

基于飞秒激光加工的无膜光纤气体压力传感器

姜源¹, 江毅^{1*}, 张柳超¹, 王素梅²

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京理工大学激光微纳制造研究所, 北京 100081

摘要 设计了一种基于飞秒激光加工的无膜式光纤气体压力传感器。通过熔接形成了单模光纤-空心光纤-无芯光纤(NCF)结构,熔接结构中的两个熔接面作为反射面,构成一个低精细度的外腔式法布里-珀罗干涉仪(EFPI)。利用飞秒激光加工结构中的空心光纤部分,烧蚀出一个与外界环境连通的小孔。外界气体压力的变化引起 EFPI 腔中气体折射率发生变化,通过测量法布里-珀罗腔的光学腔长,得到对应的外界气体压力。实验结果表明,传感器在 0~5 MPa 压力范围内的腔长-压力灵敏度为 1.02 $\mu\text{m}/\text{MPa}$,传感器的压力分辨率为 2.4 kPa。该压力传感器具有量程大、灵敏度高、分辨率高和线性度高等优点。

关键词 光纤光学; 压力传感器; 外腔式法布里-珀罗干涉仪; 飞秒激光加工

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.100601

Non-Diaphragm Fiber Gas Pressure Sensor Based on Femtosecond Laser Machining

Jiang Yuan¹, Jiang Yi^{1*}, Zhang Liuchao¹, Wang Sumei²

¹ School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Laser Micro/Nano Fabrication Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A non-diaphragm fiber gas pressure sensor fabricated using a femtosecond laser is proposed and experimentally demonstrated. This sensor is a type of low-precision extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) formed by sandwiching a hollow fiber (HF) between a single mode fiber and a no-core fiber. A femtosecond laser is used to drill a micro-channel on the side wall of the HF to allow the gas to enter and exit the HF. When the external gas pressure changes, the refractive index of the gas in the EFPI cavity changes. The gas pressure can be detected by determining the optical cavity length of the EFPI. The experimental results show that the pressure sensitivity in the cavity is 1.02 $\mu\text{m}/\text{MPa}$ in the pressure range of 0-5 MPa, and the pressure resolution of the sensor is 2.4 kPa. This pressure sensor has the advantages such as wide measuring range, high sensitivity, high resolution, and high linearity.

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

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 280.4788

1 引言

光纤压力传感器因为体积小、无源和抗电磁干扰等特点得到了广泛关注与应用。其在汽车工业、化学工业、军事、医疗、航空航天和井下监测^[1]等领域都有很大的应用前景。目前已报道的光纤压力传感器有两种,分别为膜片式^[2-10]和无膜式^[11-15]。膜

片式根据膜片位置的不同又分为端面式和侧壁式。端面式压力传感器的传感头处于传感器端部,传感器端面为一薄膜,薄膜与传输光纤端面之间有一空气腔,形成法布里-珀罗(FP)干涉仪。在外界压力的作用下,薄膜会发生形变,从而改变 FP 腔的腔长。文献[3]描述了一种膜片式压力传感器,当压力变化范围为 0~0.1 MPa 时,腔长-压力灵敏度为

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2018-12-05; 录用日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61575021,61775020)

* E-mail: bitjy@bit.edu.cn

18.5 nm/MPa^[3]。膜片式的压力传感器,灵敏度和量程相互制约,膜片厚度越薄量程越大,但膜片的加工比较困难,膜片越薄越难制作。加工时膜片厚度不易控制,制作重复性较差。热应力以及闭合腔内的残余气压,都会对膜片的形变产生影响^[9]。侧壁式压力传感器的结构更加简单,其主要由一个空气 FP 腔构成,感压面在传感器 FP 腔的侧壁。此时传感器的侧壁就可以看作压力腔的膜片,在压力的作用下,侧壁会发生形变,从而改变 FP 腔的腔长。文献^[10]描述了一种侧壁式压力传感器,在 0~20 MPa 范围内,腔长-压力灵敏度为 21 nm/MPa,分辨率为 47.6 kPa^[10]。这种类型的压力传感器灵敏度相对较低,但量程较大,制作重复性高。

无膜式压力传感器的结构也是由一个空气 FP 腔构成,但不是依靠传感器的形变改变腔长,而是通过气压改变引起腔内气体折射率改变,从而改变光学腔长。文献^[11]描述了一种无膜式压力传感器,在 0~1 MPa 范围内,波长-压力灵敏度为 4.225 nm/MPa,系统分辨率为 0.1 nm^[11]。这种传感器并不依靠膜片的形变,因此量程大、重复性好,但波长-压力灵敏度以及分辨率相对较低。

无膜式压力传感器的制作方法有很多,利用飞秒激光加工是开放腔的一种有效方法。飞秒激光加工是一个非线性、非平衡过程,具有极小化热影响区、可控性高等特点,近十几年被广泛应用于微纳制造领域。相比于传统方法,飞秒激光加工具有材料适应性广、非接触、无污染、高精度、高效率等优点。在加工极微细孔方面,其优点更显著^[16]。

本文研制了一种利用飞秒激光加工的无膜式外腔法布里-珀罗干涉仪(EFPI)光纤压力传感器。该传感器通过测量腔内气体折射率的变化测量气体压力。传感器具有体积小,制作简单、量程大、测量重复性好、分辨率高和线性度高等优点。

2 传感器制作

制作无膜式光纤气体压力传感器的步骤如下:

1)熔接单模光纤(SMF)-空心光纤(HF)-无芯光纤(NCF)结构。首先,将 SMF 进行切割,切割后的 SMF 端面应尽量光滑,且切割后端面所成角度小于 0.5°。用光纤熔接机将一段切割后的 HF 熔接在 SMF 经过切割的一端上,如图 1(a)所示。所用 HF 的规格为内径 93 μm、外径 125 μm。然后将 HF 在显微镜下切割至 350 μm 左右,如图 1(b)所示。再将端面经过切割的 NCF 熔接在上述处理过

的 HF 末端,如图 1(c)所示。NCF 的切割要求同 SMF。最后将 NCF 切割至 5 mm 左右,如图 1(d)所示。

2)用飞秒激光加工熔接后的 SMF-HF-NCF 结构。为便于解调,需将 NCF 的端面进行粗糙化,去除 NCF 末端的端面反射,从而保证所得信号为双光束干涉。具体做法为利用飞秒激光倾斜烧蚀 NCF 末端,使 NCF 末端形成一个约 20°的斜面,如图 1(e)所示。由于烧蚀掉的端面粗糙且不与光纤轴向垂直,因此可以消除 NCF 末端的菲涅耳反射。最后,再在 HF 侧面加工一个小孔。用飞秒激光从侧面烧蚀 HF,烧蚀掉长度为 60 μm、宽度为 30 μm 的区域,如图 1(f)所示。加工中使用 Spectra-Physics 公司的飞秒激光器,波长为 800 nm,重复频率为 1000 Hz,脉宽为 35 fs。飞秒激光由物镜聚焦前,功率为 0.3 mW。

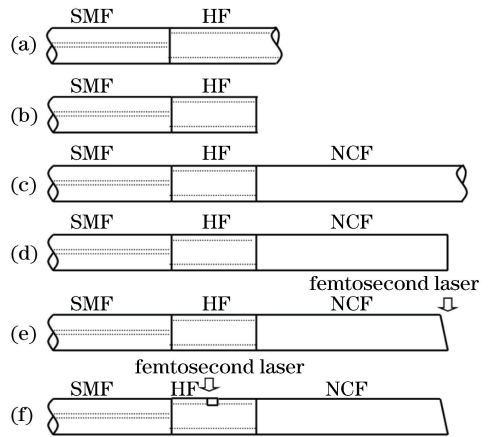


图 1 光纤压力传感器制作过程示意图

Fig. 1 Schematic of manufacturing process of fiber pressure sensor

传感器的参数选择对传感器性能有重大影响。若 HF 太长,EFPI 的腔长会过长,多次实验后得出, HF 长度大于 800 μm 会导致干涉条纹图案的对比度变差,不利于信号解调。若 HF 太短,腔长会过小, HF 小于 200 μm 会导致传感器灵敏度大幅下降。加工出的传感器如图 2 所示。图 2(a)为飞秒激光加工前的图片,图 2(b)为加工完通孔后的图片。

传感器加工前以及飞秒激光加工后的光谱如图 3 所示。NCF 端面反射被有效消除,为双光束干涉,腔长为 389.57 μm,干涉条纹对比度约为 7 dB。传感器经飞秒激光加工后的光谱发生漂移,且对比度略有降低。出现漂移现象的原因是进行熔接操作之后,传感器的 FP 腔为封闭腔,且腔内空气在熔接

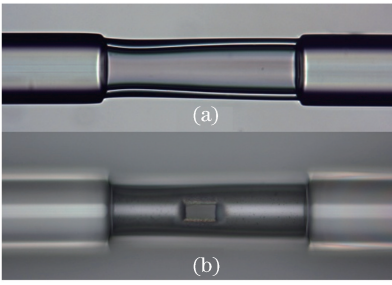


图2 飞秒激光加工前后的传感器的显微镜照片。
(a)加工前;(b)加工后

Fig. 2 Micrographs of sensor before and after femtosecond laser machining. (a) Before machining; (b) after machining

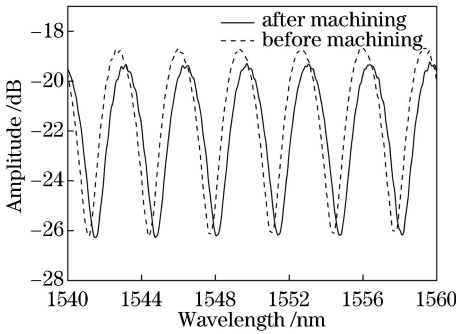


图3 传感器加工前后 HF 的光谱图

Fig. 3 Spectrum of HF before and after femtosecond laser machining

过程中受热膨胀,熔接完成恢复常温后,腔内气体压力小于外界空气压力,导致腔内空气折射率小于外界空气折射率^[13]。经飞秒激光加工后,FP腔不再是封闭的,折射率升高,因而光学腔长变长,从而发生光谱红移。在飞秒激光加工过程中,有加工碎屑落入腔内,污染了反射端面,因而对比度略微降低。

3 实验及讨论

制作的光纤压力传感器原理如图4所示。激光经过SMF和空气的传输,在SMF/HF与HF/NCF的交界面上发生反射,两束反射光发生干涉,形成EFPI。当外界气体压力变化时,EFPI腔内的气体压力也会发生变化,折射率随之变化,导致EFPI的光学腔长发生变化。因此,通过测量EFPI的光学腔长,可以得到对应的外界压力。

EFPI的光学腔长 L 为

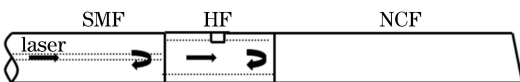


图4 光纤压力传感器原理图

Fig. 4 Schematic of fiber pressure sensor

$$L = nL_0, \quad (1)$$

式中: L_0 为EFPI的腔长; n 为腔内介质折射率。

腔内介质折射率 n 可表示为^[10]

$$n = 1 + \frac{2.8793 \times 10^{-9} \times P}{1 + 0.003661 \times T}, \quad (2)$$

式中: P 和 T 分别为压力与温度。

光学腔长 L 对气体压力的灵敏度可表示为

$$S_L = \frac{dL}{dP} = L_0 \frac{dn}{dP} = \frac{2.8793 \times 10^{-9}}{1 + 0.003661 \times T} L_0. \quad (3)$$

实验所用样品的腔长 $L_0 = 389.57 \mu\text{m}$ 。在室温 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) 下 $S_L = 1027.6 \text{ nm/MPa}$ 。

实验系统如图5所示。将传感器放置在压力罐中,并使用分辨率为 0.01 MPa 的压力计校准气体压力。通过自制白光干涉解调仪检测和解调反射频谱,解调仪波长范围为 $1525 \sim 1570 \text{ nm}$ 。该解调仪的分辨率为 1 nm 。

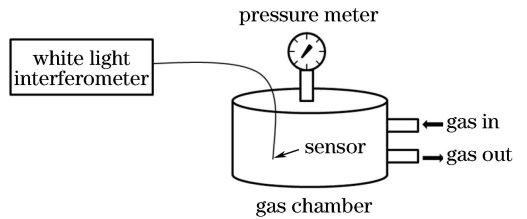


图5 光纤压力传感器测试系统图

Fig. 5 Test system of fiber pressure sensor

1) 压力测试。分别测量升压与降压过程。升压过程为将压力罐内气压从 0 MPa 升至 5 MPa , 压力每上升 0.5 MPa 记录一次数据。降压实验过程为将压力罐内气压从 5 MPa 降至 0 MPa , 每 0.5 MPa 记录一次数据。测得腔长随气压的变化关系如图6所示,其中 x 、 y 和 R^2 分别为自变量、因变量和线性度。从图6可看出,在高压环境下升压过程腔长-压力灵敏度为 1019.9 nm/MPa , 降压过程腔长-压力灵敏度为 1020.4 nm/MPa , 均与理论值 1027.6 nm/MPa 相近。

同样分别测量升压与降压过程。升压实验从 0 MPa 开始,将压力罐的进气阀门打开一个小口,让气体缓慢进入压力罐,直至气压升至 0.4 MPa , 期间每上升 0.01 MPa 记录一次传感器光学腔长。降压实验将压力罐内气压升至 0.4 MPa , 然后将压力罐的出气阀门打开一个小口,让气体缓慢泄露,每下降 0.01 MPa 记录一次传感器光学腔长,直至 0 MPa 。测得腔长随气压的变化关系如图7所示。从图7中可看出,升压过程腔长-压力灵敏度为 1026.4 nm/MPa , 降压过程腔长-压力灵敏度为

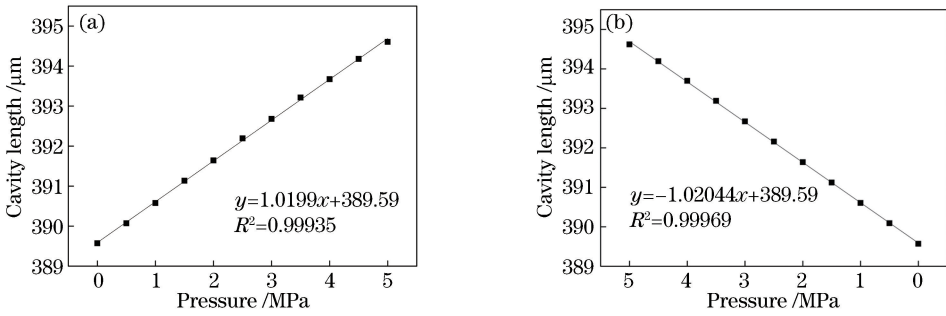


图 6 气压为 0~5 MPa 时传感器光学腔长与气压的关系。(a)升压过程;(b)降压过程
Fig. 6 Relationship between optical cavity length of pressure sensor and gas pressure in pressure range of 0-5 MPa. (a) Pressure increasing; (b) pressure decreasing

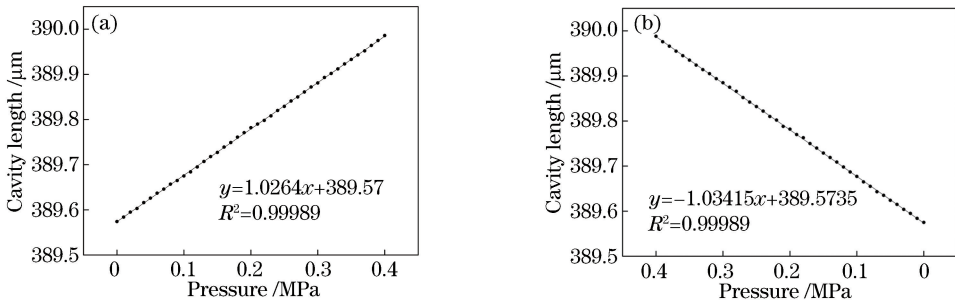


图 7 气压为 0~0.4 MPa 时传感器光学腔长与气压的关系。(a)升压过程;(b)降压过程
Fig. 7 Relationship between optical cavity length of sensor and gas pressure in pressure range of 0-0.4 MPa. (a) Pressure increasing; (b) pressure decreasing

1034.2 nm/MPa,亦均与理论值1027.6 nm/MPa相近。

2) 分辨率测试。在常温环境下连续测量传感器的腔长,1 s 测量 1 次,共测 300 次,测量结果如图 8 所示。传感器腔长最大波动差值为 2.5 nm,已知低压时升压过程腔长-压力灵敏度为1026.4 nm/MPa,降压过程腔长-压力灵敏度为1034.2 nm/MPa,则传感器的压力分辨率约为 2.4 kPa。

综上所述,该传感器的量程为 0~5 MPa,腔长-压力灵敏度为 1.02 μm/MPa,压力分辨率约为 2.4 kPa。表 1 对该传感器与其他光纤气体压力传感器的 3 种参数进行了比较。该传感器具有量程大、灵敏度高、分辨率高等优点。

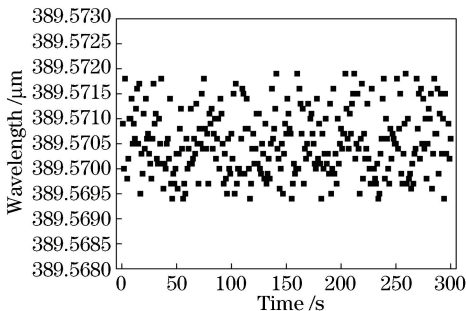


图 8 腔长的测量波动
Fig. 8 Measuring fluctuation of cavity length

表 1 本文传感器与其他光纤压力传感器的比较
Table 1 Comparison of proposed sensor and other fiber pressure sensors

Sensor	Range / MPa	Sensitivity / (nm · MPa ⁻¹)	Resolution / kPa
End-face sensor 1 ^[6]	0-2	1.036	9.7
End-face sensor 2 ^[6]	0-0.14	164.56	—
Side-wall sensor 1 ^[10]	0-20	21	47.6
Non-diaphragm sensor 1 ^[11]	0-1	4.225	23.7
Non-diaphragm sensor 2 ^[14]	0-1.2	4.028	5.0
Proposed sensor	0-5	1020	2.4

4 结 论

设计了一种基于飞秒激光加工的无膜式光纤气体压力传感器。通过飞秒激光加工烧蚀 SMF-HF-NCF 的熔接结构,形成无膜的开腔的 EFPI 压力传感器。实验表明,该传感器腔长-压力灵敏度为 1.02 μm/MPa,压力测量分辨率为 2.4 kPa。该传感

器具有量程大、灵敏度高、分辨率高和易加工等优点,可用于测量不同环境下的气体压力,有较高的实际应用价值,有望在航空航天、汽车工业、化学工业和井下监测等领域应用。

参 考 文 献

- [1] Chen W M, Lei X H, Zhang W, *et al.* Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328010.
- [2] Jiang Y, Ma W Y, Chen S F, *et al.* A micro fiber optic high-temperature pressure sensor [J]. *Optical Technique*, 2017, 43(1): 12-15.
江毅, 马维一, 陈淑芬, 等. 微纳光纤高温压力传感器[J]. *光学技术*, 2017, 43(1): 12-15.
- [3] Yang C D, Wang M, Ge Y X, *et al.* A miniature extrinsic fiber Fabry-Pérot pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1358.
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.
- [4] Wang J J, Xie J. Research of a kind of quartz optical fiber Fabry-Perot cavity wide-range pressure sensor [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 38(3): 104-107.
王俊杰, 谢俊. 一种全石英光纤法布里-珀罗大量程压力传感器的研制[J]. *武汉理工大学学报*, 2016, 38(3): 104-107.
- [5] Liao C R, Liu S, Xu L, *et al.* Sub-micron silica diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2827.
- [6] Wang G J, Liu X L, Gui Z G, *et al.* A high-sensitive pressure sensor using a single-mode fiber embedded microbubble with thin film characteristics [J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1192.
- [7] Pevac S, Donlagic D. Miniature all-fiber Fabry-Perot sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19): 4536.
- [8] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0206001.
张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0206001.
- [9] Wu Z H, Liu T G, Jiang J F, *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.
- [10] Zhang J, Jing Z G, Li A, *et al.* All-silica fiber EFPI high static pressure sensor in fusion with simple structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1010004.
张杰, 荆振国, 李昂, 等. 结构简单的熔接式全石英光纤 EFPI 高静压传感器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010004.
- [11] Hu Y H, Jiang C, Sun S M, *et al.* High sensitivity capillary structure optical fiber gas pressure sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2018, 29(1): 39-43.
胡义慧, 江超, 孙四梅, 等. 毛细石英管构成的高灵敏度光纤气压传感器[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(1): 39-43.
- [12] Silva S, Coelho L, Frazão O. An all-fiber Fabry-Pérot interferometer for pressure sensing in different gaseous environments [J]. *Measurement*, 2014, 47: 418-421.
- [13] Xu B, Wang C, Wang D N, *et al.* Fiber-tip gas pressure sensor based on dual capillaries [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23484-23492.
- [14] Xu B, Liu Y M, Wang D N, *et al.* Optical fiber Fabry-Pérot interferometer based on an air cavity for gas pressure sensing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 7102309.
- [15] Deng D S, Qin X, Huang G J, *et al.* Design and application of copper deposited tungsten disulfide film coated thin-core optical fiber gas sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1106002.
邓大申, 秦祥, 黄国家, 等. 铜沉积二硫化钨膜包覆薄芯光纤气体传感器的设计与应用[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1106002.
- [16] Xia B, Jiang L, Wang S M, *et al.* Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0201001.
夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0201001.