

引用格式: LIU Tian-mu, JIANG Yi, CUI Yang, *et al.* Photonic Crystal Fiber Temperature and Pressure Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0406001

刘天沐,江毅,崔洋.光子晶体光纤温度压力传感器[J].光子学报,2020,**49**(4):0406001

光子晶体光纤温度压力传感器

刘天沐^{1,2},江毅^{1,2},崔洋^{1,2}

(1 北京理工大学 光电学院,北京 100081)

(2 信息光子技术工业和信息化部重点实验室,北京 100081)

摘要:提出了一种在高温环境下同时测量温度和气压的光子晶体光纤温度压力传感器.在普通单模光纤和光子晶体光纤之间熔接一段空心光纤构成干涉结构,空心光纤段构成非本征法布里-珀罗干涉仪,利用光子晶体光纤的微孔与外界相通,通过气体折射率变化来测量环境中的气压变化;光子晶体光纤段构成本征法布里-珀罗干涉仪,利用热膨胀效应和热光效应来测量环境中的温度.传感器的解调通过自制的白光干涉解调仪实现,实验通过测量腔长得到被测环境的温度和气压.在不同温度和气压环境下,对腔长分别为 306 μm 和 1 535 μm 的温度压力光纤传感器进行连续测量.实验结果表明,传感器能够在 28~800 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下和 0~10 MPa 的气压下稳定工作,测量范围内温度灵敏度可达 17.4 $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$,压力灵敏度随温度增加而降低,在 28 $^{\circ}\text{C}$ 时可达 1 460.5 nm/MPa .

关键词:光纤传感;温度压力传感器;外腔型法珀干涉仪;光子晶体光纤;快速傅里叶变换

中图分类号:TP212

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0406001

Photonic Crystal Fiber Temperature and Pressure Sensor

LIU Tian-mu^{1,2}, JIANG Yi^{1,2}, CUI Yang^{1,2}

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

(2 Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An hybride optical fiber sensor is presented for the measurement of temperature and pressure in high temperature environment. The sensor is based on the configuration of an extrinsic Fabry-Perot interferometer(EFPI), which is formed by a Hollow Core Fiber(HCF) sandwiched between a section of Single Mode Fiber(SMF) and a section of of Photonic Crystal Fiber(PCF), and an intrinsic Fabry-Perot Interferometer(IFPI), which is formed by a section of PCF. Temperature measurement is achieved by thermal expansion effect and thermooptic effect, while pressure measurement is realized by the change of refractive index of gas. The demodulation of the sensor was realized by a self-made white light interferometry demodulator. In the environment of different temperature and pressure, the temperature and pressure optical fiber sensors whose cavity length is 306 μm and 1 535 μm were measured continuously. The experimental results show that the pressure sensitivity decreased with the increase of temperature. 1 460.5 nm/MPa is achieved at the temperature of 28 $^{\circ}\text{C}$ and the temperature response of the EFPI cavity is 17.4 $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$. The sensor is able to operate stably at temperature of 28~800 $^{\circ}\text{C}$ and pressure of 0~10 MPa.

Key words: Fiber sensor; Temperature and pressure sensor; Extrinsic Fabry-Perot interferometers;

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61775020, 61575021),国家高技术研究发展计划(No.2015AA043504)

第一作者:刘天沐(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感.Email:liu_tianmu@163.com

导师(通讯作者):江毅(1967-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感.Email:bitjy@bit.edu.cn

收稿日期:2019-12-02;录用日期:2020-02-17

Photonic crystal fiber; Fast Fourier transform

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 280.4788; 120.2230; 220.4000

0 引言

随着科技的发展,各行各业对高温环境下的温度和压力数据测量的需求也越来越大^[1].目前,能够应用在高温环境下的压力传感器,无论是在民用还是军用方面,都已开始广泛使用,民用方面如:石油钻井内部的温度压力测量、钢铁冶炼塔内的温度压力测量和汽车发动机内的温度压力测量等;军用方面,如航天飞船的发动机检测、坦克船舶发动机内温度压力测量等.因此恶劣高温环境下可靠准确的压力传感技术已经成为当前的重要研究方向^[2].

光纤传感器自 20 世纪 70 年代诞生以来,凭借着自身耐高温、抗电磁干扰、体积小耐腐蚀、无源等特点^[3],已经广泛用于各个领域,高温压力传感领域也已经成为了重要分支^[4-5].压力光纤传感器主要包括光栅光纤和光纤法珀两种.光纤光栅耐高温性较差,通常的光纤光栅在 300 °C 以上时紫外光写入的光栅就会被擦除^[6-7].光纤法珀型传感器不仅抗干扰能力强,且对光源功率波动和光纤损耗变化不敏感,因此大型结构的高温健康检测时,会使用这种结构的光纤传感器^[8-9].

法珀结构的光纤传感器一般属全石英结构,特点是耐高温性好,这种传感器基于多光束干涉原理,大致结构分为本征型法布里-珀罗干涉仪(Intrinsic Fabry-Perot Interferometer, IFPI)和非本征型法布里-珀罗干涉仪(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI).本征型结构的光纤传感器特点是其 FP 腔是光纤本身,其测量原理是利用热光效应和热膨胀效应.这种光纤传感器的理论测量温度通常都可以达到光纤所使用材料的熔点,实现的方法大体分为两种:一种是通过光纤端面镀膜,这种方法的缺点是会涉及复杂的镀膜工艺,并且薄膜在熔接或高温时容易损坏^[10].而 IFPI 结构则是通过特殊光纤和普通光纤之间的折射率差来形成 F-P 腔^[11].如 RAO Jiang-yun 等将单模光子晶体光纤熔接到普通单模光纤的末端,利用折射率差异制作了 IFPI 结构的光纤传感器^[12-13].非本征型结构的传感器通常是利用光纤本身的端面作为一个反射面,另外在光纤外部外加一个反射面让其构成 F-P 腔形成干涉.其结构通常分为两类:一种为膜片式,腔内外由膜片隔开,当内外存在气压差时,膜片会受到挤压产生形变,引起腔内光程变化^[14].另一种气压传感器的结构为开放式,让 F-P 腔与外界相通,当环境中气压升高时腔内的气压会一同上升,腔内气体的折射率发生变化,引起光程变化^[15].

在实际应用时,能够对不同类型参数同时进行的测量的复合传感器更容易满足实际使用的要求,如在进行高温压力测量时,环境内的温度也常常是关心的变量,一方面温度本身就对环境内的气压有影响,另一方面温度的数据也有助于后续的温度补偿数据处理等处理.本文的传感器便是基于 EFPI 和 IFPI 的双 F-P 结构的光纤复合传感器,在进行高温温度测量的同时能够测量环境中的气压.传感器是在单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)后依次熔接一段空心光纤(Hollow Core Fiber, HCF)和一段光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF),形成 SMF-HCF-PCF 结构.该方案利用特定长度的 HCF 和 PCF 形成两个特定长度的 F-P 腔:空心光纤为测量气压 EFPI 腔,利用不同气压下空心光纤中空气的折射率会发生变化实现压力测量;光子晶体光纤为温度 IFPI 腔,主要利用热光效应进行测量.从反射光谱中解调出两个腔腔长的变化从而可以得出环境中温度和气压.该传感器能够在 40~800 °C 的温度和 0~10 MPa 的气压下同时实现温度和气压的测量.

1 传感器的制作与原理

光子晶体光纤温度压力复合传感器的制作,最主要的部分是利用熔接的方法制作 SMF-HCF-PCF 结构的双 FP 腔.传感器的具体结构、显微镜照片以及封装如图 1.其中 L_1 为 HCF 的长度, L_2 为 PCF 的长度.传感器的具体加工步骤如图 2.

首先将单模光纤和空芯光纤熔接,如图 2(a)所示,注意放电参数不要让空芯光纤塌陷.然后取约 300 μm 左右的 HCF,在显微镜的辅助下将多余的 HCF 用光纤切割刀切断,如图 2(b).之后再取一段 PCF,在熔接机上选取合适的参数将 PCF 和切割平整的 HCF 熔接,如图 2(c)所示,需要注意的是参数的选择不要让 PCF

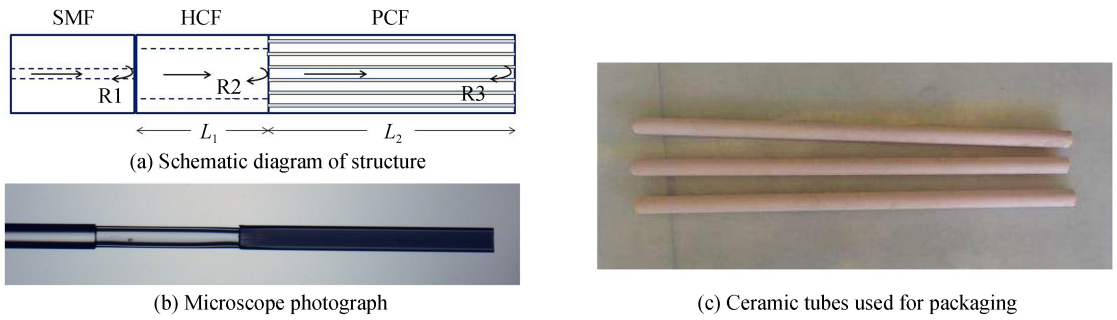


图 1 光子晶体光纤温度压力传感器结构、照片与封装

Fig.1 Structure, photograph, packaging of photonic crystal fiber temperature and pressure sensor

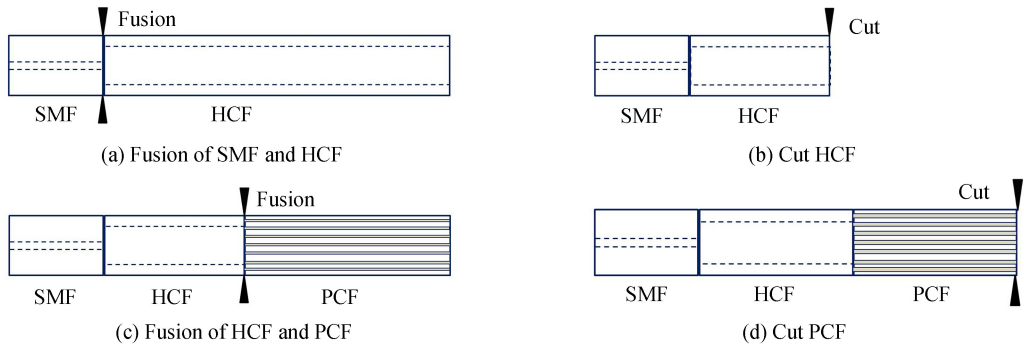


图 2 传感器制作过程

Fig.2 Manufacturing process

中的细孔塌陷,否则会影响气压的测量.最后留下约 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤,将不需要的部分用切割刀切割平整,如图 2(d),便得到了 SMF-HCF-PCF 的结构.其中单模光纤的直径是 $125\ \mu\text{m}$,空芯光纤的外径是 $125\ \mu\text{m}$,内径是 $93\ \mu\text{m}$,光子晶体光纤的直径是 $125\ \mu\text{m}$ 实心六边形气孔结构.

传感器主要利用的是三光束干涉的原理:当一束宽带光作为光源入射到单模光纤时,入射光首先在单模光纤端面产生反射光 R1;之后透射的部分光在空芯光纤和光子晶体光纤端面产生反射光 R2;最后,光会在光子晶体光纤的末端、空气的端面产生反射光 R3.由此产生的三光束干涉的光谱,每两束光之间都会产生干涉.干涉光谱经过光谱仪采集,光谱仪上可以看到多个干涉谱的叠加.每两束光之间的干涉周期不同,其频率也不同.对其经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理,转换到频域,对不同中心频率的干涉信号分别进行滤波处理后,经过快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)即可得到相应的干涉光谱,每个光谱分别进行白光干涉解调即可得到光程差.

解调仪的解调过程如图 3,图 3(a)为接收到的三光束干涉的光谱,图 3(b)为反射光的 FFT 谱,谱中能明显看到有四个峰,从左到右分别是直流峰(DC Peak)、压力腔(Peak1, R1 和 R2 的干涉)、温度腔(Peak2, R2 和 R3 的干涉)和反射光 R1 与 R3 的干涉(Peak3).通过带通滤波能够分别得到压力腔和温度腔的频率成分,再通过 IFFT 就得到了压力腔和温度腔的各自光谱图 3(c)、(d).最后,两个 F-P 腔的光程差可以由白光干涉解调^[16]计算得出.

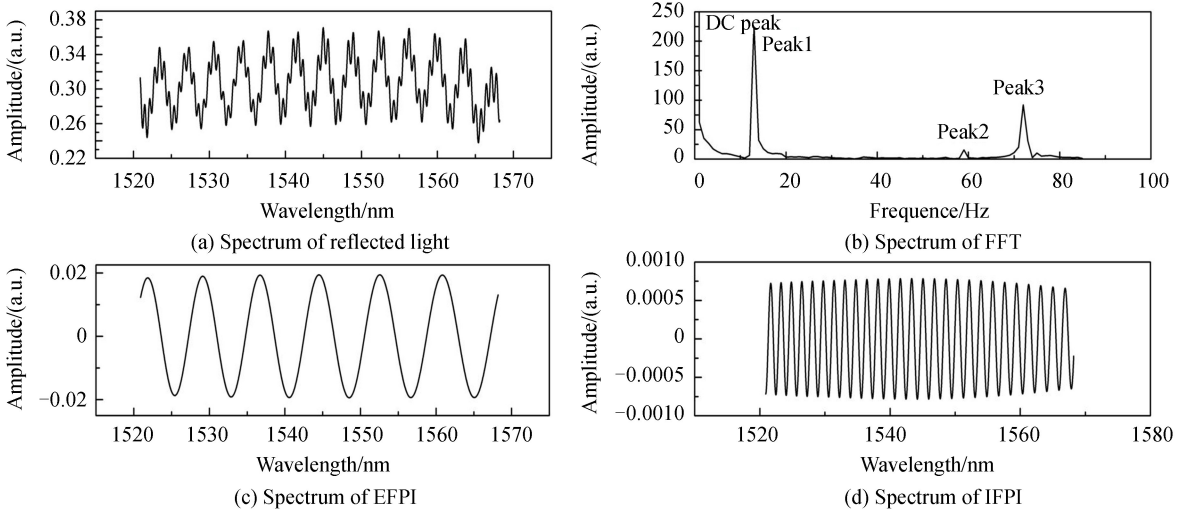


图3 光谱信号的FFT处理
Fig.3 FFT processing of spectral signal

EFPI 测量压力的工作原理主要是腔内空气的折射率会随气压变化而变化;IFPI 测量温度的变化则是根据光纤的热光效应和热膨胀效应。

传感器的压力腔的光程(L_{OPD1})和温度腔的光程(L_{OPD2})可以表示为

$$L_{OPD1} = 2n_1L_1 \quad (1)$$

$$L_{OPD2} = 2n_2L_2 \quad (2)$$

式中, n_1 和 n_2 (常温下为1.44)是两个FP腔的折射率, n_1 主要受气压和气体成分的影响, n_2 则主要受温度的影响.对于压力腔, n_1 可表示为

$$n_1 = 1 + \frac{a \times P}{1 + b \times T} \quad (3)$$

式中, a 和 b 是系数,取决于空气成分,实验中使用普通空气(101.325 kPa,干燥)的情况下, $a = 2.9 \times 10^{-9}$ / Pa, $b = 3.7 \times 10^{-3}$ / °C.

对于压力腔来说,压力灵敏度可表示为

$$S_P = \frac{dL_{OPD1}}{dP} = \frac{dn_1}{dP} \times 2L_1 = \frac{a \times 2L_1}{1 + b \times T} \quad (4)$$

气压可以表示为

$$P = \frac{1 + b \times T}{a \times 2L_1} \Delta L_{OPD1} + P_0 \quad (5)$$

式中, P_0 为初始气压,在普通大气压下, $P_0 = 0$.

对于温度腔来说温度灵敏度可表示为

$$S_T = \frac{dL_{OPD2}}{dT} = \left(\frac{1}{n} \times \frac{dn_2}{dT} + \frac{1}{L_2} \times \frac{dL_2}{dT} \right) L_{OPD2} = (\epsilon + \alpha) L_{OPD2} \quad (6)$$

式中, ϵ (8.3×10^{-6} / °C)是硅的热光系数, α (0.55×10^{-6} / °C)是硅的热膨胀系数.因此温度可以表示为

$$T = \frac{1}{(\epsilon + \alpha) L_{OPD2}} \Delta L_{OPD2} + T_0 \quad (7)$$

式中, T_0 为环境的初始温度.

根据式(4)28°C时的气压灵敏度为1 576.66 nm/MPa,根据式(6)理论温度灵敏度为20.67 nm/°C.

2 实验与讨论

传感器实验系统所用的是马弗炉(GHA 12/300, Carbolite · Gero)、压力罐和自制的白光干涉解调仪.传感器是密封在陶瓷管中,测试时在传感器密封进陶瓷管后伸入马弗炉中,如图4.

陶瓷管同时还连接着压力罐,压力罐能够通过拧动压力阀来提供气压变化.马弗炉内部的陶瓷管附近还配有温度计,以实时测量炉子中传感器的实际温度;密封罐处也配有压力测量计,以实时测量实际的压力大小.

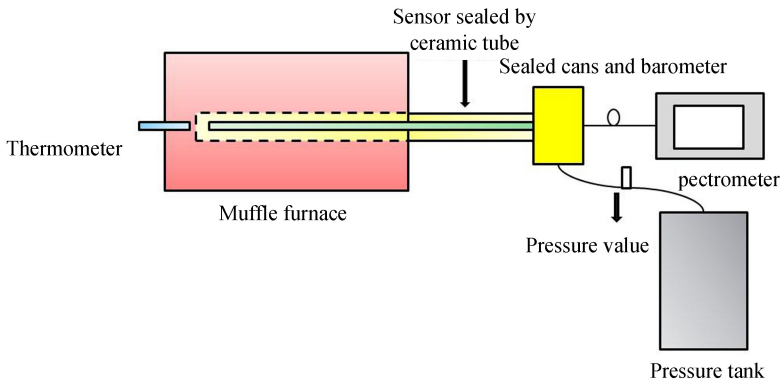
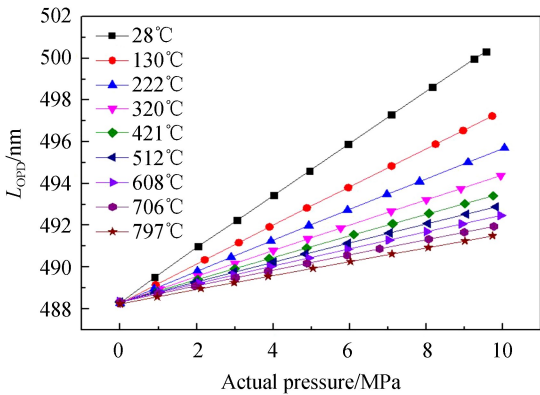


图4 实验系统示意
Fig.4 Experimental system

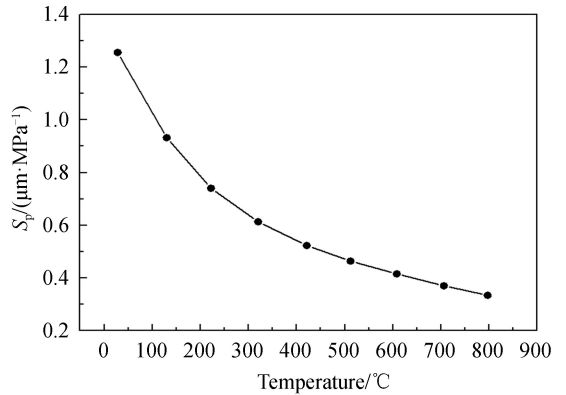
在测量开始前,首先需要将传感器高温老化,以去掉传感器内多余的应力.具体操作方法是把传感器放入马弗炉中升温至 800 °C,保持温度持续一到两小时.

传感器老化后,停止加热,待炉子内温度恢复至室温 28 °C 附近.随后再将炉子的温度从 28 °C 逐渐升至 800 °C,每次升温幅度约为 100 °C,每次升温后会等待约一小时以保证炉内的温度稳定.在温度稳定后,记录每个温度下温度腔的腔长,同时利用压力罐的压力阀,将内部的气压从 0 MPa 逐渐加压至 10 MPa,每次加压约 1 MPa.在每次加压后待解调仪显示的腔长数值稳定后,记录下对应不同气压下压力腔的腔长.

L_{OPD1} 变化随气压变化而变化如图 5(a).从折线图中可以发现二者的变化关系呈现非常好的线性.



(a) The relationship between pressure and L_{OPD1}

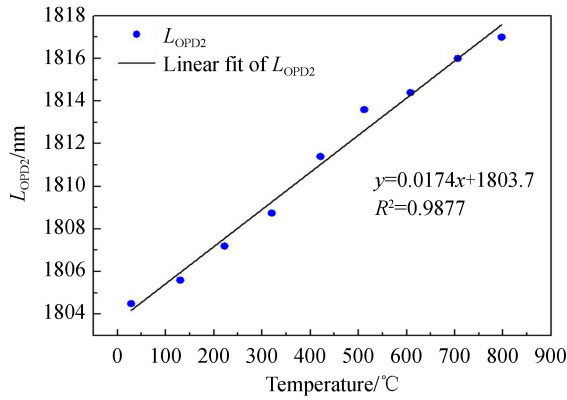


(b) The relationship between pressure sensitivity and temperature

图5 压力数据分析
Fig.5 Pressure data analysis

此时对每一个温度下的 L_{OPD1} 气压曲线进行线性拟合,拟合后的直线的斜率即每个温度下的压力灵敏度.其中传感器在常温下的压力灵敏度最高,为 1 460.5 nm/MPa.图 5(b)为不同温度情况下的压力灵敏度变化情况,可以看到随着温度的增加,压力灵敏度呈现出非线性变小的趋势,这与式(4)的理论计算公式是吻合的.

当炉内的温度从 28 °C 附近以 100 °C 梯度逐渐升到 800 °C 附近时, L_{OPD2} 随温度变化而变化的情况如图 6.从图中可以看到,二者也呈现了较好的线性关系,通过拟合后可以得到传感器的温度灵敏度为 17.4 nm/°C ($R^2 = 0.9877$).

图6 温度和光程 L_{OPD2} 的变化关系Fig.6 The relationship between temperature and L_{OPD2}

在经过第一次测量后,通过测量数据完成了对传感器标定,这样每个腔长值都能对应一个温度或者压力.第二步是对传感器标定值的准确性进行验证.具体的验证方法是重新将传感器放入炉中,按上面的步骤重新进行一次升温 and 升压,在第二次升温 and 升压的过程中,根据第一次的标定可以得出的传感器腔长得一个测量值,然后再将这个测量值与温度计或者压力计显示的实际值进行对比,来确定传感器的准确性.

传感器的压力测量准确性比较结果如图7,测量值为通过标定得到的气压值;实际气压值为气压罐的压力计所显示的气压数值.可以看出,二者的线性关系非常好,不同温度下的斜率都非常接近1.

同理,对于测量温度和实际温度也做一样的处理,测量温度由上一次测量的标定结果得出,实际温度为马弗炉中温度计的读数.从比较结果图8中可以看出二者的变化也非常吻合,线性拟合曲线的斜率非常接近1.

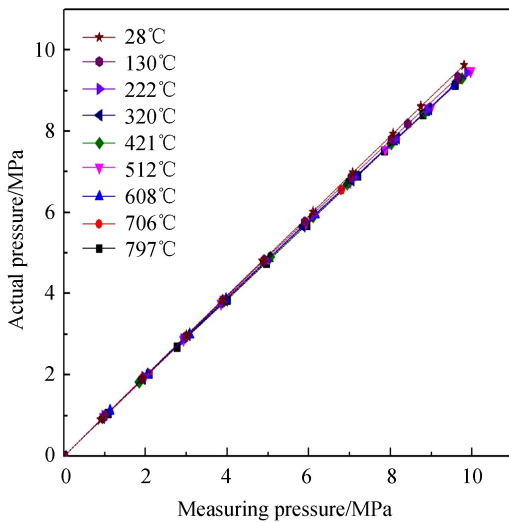


图7 实际压力和测量压力比较

Fig.7 The comparison between actual pressure and measured pressure

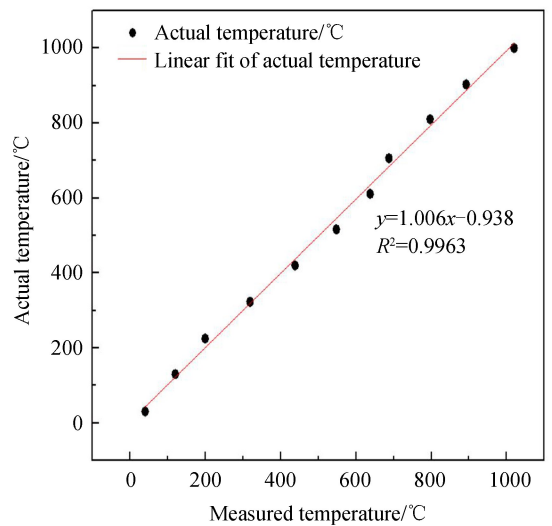


图8 实际温度和测量温度比较

Fig.8 The comparison between actual temperature and measured temperature

实验表明,传感器的压力灵敏度为 $1\ 460.5\ \text{nm}/\text{MPa}$ 、温度灵敏度为 $17.4\ \text{nm}/\text{°C}$,温度范围为 $28\sim 800\ \text{°C}$,压力范围为 $0\sim 10\ \text{MPa}$,在测量范围内准确度较高,结合计算的理论值, $28\ \text{°C}$ 时理论气压灵敏度为 $1\ 576.66\ \text{nm}/\text{MPa}$,理论温度灵敏度为 $20.67\ \text{nm}/\text{°C}$.考虑到传感器的制作以及测量过程中可能出现的误差如传感器腔长的测量误差、马弗炉内的温度不均、解调后记录腔长的读数误差等,实际测得的数据与理论基本相符.为了一定程度上避免误差,可以选择更合适的光谱解调方式来对信号进行处理,这一思路同样适用于提高传感器其他方面性能如提高灵敏度 and 分辨率或其相应速度等^[17-18].

3 结论

本文提出了一种利用单模光纤、空心光纤和光子晶体光纤实现的温度压力复合传感器.通过熔接和切割的手段实现 SMF-HCF-PCF 的结构,分别构成 EFPI 和 IFPI 两个 F-P 腔.传感器利用两个腔腔长变化测量环境中的压力和温度,其中 EFPI 利用气压引起的空气折射率变化测量压力,IFPI 利用热膨胀和热光效应引起的光程变化测量温度.实验表明,压力工作范围为 0~10 MPa,压力灵敏度随温度增加逐渐减小,在室温 28℃下压力灵敏度最大为 1 460.5 nm/MPa;传感器的温度工作范围为 28~800 ℃,温度灵敏度为 17.4 nm/℃.经过测试,传感器在工作范围内线性度良好,加工制作方便;传感器最大的优势是能满足大动态范围内温度和压力的同时测量.需要指出的是,传感器实际测量在 800 ℃以上时由于接近了光纤的熔点,干涉的温度信号出现了一定程度的减小和失真,同时也会影响压力的测量.为了使传感器能够在更苛刻的环境下工作,可以从新材料(蓝宝石)光纤或更为合适的解调方式入手进行下一步的研究.

参考文献

- [1] DING Wen-hui, JIANG Yi. Miniture photonic crystal fiber sensor for high-temperature measurement[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2014, **14**(3): 786-789.
- [2] JIA Jing-shan, JIANG Yi, ZHANG Liu-chao *et al.* Dual-wavelength DC compensation technique for the demodulation of EFPI fiber sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(15): 1380-1383.
- [3] JIA P G, WANG D H, YUAN G, *et al.* An active temperature compensated fiber-optic Fabry-Perot accelerometer system for simultaneous measurement of vibration and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(6): 2334-2340.
- [4] GAO Hong-chun, JIANG Yi, ZHANG Liu-chao, *et al.* Five-step phase-shifting white-light interferometry for the measurement of fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(5): 1168-1173.
- [5] DONG Nan-nan, WANG Su-mei, JIANG Lan, *et al.* Pressure and temperature sensor based on graphene diaphragm and fiber bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(5): 431-434.
- [6] GAO Hong-chun, JIANG Yi, LI Bao-juan, *et al.* An optical fiber temperature sensor with high sensitivity[J]. *Optical Technique*, 2017, **43**(6): 538-541.
高红春,江毅,李宝娟,等.高温光子晶体光纤温度传感器[J].光学技术,2017, **43**(6): 538-541.
- [7] MENG Zhan. The research of optical fiber gratig sensor measuring technology[D]. Henan: Henan University, 2011: 7-23.
孟展. 光纤光栅传感器测量技术的研究[D].河南:河南大学,2011: 7-23.
- [8] ZHANG Yi-nan, HUANG Jie, LAN Xin-wei, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and pressure with cascaded extrinsic Fabry-Pérot interferometer and intrinsic Fabry-Pérot interferometer sensors [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(6): 067101.
- [9] PEVEC S, DONLAGIC D. Miniature all-fiber Fabry-Pérot sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(19): 4536-4541.
- [10] DUAN Dan-yang, CHENG Jin, GAO Ran, *et al.* Temperature sensor based on optical fiber Fabry-Pérot interferometer [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*.2017, **36**(4): 124-127.
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.
- [11] RAO Jiang-yun, DENG Ming, DUAN De-wen, *et al.* In-line fiber Fabry-Perot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber[J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2008, **148**(1): 33-38.
- [12] DENG Ming, TANG Chang-ping, ZHU Tao, *et al.* PCF-based Fabry-Pérot interferometric sensor for strain measurement at high temperatures[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(11): 700-702.
- [13] KE Tao, ZHU Tao, RAO Jiang-yun, *et al.* All fiber miniature Fabry Perot interferometer as high temperature sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 106-109.
柯涛,朱涛,饶云江,等.全光纤微型法布里-珀罗干涉式高温传感器[J].红外与激光工程,2010, **39**(1): 106-109.
- [14] YANG Chun-di, WANG Ming, GE Yi-xian, *et al.* A miniature extrinsic fiber fabry-pérot pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1358-1361.
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): 1358-1361.
- [15] ZHANG Liu-chao, JIANG Yi, GAO Hong-chun, *et al.* A diaphragm-free fiber Fabry-Perot gas pressure sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, **90**(2): 025005.
- [16] JIANG Yi. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(2): 75-77.

- [17] CHEN Ke, YU Zhi-hao, YU Qing-xu, *et al.* Fast demodulated white-light interferometry-based fiber-optic Fabry-Perot cantilever microphone[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(14): 3417-3420.
- [18] CHEN Ke, GUO Min, WANG Ze-lin, *et al.* Optical correlation based demodulator for fiber-optic fabry-perot sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0606001.
陈珂,郭珉,王泽霖,等.基于光学相关的光纤法布里-珀罗传感器解调仪[J].光子学报, 2018, **47**(6): 0606001.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61775020, 61575021), the National High Technology Research and Development Program (No.2015AA043504)