

157 nm 激光微加工制作的微光纤压力传感器

倪 敏 冉曾令 鲁 恩 饶云江

(电子科技大学宽带光纤传输和通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 为了提高微光纤压力传感器的制作效率,采用 157 nm 激光加工的自封闭式法布里-珀罗腔,形成在线式全光纤压力传感器,包括微腔和一截短的单模光纤。跟踪压力传感器相位的变化可以获得压力大小。在 0~60 MPa 的测量范围内,灵敏度达到 0.01 rad/MPa,长期稳定性达到 ± 0.04 MPa。所做的 10 个传感器样品,在 60 MPa 的测量范围内,灵敏度的冗余度达到 $\pm 5\%$,可以规模化制造。这种传感器有望在航空航天、汽车工业和井下监测等领域发挥作用。

关键词 光纤光学;压力传感器;激光加工;法布里-珀罗

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.120606

Fiber-Optic Tip Pressure Sensor Fabricated by 157 nm Laser

Ni Min Ran Zengling Lu En Rao Yunjiang

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract In order to improve the fabrication efficiency of micro fiber pressure sensors, an optical fiber sensor based on Fabry-Perot (F-P) interferometer fabricated by using 157 nm laser micromachining is proposed and demonstrated. The sensor head consists of a short air F-P cavity near the tip of a single-mode fiber and the fiber tip. Tracking the phase signal, the variation of pressure can be obtained. In the pressure measurement range of 0~60 MPa, the sensitivity and long-term stability of the sensor are 0.01 rad/MPa and ± 0.04 MPa, respectively. For ten sensor samples tested, the tolerance of sensitivity of the sensors for 60 MPa measurement range is $\pm 5\%$. This sensor has great potential to realize mass-production of good reproducibility and the application prospect in industry measurement is wonderful.

Key words fiber optics; pressure sensor; laser machining; Fabry-Perot

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 310.0310

1 引 言

随着生物、医学、能源、环境、航天航空、军事等领域的快速发展,传感器的微型化、轻量化、低能耗、耐恶劣环境能力等已成为非常迫切的需求,微纳传感器如今已是国际上的重大科技前沿热点之一。微光纤压力传感器由于在航空航天、汽车工业和石油井下监测中的广泛应用而受到越来越多的关注。与电传感器相比,它们有着突出的优点^[1,2],比如体积小、长时间的稳定性、抗电磁干扰、可以在恶劣的环境下工作等。与基于布拉格反射器和布拉格光栅的压力传感器^[3,4]相比,微光纤压力传感器具有耐高温的优势。一般来说,微压力传感器的加工方法有腐蚀法^[5~7]、键合技术^[8]、粘接技术^[9]、凝胶技术等,但是基于这些技术的压力传感器并不能耐高温、耐腐蚀。为了解决这一问题,Wang 等^[10]提出了全石英的法布里-珀罗(F-P)传感器,在两根单模光纤之间焊接一根短的空心光纤,再将单模光纤一端进行手工切割形成压力膜片。这种传感器在高温

收稿日期: 2011-07-08; **收到修改稿日期**: 2011-08-11; **网络出版日期**: 2011-10-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助课题。

作者简介: 倪 敏(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感及信号处理等方面的研究。

E-mail: nimin1115@126.com

导师简介: 冉曾令(1977—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感和通信技术等方面的研究。

E-mail: ranzl@uestc.edu.cn

下具有良好的稳定性,但是手工切割很难精确控制压力膜片的厚度,而且手工装配比较耗时,因此这一技术不能在保证传感器重复性好的情况下进行批量生产。为了提高传感器的制作效率,本课题组提出采用157 nm激光加工的方法在光纤上刻蚀微腔形成光纤折射率传感器^[11,12],包括一个微腔和一截短单模光纤。对于折射率传感器,这截光纤的长度不是很重要,因此可以采用手工切割。

本文提出的微型光纤压力传感器仍然包括微腔和一截短的光纤,其中的短光纤要用作压力膜片,其长度必须得到精确控制,所以选择合适的方法在腔附近切割光纤得到精确的长度非常重要。实验中,我们提出了两个由157 nm激光加工的微型全光纤在线式压力传感器。为了获得一致的压力灵敏度,F-P微腔和压力膜片都是由157 nm激光器加工而成,这点与之前报道过的折射率传感器^[11]明显不同。该压力传感器具有干涉条纹对比度好(大于15 dB)、温度稳定性好和体积小等优点,通过采用激光微加工的自动加工技术可以实现很好的重复性,能够批量生产,从而降低成本。

2 实验

图1是压力传感器的结构示意图,包括F-P干涉仪和距离腔很近的光纤膜片。外界施加压力导致膜片偏离原来位置从而改变腔长,根据光谱的移动解调出腔长的变化,从而得出压力的大小。

传感头的加工过程包括以下3个基本步骤:1)用连续的激光脉冲通过掩模板在光纤端面加工出圆形的孔;2)将一根单模光纤切割,经研磨机(RB-20A)研磨抛光后与加工有微孔的光纤熔接形成F-P空气腔,如图1所示;3)在精密微动台的控制下,用激光束在光纤距离微孔附近的地方切断,完成压力传感器的制作。传感器的灵敏度和测量范围由膜片的厚度和腔的直径决定。

实验采用的157 nm激光微加工系统由157 nm脉冲激光器(Coherent LPF202)、25倍缩小倍率的光学调焦系统、观测系统和精密微动台组成。单个激光脉冲的最大能量、脉冲宽度及重复频率分别为35 mJ、15 ns和50 Hz。157 nm激光源具有很高的单光子能量和脉冲能量,很多材料对它具有很大的吸收系数,可实现高质量的微加工。

在实验中,用90个激光脉冲通过直径60 μm 的圆形掩模板在一束G652单模光纤的端面加工出20 μm 深的凹槽。脉冲能量密度、脉冲宽度及脉冲重复频率分别20 J/cm^2 、5 ns和20 Hz。经轮廓仪(WYKO NT1100)检测,凹槽的粗糙度小于100 nm。然后将加工有微槽的光纤端面与抛光好的光纤用光纤熔接机(Fetel S177)熔接起来行成F-P空气腔,腔长约为22 μm 。最后利用157 nm激光器的精密微动台调整带有矩形孔的掩模板到距离空气腔约10 μm 的位置,并用1600个脉冲进行光纤截断。由于光脉冲通过掩模板以纳米量级逐步打孔,因此能确保凹腔不被破坏。正因为切断位置的精确定位,观测系统的分辨率超过1 μm ,传感器的重复性得到了保证。图2显示的是制作好的微光纤压力传感器,膜片的厚度约为11.5 μm 、半径为30 μm 。传感器的反射光谱如图3所示。施加压力时,压力膜片会发生相应的形变。膜片为厚度均匀的平面,在 ΔP 的压力变化下,中心偏移量 ΔL 可以表示为

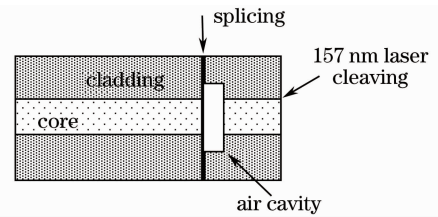


图1 压力传感器结构示意图

Fig. 1 Structure of the sensor head

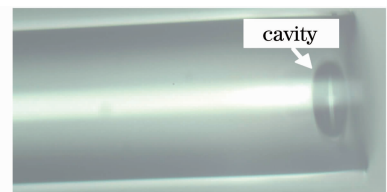


图2 加工的压力传感器照片

Fig. 2 Photo of the sensor head

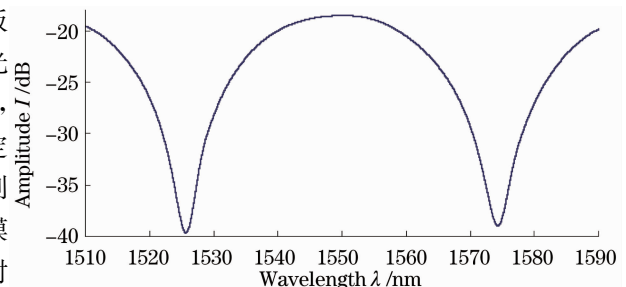


图3 传感器的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectrum of the sensor

$$\Delta L = \left[\frac{L(1-2\mu)R_0^2}{E(R_0^2 - R^2)} - \frac{3(1-\mu^2)R^4}{16Eh^3} \right] \Delta P, \quad (1)$$

式中 R_0 , L , R , h 分别为光纤的半径、空气腔的腔长、膜片的半径和厚度; E 是杨氏模量; μ 为泊松半径。

图 4 所示为压力传感器的测试系统图。实验所用的压力校准仪由北京康斯特公司的高压液体压力泵 CTS1004 和数字精密压力表 CTS2008 组成。量程为 60 MPa, 精度为 0.05%, 可以在 0~60 MPa 范围内连续产生稳定的压力信号, 符合实验要求。传感器的输出由 MOI Si720 监测, 它的波长范围为 1510~1590 nm, 分辨率为 2.5 pm。图 5 所示为实验装置的照片, 跟踪图 4 中传感器相位的变化可以获得施加的压力, 两者的关系式为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta L}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{L(1-2\mu)R_0^2}{R_0^2 - R^2} - \frac{3(1-\mu^2)R^4}{16Eh^3} \right] \Delta P, \quad (2)$$

式中 $\Delta\phi$ 为 F-P 腔相位的变化量, λ 为 Si720 的平均波长。

图 6 所示为传感器在室温下 0~60 MPa 范围内的压力曲线图, 分辨率达 0.01 rad/MPa。图 7 所示为 2 h 内传感器的稳定性测试结果, 可以看出, 该传感器的波动范围为 ± 0.04 MPa。

封装好的压力传感器在常温下经中国测试技术研究院检定, 示值误差和回程误差分别达到 0.09% 和 0.03%。

考虑到传感器是纯石英结构, 能够在高温下工作, 将传感器置于 25 °C~400 °C 的环境中 (Lenton 1200) 进行测试, 结果如图 8 所示。温度相关性为 5×10^{-5} rad/K (5 kPa/K), 造成这一现象的主要因素是材料的受热膨胀和腔内空气压的存在。实验表明, 该传感器可以在 400 °C 以下的环境中正常工作。如果环境温度范围更大, 则需要一个温度传感器做温度补偿。另一方面, 提高压力传感器的灵敏度也有利于减小温度的交叉影响。

为了验证可重复性, 按照前面的设置参数加工了 10 个传感器, 图 9 所示的实验结果表明该传感器具有良好的重复性。在 60 MPa 的测量范围内, 灵敏度的冗余度达到 $\pm 5\%$ 。考虑到商业上的应用, 该传感器的重复性还有待提高, 这可以通过提高微动台的精准度、光纤夹具的精确位置以及观测系统的分辨率来实现。

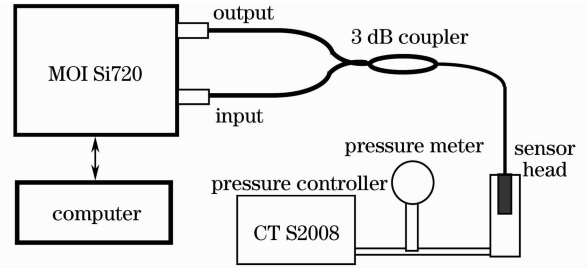


图 4 实验装置结构图

Fig. 4 Experimental setup

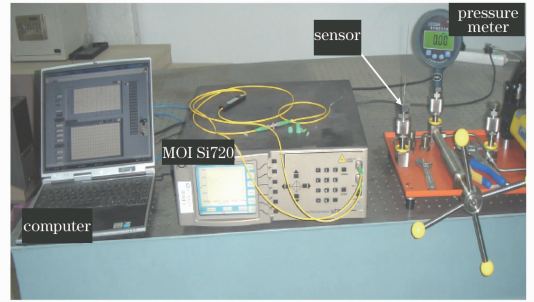


图 5 实验装置照片

Fig. 5 Photo of the testing setup

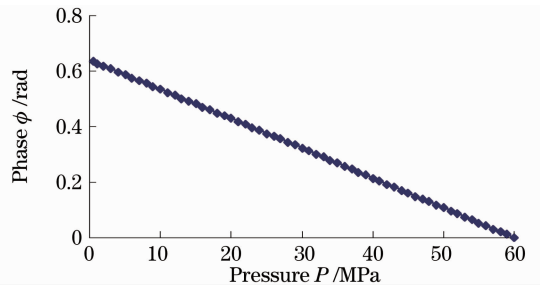


图 6 0~60 MPa 压力范围内相位曲线

Fig. 6 Pressure response from 0 to 60 MPa

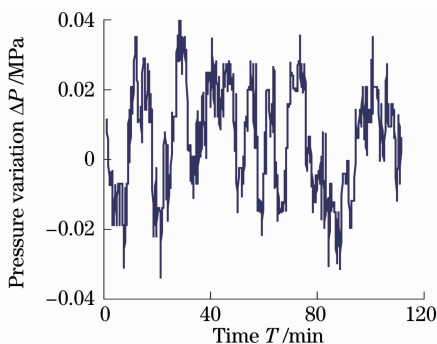


图 7 2 h 内压力传感器稳定性测试

Fig. 7 Stability testing during two hours

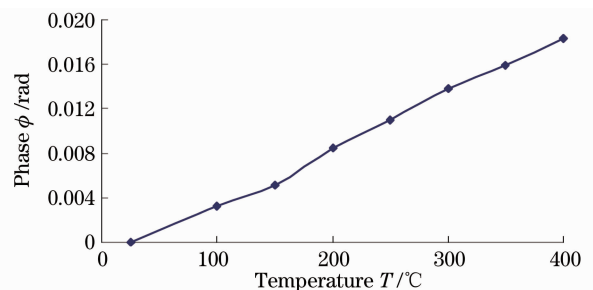


图 8 25 °C~400 °C 内的温度敏感性测试

Fig. 8 Temperature dependence of the sensor between 25 °C~400 °C

另外, Si720 是价格很昂贵的实验室传感分析仪, 考虑到传感器商用, 可以选择低成本的光栅光谱仪; 光源换作超辐射发光二极管 (SLED) 也会降低整个传感系统的成本。

3 结 论

提出了一种新型全石英熔接微光纤压力传感器, 其灵敏度为 0.01 rad/MPa , 温度依赖度为 $5 \times 10^{-5} \text{ rad/K}$ (5 kPa/K), 稳定度为 $\pm 0.04 \text{ MPa}$, 这种微型压力传感器具有体积小、结构简单、低成本、重复性好、抗电磁干扰、能批量生产等优点, 可适用于恶劣环境中的工业监测。

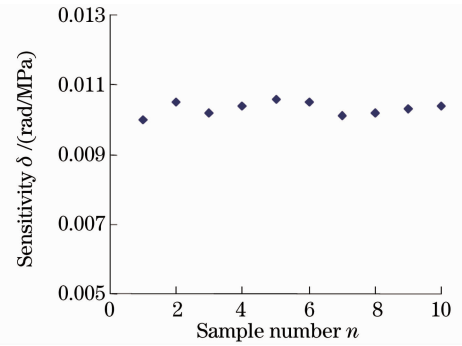


图 9 灵敏度的冗余度测试结果
Fig. 9 Tolerance of the sensitivity

参 考 文 献

- 1 D. Goustouridis, P. Normand, D. Tsoukalas. Ultraminiature silicon capacitive pressure-sensing elements obtained by silicon fusion bonding[J]. *Sens. Actuators A*, 1998, **68**(1-3): 269~274
- 2 P. P. Melvas, E. Kalvesten, P. Enoksson *et al.*. A free-hanging strain-gauge for ultraminiaturized pressure sensors[J]. *Sens. Actuators A*, 2002, **97-98**: 75~82
- 3 Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 629~631
兰玉文, 刘 波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 629~631
- 4 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405004
汪弋平, 王 鸣, 黄晓琴. 基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405004
- 5 Y. Zhu, A. Wang. Miniature fiber optic pressure sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 447~449
- 6 D. Donlagic, E. Cibula. All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO₂ diaphragm[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2071~2073
- 7 Yang Chundi, Wang Ming, Ge Yixia *et al.*. A miniature extrinsic fiber Fabry-Perot 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
- 8 J. Zhou, S. Dasgupta, H. Kobayashi *et al.*. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(4): 598~604
- 9 B. Yu, D. W. Kim, J. D. Deng *et al.*. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(16): 3241~3250
- 10 X. Wang, J. Xu, Y. Zhu *et al.*. All-fused-silica miniature optical fiber tip pressure sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 885~887
- 11 Z. L. Ran, Y. J. Rao, W. J. Liu *et al.*. Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature independent measurement of refractive index[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3) 2252~2263
- 12 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Perot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachine[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令 等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404