

飞秒激光在单模光纤中精密加工微孔及其传感应用

王解, 赵宗晨, 江超*, 刘昌宁, 孙四梅

湖北师范大学物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002

摘要 利用飞秒激光油液辅助的加工方式, 在单模光纤端面附近制作出 $20\ \mu\text{m}$ 直径的精密柱形微孔。利用微孔与光纤端面形成了具有明显光拍和游标效应的法布里-珀罗传感器, 实现了对环境参数的测量。实验结果显示了传感器对外界温度、湿度、折射率以及气压具有较好的线性响应, 传感器具有 $-0.0669\ \text{dB}/^\circ\text{C}$ 的低温灵敏度、 $0.74\ \text{nm}/\% \text{RH}$ 的湿度灵敏度、 $6.5\ \text{nm}/\text{RIU}$ 的折射率灵敏度、 $12.23\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 的高温灵敏度以及 $1.743\ \text{dB}/\text{MPa}$ 的气压灵敏度。该传感器具有制作简单、性能稳定、结构紧凑等优点。

关键词 激光光学; 飞秒激光精密加工; 光纤微孔; 光纤传感; 游标效应; 法布里-珀罗传感器

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111425

Femtosecond Laser Precision Machining of Micropores in Single-Mode Fiber and Sensing Application

Wang Jie, Zhao Zongchen, Jiang Chao*, Liu Changning, Sun Simei

College of Physics and Electronic Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China

Abstract In this paper, a precision cylindrical micropore with a diameter of $20\ \mu\text{m}$ near the end face of a single-mode optical fiber was fabricated by means of femtosecond laser oil-assisted machining method. A Fabry-Perot sensor with obvious light beat and Vernier effect was formed through the micropores and the end face of the optical fiber, which realized the measurement of environmental parameters. Experimental results show that the sensor has a good linear response to external temperature, humidity, refractive index, and gas pressure. The sensor exhibits a cryogenic sensitivity of $-0.0669\ \text{dB}/^\circ\text{C}$, a humidity sensitivity of $0.74\ \text{nm}/\% \text{RH}$, a refractive index sensitivity of $6.5\ \text{nm}/\text{RIU}$, a high temperature sensitivity of $12.23\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, and a gas pressure sensitivity of $1.743\ \text{dB}/\text{MPa}$. The sensor has the advantages of simple fabrication, stable performance, and compact structure.

Key words laser optics; femtosecond laser precision machining; fiber micropores; fiber sensing; Vernier effect; Fabry-Perot sensor

OCIS codes 140.3390; 060.2370; 230.2285; 280.4788

1 引言

光纤微孔传感器因体积小、结构简单、灵敏度高等特点一直受到较多关注^[1-3], 而飞秒激光由于其峰值功率高、脉冲宽度小等较好的加工性能, 广泛应用于光纤微孔传感器的制作。采用飞秒激光制作微孔传感器过程中, 基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)原理的微孔传感器因对微孔的加工质量要求不高, 更加易于制备^[4-6]。而基于法布里-珀罗干涉仪(FPI)原

理构成的微孔传感器需要较为平行的孔壁作为反射镜面, 所以对加工精度有一定要求, 但由于 FPI 微孔传感器具有结构紧凑、分辨率高、稳定性好等优点, 人们一直没有停止对于飞秒激光加工高质量 FPI 微孔传感器的研究^[7-8]。因此有人利用飞秒激光在光纤端面打孔, 通过拼接后形成气泡, 制作出 FPI 微孔传感器^[9]; 有人利用飞秒激光在光纤端面附近直接加工出一个折射率修正区, 其与光纤端面构成 FPI 传感器^[10-11]。但利用激光直接烧蚀的加

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-03-29; 录用日期: 2020-04-07

基金项目: 湖北师范大学 2019 年科研创新团队计划 (2019CZ09)

* E-mail: jiangchao1969@126.com

工方式加工 FPI 微孔传感器,存在重复性低、微孔质量难以控制的问题,且大多应用在特种光纤中,成本较高。

2006 年 Lai 等^[12]利用飞秒激光加工微孔后利用氢氟酸(HF)进行腐蚀,后在单模光纤上得到直径为 4 μm 的微孔,并对透射光谱性能进行了研究。化学腐蚀辅助加工的方法在对微孔质量要求较高的情况下成为一种不错的解决方式^[13-14]。但 HF 较为危险,且腐蚀过程中微孔进出口与纤芯腐蚀的时间不一致会导致微孔的形状有一定的破坏。在 FPI 微孔传感器研究中,一种具有不同观测尺度的光学游标效应被人们所熟知^[15-18]。一般采用级联两个干涉仪的形式获得游标效应,也有人在光纤端面附近加工 FPI,使其与端面一起实现了游标效应^[19]。

本文在光纤端面附近进行加工,对微腔的长度进行精确控制,微孔孔壁和光纤端面形成多个微腔,构成 FPI 微孔传感器,产生一定的游标效应,不使用化学腐蚀方法而利用飞秒激光加工柱形微孔,详细介绍了微孔的加工过程,多次实验后所得微孔的直径能控制在 18~21 μm 之内;对 FPI 微孔传感器的传感参数进行了测试,实现了环境参数的测量。FPI 微孔传感器对温度、湿度、折射率和气压都有不同程度的响应,具有重复性高、制作简单、结构紧凑等特点。

2 柱形微孔的制备

本文在普通单模光纤上进行微孔加工,单模芯径为 9 μm ,包层直径为 125 μm ,采用折射率为 1.47 的折射率匹配油液作为辅助液体。飞秒激光波长为 800 nm,频率为 1 kHz,脉冲宽度为 40 fs。激光口出光功率为 4.74 W,激光经过光阑和衰减片以及偏振分束镜后进入 20 倍物镜,激光进入倍镜之前的能量为 5.86 mW 时有最佳结果,经 20 倍物镜聚焦后激光光束直径约为 10 μm 。通过 CCD 对加工过程进行观测。被加工单模光纤一端进行端面切平,另一端连接环形器,光从光源经过环形器到达端面再到光谱仪(AQ6370D),从光谱可以看出,光谱仪波长分辨率为 0.02 nm,强度分辨率为 0.001 dB。制作过程如下:

1) 辅助液体及 V 槽准备。因光纤为圆柱形,在垂直纤芯方向打孔时加工距离较深,且经过纤芯时纤芯折射率不同会使加工激光有一定程度的偏折,为加工带来困难,难以得到较为理想的微孔。因此本文在加工过程中采用了液体辅助的方法,采用较

为常见的蒸馏水、乙醇、丙酮以及折射率为 1.47 的折射率匹配液进行实验,实验发现丙酮和乙醇挥发较快,且会使激光对孔壁造成极大的破坏,最后选择效果较好的折射率匹配液作为加工辅助液体。为防止光纤受激光能量影响时发生平移,将光纤放置在制作好的玻璃 V 槽中,添加折射率为 1.47 的折射率匹配液,V 槽以及油液使得光纤圆柱形状带来的影响降至最低,近似于加工平面物体。油液浸没光纤 3/4~4/5,最理想的情况为全部浸没,但由于加工中气泡的影响难以消除,只能接近浸没光纤,施加激光后会使光纤受力往下微弯,油液刚好浸没光纤进入孔洞。

2) 加工方式选择。激光加工较长玻璃微孔时有选择地从底部聚焦再向顶部移动平台,形成柱孔,但因为光纤折射率分布与均匀玻璃介质不同,且激光聚焦光纤底部时油液受激光照射后会使光纤发生移动。所以本文选择将激光焦点聚焦在光纤微孔入口处,再往对侧移动,也达到利用液体带出激光烧蚀的碎屑的作用。将光纤端面切平后放入 V 槽,通过计算机控制三维平台移动,使激光焦点从柱形微孔入口往出口处移动,经过 10 s 左右持续烧蚀,将光纤打穿,打穿时间与能量和油液多少有关。在激光刚打穿光纤时孔洞还有一定的锥度且出口处孔径较小,再移动平台使激光焦点回到顶部,停留时间较长时微孔直径会增大,直到稍大于光束直径形成较好的柱形,这对光纤表面损伤较小,且孔壁较光滑。微孔直径与激光光束直径大小、加工时间以及激光加工功率有关,激光功率增大时对材料的烧蚀区域增大,孔径会有一定程度的增大^[20]。

加工完成后微孔直径约为 20 μm 。从图 1(a)可以看出,入口与出口直径相差较小,由于微孔两壁近乎平行,所以微孔的入口直径和出口直径差远小于微孔深度,锥度(K)极小 $[K = (D - d)/H]$,其中 D 为入口处直径, d 为出口处直径, H 为微孔深度],加工质量较高。孔壁两侧和光纤端面形成 3 个反射镜面,构成多个 FPI,且形成光拍,具有游标效应,光路示意图如图 2 所示。

光经过传感器被镜面 1、2、3 分别反射回纤芯中,产生干涉,形成稳定的光谱,如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,微孔结构带来的光谱中形成了较稳定的光拍,微孔与端面加工距离用 L 表示,利用上述参数加工了 L 为 70, 80, 90 μm 的传感器,对比不同加工距离光谱图后选择包络最为明显的传感器($L = 80 \mu\text{m}$)进行传感测量。从

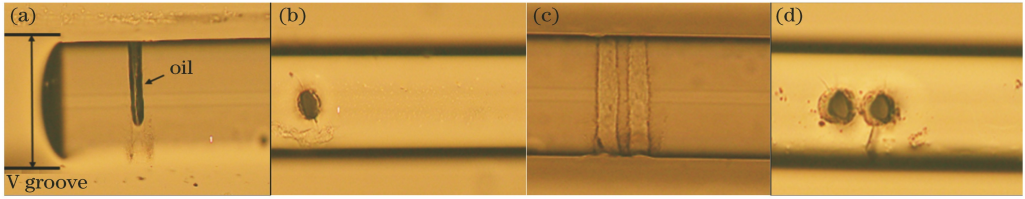


图1 柱形微孔显微图。(a)单孔侧面图;(b)单孔顶部图;(c)2孔侧面图;(d)2孔顶部图

Fig. 1 Micrographs of columnar microholes. (a) Side view of single hole; (b) top view of single hole; (c) side view of two holes; (d) top view of two holes

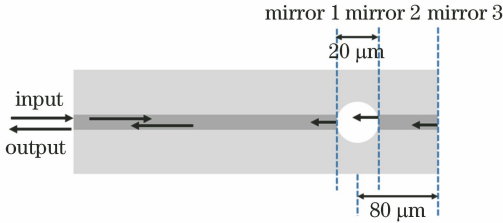


图2 传感器光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor optical path

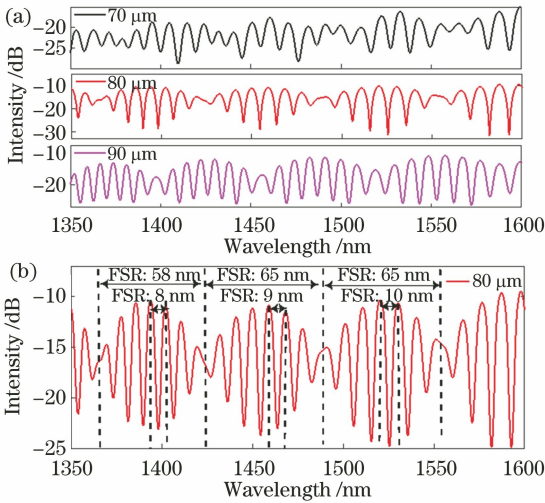


图3 传感器反射光谱。(a) $L=70, 80, 90 \mu\text{m}$;
(b) $L=80 \mu\text{m}$

Fig. 3 Reflection spectra of sensor. (a) $L=70, 80, 90 \mu\text{m}$;
(b) $L=80 \mu\text{m}$

图3(b)可以看出,不同光拍内的自由光谱范围(FSR)并不完全一致,在温度测量中表现为越往后的光拍中,波谷变化越大,在气压测量中相邻光拍连接处变化不同,所以在后续实验中选取1400~1600 nm光谱进行观测。对光谱进行傅里叶频谱转化得到图4,因为构成光谱的模式成分较复杂,所以不同的环境参数对每个波谷的影响也不尽相同。

3 光纤柱形微孔的传感应用

3.1 透射谱折射率实验

在对微孔的传感器应用探索中,发现当连接宽

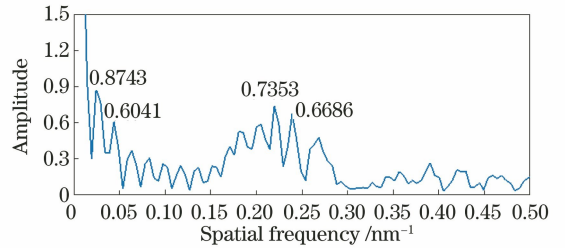


图4 传感器的傅里叶频谱图

Fig. 4 Fourier frequency spectra of sensor

带光源时,未观测到明显的透射干涉光谱图。但当利用激光光源时,发现输出的激光光谱强度与微孔中滴入的液体折射率相关。因此采用中心波长为1550.12 nm的激光器作为光源,光经过微孔后进入光谱仪(AQ6370D),在微孔处滴入不同折射率的液体,每次测量后用乙醇清洗干净,再进行下一次测量。得到的测试结果如图5所示。

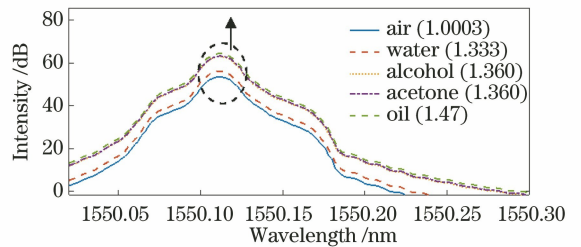


图5 折射率变化下的传感器透射光谱图

Fig. 5 Transmission spectra of sensor under change of refractive index

通过观测发现虽然随着折射率的改变,光谱强度也在改变,但其变化并无较好的规律性,每一种液体的折射率都有对应的强度,对应关系如图6所示。

从图6中未能看出透射光谱强度随着折射率的变化有规律性地变化,只能看出不同折射率有相应的透射谱强度与之对应,乙醇和丙酮的折射率相近表现在图6中为强度相近,因此本文未利用微孔传感器的透射谱进行其他物理量的传感研究。

3.2 低温实验

低温实验装置按照图7进行连接,光经宽带光

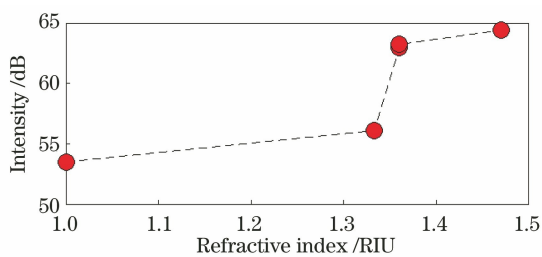


图 6 传感器在不同折射率下的透射光谱强度
Fig. 6 Transmission spectral intensity of sensor under different refractive indices

源(BBS)发出后传到环形器到达结构,反射后进入光谱仪(AQ6370D),实验采用可程式恒温恒湿试验箱,温控精度为 0.01 °C。实验中温度变化范围为 35~115 °C,每隔 10 °C 记录一次光谱变化,当温度到达设定温度后保持 15 min 再记录光谱。箱内存在一定的湿度,使光谱形状发生变化,取出后复原。将传感头伸入试验箱后塞紧炉塞。

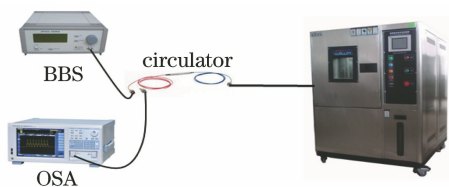


图 7 低温装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cryogenic device

不同温度下传感器变化对应的光谱图如图 8 所示。由图中可以看到,随着温度的升高,干涉光谱逐渐下移,波长越长的光拍下移量越多。所以选择最右端的波谷作为观测点 dip1,对应波长为 1592 nm。当温度恢复到初始温度时,光谱恢复初始状态。图 9 为 dip1 峰值强度随温度变化的拟合图,从图中可以看到 1592 nm 处拟合系数为 0.9593,低温灵敏度为 $-0.0669 \text{ dB}/^\circ\text{C}$,低温分辨率约为 0.015 °C。

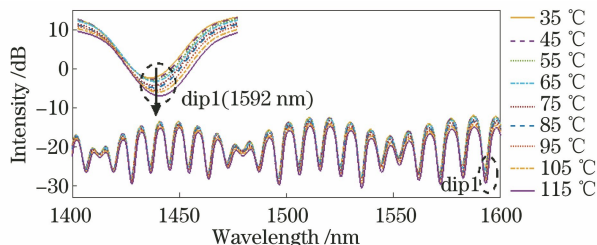


图 8 温度变化下的传感器光谱图

Fig. 8 Spectra of sensor under temperature change

3.3 湿度实验

湿度实验装置与低温实验相同,在低温实验完成后,等待试验箱恢复正常温度 30 min 后进行湿度实验,试验箱相对湿度(RH)精度为 0.1%,湿度实

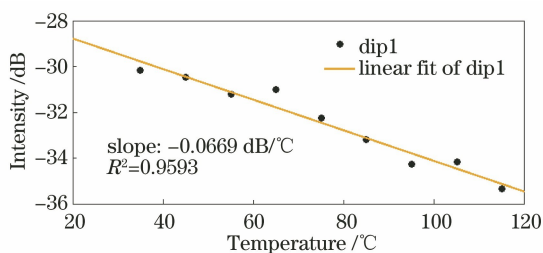


图 9 dip1 处低温实验线性拟合

Fig. 9 Linear fitting at dip1 for cryogenic experiment

验中,温度恒定为 50 °C,实验时发现传感器对于低湿度变化没有规律性可循。但当温度为 50 °C,高湿度(86%以上)变化时,传感器具有较好的规律性。实验时,以 2%湿度变化间隔记录传感器光谱变化。在湿度变化恒定后保持 5 min 记录光谱。图 10 为传感器随湿度增加的光谱图。选取波长 1575 nm 为观测点 dip1,从光谱中可以看到:随着湿度的增加,波长逐渐红移,湿度减小后光谱逐渐恢复,从试验箱中取出传感器,用乙醇清洗后恢复初始光谱。图 11 为 dip1 波长变化与湿度拟合图,可以得到 dip1(1575 nm)处线性拟合度为 0.9918,灵敏度为 0.66 nm/%RH,湿度分辨率约为 0.027%RH。

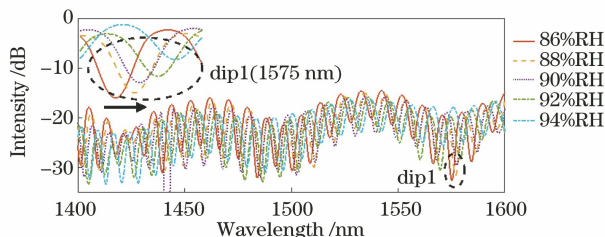


图 10 湿度变化下传感器的光谱图

Fig. 10 Spectra of sensor under humidity change

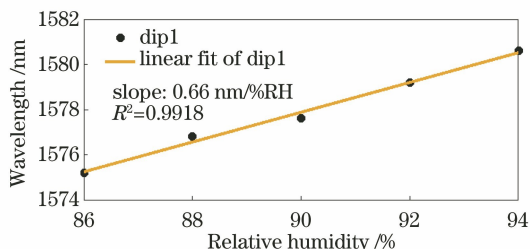


图 11 dip1 处湿度实验线性拟合

Fig. 11 Linear fitting of humidity experiment at dip1

3.4 折射率实验

将传感器从恒温恒湿试验箱中取出后使用乙醇清洗,自然干燥后进行折射率实验,实验装置如图 12 所示。光由宽带光源发出后经过环形器到达传感头,传感头浸入溶液,光经过传感头,再到达光谱仪。测量后用乙醇清洗传感头,避免溶液残留对实

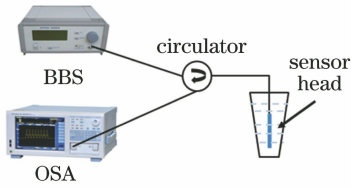


图 12 折射率装置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of refractive index device

验产生影响。折射率液体由饱和氯化钠溶液与蒸馏水以不同浓度配制而成,折射率变化范围为 1.333~1.5146。

图 13 是传感器折射率实验光谱图,与初始光谱相比较强度下降较多,因传感头浸没在溶液中后,端面与微孔同时浸没在溶液中,许多原本在纤芯中传播的光未反射回纤芯,取出传感头并用乙醇清洗干净后,恢复为初始光谱。从图中可以看出,随着折射率的变化光谱呈现红移,选取其中 1510 nm 处作为观测点 dip1,观察光谱后发现波长漂移较明显,强度变化远小于波长变化。对实验结果进行拟合分析后得到的结果如图 14 所示,线性拟合度为 0.9721,线性度较好,灵敏度为 6.5 nm/RIU,折射率分辨率约为 3.1×10^{-3} RIU。

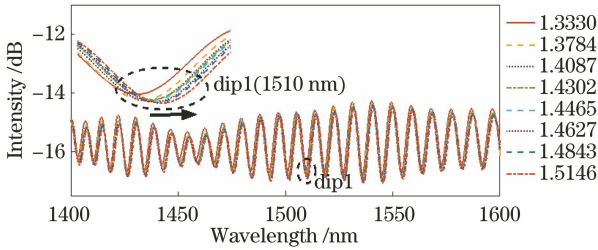


图 13 折射率变化下传感器光谱图

Fig. 13 Spectra of sensor under refractive index change

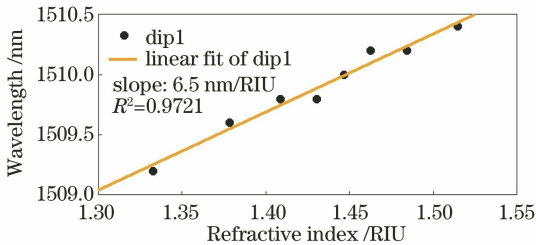


图 14 dip1 处折射率实验线性拟合

Fig. 14 Linear fitting of refractive index experiment at dip1

3.5 高温实验

高温实验测量装置如图 15 所示,将传感头伸入高温实验炉炉管中,光由宽带光源经过环形器到达传感头再反射到光谱仪。温度范围为 130~610 °C,每隔 80 °C 记录一次光谱,到达设定温度后停留 15 min 确保光谱稳定,使用的高温炉精度为 1 °C。

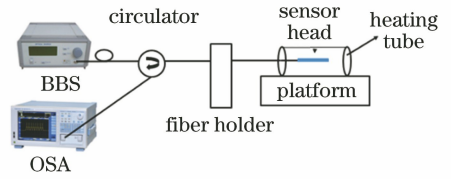


图 15 高温装置示意图

Fig. 15 Schematic diagram of high temperature device

高温实验光谱图如图 16 所示,经过观察后发现高温实验结果呈现出与低温实验结果不同的温度特性,随着温度升高光谱逐渐红移,且波谷沿着包络向长波长移动,所以选择较为平坦的一组波谷作为参考点,且对照后发现与低温下类似的现象,波长越长的光拍变化幅度越大,因此选择 1581 nm 处作为观测点 dip1。对 dip1 进行拟合分析,结果如图 17 所示,线性度为 0.9719,灵敏度为 12.23 pm/°C,高温分辨率约为 1.6 °C。

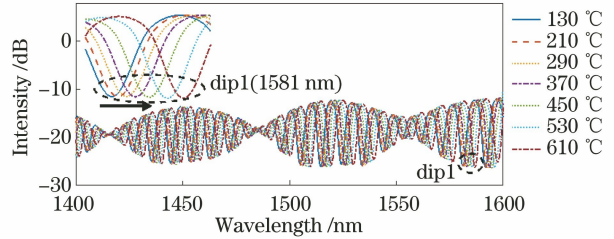


图 16 温度变化下传感器光谱图

Fig. 16 Spectra of sensor under temperature change

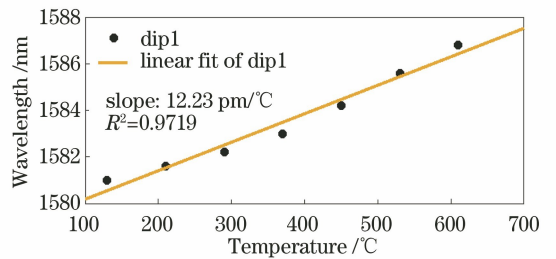


图 17 dip1 处高温实验结果线性拟合

Fig. 17 Linear fitting of high temperature experimental results at dip1

3.6 气压实验

气压实验装置示意图如图 18 所示,气压测试装置由气室、气压计和可增减气压的气泵组成。传感头伸入三通,由软管连接气压计和气泵形成气室,用 AB 胶将气室密封。通过手动给气室线性增大或减小气压,压力范围为 0.1~0.8 MPa,每隔 0.1 MPa 记录一次光谱,每次记录前保持 15 min。

图 19 为传感器随气压变化的光谱图。从光谱中看到:随着气压的增加,光谱的强度出现变化,光拍波长未发生变化。中心处强度在一个光拍内部变

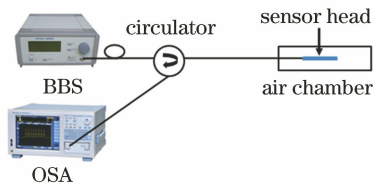


图 18 气压装置示意图

Fig. 18 Schematic diagram of gas pressure device

化较小,在边缘处变化明显,且有两个光拍连接处左、右波谷强度变化相反的情况,因此选择靠近连接处波长为 1495 nm 的波谷作为观测点 dip1。对 dip1 的变化情况进行线性拟合,所得结果如图 20 所示,线性度为 0.9725,有较好的线性关系,灵敏度为 1.743 dB/MPa,气压分辨率约为 5.7×10^{-4} MPa。

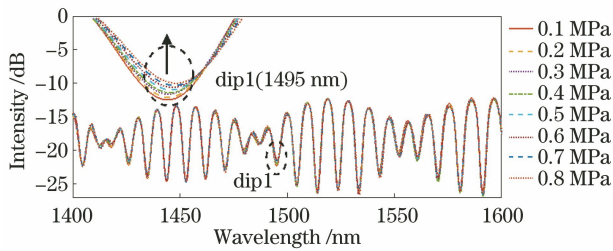


图 19 气压变化下传感器光谱图

Fig. 19 Spectra of sensor under gas pressure change

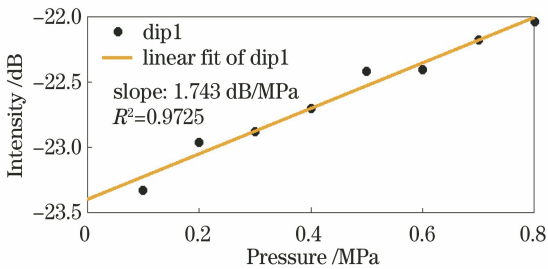


图 20 dip1 处气压实验结果线性拟合图

Fig. 20 Linear fitting of gas pressure experimental results at dip1

在进行温度、湿度、折射率以及气压的单独测量后得到:除湿度外,传感器对外界参数的变化可以呈现为波长或者强度的单一变化,对折射率以及高温的变化呈现为波长变化,对低温以及气压的变化呈现为强度变化。因此传感器可以实现对低温和折射率、高温和气压的同时测量且无交叉敏感;在相邻光拍取两点可剔除气压影响,在同一光拍取两点可剔除温度影响,从而实现传感器对低温与气压的同时测量,而传感器对于高温与折射率、气压与折射率的同时测量较难实现。而由于湿度对光谱形状的影响较大,只适合进行单独测量,所以难以进行三参量的同时测量。

4 结 论

利用飞秒激光液体辅助的加工方式,不使用化学腐蚀在单模光纤上制作出直径为 $20 \mu\text{m}$ 的柱形微孔,微孔与光纤端面能构成多个 FPI,产生明显的光拍以及游标效应。该微孔传感器在传感测量中对温度和气压变化的响应表现为:当温度改变时,波长越长,光拍变化幅度越大,相同光拍内的波谷变化相同;随着高温变化,波谷红移过程中强度沿包络发生改变;而气压改变时,光谱波长不变动,相邻光拍节点左、右波谷强度变化相反,同一光拍内中心处强度变化幅度较小,而节点附近变化明显。因此同时测量高温和气压时能够避免交叉敏感问题。该加工方式制作的微孔传感器具有结构紧凑、体积小、无交叉敏感、成本低等优点,在光纤传感领域有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wang Y, Yang M W, Wang D N, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(3): 370-374.
- [2] Bai L, Zhao X L, Liu Y, et al. Optical fiber micro-hole sensor fabricated with femtosecond laser [J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 101-104. 柏玲, 赵秀丽, 刘一, 等. 飞秒激光制备光纤微孔传感器[J]. 激光技术, 2013, 37(1): 101-104.
- [3] Dong W C, Wei J, Wang X H, et al. Liquid refractive index sensor based on polymer fiber with micro-holes created by femtosecond laser[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9): 090601.
- [4] Li Z Y, Liao C R, Wang Y P, et al. Ultrasensitive refractive index sensor based on a Mach-Zehnder interferometer created in twin-core fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 4982-4985.
- [5] Hou M X, Zhu F, Wang Y, et al. Antiresonant reflecting guidance mechanism in hollow-core fiber for gas pressure sensing[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27890-27898.
- [6] Dong H Y, Liu C N, Sun S M, et al. Optical fiber high-temperature and refractive index sensor fabricated by femtosecond laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170633. 董航宇, 刘昌宁, 孙四梅, 等. 飞秒激光制作的光纤

- 高温和折射率传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170633.
- [7] Yang F, Tan Y Z, Jin W, et al. Hollow-core fiber Fabry-Perot photothermal gas sensor [J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3025-3028.
- [8] Jiang Y, Jiang Y, Zhang L C, et al. Non-diaphragm fiber gas pressure sensor based on femtosecond laser machining [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100601.
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): 100601.
- [9] Ran Z L, Rao Y J, Liu W J, et al. Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 2252-2263.
- [10] Chen P C, Shu X W, Cao H Y, et al. Ultra-sensitive refractive index sensor based on an extremely simple femtosecond-laser-induced structure [J]. Optics Letters, 2017, 42(6): 1157-1160.
- [11] Chen P C, Shu X W. Refractive-index-modified-dot Fabry-Perot fiber probe fabricated by femtosecond laser for high-temperature sensing [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5292-5299.
- [12] Lai Y, Zhou K, Zhang L, et al. Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. Optics Letters, 2006, 31(17): 2559-2561.
- [13] Li Z Y, Liao C R, Chen D N, et al. Label-free detection of bovine serum albumin based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometric biosensor [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17105-17113.
- [14] Zhou P, Liao C R, Li Z Y, et al. In-fiber cascaded FPI fabricated by chemical-assisted femtosecond laser micromachining for micro-fluidic sensing applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3214-3221.
- [15] Dai D X. Highly sensitive digital optical sensor based on cascaded high-Q ring-resonators [J]. Optics Express, 2009, 17(26): 23817-23822.
- [16] Jin L, Li M Y, He J J. Highly-sensitive optical sensor using two cascaded-microring resonators with Vernier effect [C] // Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, November 2 - 6, 2009, Shanghai. Washington, D. C.: OSA, 2009: TuM4.
- [17] Yang Y, Xu B, Liu Y M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 094205.
杨易, 徐贲, 刘亚铭, 等. 基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 094205.
- [18] Liu Y Y, Liu L, Liu X Q, et al. Sensitivity improvement of Fabry-Perot sensor based on vernier effect [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0428001.
刘燕燕, 刘磊, 刘雪强, 等. 基于 Vernier 效应的法布里-珀罗传感器增敏方法[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0428001.
- [19] Gomes A D, Becker M, Dellith J, et al. Multimode Fabry-Perot interferometer probe based on vernier effect for enhanced temperature sensing[J]. Sensors, 2019, 19(3): 453.
- [20] Zhang Y J, Song H Y, Liu H Y, et al. Fabrication of millimeter-scaled holes by femtosecond laser filamentation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402012.
张艳杰, 宋海英, 刘海云, 等. 飞秒激光成丝制备毫米级深孔[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402012.