

· 光学设计 ·

一种基于微孔FP腔结构的光纤温度传感器

刘颖刚¹, 梁星¹, 刘鑫¹, 杨武海¹, 张伟²

(1. 西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 利用准分子激光器在普通单模光纤上加工微孔, 制作了一种微孔结构型的光纤 Fabry-Perot (FP) 腔, 并对该微孔型光纤 FP 腔的温度特性进行了理论和实验研究。研究表明, 当外界环境温度变化时, FP 腔腔长和腔中介质的折射率会发生变化, 致使传感器输出光谱发生漂移。通过观测光谱对应的峰值或谷值的漂移量, 即可实现对环境温度的传感检测。实验结果发现, 随着温度的升高, 波长逐渐向短波方向方发生漂移, 且波长的漂移量温度变化呈线性关系, 其对应的温度灵敏度和线性度分别为 $-0.152 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 98.8% 。该微孔结构型光纤 F-P 腔温度传感器具有结构简单、成本低廉、实用性好等优点, 可以适应不同温度的需要, 研究结果可为该种器件在传感中的应用提供一定参考。

关键词: 光纤法布里珀罗传感器; 温度特性; 准分子激光器; 传感

中图分类号: TP212.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0006-04

A Fiber Temperature Sensor Based on Micro-hole Fabry-Perot Cavity

LIU Ying-gang¹, LIANG Xing¹, LIU Xin¹, YANG Wu-hai¹, ZHANG Wei²

(1. Key Laboratory of Photo-electricity Gas & Oil Logging and Detecting of Education Department, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A micro-hole structure fiber Fabry-Perot (FP) cavity is fabricated using an excimer laser to process a micro-hole in single mode fiber (SMF). And the theoretical and experimental research of temperature response characteristics of the FP cavity is performed. Research results show that when the temperature of external environment changes, the FP cavity length and the refractive index of medium in the cavity will change, which will lead to sensor output spectrum shifting. By observing the shifting of the peak or valley values of spectrum, the sensing inspection of environment temperature can be realized. Experimental results show that spectrum shifts to short wavelength gradually with the increasing of temperature. The wavelength shifting is linear with the temperature changing, and the corresponding temperature sensitivity and linearity are $-0.152 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and 98.8% respectively. The micro-hole structure fiber FP temperature sensor has the advantages of simple structure, low cost and good practicability, and it can meet the needs of different temperatures. The research results can provide a reference for the application of this device in sensing.

Key words: fiber Fabry-Perot interferometric sensor; temperature characteristics; excimer laser; sensing

随着光纤传感技术的发展, 基于光纤的新型传感器研究与应用成为了研究热点。特别是在干涉

型传感器的研究中, 提出了多种光纤干涉型传感器件, 比如光纤马增干涉仪、光纤迈克耳逊干涉仪、光

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划(2013JM8032); 陕西省教育厅科研计划(14JK1423)和国家级大学生创新创业训练计划项目(201610705020)

作者简介: 刘颖刚(1977-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光纤传感技术与应用方面的研究。

纤萨格纳克干涉仪以及光纤法布里珀罗干涉仪等,并将这些传感器件应用于不同领域不同物理量的测量,展现了干涉型光纤传感器的诸多优点。然而,伴随光纤传感器朝着微型化、低成本、耐恶劣环境和实用化方面的发展^[1-3],传统结构的基于双光束干涉型光纤传感器已经达不到体积微型化的要求,在制作中还要满足两路光程差要足够小,这些问题导致要通过手动方法控制双光路光程差,以实现高对比度清晰的干涉光谱,在实践中存在诸多困难。因此,在Lee和Taylor成功制备本征型^[4]和非本征型光纤FP传感器^[5]以后,光纤法布里珀罗干涉型传感器便逐渐成为传感器家族的重要成员^[6-13]。由于具有可调自由谱范围和高对比度的传输光谱,又兼备微型化传感特点,使得光纤法布里珀罗(FP)传感器或滤波器件的研究与应用不断取得新进展。先后提出了化学腐蚀法、电弧放电法、飞秒激光加工法以及聚合物辅助制备等方法^[14-15],虽各有优缺点,但整体上依然存在制作工艺复杂、成本较高的问题。研究中,利用ArF准分子激光器,通过对光路进行改造,结合化学腐蚀方法,成功制备了单微孔型光纤FP腔传感器,并将该种传感器应用于温度的测量,获得了较好的温度响应灵敏度和线性度。和飞秒激光加工法相比,该方法工艺简单,能够有效降低制作成本。而且,通过采用新型功能材料的封装保护处理,也能制作气体和液体温度、压力以及折射率传感器件等,这些必将有助于推动光纤FP腔型传感器件的进一步实用化。

1 微孔结构光纤传感机理

微孔结构型光纤传感器,就其本质而言,就是在光纤上加工不同尺寸的微孔构成光纤FP干涉腔。如图1所示。

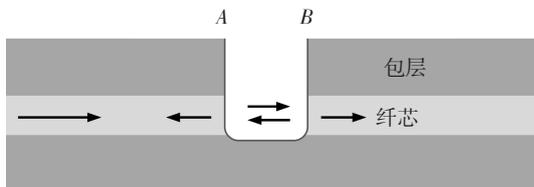


图1 微孔型光纤FP腔结构原理图

光纤内的传输光进入微腔后,将在两个端面A、B间被多次反射,在输出端产生了一系列光频率相同而振幅递减的平行光束,且任意两相邻光束之间光程差都相同,它们相互叠加形成多光束干涉,在

光纤的两端可以观测FP腔的反射或透射光谱,其透射干涉光谱图样的强度可以表示为^[17]

$$I_t = \frac{T^2}{(1-R) + 4R\sin^2(\delta/2)} I_i \quad (1)$$

其中, I_i 和 I_t 分别为入射和透射光场强度; R 和 T 分别为反射端面的反射率和透射率,理想状况下,应有 $R+T=1$ 。当任意两相邻光束的相差 δ 满足关系式(2)或式(3)时,透射光谱有最大输出光强 $I_{t-\max}$ 和最小输出光强 $I_{t-\min}$ 。其中, λ_p 和 λ_d 分别对应光强最大和最小时的入射光波长; n 是腔内介质的折射率; L 是A、B腔面间距(即FP腔的有效长度); φ_0 是FP腔初始的相位; k 为整数,代表干涉光谱的级次。

$$\frac{4\pi nL}{\lambda_p} + \varphi_0 = 2k\pi \quad (2)$$

$$\frac{4\pi nL}{\lambda_d} + \varphi_0 = (2k+1)\pi \quad (3)$$

因此,当腔内介质折射率 n 或腔长 L 发生变化时,由式(2)和式(3)可知,光谱光强最大和最小处对应的波长会相应改变,即当观测某一确定级次的光谱峰值或谷值的波长时,波长均会随折射率 n 或腔长 L 的增大而向长波方向漂移,反之则会向短波方向漂移。故而,通过观测光谱某一峰值或谷值对应波长的移动,即可实现对改变腔内介质折射率 n 或腔长 L 的因素的传感测量。由于FP腔所处环境的温度变化时,光纤热膨胀效应以及腔内介质热光效应会影响腔长 L 和腔内介质折射率 n ,因此通过观测光谱峰值或谷值波长的漂移,即可实现对温度的传感测量。其自由谱范围可以表示为^[18]

$$\Delta = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (4)$$

对式(3)两边分别求导得到温度传感公式^[19]为

$$\frac{d\lambda_k}{dT} = \frac{4}{2k+1} \left(\frac{dn}{dT} L + \frac{dL}{dT} n \right) \quad (5)$$

其中, $\frac{dn}{dT}$ 是腔内介质热光效应; $\frac{dL}{dT}$ 是光纤热膨胀效应。当FP腔内介质是空气时,光纤热膨胀效应占主导位置,当温度升高时,干涉光谱会向长波漂移;

当FP腔内介质是水时,温度的升高,会使水的折射率降低,所以腔内介质热光效应占主导位置,此时干涉光谱向短波漂移。

2 光纤微孔FP腔的制备

实验中,使用输出波长为193 nm的准分子激光器作为刻写光源,实验所用的光纤均为长飞公司

生产,单模光纤的纤芯和包层直径为 $8.5\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$,制备与测试系统原理如图2所示。

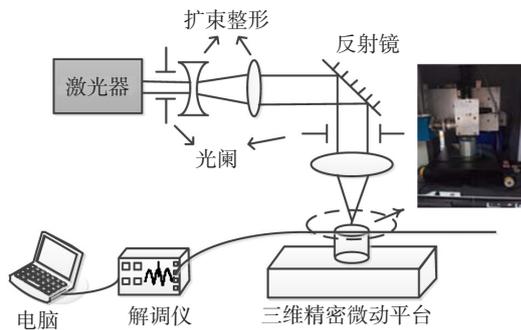


图2 制备与测试系统原理图

剥除光纤的涂覆层后,用酒精清洗;将光纤固定在载玻片上,并将载玻片放置在三维精密微动平台上,启动准分子激光器,并调节三维精密微动平台和光路系统使激光光斑聚焦在纤芯的中轴线位置;设置准分子激光器的脉冲次数为300~1 000次,准分子激光器的输出波长为193 nm、脉冲能量为10~30 mJ、频率为300 Hz,开始加工,得到光纤微孔FP腔。制作的FP腔长为 $75\ \mu\text{m}$ 。图3为微孔型光纤FP腔结构实物图。

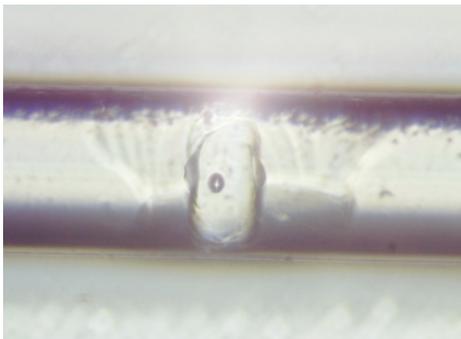
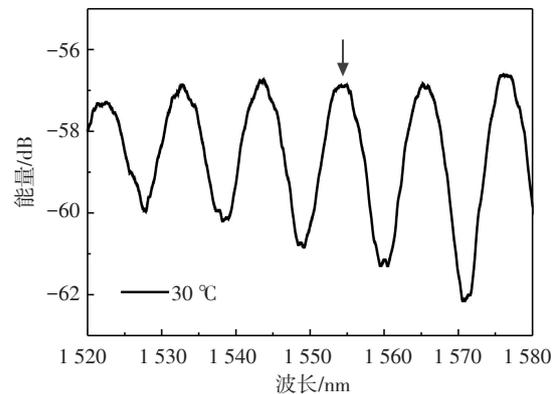


图3 微孔型光纤FP腔结构实物图

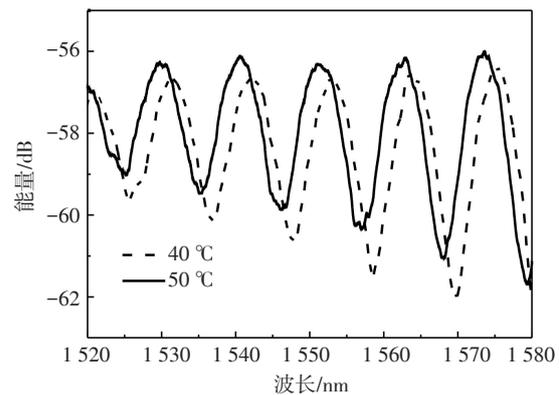
3 温度传感实验研究

由于该传感器主要用来测量温度与波长漂移的关系,所以测量时必须将该传感器置于一定的温度环境中。温度的改变,主要依靠水浴法来完成。在测量范围30~75 $^{\circ}\text{C}$ 内,每隔5 $^{\circ}\text{C}$ 进行测试,共10个测试点,利用光纤光栅传感解调仪(sm125)采集每个采样温度的干涉谱图样,并利用软件Origin Pro 9进行数据处理。

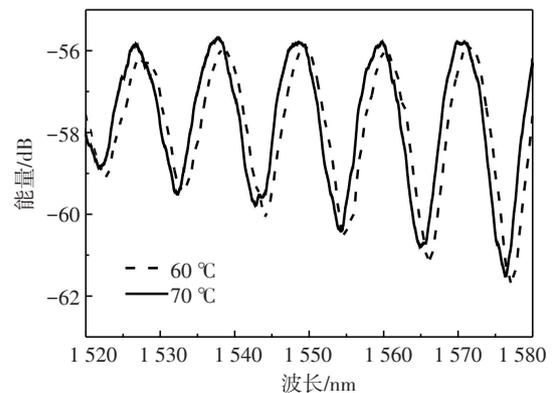
图4是不同温度下的光谱与波长漂移拟合曲线。



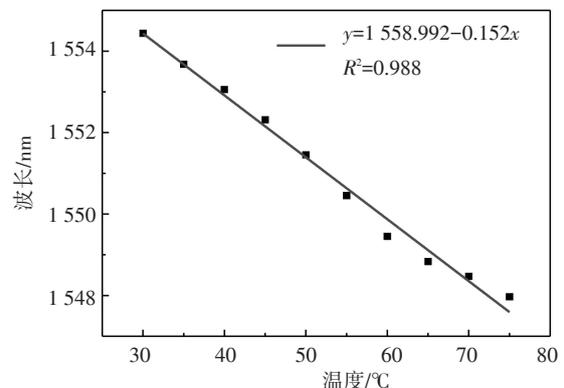
(a)30 $^{\circ}\text{C}$ 时的光谱图



(b)40 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 下的光谱图



(c)60 $^{\circ}\text{C}$ 、70 $^{\circ}\text{C}$ 下的光谱图



(d)波长随温度变化拟合曲线

图4 不同温度下的光谱与波长漂移拟合曲线

图4a是初始温度30℃采集到的传感器光谱,图4b和图4c分别是温度为40℃和50℃、60℃和70℃下采集的传感器光谱。从图中可见,当温度升高时,干涉谱的波长向短波漂移。图4d给出了整个降温过程中,1555nm附近峰值波长(如图4a箭头标示)随温度的变化曲线。经过拟合后,线性方程为 $y = 1558.99 - 0.152 \times x$,线性度达到0.988,这说明干涉光谱的波长漂移与温度变化接近线性关系,该传感器在整个温度变化过程中的温度响应灵敏度为 $-0.152 \text{ nm}/\text{℃}$,相比于普通光纤光栅温度传感器,其灵敏度提高了一个数量级。传感器由于体积小,易制作,具有广泛的应用前景。

4 结 论

基于现有的光纤FP腔干涉传感器的制作及运用基础上,设计了一种基于微孔结构型光纤F-P腔传感器并对其温度传感特性进行了理论研究和实验验证。文中传感器主要是利用193nm准分子激光器在普通单模光纤上制作微孔以构成FP腔的两个平行反射面,该微孔的腔长为75 μm 。在温度实验中,测定了单孔FP腔传感器的干涉光谱在温度改变下的波长漂移,并对测量的结果线性拟合,得到单孔FP腔的灵敏度为 $-0.152 \text{ nm}/\text{℃}$ 。准分子激光器和单模光纤的使用减少了制作成本,且该制作方法简单,传感器灵敏度高,为FP腔的制作方法提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 高桥清,庄庆德.展望21世纪新技术革命中的传感器[J].传感器技术,2001,20(1):1-3.
- [2] 吕涛.敏感型Fabry-Perot腔高精度光纤角位移传感器研究[D].重庆:西南师范大学,2005.
- [3] 刘丽华,王军,新力,等.光纤温度传感器的应用及发展[J].仪器仪表学报,2003,24(5):547-550.
- [4] Lee C E, Taylor H F. Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors[J]. Electronics Letters, 1988, 24(4): 193-194.
- [5] Lee C E, Taylor H F, Markus A M, et al. Optical-fiber Fabry-Perot embedded sensor[J]. Optics Letters, 1989, 14(21):1225-1227.
- [6] 毕卫红,王昕,郎利影.光纤Fabry-Perot干涉式温度测量[J].光电子·激光,2002,13(12):1316-1316.
- [7] 张桂菊,于清旭,宋世德.基于F-P腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J].中国激光,2005,32(2):228-231.
- [8] Wang Y, Wang D N, Liao C R, et al. Temperature-insensitive refractive index sensing by use of micro Fabry-Pérot cavity based on simplified hollow-core photonic crystal fiber[J]. Opt Lett, 2013, 38(3): 269-271.
- [9] Pevec S, Donlagic D. High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Opt Express, 2014, 22(13): 16241-16243.
- [10] Liu Y, Qu S L. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown for refractive index sensing[J]. Applied Optics, 2014, 53(3): 469-474.
- [11] Gao S, Zhang W, Bai Z Y, et al. Microfiber-enabled in-line Fabry-Pérot interferometer for high-sensitive force and refractive index sensing[J]. Lightwave Technology Journal, 2014, 32(9):1682-1688.
- [12] Gong Y, Yu B, Wang T, et al. Highly sensitive force sensor based on optical microfiber asymmetrical Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Express, 2014, 22(3):78-84.
- [13] 付彩玲,夏巨江.膜片式FP光纤压力传感器[J].科技研究,2014,7(11):49-52.
- [14] 赵娜.光纤温度、折射率传感器研究[D].西安:西安石油大学,2015.
- [15] 饶云江,邓明,朱涛.飞秒激光加工的高对比度法布里-珀罗干涉传感器[J].中国激光,2009,36(6):1459-1462.
- [16] 王玉田.光电子学与光纤传感器技术[M].北京:国防工业出版社,2003:136-142.
- [17] 王真真.集成式光纤Michelson-FP复合型干涉仪的理论与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [18] Liao C R, Hu T Y, Wang D N. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing[J]. Opt Express, 2012, 20(20): 22813-22818.
- [19] Zhang Y N, Yuan L, Lan X W, et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4609-4612.