.1\ \text{nm/MPa}$ 。

## 3 实验结果及讨论

超低温压力响应测试系统如图3。将传感器与一段单模光纤熔接,并插入陶瓷管中,陶瓷管通过不锈钢管连接到压力罐。带有传感器的单模光纤从气室中引出并连接到解调仪,整套系统密封良好。使用分辨率为  $0.01\ \text{MPa}$  的压力计来监测实际气体压力。在压力测量过程中,传感器的腔长由解调仪实时记录。

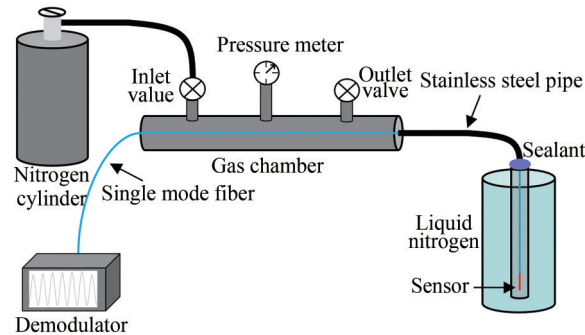


图3 压力响应测试系统  
Fig.3 The test system of pressure response

首先,测试了传感器在室温下的压力响应。氮气通过压力腔的入口阀注入。控制气压以  $0.5\ \text{MPa}$  为间隔从  $0\ \text{MPa}$  增加到  $5\ \text{MPa}$  (相对于大气压的压力)。腔长与压力的关系如图4。观察到传感器腔长在  $0\sim 5\ \text{MPa}$  的压力范围内线性变化,升压和降压的灵敏度分别为  $111.36\ \text{nm/MPa}$  和  $111.29\ \text{nm/MPa}$ ,与理论值  $109.1\ \text{nm/MPa}$  接近。

然后,测试了传感器在超低温下的压力响应。装有传感器的陶瓷管缓慢放入液氮中。在初始腔长稳定后,同样以  $0.5\ \text{MPa}$  为间隔,记录腔长。实验结果如图5,传感器在升压和降压过程中的灵敏度分别为  $110.33\ \text{nm/MPa}$  和  $110.68\ \text{nm/MPa}$ 。图4和图5中的所有拟合曲线均有高线性度 ( $R^2 > 0.999$ ) 和重复性。由于膜片的厚度及石英的杨氏模量随温度变化等因素的影响,超低温环境下的压力灵敏度略有下降。

在常压条件下,超低温环境中传感器腔长稳定在  $192.653\ \mu\text{m}$ ,而室温环境中的腔长为  $192.6475\ \mu\text{m}$ ,这

与热胀冷缩理论相悖,本文对这一现象进行了探究。在将传感器缓慢放入液氮的过程中,用解调仪以 1 Hz 的频率实时记录腔长。腔长随时间的变化如图 6。可以看出,腔长随着温度的降低先减小后增大。

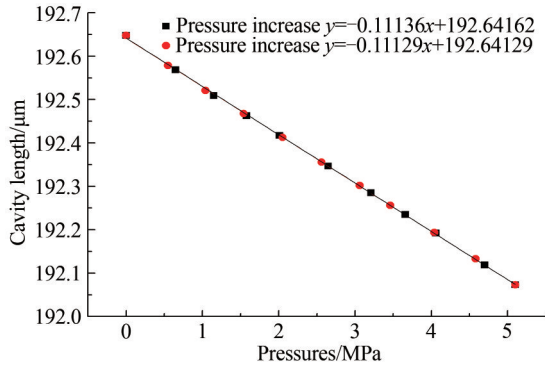


图 4 室温下传感器的压力响应  
Fig.4 Pressure response of the sensor at room temperature

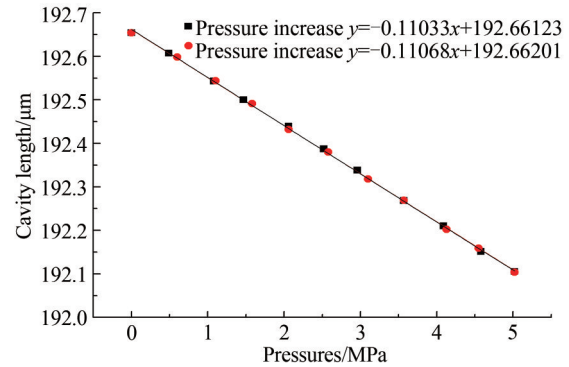


图 5 传感器在 -196°C 时的压力响应  
Fig.5 Pressure response of the sensor at -196°C

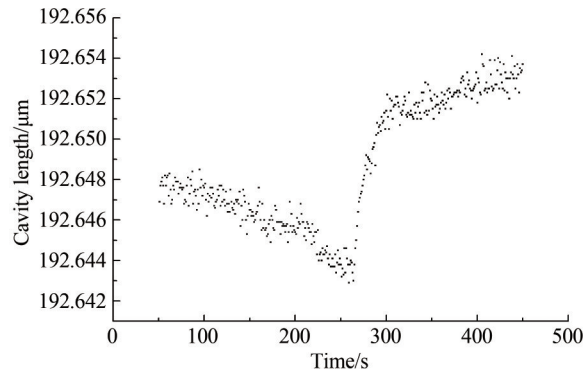


图 6 腔长从室温到 -196°C 的变化  
Fig.6 The change of the cavity length from room temperature to -196°C

根据文献[20],熔融石英的线性热膨胀系数(Linear Thermal Expansion Coefficient, LTEC)与温度的关系可以表示为

$$\alpha/10^{-6}K^{-1} = a(b/T)^c \exp(b/T)/(\exp(b/T) + 1)^2 + d(e/T)^2 \exp(e/T)/(\exp(e/T) - 1)^2 \quad (5)$$

式中,  $a = -4.22 \pm 0.07$ ,  $b = 35.5 \pm 0.8$ ,  $c = 0.335 \pm 0.015$ ,  $d = 1.253 \pm 0.022$ ,  $e = 535 \pm 9$ 。室温为 20 °C,超低温为 -196 °C,分别对应绝对温度 293.15 K 和 77.15 K。根据式(5)能够计算 60 K (-213.15 °C)~300 K (26.85 °C)之间的 LTEC(20 K 间隔),如表 1 所示。

表 1 各温度对应的 LTEC  
Table 1 LTEC corresponding to each temperature

T/K	LTEC/( $\times 10^{-6}$ )	T/K	LTEC/( $\times 10^{-6}$ )	T/K	LTEC/( $\times 10^{-6}$ )
60	-0.799	160	-0.097	260	0.352
80	-0.695	180	0.023	280	0.406
100	-0.551	200	0.127	300	0.453
120	-0.391	220	0.214		
140	-0.236	240	0.289		

通过多项式拟合, LTEC 在 60 K (-213.15 °C)~300 K (26.85 °C) 范围内温度的关系可以表示为

$$\alpha/10^{-6}K^{-1} = -4 \times 10^{-8}T^3 + 8 \times 10^{-6}T^2 + 6.9 \times 10^{-3}T - 1.256 \quad (6)$$

根据 LTEC 的定义,应变可以表示为

$$\epsilon/10^{-6} = \int \alpha/10^{-6} K^{-1} dT = -10^{-8} T^4 + (8/3) \times 10^{-6} T^3 + 3.45 \times 10^{-3} T^2 - 1.256 T + C \quad (7)$$

式中,  $C$  是常数。以 290 K (16.85 °C) 时的应变为参考, 可以计算出其他温度下的相对应变。熔融石英在 290 K (16.85 °C) 到 70 K (-203.15 °C) 的相对应变如图 7。

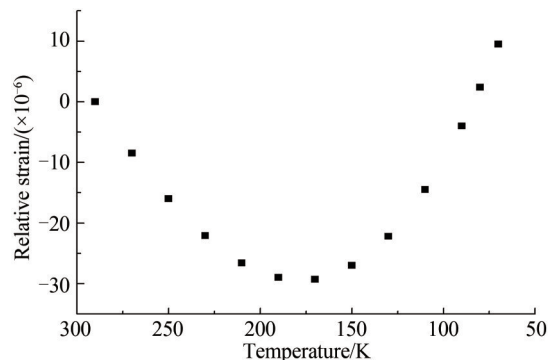


图 7 熔融石英的相对应变  
Fig.7 The relative strain of fused silica

从图 7 看出, 理论计算得到的应变趋势同样为先降低后升高, 并且在超低温时, 应变为正值, 这也证明了测得的腔长是正确的。

如图 6 所示, 传感器具有温度敏感性。以室温下的腔长为参考, 从室温至 -196 °C, 腔长变化在 5.5 nm 范围内。根据室温升压灵敏度 111.36 nm/MPa, 5.5 nm 腔长变化引起的压强变化约为 0.05 MPa, 不做温度补偿带来的误差为

$$E_{\text{error}} = \frac{0.05 \text{ MPa}}{5 \text{ MPa}} \times 100\% = 1\% \quad (8)$$

由此可知, 低温环境引起的测量误差较小。

当传感器腔长稳定时, 压力测试系统的分辨率主要受解调仪腔长测量分辨率的限制。在室温和大气压环境下, 用自制的光纤白光干涉解调仪连续测量传感器的腔长。如图 8 所示, 腔长的测量分辨率约为 1.0 nm。

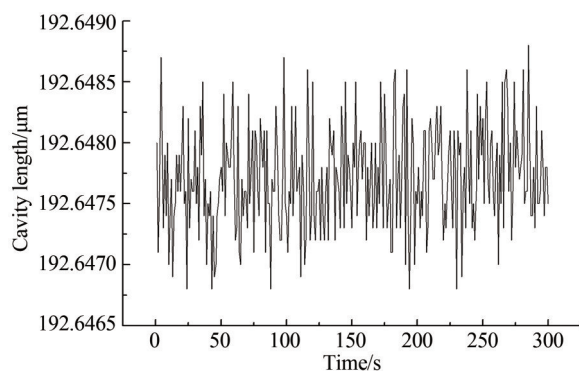


图 8 常温常压下的腔长  
Fig.8 The cavity length at room temperature and atmospheric pressure

压力测量系统的分辨率是腔长测量分辨率与传感器压力灵敏度的比值。根据液氮中传感器的升压过程中的灵敏度, 超低温压力测量系统的压力分辨率为

$$R = \frac{1.0 \text{ nm}}{110.33 \text{ nm/MPa}} \approx 9.06 \text{ kPa} \quad (9)$$

## 4 结论

本文提出了一种微纳光纤EFPI超低温压力传感器。传感头由密封的微纳空气腔和光纤膜片组成。实验结果表明,该传感器能够在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温环境中测量压力,升压和降压过程中的灵敏度几乎相同,具有良好的稳定性和重复性。腔长从室温到超低温的变化趋势与理论分析一致。所提出的传感器具有体积小、结构坚固、测量范围大、受环境温度交叉影响小等特点,能够解决在超低温环境中压力在线实时测量的技术难题。

### 参考文献

- [1] JI Changhong, ZHANG Binzhen, ZHANG Jian, et al. Design of ultra low temperature pressure and temperature sensor structure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 80-81:693-697.
- [2] KUNIMATSU M, MIZUIDE T, YAMANE K. Measurement of dynamic pressure using piezoelectric sensors at extremely low temperatures[J]. JSAE Review, 2001, 22(4):553-558.
- [3] HIEDA M, KATO T, HIRANO D, et al. Low temperature performance of miniature capacitive pressure sensor with submicron gap[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2005, 138(3-4):917-921.
- [4] ZHANG Shuo, JIANG Yi. Optical fiber high-temperature pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(1): 10-13.  
张硕, 江毅. 一种光纤高温压力传感[J]. 仪表技术与传感器, 2018(1):10-13.
- [5] WANG Yuansheng, WEN Zhixun, AI Changsheng, et al. Research on full strain measurement performance of non-intrinsic optical fiber F-P sensor[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3):137-143.  
王元生, 温志勋, 艾长胜, 等. 一种新型结构非本征F-P传感器全应变测量性能研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 137-143.
- [6] LIAO Changrui, HE Jun, WANG Yiping. Study on high temperature sensors based on fiber bragg gratings fabricated by femtosecond laser[J]. Acta Optical Sinica, 2018, 38(3):130-138.  
廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3):130-138.
- [7] XU Ben, WANG Chao, WANG D N, et al. Fiber-tip gas pressure sensor based on dual capillaries[J]. Optics Express, 2015, 23(18):23484-23492.
- [8] CUI Yang, JIANG Yi, LIU Tianmu, et al. A dual-cavity Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. IEEE Access, 2020, 8:80582-80587.
- [9] ZHANG Shubin, LEI Qi, HU Jiabin, et al. An optical fiber pressure sensor with ultrathin epoxy film and high sensitivity characteristics based on blowing bubble method[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(1):6800510.
- [10] CIBULA E, DONLAGIC D. Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm[J]. Applied Optics, 2005, 44(14):2736-2744.
- [11] SHAO Zhiqiang, WU Yalin, WANG Shuang, et al. All-sapphire-based fiber-optic pressure sensor for high-temperature applications based on wet etching[J]. Optics Express, 2021, 29(3):4139-4146.
- [12] DONLAGIC D, CIBULA E. All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO<sub>2</sub> diaphragm[J]. Optics Letters, 2005, 30(16):2071-2073.
- [13] WANG Wenhui, WU Nan, TIAN Ye, et al. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. Optics Express, 2010, 18(9):9006-9014.
- [14] ZHANG Yinan, YUAN Lei, LAN Xinwei, et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(22):4609-4612.
- [15] KAWATA S, SUN H B, TANAKA T, et al. Finer features for functional microdevices[J]. Nature, 2001, 412(6848): 697-698.
- [16] CAI Guoli, JIAN Wei. Experiment on FBG temperature sensor in cryogenic environment [J]. Study on Optical Communications, 2006, (6):59-60.  
蔡国利, 简伟. 光纤光栅在液氮温区温度传感性能的研究[J]. 光通信研究, 2006, (6):59-60.
- [17] ZAYNETDINOV M, SEE E M, GEIST B, et al. A fiber bragg grating temperature sensor for 2 - 400 K[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3):1908-1912.
- [18] JIANG Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2):75-77.
- [19] JIANG Y. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method[J]. Applied Optics, 2008, 47(7):925-932.
- [20] OKAJI M, YAMADA N, NARA K, et al. Laser interferometric dilatometer at low temperatures: application to fused silica SRM 739[J]. Cryogenics, 1995, 35(12):887-891.

## Research on the Micro Optical Fiber Fabry-Perot Ultra-low Temperature Pressure Sensor

ZHANG Yutong<sup>1,2</sup>, JIANG Yi<sup>1</sup>, CUI Yang<sup>1</sup>, FENG Xinxing<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 School of Physical Science and Technology, Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

**Abstract:** Ultra-low temperature pressure sensors refer to the pressure sensor that can work normally in the temperature range of 4~110 K. Nowadays, liquid hydrogen and liquid oxygen are widely used as fuels in space vehicles, which puts forward requirements of pressure parameter measurement in ultra-low temperature environment. At present, electronical sensors have been reported to measure pressure in ultra-low temperature environment. However, electrical sensors contain electromagnetic interference and potential safety hazards, making them unable to work in a harsh environment. Due to advantages of intrinsic safety, high sensitivity, immunity to electromagnetic interference, small volume, light weight, fiber optic sensors have been widely used in various fields of physical quantity measurement. The structure of the extrinsic Fabry-Perot interferometer is naturally suitable for pressure measurement. Optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer pressure sensors are mainly divided into two types: diaphragm-based type and diaphragm-free type. Diaphragm-free fiber pressure sensors can be only used to measure gas pressure and the sensitivity is greatly affected by temperature. For the diaphragm-based type, to measure pressure in ultra-low temperature environment, a pressure sensor must have a robust structure at ultra-low temperature and the material of the diaphragm needs to be resistant to ultra-low temperature. Since no other materials are introduced, the all-silica diaphragm-based pressure sensor has advantages of high mechanical strength and small size. One method is selective etching of the fiber core to form a micro-hole. Compared with chemical etching method, fs laser micromachining is a safe method to fabricate the air cavity and the thin diaphragm due to high precision material processing capability. Optical fiber sensors have been used for temperature measurement at ultra-low temperature, which proves that pure quartz is resistant to ultra-low temperature. In this paper, for the measurement of pressure at ultra-low temperature, a micro optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer sensor is proposed and experimentally demonstrated. The end face of a single mode fiber is inscribed by a femtosecond laser to form a micro-hole. Then the single mode fiber is spliced to a non-core fiber to form a sealed Fabry-Perot cavity. The micro optical fiber pressure sensor is fabricated by cleaving and grinding the non-core fiber. By femtosecond laser micromachining, micro-holes with different apertures and diaphragms with different thicknesses can be processed to obtain pressure sensors with different sensitivities and pressure measurement ranges. The test system is shown in the figure below. Experiment results show the sensor proposed in this paper exhibits good linearity within a pressure range from 0 to 5 MPa at  $-196^{\circ}\text{C}$ , and the cavity length-pressure sensitivities during the process of pressure increasing and decreasing are 110.33 nm/MPa and 110.68 nm/MPa, respectively. The proposed sensor can meet the pressure measurement requirements in an ultra-low temperature environment.

**Key words:** Extrinsic Fabry-Perot interferometers; Optical fiber sensors; Femtosecond laser micromachining; Ultra-low temperature; Pressure measurement

**OCIS Codes:** 060.2370; 280.4788; 120.2230