

DOI:10.16136/j.joel.2022.04.0503

# 光纤端面涂覆敏感材料的高灵敏度传感器

陈海林, 江超\*, 叶文豪, 王媛, 宋娇, 李宏

(湖北师范大学 物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002)

**摘要:**描述了一种基于法布里-佩罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)结构的双参数光纤传感器,并演示了它可以同时测量气压和温度。所提出的FPI传感结构由覆盖在单模光纤端面上半球形的紫外固化胶组成,FPI产生的光谱干涉峰对环境温度和气压变化敏感。选择传感器干涉谱中两个谐振峰波谷Dip 1和Dip 2,跟踪它们的波长随气压和温度的变化,构建传输矩阵,能够同时测量气压和温度,并消除交叉敏感。实验结果表明Dip 1点的气压与温度灵敏度分别为2.925 nm/MPa和-1.165 nm/°C,Dip 2点的气压与温度灵敏度分别为4.715 nm/MPa和-1.209 nm/°C。利用Dip 1和Dip 2的气压与温度灵敏度构建测量矩阵,传感器实现了多参数测量。通过长时间稳定性实验发现传感器测量气压与温度的最大误差分别为0.068 MPa和0.19 °C。该传感器具有灵敏度高、结构简单紧凑、造价低廉等优点,在工业生产中具有一定的应用价值。

**关键词:**光纤传感器;法布里-珀罗干涉仪;紫外(ultraviolet,UV)胶;气压;温度

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)04-0349-07

## Optical fiber end-face coated with sensitive-material for high sensitivity sensor

CHEN Hailin, JIANG Chao\*, YE Wenhao, WANG Yuan, SONG Jiao, LI Hong

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

**Abstract:** A dual-parameter fiber-optic sensor based on Fabry-Perot interferometer (FPI) structure is described and demonstrated to measure gas pressure and temperature simultaneously. The proposed sensing structure consists of an extrinsic FPI in the form of hemispherical ultraviolet curing glue capped on a single mode fiber end face. The spectral interference peak produced by FPI is sensitive to ambient temperature and gas pressure variations. We select two resonant peak dips in the interference spectrum to track their wavelength changes with gas pressure or temperature, constructing transport matrices capable of measuring both gas pressure and temperature and eliminating mutual cross-sensitivities. The experimental results showed that the gas pressure and temperature sensitivity at dip 1 were of 2.925 nm/MPa and -1.165 nm/°C, and the gas pressure and temperature sensitivity at dip 2 were of 4.715 nm/MPa and -1.209 nm/°C, respectively. Building the measurement matrix using the gas pressure and temperature sensitivity of dip 1 and dip 2, the sensor can realize the multi-parameters measurement. The stability experiment of the sensor showed that the measurement error of the gas pressure and temperature were of 0.068 MPa and 0.19 °C, respectively. The sensor has high sensitivity, low cost, simple and compact structure. It has certain application value in industrial production.

**Key words:** fiber optic sensor; Fabry-Perot interferometer; ultraviolet (UV) glue; gas pressure; temperature

\* E-mail: jiangchao1969@126.com

收稿日期: 2021-07-20 修订日期: 2021-09-12

基金项目: 湖北师范大学研究生创新项目(20210110)、湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020014)和湖北师范大学优秀创新团队计划项目(T201502)资助项目

# 1 引言

光纤法布里-佩罗干涉仪 (Fabry-Perot interferometer, FPI) 作为一种常见的光纤干涉仪, 具有精度高、稳定性好等优点<sup>[1]</sup>。对于 Fabry-Perot 腔, 当它的腔长度或者腔中介质折射率发生变化时, 其中传输的光束相位将发生改变, 使得 FPI 具有极高的灵敏度<sup>[2]</sup>。紫外胶作为一种性能优良的聚合物材料, 它的热膨胀系数大和弹性好, 人们利用它与空心光纤一起构成 FPI 用于温度传感测量<sup>[3]</sup>和气压传感测量<sup>[4]</sup>, 获得很高的灵敏度, 但传感器结构制造相对复杂, 增加了成本和制造难度。最近, 人们发现利用一些高热膨胀系数和弹性系数的聚合物在单模光纤端面制作结构特别简单的 FPI, 也能够用于温度、气压和折射率的测量<sup>[5-15]</sup>。ZHANG 等<sup>[5]</sup>在光纤端面研制了一种聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 涂层的超微 FPI 传感器, 用于折射率与温度的高灵敏度测量。ZHANG 等<sup>[6]</sup>则探索了光纤端面聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 聚合物涂层的 FPI 用于气压的高效测量。SALUNKHE 等<sup>[7]</sup>演示了光纤端面带有聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 的 FPI 传感器用于气压测量, SALUNKHE 等<sup>[8]</sup>还提出了在光纤端面涂覆甲基丙烯酸甲酯 (poly(methyl methacrylate), PMMA) 用于温度测量。COOTE 等<sup>[9]</sup>则探索了在光纤端面镀石墨烯用于温度测量, MA 等<sup>[10]</sup>也提出了在光纤端面镀石墨烯用于气压测量。CHENG 等<sup>[11]</sup>演示了在光纤端面涂覆硅橡胶用于高灵敏度气压测量。GE 等<sup>[12]</sup>在光纤端面涂覆 PDMS 与紫外胶两种敏感材料实现了双参量测

量。CHEN 等<sup>[13]</sup>在多模光纤端面涂覆紫外胶测量了气压。LIU 等<sup>[14]</sup>利用布拉格光栅与端面镀膜紫外膜的单模光纤级联实现了温度与气压的双参量测量。SUN 等<sup>[15]</sup>在单模光纤端面镀膜紫外胶薄膜实现了气压与温度的同时测量。这些光纤帽盖传感器灵敏度极高、结构简单和制备容易, 为高灵敏度传感器的设计提供了一种新思路。在本研究中, 基于菲涅尔反射原理, 也开发了一种单模光纤端面紫外胶涂层的 FPI 传感器, 它被证明是一种简单的和高灵敏度的传感技术。为了提高传感器的灵敏度, 只需调整单模光纤端面的紫外胶涂层厚度即可。此外, 该传感器还具有结构简单、低成本和能够同时测量气压与温度等特点。它在生化、物理或其他领域展示出广泛的应用潜力。

# 2 传感器结构与工作原理

利用紫外固化胶涂覆在单模光纤末端面形成的 FPI 结构示意图、光路与显微图如图 1 所示。单模光纤采用武汉长飞光纤光缆有限公司生产的普通标准单模光纤, 纤芯直径为 9 μm, 包层直径为 125 μm。在图 1(a)中, 紫外胶薄膜形成了 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 等 2 个反射面, 反射面 M<sub>1</sub> 由单模光纤的末端面构成, 反射面 M<sub>2</sub> 由紫外固化胶与外空气接触面构成, 由反射面 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 形成一个 FPI。图 1(b)是制作好的 FPI 传感器的显微图, 测得紫外固化胶的中间部分厚度约为 29.20 μm。图 1(b)显示在单模光纤 (single mode fiber, SMF) 的末端形成了一个帽形的结构, 紫外胶形成一个透明的 FPI, M<sub>2</sub> 面为一个向外的凸面, 主要是因为单模光纤与紫外固化胶之间的粘合力超过了紫外固化胶本身的分子间力。

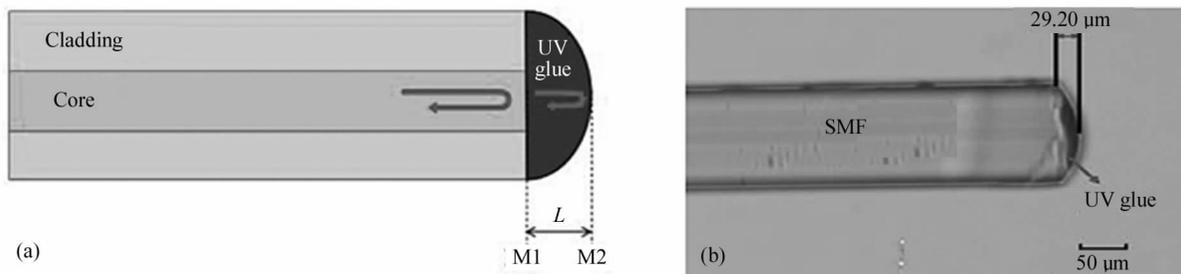


图 1 (a) 传感器的结构示意图与光路图; (b) 传感器的实物显微图

Fig. 1 (a) Structural diagram and optical diagram of the sensor; (b) Physical micrograph of the sensor

由于 2 个反射面的反射率较小, 干涉仪可以看成是 2 个反射面的双光束干涉, 设 2 个反射面的反射光强分别为 I<sub>1</sub> 和 I<sub>2</sub>, 则依据干涉理论计算得到总的反射光干涉强度 I 为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda}\right), \quad (1)$$

式中, n 是 FPI 中紫外固化胶的折射率, L 为 FPI 的腔长, λ 为自由空间光波长。

当环境气压或者温度变化时, 紫外固化胶发生热膨胀或折射率变化, 导致 FPI 的反射谱发生漂移, 通过监测 FPI 反射谱谐振峰波长漂移进行环境气压与温度的测量。假设只考虑气压变化对传感器的影

响,则传感器的气压响应灵敏度为:

$$S_p = \frac{d\lambda}{dP} = \lambda \left( \frac{1}{L} \frac{dL}{dP} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dP} \right), \quad (2)$$

式中,  $P$  是施加的气压,  $\lambda$  是干涉谱波谷波长。

由于紫外固化胶材料的低弹性模量,  $\frac{dL}{dP}$  很大, 导致高的气压敏感度。虽然压力变化时, 也会造成  $\frac{dn}{dP}$  变化, 但是  $\frac{dL}{dP}$  变化起主要作用。由于使用的紫外固化胶成分复杂,  $\frac{dL}{dP}$  和  $\frac{dn}{dP}$  无法得到具体数字, 因此这里不做定量分析。

当只考虑温度变化对传感器的影响, 则传感器的温度响应灵敏度为:

$$S_T = \frac{d\lambda}{dT} = \lambda \left( \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right), \quad (3)$$

式中,  $T$  是环境温度,  $\frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$  是紫外固化胶的热膨胀系数,  $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$  是紫外固化胶的热光系数。

由于紫外固化胶的热膨胀系数很大, 因此传感器的温度灵敏度很高, 在温度响应中热膨胀系数起着主要作用。由于使用的紫外固化胶成分复杂, 其热光系数没有具体数字, 因此这里不做定量分析。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 传感器的制备

传感器结构的制备过程如图 2 所示。本文将透明的紫外胶涂覆在光纤尖端形成 FPI 的过程与方法与文献[14]、[15]相似。首先, 使用光纤切割刀(日本住友, FC-6S)将 SMF<sub>1</sub> 端面切割开形成反射表面, 把 SMF<sub>1</sub> 夹在光纤熔接机(南京吉隆, KL-300T)的左支架上。其次, 将一段端面切割好的 SMF<sub>2</sub> 浸入紫外(ultraviolet, UV) 固化胶(NO A65)中, 让其端面覆盖一些 UV 胶, 然后将 SMF<sub>2</sub> 夹在光纤熔接机的右支架上。第三, 通过熔接机的电机拖动 SMF<sub>1</sub> 和 SMF<sub>2</sub> 相互接触, 当 SMF<sub>1</sub> 端表面附着了一定厚度的紫外胶后, 熔接机右支架的 SMF<sub>2</sub> 脱离左支架。第四, 利用小功率的紫外灯照射 SMF<sub>1</sub> 端面紫外胶 1 min 左右, 紫外胶将很快固化, 形成一个透明的涂层。紫外胶在液态时折射率约为 1.425, 在紫外固化过程中逐渐转变为折射率约 1.5 的固体聚合物。最终在单模光纤的末端形成一个具有一定厚度的半球形光滑的固体聚合物帽, 构成一个 FPI。

利用光纤环形器把制作的结 构接到宽带光源

(broadband light source, BBS)与光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)中测量它的反射谱, 如果干涉谱没有好的条纹对比度, 就必须继续进行涂覆。FPI 的干涉条纹的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 为:

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

从式(4)可知, FSR 由 FPI 的腔长度  $L$  决定。如果胶盖的厚度不满足要求, 可以多次重复上述步骤, 直到厚度足够为止。本文利用上述方法制作的 FPI 的显微像如图 1(b)所示, 胶盖的中间厚度约为 29.28  $\mu\text{m}$ , 依据公式(4)算得  $FSR = 27.35 \text{ nm}$ 。制作的 FPI 的反射谱与空间频谱图如图 3 所示, 从图 3 中可以得到 FPI 具有较大的条纹对比度和 FSR, 它的 FSR 约为 29 nm, 对应的空间频谱频率约为 0.036 65, FSR 的理论计算值与实验测量值基本一致。

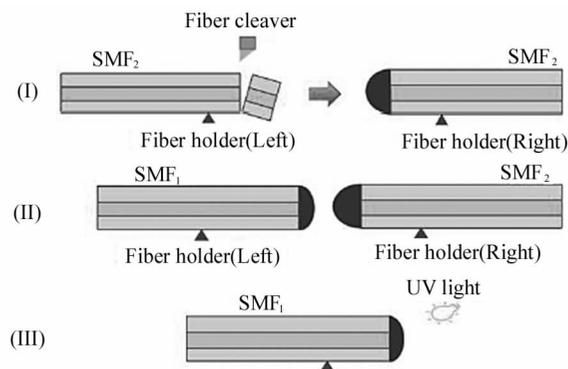


图 2 传感器结构的制备过程

Fig. 2 Preparation process of the sensor structure

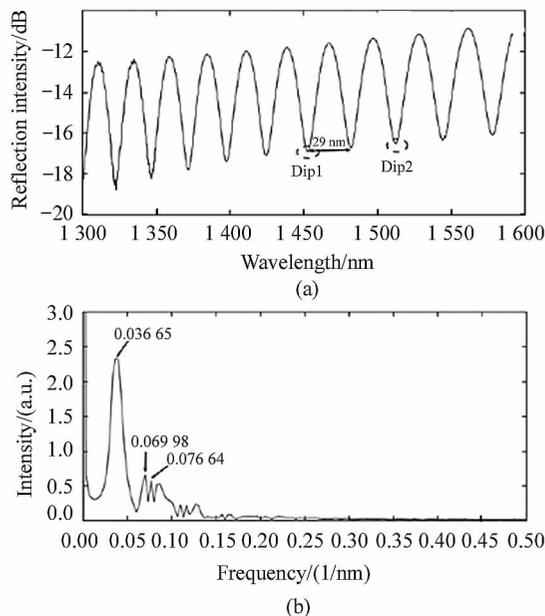


图 3 传感器特性:(a) 反射谱; (b) 空间频谱

Fig. 3 Sensor characteristics: (a) Reflection spectrum; (b) Spatial frequency spectrum

### 3.2 传感器的气压实验

图4为传感器测量气压的实验装置图。图中包括宽带光源(BBS, FL-ASE-EB-D-2-2-FC/APC)、光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA, AQ6370D)、光纤环形器、气室、气泵、高压气表和传感器等。气室由硬塑料三通管子构成,三通的2个直通端经过耐高压软管接气泵与气压表,传感器通过玻璃管接在三通的第3个端口上,利用AB胶把三通的各个接口都密封好构成气室,放置24 h等待AB胶完全干燥后,再对这些地方进行检漏,确保实验时不漏气,防止漏气影响实验测量结果。气压实验在室温下进行,通过手动方式直接操作气泵给气室线性加压和减压。由于单模光纤端面镀的紫外胶不能承受太高气压,选取气压 $P$ 的测量范围为:0—0.3 MPa,每次给气室加压0.05 MPa,在每个增压点保持10 min让气压达到稳定不变后再记录光谱,确保数据真实可靠。

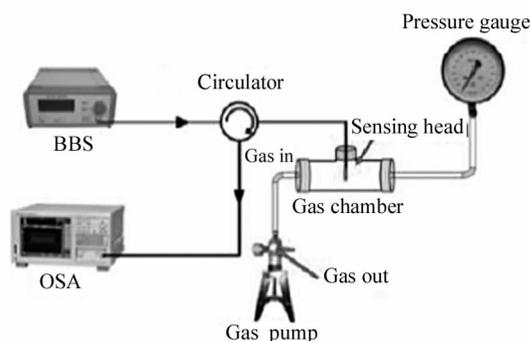


图4 传感器的气压实验装置图

Fig. 4 The gas pressure test device for the sensor

图5显示了传感器干涉谱中Dip 1随着气压上升和下降的变化情况及拟合图,当气压从0 MPa上升到0.3 MPa时,Dip 1朝着长波长方向漂移(红移)了约0.89 nm,对变化数据进行线性拟合,得到线性拟合度为0.997 7,气压灵敏度为2.925 nm/MPa。在图5中,当气压从0.3 MPa下降到0 MPa时,Dip 1朝着短波长方向漂移(蓝移)了约0.83 nm,对变化数据进行线性拟合,得到线性拟合度为0.979 2,气压灵敏度为2.772 nm/MPa。实验结果与理论分析一致,对比升降气压过程,发现波谷Dip 1的变化基本一致,说明传感器具有极小的回程误差,良好的重复性。同时说明制作的传感器能够测量气压,而且获得很高的气压灵敏度。

为了构建传输矩阵实现传感器同时对气压与温度的测量,本文选择传感器干涉谱中另外一个波谷Dip 2来考察气压的变化情况。图6显示了传感器

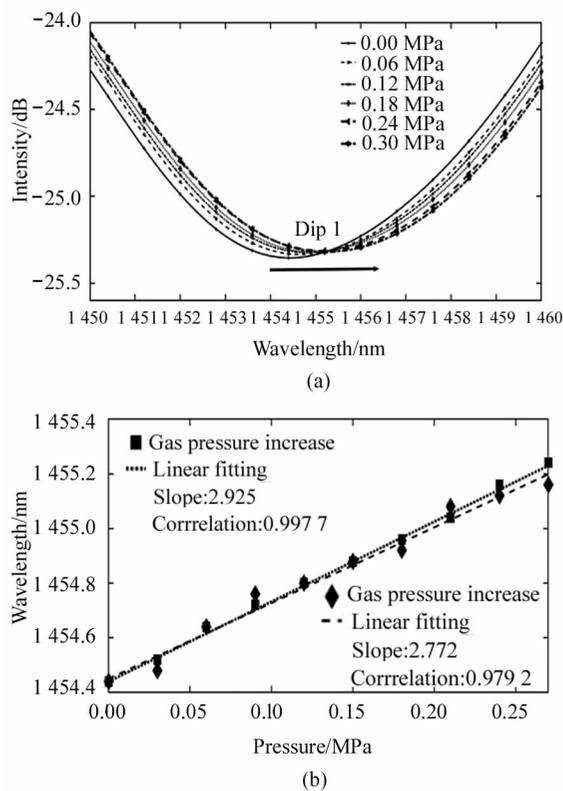


图5 传感器反射谱中波谷Dip 1随气压的(a) 漂移图和(b) 拟合图

Fig. 5 (a) Shift diagram and (b) fitting diagram of Dip 1 in the sensor reflection spectrum with gas pressure

干涉谱中Dip 2随着气压上升和下降的变化情况及拟合图,当气压从0 MPa上升到0.3 MPa时,Dip 2朝着长波长方向漂移(红移)了约1.41 nm,对变化数据进行线性拟合,得到线性拟合度为0.994 2,气压灵敏度为4.715 nm/MPa。在图6中,当气压从0.3 MPa下降到0 MPa时,Dip 2朝着短波长方向漂移(蓝移)了约1.39 nm,对变化数据进行线性拟合,得到线性拟合度为0.989 3,气压灵敏度为4.642 nm/MPa。对比升降气压过程,发现波谷Dip 2的变化基本一致,说明传感器具有较小的回程误差,良好的重复性。同时说明传感器能够利用Dip 2点来测量气压,而且获得更高的气压灵敏度。

气压稳定性实验主要是为了检验传感器测量气压的误差。将气室气压设置为某一个固定的值(例如:0.1 MPa)不变,先保持气压稳定30 min,而后每隔10 min测量一次Dip 1与Dip 2的峰值波长,在100 min内Dip 1与Dip 2的波长变化情况如图7所示。由图7可知,在100 min内测得Dip 1的波长与理论值(1452.4 nm)的最大误差约为0.2 nm,Dip 2

的波长与理论值 (1507.8 nm) 的最大误差约 1.45 nm, 依据前面测得的 Dip1 和 Dip2 的气压灵敏度 2.925 nm/MPa 与 4.715 nm/MPa, 计算得到 Dip1

的测量误差约为 0.068 MPa ( $0.2/2.925 = 0.068$  MPa), Dip2 的测量误差约为 0.031 MPa ( $1.45/4.715 = 0.031$  MPa)。实验结果表明传感器测量气压的误差较小, 其稳定性也较好。

### 3.3 传感器的温度实验

传感器的温度实验装置如图 8 所示。实验中采用具有 400 nm 带宽 (1250—1650 nm) 的低偏振超宽带光源 (BBS, FL-ASE-EB-D-2-2-FC/APC) 作为光源, 利用可程式管式温度炉 (合肥科晶 OTF-1200X) 来评估传感器的温度特性, 利用具有 0.05 nm 分辨率的光谱分析仪 (OSA, YOKOGAWA, AQ6370D) 来记录传感器的反射谱, 利用光纤环形器把 BBS、OSA 和传感器连接在一起。在温度实验中, 光从 BBS 发出, 经过环形器传输到传感器中, 然后传感器的反射光返回到环形器, 最后被环形器输出端的 OSA 收集。传感器的温度测量范围 55 °C 到 90 °C, 每次温度变化的步长为 5 °C。

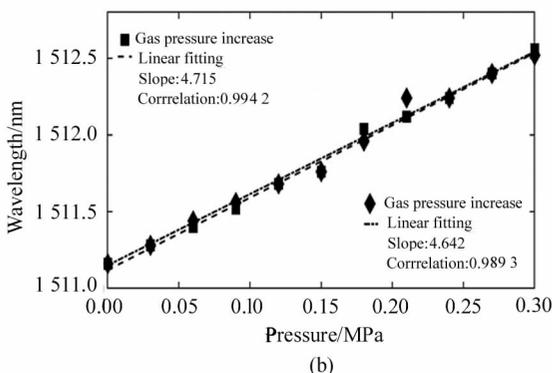
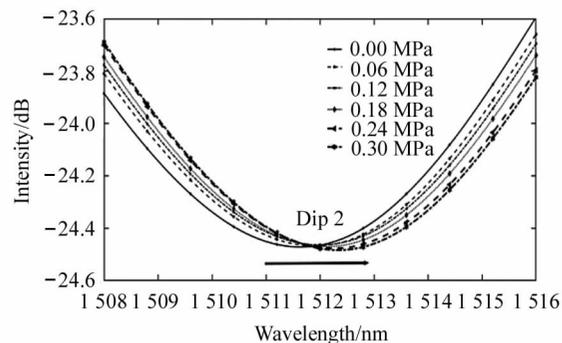


图 6 传感器反射谱中波谷 Dip 2 随气压的 (a) 漂移图和 (b) 拟合图

Fig. 6 (a) Shift diagram and (b) fitting diagram of Dip 2 in the sensor reflection spectrum with gas pressure

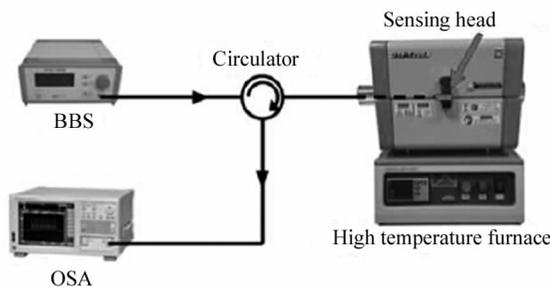


图 8 传感器的温度实验装置图

Fig. 8 Experiment setup of the measuring temperature of the sensor

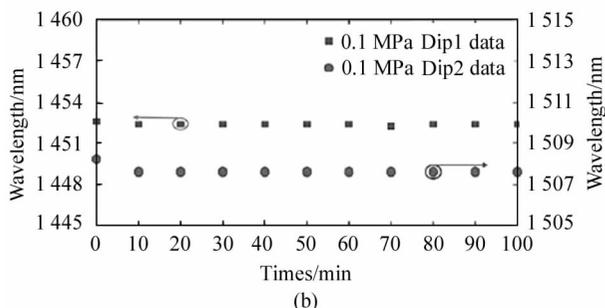
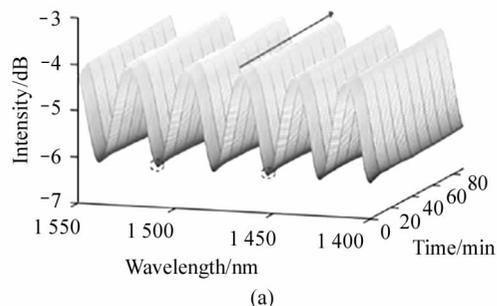


图 7 传感器中波谷 Dip 1 和 Dip 2 在气压恒定下随时间的演变

Fig. 7 The spectrum evolution of Dip 1 and Dip 2 of the sensor with time at constant gas pressure

图 9 显示了传感器干涉谱中 Dip 1 随着温度上升时的变化情况, 当温度从 55 °C 升到 90 °C 时, Dip 1 朝着短波长的方向移动 (蓝移)。实验结果表明当温度上升 35 °C, Dip 1 的波长蓝移了约 40 nm, 对变化数据进行线性拟合, 得到线性拟合度为 0.9936, 温度灵敏度为 -1.165 nm/°C。图 9 还显示了传感器干涉谱中 Dip 1 随着温度下降时的变化情况, 当温度从 90 °C 降到 55 °C 时, Dip 1 朝着长波长的方向移动 (红移)。实验结果表明当温度下降 35 °C, Dip 1 的波长红移了约 42.5 nm, 对变化数据进行线性拟合, 得到线性拟合度为 0.9807, 温度灵敏度为 -1.215 nm/°C。实验结果与理论分析一致, 对比升降温过程, 发现波谷 Dip 1 的变化基本一致, 说明传感器具有较小的回程误差, 良好的重复性。同时说明传感

器能够测量温度,而且获得了较高的温度灵敏度。

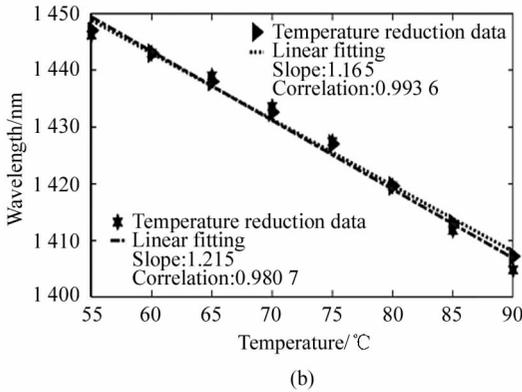
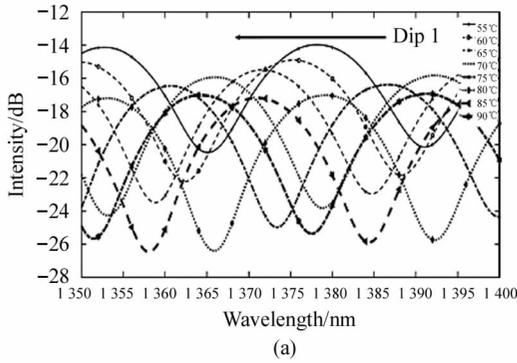


图9 传感器反射谱中波谷 Dip 1 随温度的(a)变化图和(b)拟合图

Fig. 9 (a) Variation diagram and (b) fitting diagram of Dip 1 in the sensor reflection spectrum with temperature

为了构建传输矩阵实现传感器同时对气压与温度的测量,本文选择传感器干涉谱中另外一个波谷 Dip 2 来考察温度的变化情况。图 10 显示了传感器干涉谱中 Dip 2 随着温度上升时的变化情况,实验结果表明当温度上升时,Dip 2 也向短波长方向漂移(蓝移),获得温度灵敏度为  $-1.209 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,线性拟合度为 0.9893。图 10 也显示了传感器干涉谱中 Dip 2 随着温度下降时的变化情况,实验结果表明当温度下降时,Dip 2 向长波长方向漂移(红移),获得温度灵敏度为  $-1.273 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,线性拟合度为 0.9801。对比升降温过程,发现波谷 Dip 2 的变化基本一致,说明传感器具有较小的回程误差,良好的重复性。同时说明传感器也可以利用 Dip 2 来测量温度,获得的温度灵敏度与 Dip 1 的基本相当。

温度稳定性实验主要是为了检验传感器测量温度时的误差。将温度炉的温度设置为某一个固定的温度(例如:  $60^\circ\text{C}$ )不变,然后将传感器放置到炉管中央,先保持温度稳定 30 min,而后每隔 10 min 测量一

次 Dip 1 与 Dip 2 的峰值波长,在 100 min 内 Dip 1 与 Dip 2 的波长变化情况如图 11 所示。由图 11 可知,在 100 min 内测得 Dip 1 的波长与理论值(1443.6 nm)的最大误差约为 0.22 nm,Dip 2 的波长与理论值(1502.8 nm)的最大误差约为 0.2 nm。依据前面测得传感器 Dip 1 与 Dip 2 的温度灵敏度  $-1.165 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  与  $-1.209 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,计算得到 Dip 1 的测量误差为  $0.19^\circ\text{C}$  ( $0.22/1.165=0.19^\circ\text{C}$ ),Dip 2 的测量误差为  $0.17^\circ\text{C}$  ( $0.2/1.209=0.17^\circ\text{C}$ )。实验结果表明传感器测量温度的误差很小,其稳定性也较好。

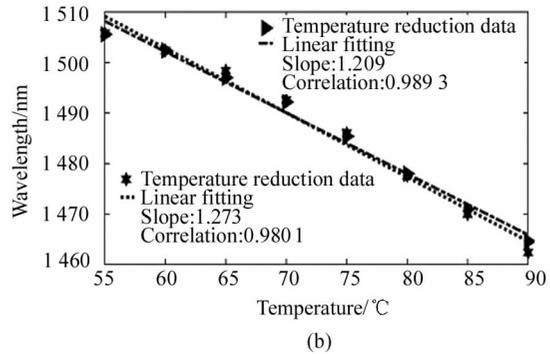
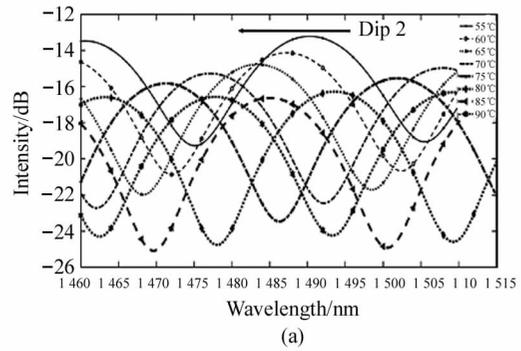


图10 传感器反射谱中波谷 Dip 2 随温度的(a)变化图与(b)拟合图

Fig. 10 (a) Variation diagram and (b) fitting diagram of Dip 2 in the sensor reflection spectrum with temperature

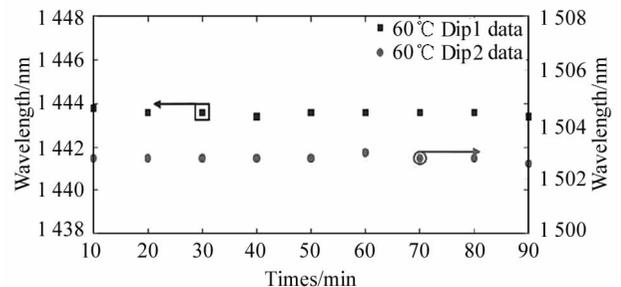


图11 传感器中波谷 Dip 1 与 Dip 2 在恒定温度下随时间的演变

Fig. 11 The spectrum evolution of Dip 1 and Dip 2 of the sensor with time at constant temperature

### 3.4 实验结果讨论

由上述实验结果可知,干涉仪透射谱谐振峰波长对气压和温度都敏感,利用波长调制解调法和测量矩阵,可以实现同时对气压和温度的测量,不存在交叉敏感,测量矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为波谷 Dip 1 和 Dip 2 的波长变化量, $\Delta P$ 和 $\Delta T$ 分别为环境气压和温度的变化量, $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别为波谷 Dip 1 和 Dip 2 对应的气压灵敏度, $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 分别为波谷 Dip 1 和 Dip 2 对应的温度灵敏度。

代入数据得到传感器气压与温度的灵敏度测量矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.925 & -1.165 \\ 4.715 & -1.209 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (6)$$

通过求式(6)的逆矩阵,能够得到测量的气压与温度,消除它们的交叉敏感。

## 4 结 论

本文提出了一款基于紫外胶涂覆在 SMF 端面构成 FPI 用于高灵敏度气压与温度同时测量的传感器。该传感器包括一段 SMF 和一定厚度的紫外胶薄膜,利用 SMF 的端面和紫外胶薄膜构成一个 FPI。当紫外胶受压或者受热时,导致紫外胶的折射率与厚度发生变化,使 FPI 的谐振峰波长发生漂移,通过考察波长漂移量与气压或者温度变化之间的关系实现气压与温度测量。实验获得传感器的最大气压灵敏度为 4.715 nm/MPa,最大温度灵敏度为 -1.209 nm/°C。实验结果表明传感器灵敏度高,测量误差较小和稳定性好,能够同时实现气压与温度的测量。

### 参考文献:

- [1] XU B, YANG Y, JIA Z B, et al. Hybrid Fabry-Perot interferometer for simultaneous liquid refractive index and temperature measurement[J]. Optics Express, 2017, 25(13):14483-14489.
- [2] LIU Y G, LIU X, FU H W, et al. Temperature dependence of microhole-based fiber Fabry-Perot interferometric sensors fabricated by excimer laser[J]. Optics Engineering, 2018, 57:056104.
- [3] ZHANG J, LIAO H, LU P, et al. Ultrasensitive temperature sensor with cascaded fiber optic Fabry-Perot interferometers based on Vernier effect[J]. IEEE Photonics Journal,

2018, 10(5):1-11.

- [4] ZHANG T, LIU Y, YANG D, et al. Constructed fiber-optic FPI-based multi-parameters sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature, refractive index and temperature[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 49:64-70.
- [5] ZHANG X Y, YU Y S, ZHU C C, et al. Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1):7-10.
- [6] ZHANG Z, LIAO C, TANG J, et al. High-sensitivity gas-pressure sensor based on fiber-tip PVC diaphragm Fabry-Pérot interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18):4067-4070.
- [7] SALUNKHE T T, LEE D J, LEE H K, et al. Enhancing temperature sensitivity of the Fabry-Perot interferometer sensor with optimization of the coating thickness of polystyrene[J]. Sensors, 2020, 20:794.
- [8] SALUNKHE T T, CHOI H W, PARK S J, et al. High sensitivity temperature sensor based on Fresnel reflection with thermosensitive polymer: control of morphology and coating thickness[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59, SGGG06.
- [9] COOTE J M, TORII R, DESJARDINS A E. Dynamic characterisation of fibre-optic temperature sensors for physiological monitoring[J]. Sensors, 2021, 21:221.
- [10] MA J, JIN W, HO H L, et al. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm[J]. Optics Letters, 2012, 37(13):2493-2496.
- [11] CHENG X, DASH J N, GUNAWARDENA D S, et al. Silicone rubber based highly sensitive fiber-optic Fabry-Perot interferometric gas pressure sensor[J]. Sensors, 2020, 20:4927.
- [12] GE M, LI Y, HAN Y, et al. High-sensitivity double-parameter sensor based on the fibre-tip Fabry-Pérot interferometer[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 64(6):596-600.
- [13] CHEN W P, WANG D N, XU B, et al. Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement[J]. Scientific Reports, 2017, 7:368.
- [14] LIU Y, YANG D, WANG Y, et al. Fabrication of dual-parameter fiber-optic sensor by cascading FBG with FPI for simultaneous measurement of temperature and gas pressure[J]. Optics Communications, 2019, 443:166-171.
- [15] SUN B, WANG Y, QU J, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet[J]. Optics Express, 2015, 23(3):1906-1911.

作者简介:

江超 (1969—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感技术的研究工作。