光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.006

CO_2 激光熔融毛细管端面制备的光纤 F-P 压力传感器

张皓月[1,2]，李　红[1,2]，孟凡勇[2,3]，徐　滔[2,3]，祝连庆[1,2]*

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室；
2. 光纤传感与系统北京实验室；3. 北京市光电测试技术重点实验室，北京 100192）

摘　要： 提出了一种利用 CO_2 激光熔融毛细管端面来制备光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感器的方法。F-P 结构由普通单模光纤和基于 CO_2 激光熔融毛细管端面制备的硅薄膜组成。文章详细说明了硅薄膜的制造工艺和熔融参数，并对光纤 F-P 压力传感器进行了性能测试。实验结果表明：制备的光纤 F-P 压力传感器对气压具有良好的灵敏度和线性度，灵敏度可达到 16.37 pm/kPa，线性度为 0.998。该光纤 F-P 压力传感器结构紧凑，易于生产，具有在极端恶劣环境下的应用潜力。

关键词： 光纤 F-P；CO_2 激光；毛细管端面；硅薄膜；压力传感器

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0035－05

Study on Fabrication of Fiber F-P Pressure Sensor by CO_2 Laser Melting Capillary End Face

ZHANG Haoyue[1,2], LI Hong[1,2], MENG Fanyong[2,3], XU Tao[2,3], ZHU Lianqing[1]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument;
2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System; 3. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN)

Abstract: A method for fabricating optical fiber Fabry-Perot (FP) pressure sensor by using CO_2 laser to melt capillary end face is proposed. The F-P structure is composed of ordinary single-mode fiber (SMF) and a silicon film prepared based on the end face of a CO_2 laser fusion capillary. In this paper, the manufacturing process and melting parameters of the silicon thin film are introduced in detail and performance tests are performed on the F-P pressure sensor. The results show that the fabricated fiber F-P sensor realizes good sensitivity and linearity to the pressure, obtaining a sensitivity of 16.37 pm/kPa, and the linearity of 0.998.

Key words: fiber Fabry-Perot; CO_2 laser; capillary end; silicon film; pressure sensor

0　引言

光纤传感器具有测量精度高、抗电磁干扰、质量小、体积小、损耗低，以及测量范围广等优点，被广泛应用于航空航天、陀螺导航、桥梁建筑、石油勘探和生物医学等领域[1-3]。其中，光纤法布里-珀罗(F-P)作为一种重要的光纤器件，被广泛应用于压力、应变、温度、超声、折射率等参量的测量[4-8]。

大气压力是航空航天等领域最为重要和基础的物理量之一，光纤 F-P 压力传感器，特别是采用薄膜结构作为传感元件的探头已经成为最具吸引力的选择，在测量气压方面显示出独特优势[9-12]。光纤 F-P 压力传感测量主要通过在光纤端面与光纤端面或光纤端面与薄膜两个反射面之间形成 F-P 干涉，外界物理参数的变化会引起 F-P 腔长度或腔内折射率的改变，从而引起干涉光谱的漂移，可以根据光谱漂移的波长值来计算外界压力变化[13-16]。薄膜的质量决定传感器的性能，近年来，有人提出使用硅薄

收稿日期：2020－11－23.
基金项目：国家自然科学基金项目(61903042，51535002)；高等学校学科创新引智计划项目(D17021)；北京市自然科学基金项目(4194077).
* **通信作者：**祝连庆　**E-mail：** lqzhu_bistu@sina.com

膜结构来代替传统薄膜以实现高灵敏度的气压传感测量。2017 年，Wang 等[17]提出了一种新型光纤压力传感器。该传感器利用电弧熔接机和手动压力泵在玻璃毛细管的一端制作出了具有薄膜特性的二氧化硅空心微气泡，然后将单模光纤嵌入微气泡中形成 F-P 腔，其压力灵敏度约为 164.56 pm/kPa。Zhang 等[18]同样使用电弧放电技术制作玻璃微气泡，将微气泡和单模光纤封装在玻璃毛细管中组成全硅光纤压力传感器，该传感器在室温下 1.1 MPa 的压力范围内线性灵敏度约为 4.84 nm/MPa。Kong 等[19]利用 CO_2 激光熔接机的实时反馈和双光束激光的优点，使用普通单模光纤在熔融状态下制作出超灵敏的扭力传感器，该传感器不仅制作方法简单，而且灵敏度是传统方法制备出的传感器的几倍。

气压是航空航天等领域中重要的性能监测指标，尤其是对于飞机、飞艇的工作高度和飞行速度的测量有着直接关系，因此需要针对气压测量的光纤气压传感器开展更深入的研究。全硅结构的 F-P 压力传感器因其较低的温度敏感度和较高的气压灵敏度而适于航空航天领域的气压测量。本文采用 CO_2 激光熔融毛细管端面来制备硅薄膜，并将其与单模光纤相结合形成光纤 F-P 干涉传感器，最后对其气压传感特性进行了测试分析。

1 新型光纤 F-P 传感器制备

CO_2 激光是熔融制作毛细管端面硅薄膜和封装 F-P 腔的关键加热源，CO_2 激光加热源的光路图如图 1 所示，激光经分束器分光后会分成两束方向相对的激光，两束激光会同时作用于毛细管端面，以保证端面受热的均匀性。而且在加热过程中可以通过摄像机实时观察熔融加工毛细管端面，更容易得到熔接参数对毛细管硅薄膜参数的影响，便于进行后续优化。

毛细管端面硅薄膜的主要制备过程如图 2 所示。柔性石英毛细管（YN200320，永年瑞普）的外径为 320 μm，内径为 200 μm。

第一步，先将毛细管与气压泵（ConST810-S，康斯特）通过转接件相连，保证毛细管管内气压维持在约 116 kPa。然后对毛细管端面（加工端）进行预处理，利用明火去除毛细管表面的聚酰亚胺涂敷层，再用酒精擦拭干净。将去除了涂敷层的部分置于 CO_2 激光熔接机（LZM100，藤仓）的激光光斑边缘区域，具体位置如图 2 步骤 1 所示，设置毛细管的初始位置为距离光斑中心 380 μm 处。

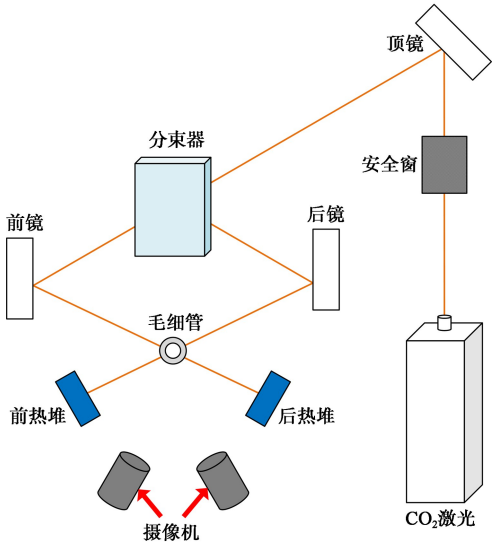


图 1 CO_2 激光加热源的光路图

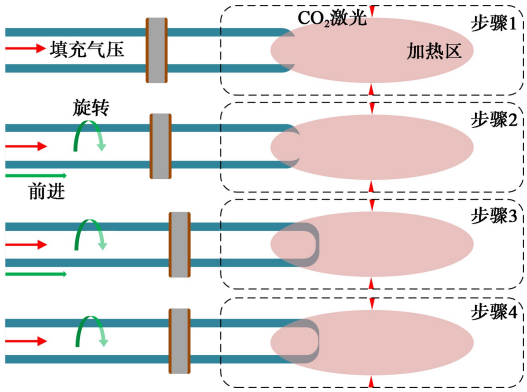


图 2 毛细管端面硅薄膜制备流程图

第二步，气压泵继续向毛细管内提供 116 kPa 的填充压力，激光功率设置为 1 270 bit，毛细管从初始位置以 0.010 μm/ms 的速度向光斑中心移动，前进的同时旋转毛细管，以保证毛细管端面在熔融加热状态下的均匀性。如图 2 步骤 2 所示，毛细管端面在旋转加热的过程中，玻璃外壁逐渐向内聚拢。

第三步，如步骤 3 所示，适当降低激光功率和填充压力，防止毛细管在向光斑中心靠近的过程中硅膜膨胀破裂。毛细管在向中心移动合适的距离后停止前进，旋转马达继续工作，让毛细管端面受热更均匀。

最后，保持旋转加热一段时间后，毛细管端面会形成如步骤 4 所示的玻璃薄膜，硅薄膜外表面光滑均匀。制备过程需要旋转马达不间断工作，目的是防止毛细管端面在熔融状态下受重力因素的影响而

导致薄膜厚度不均匀。

在实验过程中，CO_2 激光熔接机的设置参数如表 1 所示，该毛细管端面硅薄膜制备参数与图 3 所示的流程图相互配合，实现硅薄膜的自动化制备。总之，本文设计的 CO_2 激光熔融毛细管端面制备硅薄膜，与传统电弧放电法相比，更具有集成自动化、灵活性、稳定性和操作简单的优势，并且该工艺延长了硅薄膜的加工时间，使其表面更加均匀，从而在工艺上提高了硅薄膜的加工质量。毛细管硅薄膜的显微图像如图 4 所示。图 4(a)和(b)分别是本实验参数下和压力过大时毛细管端面膜片的俯视图和端视图，CO_2 激光熔融参数必须与管内的填充压力相匹配，当压力过大时，将发生图 4(b)所示的现象：毛细管端面在熔融状态下膨胀且无法形成闭合薄膜。

表 1　毛细管端面硅薄膜制备参数

类型	数值
填充压力/kPa	116
CO_2 激光功率/bit	1 270
马达旋转速度/(°/ms)	0.150
马达前进速度/(μm/ms)	0.010
预热时间/ms	3 000
加工时间/ms	180 000

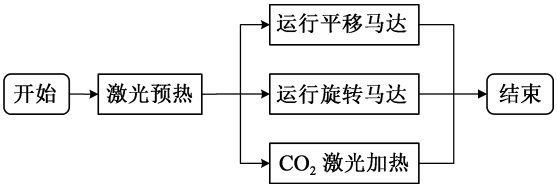
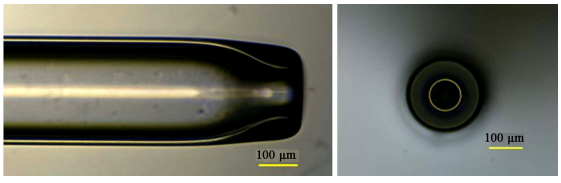
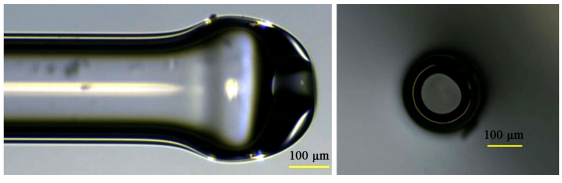


图 3　制备硅薄膜的流程图



(a)　压力合适时



(b)　压力过大时

图 4　压力合适和压力过大时毛细管端面膜片的俯视图和端视图

2　新型光纤 F-P 传感原理

本文提出的基于 F-P 干涉原理的光纤 F-P 压力传感器结构设计如图 5 所示。该传感器结构包括一段普通单模光纤(SMF)、毛细管端面硅薄膜和玻璃外壳，单模光纤的芯和包层直径分别为 9 和 125 μm。这是一个全硅结构，通过 CO_2 激光熔融技术将单模光纤和玻璃外壳熔融固定，并且在 SMF 端面和毛细管硅薄膜之间形成密封的 F-P 腔。如图 5 所示，SMF 中的信号光在光纤端面(R_1)和硅薄膜(R_2)两个反射面之间来回反射，再返回到光纤中，形成 F-P 干涉。

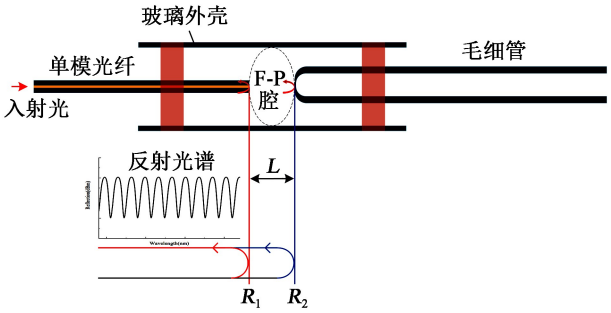


图 5　传感器结构和工作原理示意图

一束相干光从光纤入射到 F-P 腔中，会在光纤端面和薄膜端面之间来回反射，形成多光束干涉。光在两端面反射后沿原路返回，相遇并产生干涉，称之为 F-P 干涉。其中，反射光强度可以表示为[20]

$$I_R=\frac{2R(1-\cos\phi)}{1+R^2-2R\cos\phi}I_0 \tag{1}$$

式中，I_0 是入射光的强度，R 是两平面的反射率，ϕ 是任意两束光的相位差，且

$$\phi=\frac{4\pi nL}{\lambda} \tag{2}$$

式中，n 为腔内介质的折射率，L 为腔长，λ 为入射光的波长。

当外部压力在毛细管硅薄膜内表面上传递时，硅薄膜会微微向外膨胀。当反射率很小时，式(1)可简化为

$$I_R=2R(1-\cos\phi)I_0 \tag{3}$$

式(1)～(3)表明：当外界参量作用于硅薄膜表面时，可以通过反射光强变化来分析反射光干射条纹波长的位移漂移量，解调出相干光的相位位移，推导出外界参量变化，实现测量压力的目的。

3　光纤 F-P 腔压力传感特性研究

本实验对所制备的新型光纤 F-P 腔结构的反射光谱进行了测试，检测系统如图 6 所示。光纤 F-P 传感器通过光纤环形器连接光谱仪和光源，毛

细管另一端与气泵连接。其中测试光源出射波长范围为1 528～1 604 nm,光谱分析仪是日本Yokogawa公司的AQ6370D光谱分析仪,其工作波长范围为600～1 700 nm,最小分辨精度为0.02 nm。经过测试,反射光谱图的最高对比度为2 dB。

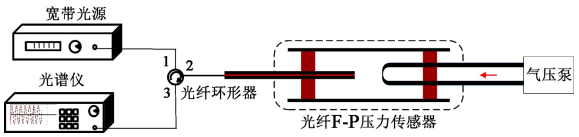


图6 光纤F-P压力传感测试系统

本实验利用气压泵通过毛细管向硅薄膜供压,压力变化引起硅薄膜尺寸变化,进而导致F-P腔长发生改变,通过观察光谱的波长漂移量来标定气压变化量。整个实验在超净间完成,以避免湿度等其他参数的影响。

将光纤F-P压力传感器接入测试系统后,启动气压泵,在恒温环境下进行气压标定实验。针对飞机典型飞行作业的气压工作环境,本文选用康斯特810S气压泵对制备的全硅薄膜光纤F-P传感器进行压力测试。压力(p)测试范围选取为0～240 kPa,用光谱仪采集反射谱。为方便观察,本文选取波段1 579～1 588 nm进行分析,结果如图7～8所示。

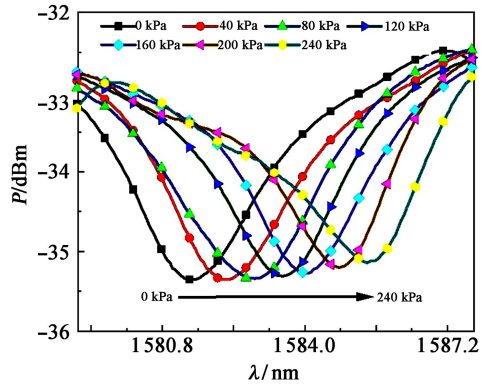


图7 光纤F-P压力传感器的气压特性曲线

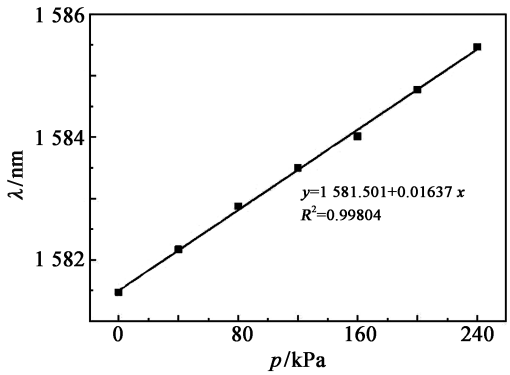


图8 光纤F-P压力传感器的线性度曲线图

根据图7和图8的结果显示:该传感器干涉波谷波长随着压力增加发生漂移,灵敏度为16.37 pm/kPa,线性度为0.998。

4 结论

本文提出了一种利用CO_2激光熔融毛细管端面来制备光纤F-P压力传感器的方法,详细说明了如何利用CO_2激光熔融毛细管端面来制备表面均匀的硅薄膜,并对其压力传感特性进行了测试研究。在室温下0～240 kPa的压力变化范围内,该传感器压力灵敏度可达16.37 pm/kPa,线性度为0.998。基于CO_2激光熔融毛细管端面制备的硅薄膜的光纤F-P压力传感器结构紧凑、易于生产,在航空、能源运输等行业的极端恶劣环境中具有巨大应用潜力。

参考文献:

[1] 江 毅,唐才杰. 光纤Fabry-Perot干涉仪原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
Jiang Yi, Tang Caijie. Principles and Applications of Fiber Fabry-Perot Interferometer[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.

[2] 上官春梅,何 巍,张 雯,等. 化学腐蚀法制备的光纤Fabry-Perot位移传感器[J]. 半导体光电,2018,39(2):170-173.
Shangguan Chunmei, He Wei, Zhang Wen, et al. Optical fiber Fabry-Perot displacement sensor prepared by chemical etching method[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(2): 170-173.

[3] 郑志霞,黄元庆. 基于F-P腔干涉的膜片式光纤微机电系统压力传感器[J]. 光子学报,2012,41(12):1488-1492.
Zheng Zhixia, Huang Yuanqing. Diaphragm optical fiber MEMS pressure sensor based on F-P cavity interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(12): 1488-1492.

[4] 王文华,于清旭,李 芳,等. 基于全石英结构非本征型温度不敏感的光纤压力传感器[J]. 新型工业化,2012(4):44-49.
Wang Wenhua, Yu Qingxu, Li Fang, et al. An extrinsic temperature-insensitive optical fiber pressure sensor based on all-quartz structure[J]. New Industrialization, 2012(4): 44-49.

[5] Eom J, Park C J, Lee B H, et al. Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor based on lensed fiber and polymeric diaphragm [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2015, 225: 25-32.

[6] Fujiwara E, Delfino T D S, Cabral T D, et al. All-optical fiber anemometer based on the pitot-static tube[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1805-1811.

[7] 李立彤,张东生,文晓艳,等. 微型光纤F-P传感器用于材料

热膨胀系数的测量[J]. 光电子·激光，2014(11)：2130-2135.
Li Litong, Zhang Dongsheng, Wen Xiaoyan, et al. Miniature optical fiber F-P sensor for the measurement of material thermal expansion coefficient[J]. J. of Optoelectronics · Laser, 2014(11): 2130-2135.

[8] 沈小燕，蓝旭辉，朱鹤年，等. 基于法布里-珀罗标准具的亚微米级位移测量方法[J]. 中国激光，2019，46(12)：1204002.
Shen Xiaoyan, Lan Xuhui, Zhu Henian, et al. Submicron displacement measurement method based on Fabry-Perot etalon [J]. Chinese Laser, 2019, 46(12): 1204002.

[9] Yang Y B, Wang D N, Xu B, et al. Optical fiber tip interferometer gas pressure sensor based on anti-resonant reflecting guidance mechanism[J]. Optical Fiber Technol., 2018, 42(MAY): 11-17.

[10] Yu Qingxu, Zhou Xinlei. Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 72-83.

[11] Pinggang J, Hao L, Guocheng F, et al. Batch-producible MEMS fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature application[J]. Appl. Opt., 2018, 57(23): 6687-6692.

[12] Luo C, Liu X, Liu J, et al. An optimized PDMS thin film immersed Fabry-Perot fiber optic pressure sensor for sensitivity enhancement[J]. Coatings, 2019, 9(5): 290.

[13] 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(1)：39-43.
Hu Yihui, Jiang Chao, Sun Simei, et al. High sensitivity capillary structure optical fiber gas pressure sensor[J]. J. of Optoelectronics · Laser, 2018(1): 39-43.

[14] Bae H, Zhang X M, Liu H, et al. Miniature surface-mountable Fabry-Perot pressure sensor constructed with a 45° angled fiber[J]. Opt. Lett., 2010, 35(10): 1701-1703.

[15] Jia L, Pinggang J, Huixin Z, et al. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on low-temperature co-fired ceramic technology for high-temperature applications[J]. Appl. Opt., 2018, 57(15): 4211-4215.

[16] 姜　源，江　毅，张柳超，等. 基于飞秒激光加工的无膜光纤气体压力传感器[J]. 激光与光电子学进展，2019，56(10)：49-53.
Jiang Yuan, Jiang Yi, Zhang Liuchao, et al. Filmless optical fiber gas pressure sensor based on femtosecond laser processing [J]. Progress in Laser and Optoelectron., 2019, 56(10): 49-53.

[17] Wang G, Huang M, Liu J, et al. Fabrication and pressure sensing characterization of an ultrathin egg-shaped microbubble[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2018, 72: 165-174.

[18] Zhang H X, Liu J, Li J S, et al. Miniature all-silica microbubble-based fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with pressure leading-in tube[J]. J. of Sensors, 2019: 1-7.

[19] Kong X, Ren K, Ren L, et al. Chiral long-period gratings: fabrication, highly sensitive torsion sensing and tunable single-band filtering[J]. Appl. Opt., 2017, 56(16): 4702-4707.

[20] Liu J, Jia P, Zhang H, et al. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on low-temperature co-fired ceramic technology for high-temperature applications[J]. Appl. Opt., 2018, 57(15): 4211-4215.

作者简介：

张皓月(1995—)，男，河北廊坊人，硕士研究生，主要从事光纤传感器和光纤微结构加工方面的研究；

祝连庆(1963—)，男，浙江兰溪人，博士，教授，主要从事光纤传感技术和光学测量方面的研究。