

激光与光电子学进展

基于级联腔法布里-珀罗干涉仪的温度和压力同时测量

胡白燕¹, 文富荣¹, 程永山¹, 吴卫东¹, 齐泉^{2*}

¹湖北师范大学计算机与信息工程学院, 湖北 黄石 435002;

²中部战区总医院信息科, 湖北 武汉 430014

摘要 提出了一种基于级联法布里-珀罗干涉仪(CFPI)的光纤传感器,用于同时测量温度和压力。该传感器由单模光纤(SMF)、空心光纤(HCF)和双孔光纤(DHF)依次熔接在一起而构成。其中,HCF构成空气腔法布里-珀罗干涉仪(FPI),DHF构成石英腔FPI,两个FPI级联形成混合腔FPI。空气腔FPI通过DHF的空气孔与外部环境连通,实现对气压的高灵敏度传感;石英腔FPI利用二氧化硅的热光效应和热膨胀效应,实现对温度的高灵敏度传感。在0.1~0.6 MPa气压范围,60~260 °C温度范围,实现的空气腔FPI的气压和温度灵敏度分别为4 nm/MPa和1 pm/°C,混合腔FPI的气压和温度灵敏度分别为0.5 nm/MPa和9 pm/°C。空气腔FPI和混合腔FPI对温度和气压的灵敏度不同,实现了温度和气压的双参数测量,同时该传感结构制造工艺简单,集成度高,灵敏度高。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 法布里-珀罗干涉仪; 气压测量; 温度测量

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1906006

Simultaneous Measurement of Temperature and Pressure Based on Cascaded Fabry-Perot Interferometer

Hu Baiyan¹, Wen Furong¹, Cheng Yongshan¹, Wu Weidong¹, Qi Quan^{2*}

¹School of Computer and Information, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China;

²Information Department, General Hospital of the Central Theater Command of the People's Liberation Army, Wuhan, Hubei 430014, China

Abstract This article proposes and demonstrates a fiber optic sensor based on two cascaded Fabry-Perot interferometers (CFPIs) for simultaneous measurement of temperature and pressure. The sensor is made by fusion splicing of the single-mode fiber (SMF), hollow-core fiber (HCF), and double-hole fiber (DHF) in sequence. An air cavity FPI is formed in HCF and a silica cavity FPI is formed in DHF. The two FPIs are cascaded to form the mixed cavity FPI. The air cavity FPI is connected with the external environment via holes in the DHF, realizing sensing of air pressure with high sensitivity. At the same time, due to the thermo-optical effect and thermal expansion effect of the silica in the DHF, high sensitivity sensing is realized for temperature. In this article, in the air pressure measurement range of 0.1–0.6 MPa and the temperature measurement range of 60–260 °C, the sensitivity of the air cavity FPI to air pressure and temperature is 4 nm/MPa and 1 pm/°C,

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-06-14; 录用日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(11274104,61976085)、教育部高等教育司2020产学研合作协同育人项目(202002288058)、湖北省教育厅科研计划项目(B2019134)、2020年科技人员服务企业专项行动湖北专项(第一批29)

通信作者: *83258405@qq.com

respectively, and the sensitivity of the mixed cavity FPI to air pressure and temperature is 0.5 nm/MPa and 9 pm/°C, respectively. The air cavity FPI and the mixing cavity FPI have different sensitivities to temperature and air pressure, and realize the dual parameter measurement of temperature and air pressure. At the same time, the sensing structure has simple manufacturing process, high integration, and high sensitivity.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; Fabry-Perot interferometer; air pressure measurement; temperature measurement

OCIS codes 060.2370; 050.2230; 120.5475; 120.6780

1 引言

在工业生产中,温度和气压作为两个重要的物理量,反映了环境和工程结构的健康状况。对温度和压力的实时监测在石油钻探、深海勘探、化学工业等许多领域具有重要意义^[1-3]。近年来很多研究基于光纤传感器将信号传感和传输集成在光纤中,光纤传感器具有装置体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、集成度高的特点,因此可应用于对温度和压力的测量。其中典型的光纤传感结构包括光纤布拉格光栅(FBG)^[4]、长周期光纤光栅(LPFG)^[5-6]、法布里-珀罗光纤干涉仪(FPI)^[7-8]、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)^[9-10]、迈克耳孙干涉仪(MI)^[11-12],但这些结构只能作为单一的温度或气压传感器使用,难以解决温度串扰问题,无法实现温度和气压双参量的同时测量。

近年来,研究人员逐渐报道了同时测量温度和压力的混合传感结构,如FBG-FPI和FPI-FPI^[13-16]。其中基于FBG-FPI的传感结构的原理是通过级联两个不同的传感结构实现温度和气压的同时测量,但这种混合传感器结构的工作温度将受到布拉格光栅本身的限制,在高温下通常会失去传感性能,热稳定性相对较低。同时,所提出的基于级联FPI-FPI的混合结构有效地解决了热稳定性差的问题,并且可以有效地改善同时测量温度和压力时外部环境因素对传感结构的干扰。但是,以往报道的基于级联FPI-FPI结构的文献通常采用化学刻蚀^[17]或飞秒激光加工方法^[18],其制造过程复杂且成本高。因此,迫切需要一种能够实现温度和压力双参数测量的简单、经济、高效的传感器结构。

本文提出了一种基于级联FPI的同时测量温度和压力的光纤传感器,此传感器是通过将单模光纤(SMF)、空心光纤(HCF)和双孔光纤(DHF)依次熔接在一起形成的空气腔FPI和石英腔FPI级联结构。利用空气和石英对气压和温度的不同响应特性,可实现较高灵敏度的温度和气压双参量测

量。该传感器结构制造工艺简单,集成度高,灵敏度高。

2 传感原理和结构制备

本文所提出的级联FPI传感器结构如图1所示。SMF依次与一小段HCF、DHF熔接在一起。其中HCF的空气孔直径为80 μm,包层直径为125 μm,DHF的空气孔直径为40 μm,包层直径为125 μm,纤芯为椭圆芯,其长轴长度为10.4 μm,短轴长度为8.7 μm。其中传感器的制备过程包括三个步骤。第一步,将一段HCF熔接到SMF,将HCF的长度记录为 L_1 ;第二步,HCF的另一端被切割后,将其与一段DHF熔接;第三步,在合适位置将DHF的另一端切割平整,将DHF的长度记录为 L_2 。其中,HCF与SMF和DHF的界面及HCF的空气芯构成空气腔FPI,DHF与HCF的界面和它的另一个端面及DHF的石英纤芯和包层构成石英腔FPI,两个FPI级联构成混合腔FPI。传感器结构的显微镜图像如图1(b)和(c)所示。此处需要注意的是,由于DHF的纤芯和包层的折射率差在 10^{-3} 量级,因此纤芯模和包层模的光程差比混合腔FPI两个反射面之间的光程差小3个数量级,其差异可以忽略不计,所以可以将纤芯模和包层模看作一个模式。

如图1(a)所示,一束光从单模光纤注入,部分光在单模光纤与空芯光纤的界面(M_1)发生反射,剩下的光进入空芯光纤并继续向前传播,在HCF和DHF的熔接点(M_2)发生部分反射。剩余的光进入DHF继续传播,在DHF的端面上发生反射(M_3)。其中, M_1 和 M_2 两个反射镜反射的光束干涉形成空气腔FPI的干涉光谱, M_1 和 M_3 两个反射镜反射的光束干涉形成混合腔FPI的干涉光谱。

空气腔和混合腔FPI中三光束干涉的总反射光强可分别表示为

$$I_{\text{air}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi_{12}, \quad (1)$$

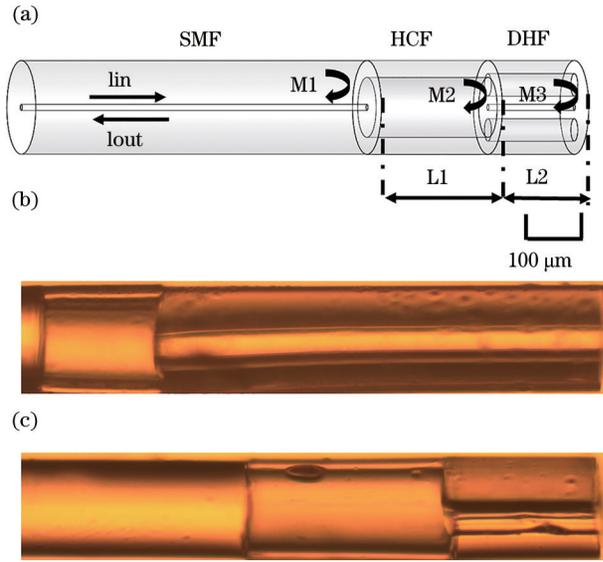


图 1 传感器结构示意图。(a)传感结构示意图;(b)一号样品;(c)二号样品

Fig. 1 Schematic diagrams of sensor structure. (a) Schematic diagram of sensing structure; (b) sample 1; (c) sample 2

$$I_{\text{mix}} = I_1 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_3} \cos \phi_{13}, \quad (2)$$

式中: I_1, I_2, I_3 为三束反射光的光强; ϕ_{12}, ϕ_{13} 为相位, 可以分别表示为

$$\phi_{12} = \frac{4n_1 L_1 \pi}{\lambda}, \quad \phi_{13} = \frac{4(n_1 L_1 + n_2 L_2) \pi}{\lambda}. \quad (3)$$

两光束干涉光谱的自由光谱范围(FSR)可以表示为

$$R_{\text{FSR1}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n_1 L_1}, \quad R_{\text{FSR2}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(n_1 L_1 + n_2 L_2)}, \quad (4)$$

式中: λ_1 和 λ_2 是干涉条纹的两个相邻波峰或波谷的波长; L_1 和 L_2 是 HCF 和 DHF 的长度; n_1 是 HCF 腔中空气的折射率; n_2 是 DHF 中二氧化硅的折射率。

本文对空气腔 FPI 和混合腔 FPI 进行 FFT 滤波处理, 由(2)式可知, 它们的气压灵敏度可以分别表示为

$$S_{P_1} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta p} = \lambda \left(\frac{1}{n_1} \frac{dn_1}{dp} + \frac{1}{L_1} \frac{dL_1}{dp} \right), \quad (5)$$

$$S_{P_3} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta p} = \frac{\lambda}{n_1 L_1 + n_2 L_2} \times \left(L_1 \frac{dn_1}{dp} + n_1 \frac{dL_1}{dp} + L_2 \frac{dn_2}{dp} + n_2 \frac{dL_2}{dp} \right), \quad (6)$$

式中: $\Delta \lambda$ 为反射干涉谱波长变化量; Δp 为气压变化量; p 为气压。两个腔的温度灵敏度分别为

$$S_{T_1} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = \lambda \left(\frac{1}{n_1} \frac{dn_1}{dT} + \frac{1}{L_1} \frac{dL_1}{dT} \right), \quad (7)$$

$$S_{T_3} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = \frac{\lambda}{n_1 L_1 + n_2 L_2} \times \left(L_1 \frac{dn_1}{dT} + n_1 \frac{dL_1}{dT} + L_2 \frac{dn_2}{dT} + n_2 \frac{dL_2}{dT} \right). \quad (8)$$

对于空气腔 FPI, 由于空气腔 FPI 与外界气体连通, 因此气压改变会引起 FP 腔的气体折射率和腔长变化, (5)式右边第一项表示气压引起的空气折射率变化, 第二项表示气压引起的 HCF 长度变化, 空气腔的气压灵敏度系数设为 K_{FFPI}^P ; 而温度的变化也会引起 HCF 长度变化和空气内气体折射率的改变, (7)式右边第一项表示热光效应引起的折射率变化, 第二项表示热膨胀效应引起的腔长变化, 其温度灵敏度系数设为 K_{FFPI}^T 。同样地, 对于混合腔 FPI, 气压和温度的改变也会引起光纤材料石英的折射率变化和 DHF 长度的变化, 因此设混合腔 FPI 的气压和温度灵敏度系数为 K_{SFPI}^P 和 K_{SFPI}^T 。当环境温度和气压同时改变时, 通过求解以下矩阵, 可以实现压力和温度的同时测量^[19-22]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\text{FFPI}}^P & K_{\text{FFPI}}^T \\ K_{\text{SFPI}}^P & K_{\text{SFPI}}^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{FFPI}} \\ \Delta \lambda_{\text{SFPI}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: ΔT 为温度的变化量; ΔP 为气压的变化量; $\Delta \lambda_{\text{FFPI}}$ 为空气腔波长漂移量; $\Delta \lambda_{\text{SFPI}}$ 为混合腔波长漂移量。

图 2(a)显示了所制备的级联 FPI 的反射光谱。宽带光源(SLED)的光谱范围为 1450~1650 nm, 光谱分析仪(OSA)的工作分辨率设为 0.025 nm。从图 2(a)可以看出, 级联 FPI 的干涉光谱由不同频率分量组成。其中低频分量(较大 FSR)是由空气腔 FPI 结构产生的, 而高频分量(较小 FSR)是由混合腔 FPI 引起的。通过对图 2(a)的光谱进行傅里叶变换(FFT), 获得图 2(b)所示的频谱信息。从图中可以看出, 频谱中主要有三个峰: 峰 1 是由 M_1 和 M_2 两个反射面的反射光干涉(空气腔 FPI)形成的, 峰 2 是由 M_2 和 M_3 两个反射面的反射光干涉(石英腔 FPI)形成的, 峰 3 是由 M_1 和 M_3 两个反射面的反射光干涉产生。由于 L_2 远大于 L_1 , 因此峰 2 和峰 3 对应的两个频率非常接近, 在滤波时通常不对其进行区分。图 2(c)和图 2(d)所示为通过滤波彼此的频率并使用傅里叶逆变换获得的空气腔 FPI 和混合腔 FPI 的干涉谱。

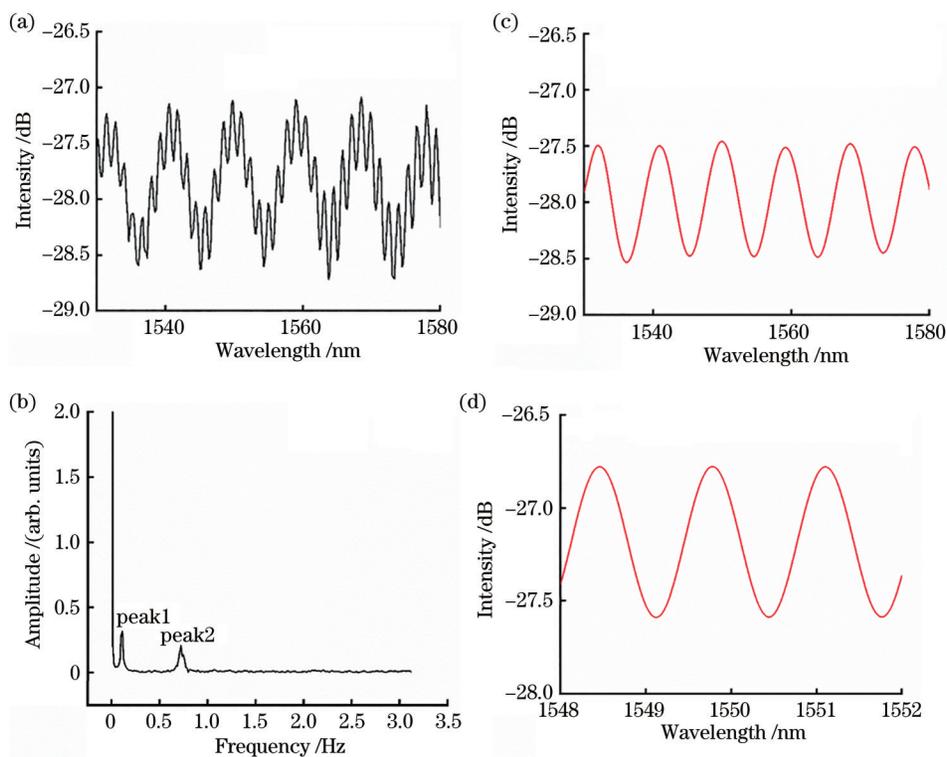


图 2 干涉图谱。(a)室温下原始光谱;(b)FFT 频谱;(c)空气腔 FPI 和 (d)混合腔 FPI 的干涉谱

Fig. 2 Interference spectra. (a) Original spectrum at room temperature; (b) FFT frequency spectrum; spectra of (c) air cavity FPI and (d) mixed cavity FPI

3 实验结果和讨论

为了研究所提出的 CFPI 的气压响应,利用图 3 所示的气压测试装置,将传感器固定在与压力泵 (ConST162) 连接的气压室中,该压力泵可提供 0 MPa 至 0.8 MPa 的气压。分辨率为 0.001 MPa 的数字压力计 (ConST-211) 用于显示压力室内的压力值。在室温下,腔室内的压力从 0 MPa 逐渐增加到 0.6 MPa,间隔为 0.1 MPa。OSA 实时记录测得的光谱,然后处理检测到的光谱数据。首先,通过 FFT 获得频谱,然后根据频谱中的两个主要频率进行滤波。由于干涉仪空气腔 FPI 的光程差很小,相应的频率也很小,因此可以使用设计的带通滤波器过滤检测到的光谱,以获得空气腔 FPI 的光谱。虽然混合腔 FPI 结构的光程差较大,但使用设计的带通滤波器可以提取混合腔 FPI 的光谱。

实验中分别制备了两个不同参数的传感器样品,样品的具体参数如表 1 所示。其中样品 1 的 HCF 长度小于 DHF 长度,样品 2 的 HCF 长度大于 DHF 长度。这样设置长度参数的目的是比较 HCF 和 DHF 长度对灵敏度的影响。

图 4 为气压改变时基于空气腔 FPI 的样品 1 和

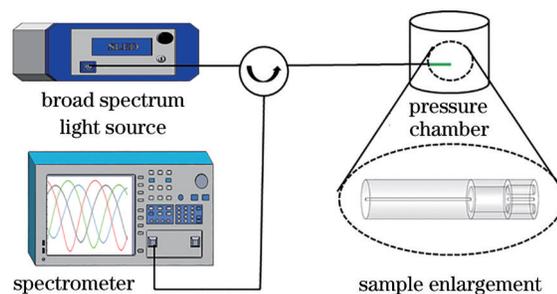


图 3 测试装置

Fig. 3 Test experimental setup

表 1 级联 FPI 的光纤结构参数

Table 1 Optical fiber structure parameters of cascaded FPI

Sample	Length of HCF $L_1 / \mu\text{m}$	Length of DHF $L_2 / \mu\text{m}$	L_1 / L_2
Sample 1	149	598	0.25
Sample 2	214	169	1.27

样品 2 的波长漂移曲线。图 5 为气压改变时,基于混合腔 FPI 的样品 1 和样品 2 的波长漂移曲线。从图 4 可以看出,随着气压增加,空气腔 FPI 的干涉谱往长波方向漂移,且样品 1 的气压灵敏度为 4.1 nm/MPa,样品 2 的气压灵敏度为 4.4 nm/MPa。从图 5 可以看出,随着气压的增加,混合腔 FPI 的干

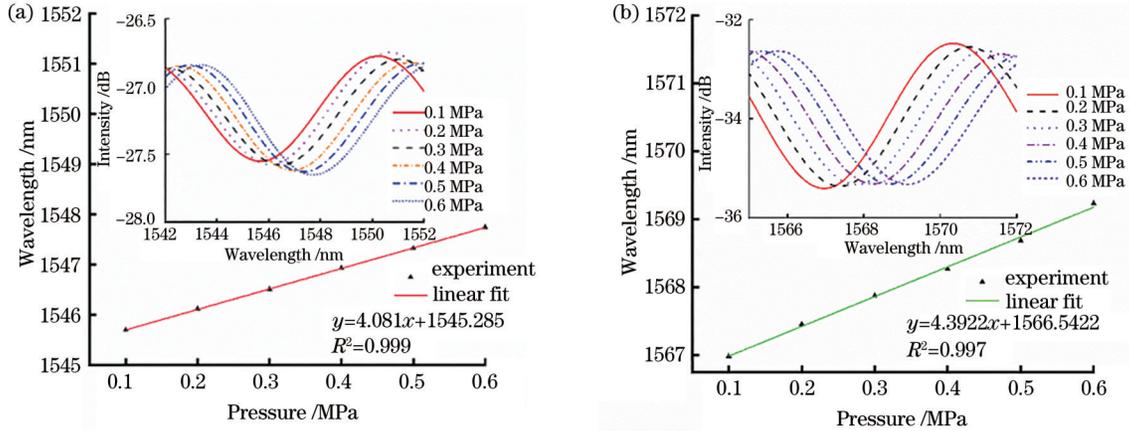


图 4 样品的空气腔 FPI 气压灵敏度拟合曲线。(a) 样品 1; (b) 样品 2

Fig. 4 Fitting curves of air pressure sensitivity of air-cavity FPI for samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

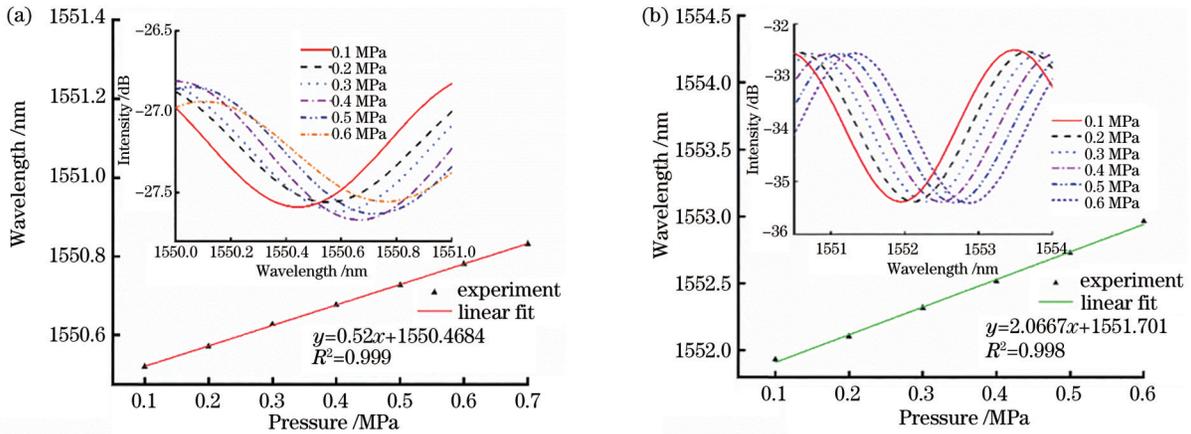


图 5 样品的混合腔 FPI 气压灵敏度拟合曲线。(a) 样品 1; (b) 样品 2

Fig. 5 Fitting curves of air pressure sensitivity of mixed cavity FPI for samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

涉谱也往长波方向漂移,同时样品 1 的气压灵敏度为 0.5 nm/MPa, 样品 2 的气压灵敏度为 2.1 nm/MPa。从两组数据中可以看出,两个样品的空气腔气压灵敏度接近,但混合腔的气压灵敏度却相差很大。这是由于对于空气腔 FPI,空气的热光效应占主导作用,其气压灵敏度受腔长的影响不大;而对于混合腔 FPI,其气压响应由空气腔 FPI 和石英腔 FPI 的气压响应共同决定,而且是空气腔占主导作用,因此混合腔 FPI 的气压灵敏度受空气腔和石英腔的腔长比例的影响较大。样品 2 中 HCF 长度与 DHF 长度的比例远大于样品 1,因此其气压灵敏度比样品 1 大。

然后测试传感器的温度灵敏度响应,将传感器放入加热炉中,加热炉的温度调节精度为 0.01 °C,在温度测试过程中温度能在某一值维持一定时间。图 6 为温度改变时样品 1 和样品 2 的空气腔 FPI 的波长漂移曲线。图 7 为温度改变时样品 1 和样品 2

的混合腔 FPI 的波长漂移曲线。从图 6 可以看出,随着温度增加,空气腔 FPI 的干涉谱往长波方向漂移,且样品 1 的温度灵敏度为 1 pm/°C,样品 2 的温度灵敏度为 1 pm/°C。从图 7 可以看出,随着温度的增加,混合腔 FPI 的干涉谱也是往长波方向漂移,同时样品 1 的温度灵敏度为 9 pm/°C,样品 2 的温度灵敏度为 8 pm/°C。从两组数据中可以看出,两个样品的空腔灵敏度几乎一致,样品 1 的温度灵敏度略大于样品 2 的温度灵敏度,这也是由 HCF 和 DHF 长度比例不同引起的。

将上述测得的灵敏度系数代入(9)式,当外界环境变化引起光谱漂移时,将所测波长漂移量代入以下方程即可求得温度和气压的变化量:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0.001 \\ 0.5 & 0.009 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{FPPI}} \\ \Delta \lambda_{\text{SFPI}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

进而实现温度和气压的双参量测量^[23-25]。

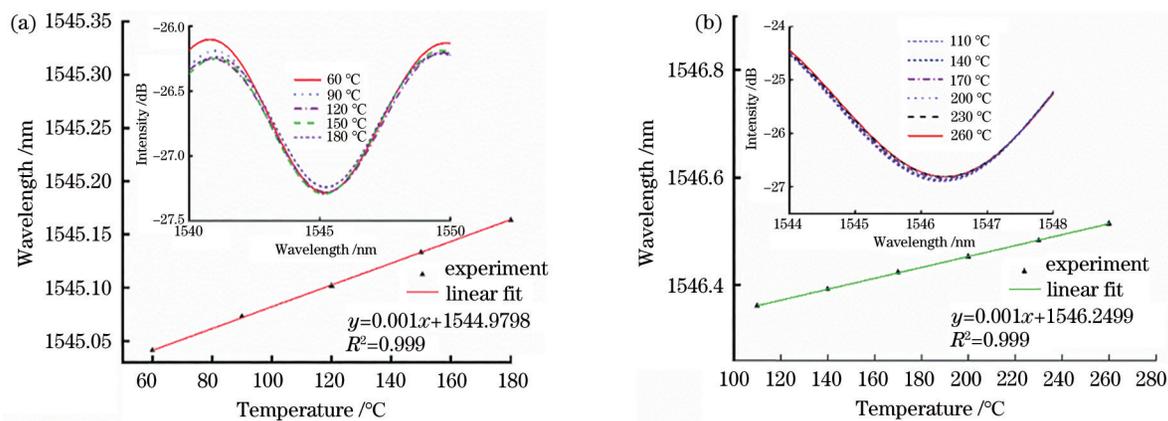


图 6 样品的空气腔 FPI 温度灵敏度曲线。(a) 样品 1; (b) 样品 2
Fig. 6 Temperature sensitivity curves of air pressure FPI of samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

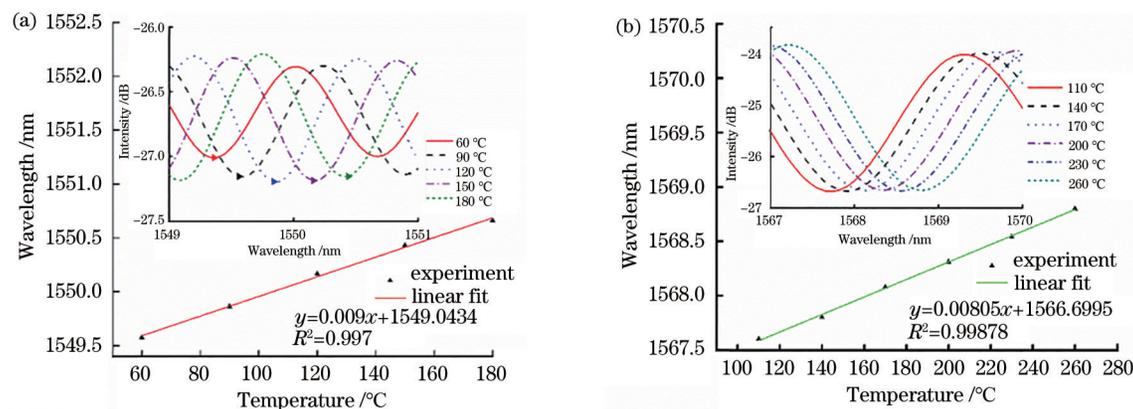


图 7 样品的混合腔 FPI 温度灵敏度曲线。(a) 样品 1; (b) 样品 2
Fig. 7 Temperature sensitivity curves of mixed cavity FPI of samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

4 结 论

提出并验证了一种基于级联 FPI 干涉仪的同时测量温度和压力的光纤传感器。传感器结构是由 HCF 制成的空气腔 FPI 和由 DHF 制成的混合腔 FPI 的级联结构。实验结果表明,空气腔 FPI 的气压和温度灵敏度分别为 4 nm/MPa 和 1 pm/°C,混合腔 FPI 的气压和温度灵敏度分别为 0.5 nm/MPa 和 9 pm/°C。该结构具有体积小、结构简单、成本低、制造工艺简单、线性度好的优点。

参 考 文 献

[1] Li Z, Zhang Y X, Zhang W G, et al. High-sensitivity gas pressure Fabry-Perot fiber probe with micro-channel based on vernier effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3444-3451.
[2] Yang X Y, Zhao Q K, Qi X X, et al. In-fiber integrated gas pressure sensor based on a hollow

optical fiber with two cores[J]. Sensors and Actuators A, 2018, 272: 23-27..
[3] Zhao Y J, Lin H F, Zhou C M, et al. Cascaded Mach-Zehnder interferometers with vernier effect for gas pressure sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(8): 591-594.
[4] Kashyap R. Fiber Bragg gratings[M]. Salt Lake City: Academic Press, 2009.
[5] Bhatia V, Burford M K, Murphy K A, et al. Long-period fiber grating sensors[C]//Optical Fiber Communications, OFC, February 25-March 1, 1996, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 1996: 265-266.
[6] Petrović M D, Petrovic J, Daničić A, et al. Non-invasive respiratory monitoring using long-period fiber grating sensors[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(4): 1136-1144.
[7] Jiang M Z, Gerhard E. A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical,

- 2001, 88(1): 41-46.
- [8] 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]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22813-22818.
- [9] Lu P, Men L Q, Sooley K, et al. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(13): 131110.
- [10] Wu D, Zhu T, Chiang K S, et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(5): 805-810.
- [11] Huang J, Lan X W, Song Y, et al. Microwave interrogated sapphire fiber Michelson interferometer for high temperature sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(13): 1398-1401.
- [12] Zhou J T, Wang Y P, Liao C R, et al. Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber Michelson interferometer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 208: 315-319.
- [13] Liu Z G, Liu G G, Zhu Y P, et al. Unambiguous peak identification of a silicon Fabry-Perot temperature sensor assisted with an in-line fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(17): 4210-4215.
- [14] Liu Y G, Wang Y X, Yang D Q, et al. Hollow-core fiber-based all-fiber FPI sensor for simultaneous measurement of air pressure and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11236-11241.
- [15] Zhang Z, He J, Du B, et al. Measurement of high pressure and high temperature using a dual-cavity Fabry-Perot interferometer created in cascade hollow-core fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6009-6012.
- [16] Cui Y, Jiang Y, Liu T M, et al. A dual-cavity Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 80582-80587.
- [17] Yuan L, Lan X W, Huang J, et al. Miniaturized optical fiber Fabry-Perot interferometer fabricated by femtosecond laser irradiation and selective chemical etching[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8974: 89741A.
- [18] Li Z L, Liao C R, Liu S, et al. Research progress of in-fiber Fabry-Perot interferometric temperature and pressure sensors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070708.
- [19] Yu Z H, Wang A B. Fast white light interferometry demodulation algorithm for low-finesse Fabry-Pérot sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 817-820.
- [20] Deng M, Tang C P, Zhu T, et al. Refractive index measurement using photonic crystal fiber-based Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9): 1593-1598.
- [21] Deng M, Tang C P, Zhu T, et al. Refractive index measurement using photonic crystal fiber-based Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9): 1593-1598.
- [22] Zhang P, Tang M, Gao F, et al. Simplified hollow-core fiber-based Fabry-Perot interferometer with modified vernier effect for highly sensitive high-temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-10.
- [23] Bai L, Zheng G, Zhang X X, et al. Optical fiber pressure sensor based on frequency-modulated continuous-wave and analysis of its measurement characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0328002.
白浪, 郑刚, 张雄星, 等. 调频连续波光纤压力传感器及其测量特性分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0328002.
- [24] Wang C, Zhang X Z, Jiang J F, et al. High-speed airflow measurement system based on optical fiber Fabry-Perot sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206005.
王超, 张学智, 江俊峰, 等. 基于光纤法布里-珀罗传感的高速气流测量系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206005.
- [25] Bai L, Zheng G, Guo Y, et al. Analysis and compensation method of temperature characteristics of high-precision frequency-modulated continuous wave fiber optic pressure sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0928002.
白浪, 郑刚, 郭媛, 等. 高精度调频连续波光纤压力传感器温度特性分析及补偿方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0928002.