

文章编号 1004-924X(2019)04-0766-05

端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器

冯文林^{1,2*}, 彭 进¹, 余佳浩¹, 鲜 爽¹, 陈 翠¹

(1. 重庆理工大学 理学院 物理与能源系, 重庆 400054;
2. 绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要:针对环境测温,特别是在复杂环境中温度传感器的小体积、低成本、抗干扰以及高灵敏度的要求,提出了基于端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感探头。以长为 2 cm 的光子晶体光纤作为第一个 F-P 腔体,在它的一个端面熔接普通单模光纤,熔接面形成第一个反射镜面;然后,在它另一个端面熔接多模光纤,熔接面形成第二个反射镜面;最后,以多模光纤作为第二个 F-P 腔体,并用氢氟酸将其刻蚀成探针结构,同时在腔体末端形成了第三个反射镜面。以此复合结构作为传感探头,结合多光束干涉的传感原理,构造了双 F-P 结构的波长调制型传感器,并搭建了温度传感测试系统。测试结果表明:在 28~81 °C 内,随着温度增加,该传感器的反射光谱波长逐渐红移,温度与波长偏移量的线性相关系数高达 0.998 37;该传感器传感性能良好,灵敏度达 64.6 pm/°C。该传感器在复杂环境中对小范围温度测量具有潜在的应用价值。

关键词: 光纤传感;双法布里-珀罗干涉;温度测量;光纤腐蚀

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192704.0766

Double Fabry-Pérot fiber optic temperature sensor based on end-face corrosion

FENG Wen-lin^{1,2*}, PENG Jin¹, YU Jia-hao¹, XIAN Shuang¹, CHEN Cui¹

(1. Department of Physics and Energy, School of Science,
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials
Technology and Systems, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: wenlinfeng@126.com

Abstract: To fulfill the requirements of small volume, low cost, anti-interference ability, high sensitivity, and real-time and accurate temperature measurement in a complex environment, a double Fabry-Pérot (F-P) fiber optical temperature sensor based on end-face corrosion was proposed. The sensor was fabricated by fusion Endlessly Photonic Crystal Fiber (EPCF) with a Multi-Mode Fiber (MMF). There are three F-P reflectors: one between the Single-Mode Fiber (SMF) and EPCF, one between EPCF and MMF, and one at the interface of MMF and air. The first F-P cavity was formed

收稿日期: 2018-11-05; **修订日期:** 2019-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51574054); 重庆市科技局社会事业与民生保障科技创新专项 (No. cstc2017shmsA20017); 重庆市高校创新团队资助项目 (No. CXTDX201601030); 重庆理工大学研究生创新重点资助项目 (No. ycx2018104)

by the fusion of a SMF and a 2-cm EPCF, the second F-P cavity was formed by fusion splicing an MMF and EPCF; finally, a probe structure was obtained by hydrofluoric acid etching. A wavelength modulation sensor with double F-P structure was constructed by using the composite structure as the sensing probe and the multi-beam interference sensing principle. Simultaneously, a temperature sensing test system was constructed. Results show that in the range of 28-81 °C, the wavelengths of the reflection spectra appear red-shifted with increasing temperature, and the linearity between temperature and wavelength shift is 0.998 37. The sensor has high sensitivity, which reaches up to 64.6 pm/°C. These sensors may have a potential application for small-range temperature measurements in complex environments.

Key words: fiber optic sensing; dual Fabry-Pérot interferometer; temperature measurement; fiber corrosion

1 引言

光纤传感器具有精度高、体积小、抗电磁干扰和耐腐蚀性等优点,因此在医疗^[1]、地质探测^[2]、航海^[3]等领域得到了广泛应用。例如,法布里-珀罗(F-P)型光纤温度传感器自20世纪80年代起被广泛应用于军事和民用领域。在恶劣环境以及特殊工业领域,微型F-P光纤温度传感器也发挥着重要作用^[4]。目前,常用传感器有热电偶和红外测温传感器。热电偶的导线很容易腐蚀,从而导致短路,同时制作成本高昂、工序复杂^[5-6];红外测温仪的测量结果容易受到背景辐射、测量距离和气体组成等因素的影响^[7-9]。因此,结构稳定、成本低廉、抗干扰能力强的微型F-P光纤温度传感器有很好的应用前景。

微型F-P光纤温度传感器大体分为本征型和非本征型两种。国内外学者对此类传感器进行了广泛研究。Hae Young Choi等人设计了基于光子晶体光纤和空芯光纤的温度传感器,其线性度良好^[10]。刘加萍等人利用石英毛细管制备温度传感器,其灵敏度为6.083 pm/°C^[11]。Xinpu Zhang等人利用布拉格光栅和空气腔制备成微型温度传感器,其灵敏度可以达到7.82 pm/°C^[12]。Zhenshi Chen等人利用超细纤维制作高精度温度传感器,其灵敏度为13.6 pm/°C^[13]。Haihu Yu等人利用光子晶体光纤构造出F-P腔体,使得温度传感器的灵敏度达到15.61 pm/°C^[14]。Jun-Long Kou在光纤尖端利用激光刻蚀了空气孔形成F-P腔体,温度传感器的灵敏度达到20 pm/°C^[15]。现有的F-P测温研究工作已有了很好探索,但其灵敏度等方面还需要进一步提升。

本文将单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)

和无截止波长光子晶体光纤(Endlessly Photonic Crystal Fiber, EPCF)进行特殊程序熔接,通过多次熔接实验,改变相应熔接参数探究出最佳熔接效果;同时将多模光纤一端进行刻蚀,制备出微型双F-P光纤温度传感器结构。为了探究传感器的温度特性,进行了温度测试实验。结果表明,干涉光谱呈现明显红移,且波谷偏移量与温度呈线性关系,灵敏度也相对较高。简洁的传感单元使得制作工艺简单,成本低廉;同时传感器又是全光纤结构,从而使稳定性、抗腐蚀性及抗干扰能力得以保障。该传感器对比于同类型F-P型温度传感器灵敏度得到有效提升;与热电偶和红外测温仪传感器相比,本研究提出的传感器在恶劣环境以及特殊工业领域小范围温度测量时干扰更少,测试结果更加可靠。

2 理论分析

传感器的基本原理如图1所示。光束经过两个F-P腔后被多次反射,三块平行的反射镜面形成两个光学谐振腔。在检测信号过程中,一束光经过第1个镜面反射一部分光,透射另一部分光进入第2反射镜面;再在第2端面反射一部分光,透射另一部分光进入第3个反射镜面,再在第3个镜面反射一部分光。因此 I_{10} (第1镜面反射的光束)和 I_{20} (第2镜面反射的最终回到SMF中的光束)以及 I_{30} (第3镜面反射的最终回到SMF中的光束)形成干涉光谱,从而可以通过检测反射波的信息来判断调制信号,将多光束简化为三光束反射后光干涉的情况,其光强 I_0 为^[16-19]:

$$I_0 = I_{10} + I_{20} + I_{30} - 2\sqrt{I_{10}I_{20}}\cos(\Delta\varphi_1) - 2\sqrt{I_{30}I_{20}}\cos(\Delta\varphi_2) + 2\sqrt{I_{30}I_{10}}\cos(\Delta\varphi_3), \quad (1)$$

其中: $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$ 分别表示对应相叠加两束光的相位差。当传感器置于温度变化的环境中, 光纤的热光效应和光纤的热膨胀效应会直接引起上述因素的变化, 从而产生相位变化(忽略泊松效应)^[20]。

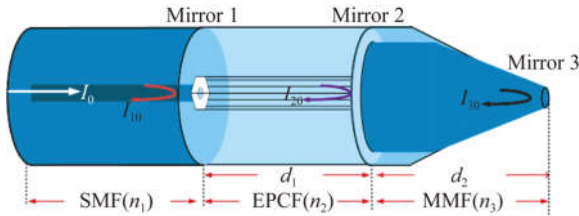


图 1 传感探头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor probe

当任意两相邻光束的相差 $\Delta\varphi$ 满足如下条件时, 呈现干涉相消。

$$\Delta\varphi = 4nd\pi/\lambda = (2m+1)\pi, \quad (2)$$

其中: n 是腔内介质折射率, λ 为入射光的波长, d 是腔面间距, 整数 m 代表干涉光谱的级次。即当观测某一个确定波谷值时, 波谷会随着 n 和 d 的变化而变化。

由温度引起的相位变化为:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_L + \Delta\varphi_n, \quad (3)$$

其中 $\Delta\varphi_L, \Delta\varphi_n$ 分别为光纤长度变化产生的相位变化(热膨胀效应)及光纤折射率变化产生的相位变化(热光效应)。

当长度变化为 ΔL 时, 相位变化量^[18-19]为:

$$\Delta\varphi_L = \frac{4\pi}{\lambda} n \Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} n \cdot \frac{\partial L}{\partial T} \Delta T. \quad (4)$$

当折射率变化为 Δn 时, 相位变化量为:

$$\Delta\varphi_n = \frac{4\pi}{\lambda} L \Delta n = \frac{4\pi}{\lambda} L \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T. \quad (5)$$

两者都是由于温度变化引起的相位改变, 因此温度改变为 ΔT 时相位变化为:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_L + \Delta\varphi_n = \frac{4\pi}{\lambda} \left[n \cdot \frac{\partial L}{\partial T} + L \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \right] \Delta T = (2m+1)\pi, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\Delta T} = 4 \left(n \cdot \frac{\partial L}{\partial T} + L \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \right) / (2m+1), \quad (7)$$

式中: $\partial L/\partial T$ 为光纤热膨胀系数, $\partial n/\partial T$ 为光纤折射率随温度变化的系数。由式(7)可以看出, 在相同干涉级下, 波长的移动正比于温度的变化。

3 温度传感实验

3.1 传感器制备

该传感器的制备材料及实验仪器有: 普通

SMF 和多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF), 纤芯和包层直径均为 $105 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$; EPCF, 其包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 具有直径为 $9.5 \mu\text{m}$ 的空气孔, 呈六边形结构排列; 古河 S178C 光纤熔接机; 康冠 ASE 宽带光源; 河南濮阳 CIR-1 \times 2-1550-900-1-FA 环形器; 横河 AQ6370D 型光谱分析仪等。

去除 MMF 和 EPCF 外面的涂覆层, 然后用切割刀将其两端面切平得到长度约为 2 cm 的 EPCF 和 0.5 cm 的 MMF。将 EPCF 与 MMF 进行特殊熔接, 熔接后的多模光纤端放入氢氟酸中腐蚀 25 min, 得到如图 2 所示的显微结构, 探头尖端长度为 $202 \mu\text{m}$, 末端直径为 $5.07 \mu\text{m}$ 。MMF 与 EPCF 特殊熔接时, 放电强度太小, 时间太短会使熔接面达不到干涉所需要的反射率; 放电强度过大, 放电时间过长会使熔接面形成坍塌层, 不能形成 F-P 干涉仪。因此经过多次试验, 探究出最佳熔接程序, 参数如表 1 所示。最终, 制备完整的传感探头的总体长度约为 2.02 cm, 将探头与传光光纤 SMF 熔接, 即完成传感器制备。

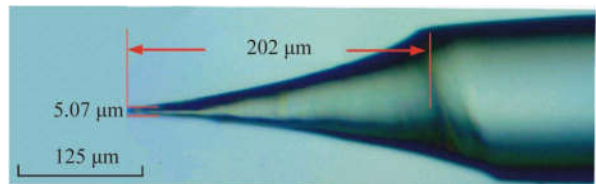


图 2 光纤端面局部结构显微图

Fig. 2 Micrograph structure of fiber tip

表 1 光纤熔接参数

Tab. 1 Parameters of fiber welding

操作步骤	参数	操作步骤	参数
首次放电开始强度	+65	再次放电强度	+100
首次放电时间/ms	+150	再次放电时/ms	+150
放电强度补偿值	+65	再放电间隔/ms	+1 000
清洁放电偏差/ms	+20	轴偏移类型	1
清洁放电偏差/ms	+150	对准方式	1
预熔时间	+150	Z 推进距离/ μm	+15
中心偏移/ μm	-30	端面间隔/ μm	+20

3.2 温度传感测试

温度传感性能测试的实验装置如图 3 所示, 温度测试装置为真空干燥箱(型号: DZF-6020), 图 4 为温度测试范围为 $28 \sim 81^\circ\text{C}$ 的干涉光谱图。

由图4可见,随着温度的增大,传感器输出光谱呈现明显的红移现象。以1533 nm波长处的反射光谱波谷为参考,对光谱偏移量进行计算,得到输出光谱偏移量与所测温度的关系,如图5所示,可见线性拟合度良好,线性相关系数为0.99837,灵敏度为64.6 pm/°C,光谱发生红移。实验结果与理论分析具有较好的一致性。

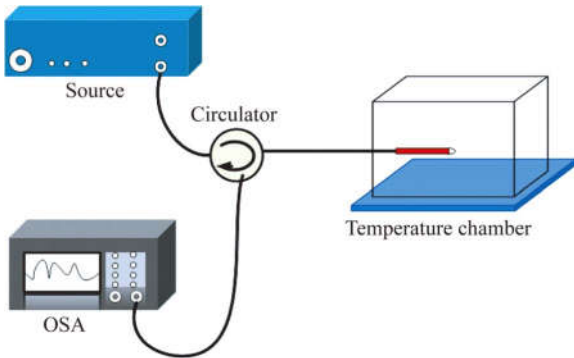


图3 温度传感器实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for temperature sensor

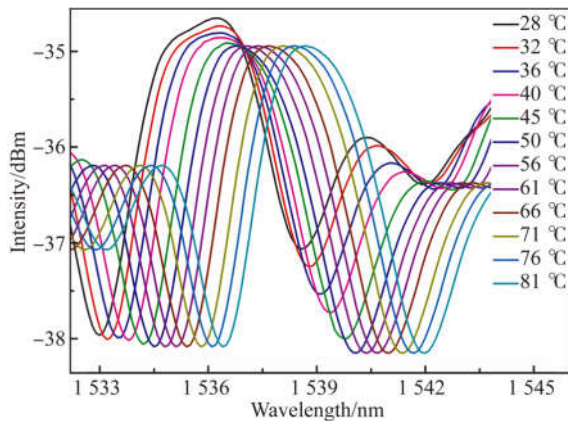


图4 反射光谱与温度的关系

Fig. 4 Relation between reflectance spectra of sensor and temperature

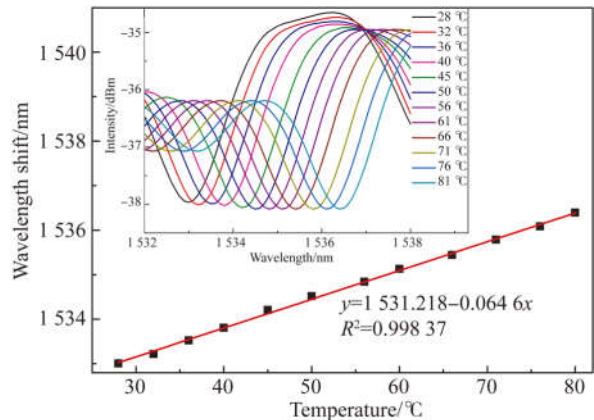


图5 输出光谱偏移量与所测温度的关系图,插入图为不同温度所对应的反射光谱图

Fig. 5 Wavelength shift as a function of temperature. Inset shows reflectance spectra of sensor at different temperatures

4 结论

本文基于多光束干涉理论,提出微探针式双F-P型光纤温度传感器的制备方法。通过探究不同光纤间熔接程序的参数,形成了满足反射要求的F-P反射镜面,并利用氢氟酸刻蚀法制备出了长为202 μm,末端端面直径为5.07 μm的微型探针。对传感器进行了温度性能测试实验,结果表明:随着温度的增大(在28~81 °C),所设计的光纤温度传感器的反射光谱发生红移,且波长漂移量与温度呈现良好的线性关系,线性相关系数为0.99837,灵敏度达64.6 pm/°C。该传感器具有体积小、重量轻、易于制备、灵敏度高、抗干扰强等优点,在小范围温度测量领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] 田赫,陈天庭,白岩,等. 玻璃封装医用小型光纤光栅温度传感探头[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12):3105-3110.
TIAN H, CHEN T T, BAI Y, *et al.*. Medical miniature fiber grating temperature sensing probe encapsulated with glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 3105-3110. (in Chinese)
- [2] 赵斌,仲志成,林君,等. 基于光纤光栅传感地层应力的监测方法与实验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):346-352.
HAO B, ZHONG ZH CH, LIN J, *et al.*. Monito-

- ring method and experiment for stratum stress based on fiber Bragg grating sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 346-352. (in Chinese)
- [3] 吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2):311-317.
WU J, WU H P, HUANG J H, *et al.*. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 311-317. (in Chinese)
- [4] 李自亮,廖常锐,刘申,等. 光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7):102-118.
LI Z L, LIAO CH R, LIU SH, *et al.*. Research

- progress of optical fiber Fabry-Pérot interference temperature pressure sensing technology [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2017,66(7): 102-118. (in Chinese)
- [5] ZHAN G C, TONG X Y, SONG L P, *et al.*. Research progress and development of sapphire fiber sensor [J]. *Sens. Transducers*, 2014,174: 8-13.
- [6] SLONEKER K C. Life expectancy study of small diameter type E, K, and N mineral-insulated thermocouples above 1 000 °C in air [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2011,32: 537-547.
- [7] 张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术 [J]. *中国光学*, 2014,7(1): 150-155. ZHANG X L, LIU Y, WANG J, *et al.*. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures [J]. *Chinese Optics*, 2014,7(1): 150-155. (in Chinese)
- [8] SAUNDERS P, FISCHER J, SADLI M, *et al.*. Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2008,29: 1066-1083.
- [9] HAO X, YUAN Z, LU X, *et al.*. Size-of-source effect difference between direct and indirect methods of radiation thermometers [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2011,32: 1655-1663.
- [10] CHOI H Y, PARK K S, PARK S J, *et al.*. Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Pérot interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2008,33(21): 2455-2457.
- [11] 刘加萍, 王彦, 刘吉虹. 非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017(11): 65-70. LIU J P, WANG Y, LIU J H. Temperature characteron of extrinsic fiber Fabry-Pérot interferometric sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017(11): 65-70. (in Chinese)
- [12] ZHANG X, PENG W, SHAO L Y, *et al.*. Strain and temperature discrimination by using temperature-independent FPI and FBG [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2018,272: 134-138.
- [13] CHEN Z, XIONG S, GAO S, *et al.*. High-temperature sensor based on Fabry-Pérot interferometer in microfiber tip [J]. *Sensors*, 2018,18(1): 202-208.
- [14] YU H, WANG Y, MA J, *et al.*. Fabry-Pérot interferometric high-temperature sensing up to 1200 °C based on a silica glass photonic crystal fiber [J]. *Sensors*, 2018,18(1): 273-281.
- [15] KOU J L, FENG J, YE L, *et al.*. Miniaturized fiber taper reflective interferometer for high temperature measurement [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(13): 14245-14250.
- [16] JIA P, FANG G, LIANG T, *et al.*. Temperature-compensated fiber-optic Fabry-Pérot interferometric gas refractive-index sensor based on hollow silica tube for high-temperature application [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2017,244: 226-232.
- [17] FERREIRA M S, COELHO L, SCHUSTER K, *et al.*. Fabry-Pérot cavity based on a diaphragm-free hollow-core silica tube [J]. *Opt. Express*, 2011,36: 4029-4031.
- [18] QUAN M G, TIAN J J, YAO Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Pérot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect [J]. *Opt. Lett.*, 2015,24: 4891-4894.
- [19] TAN X, LI X, GENG Y, *et al.*. Polymer microbubble-based Fabry-Pérot fiber interferometer and sensing applications [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015,27: 2035-2038.
- [20] 段丹阳, 程进, 高然, 等. 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的温度传感器 [J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(4): 124-127. DUAN D Y, CHENG J, GAO R, *et al.*. Temperature sensor based on fiber Fabry-Pérot interferometer [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017,36(4): 124-127. (in Chinese)

作者简介:



冯文林(1976—),男,四川南部人,博士,教授,2008年于四川大学获得博士学位,2009—2011年重庆大学“光学工程”博士流动站博士后,2011—2012年清华大学访问学者,2013—2014年美国阿肯色大学访问学者,主要从事光电功能材料与器件方面的研究。E-mail: wenlinfeng@126.com



彭进(1994—),女,重庆大足人,硕士研究生,2017年于绵阳师范学院获得学士学位,主要从事光纤传感与检测方面的研究。E-mail: 1823510572@qq.com