

## 基于 PDMS 膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器

徐廷廷<sup>1,2</sup>, 杨玉强<sup>1\*</sup>, 杨文龙<sup>2\*\*</sup>, 王骥<sup>1\*\*\*</sup>, 刘家成<sup>2</sup>, 朱世伟<sup>2</sup><sup>1</sup> 广东海洋大学智慧海洋传感网及其装备工程技术研究中心, 广东 湛江 524088;<sup>2</sup> 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 提出并制备了一种基于聚二甲硅氧烷(PDMS)膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器。该传感器由空气腔(FP1)和 PDMS 腔(FP2)级联而成,且 PDMS 腔长度远小于空气腔长度,从而使该传感器满足游标效应产生条件 [FP1 腔与复合腔 FP3(由 FP1 和 FP2 组成)的光程接近]。当外界温度变化时,PDMS 膜向两侧膨胀,导致 FP1 腔和 FP3 腔的干涉谱向相反的方向移动。实验结果表明,FP1 腔和 FP3 腔干涉谱产生了游标效应,干涉谱包络明显;在 50~60 °C 范围内,温度灵敏度达到 1.32 nm/°C,该结果与理论分析结果相符。该传感器具有体积小、结构轻、灵敏度高、制备简单等优点,在化学、生物、医疗等领域具有潜在的应用价值。

**关键词** 光纤传感器; 游标效应; 法布里-珀罗干涉仪; 高灵敏温度检测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0806004

## Cascaded Double-Cavity Temperature Sensor Based on Hollow Fibers Encapsulated by PDMS Membrane

Xu Tingting<sup>1,2</sup>, Yang Yuqiang<sup>1\*</sup>, Yang Wenlong<sup>2\*\*</sup>, Wang Ji<sup>1\*\*\*</sup>, Liu Jiacheng<sup>2</sup>, Zhu Shiwei<sup>2</sup><sup>1</sup> *Research Center of Guangdong Smart Oceans Sensor Networks and Equipment Engineering,**Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;*<sup>2</sup> *School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology,**Harbin, Heilongjiang 150080, China*

**Abstract** A cascaded double-cavity temperature sensor based on hollow fibers encapsulated by polydimethylsiloxane (PDMS) membrane is proposed and prepared. The sensor consists of an air cavity (FP1) and a PDMS cavity (FP2) that are cascaded, and the PDMS cavity is much shorter than the air cavity so that the sensor can meet the condition of the Vernier effect [the optical path of FP1 is close to that of the composite cavity FP3 (composed of FP1 and FP2)]. When the external temperature changes, the PDMS membrane expand to both sides, resulting in the interference spectra of FP1 and FP3 move in the opposite direction. The experimental results show that the interference spectrum of FP1 and FP3 manifest the Vernier effect, and the envelope of the interference spectrum is obvious. The temperature sensitivity reaches 1.32 nm/°C in the range of 50–60 °C, which is consistent with the theoretical analysis results. The proposed sensor, with the advantages of small size, light structure, high sensitivity, and simple preparation, has application potential in chemistry, biology, and medical treatment.

**Key words** optical fiber sensor; vernier effect; Fabry-Perot interferometer; highly sensitive temperature measurement

收稿日期: 2021-08-07; 修回日期: 2021-10-04; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51777046)、黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019A004)

通信作者: \*yangyuqiang@hrbust.edu.cn; \*\*wlyang@hrbust.edu.cn; \*\*\*13902576499@163.com

# 1 引言

温度在粮食储备、生物蛋白活性与医学等领域起着非常重要的作用,实现高精度温度测量一直是研究者追寻的目标<sup>[1-2]</sup>。与传统温度传感器相比,光纤温度传感器具有安全性能好、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀等优点,特别是光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI)温度传感器,具有体积小、结构紧凑、便于集成等优点<sup>[3-4]</sup>,受到了国内外学者的广泛关注<sup>[5-6]</sup>。然而,受石英热膨胀和热光系数偏低的影响,全光纤 FPI 温度传感器的灵敏度普遍较低,约为  $84.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>。

将聚二甲基硅氧烷(PDMS)与光纤结合是提高光纤温度传感器灵敏度的一种有效方法<sup>[8-9]</sup>。PDMS 是一种由弹性聚合物(Sylgard184-A)和硬化剂(Sylgard184-B)混合而成的温度敏感材料。它不仅具有非常好的热膨胀特性与热光特性,还具有良好的粘接性和化学惰性。起初 PDMS 为液体,在温度作用下将逐渐变为固态,因此易于与光纤相结合,制备出高灵敏温度传感器。2014 年,Zhang 等<sup>[10]</sup>提出了一种采用浸涂法的方式在单模光纤(SMF)尾端涂上 PDMS 形成帽状结构的光纤 FPI,该传感器可同时实现折射率和温度的测量,温度灵敏度为  $385.46 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ;2016 年,Hernández-Romano 等<sup>[11]</sup>将单模光纤端面涂覆一层  $\text{TiO}_2$  与单模进行熔接,用 PDMS 覆盖制成 FPI 温度传感器,该温度传感器灵敏度为  $0.13 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ;2018 年,He 等<sup>[12]</sup>用 PDMS 包覆在侧抛无芯光纤上制备了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的温度传感器,该温度传感器在  $30\sim 85^\circ\text{C}$  范围内灵敏度为  $0.44 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。借助 PDMS 良好的温度特性,上述光纤温度传感器的灵敏度均有不同程度的提高。

近年来,光学游标效应被广泛用于提高光纤干涉计的测量灵敏度。光学游标效应原理与游标卡尺

类似,当自由光谱范围接近的两干涉计级联/并联时,其灵敏度将呈现放大现象。2014 年,Zhang 等<sup>[13]</sup>将两个 FPI 级联使其产生游标效应,制备了磁场和压力传感器,其灵敏度比单个 FPI 提高了约 29 倍。2015 年,Yang 等<sup>[14]</sup>提出基于三面反射式级联双腔结构的光纤气体折射率传感器,相对于单腔结构,游标效应使其灵敏度提高了约 35 倍。2017 年,Quan 等<sup>[15]</sup>将 Sagnac 环和 FPI 级联使其产生游标效应,其温度灵敏度比单 Sagnac 环结构提高了 20.7 倍。以上结果表明游标效应是提高干涉计测量灵敏度的一种有效方法。

本研究提出并制备了一种基于 PDMS 膜封装空芯光纤(HCF)的级联双腔温度传感器,该传感器是由单模光纤、空气腔和 PDMS 膜构成,即 SMF-air-PDMS 结构,PDMS 膜的厚度远小于空气腔长度,从而使空气腔和复合腔(由空气腔和 PDMS 膜构成)之间产生游标效应。与全光纤级联双腔温度传感器相比<sup>[16-17]</sup>,该传感器的温度灵敏度得到了大幅提升。

## 2 传感原理与仿真

### 2.1 传感原理

本研究提出的光纤 FPI 温度传感器结构如图 1 所示,由图可知,一段空芯光纤的一端与 SMF 熔接,另一端由 PDMS 膜封装。由于 SMF、空气、PDMS 的折射率不同,该温度传感器存在三个反射面,分别为  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ ,其中  $M_1$  为 SMF/HCF 界面, $M_2$  为 HCF/PDMS 界面, $M_3$  为 PDMS/air 界面。 $M_1$  与  $M_2$  之间构成 FP1 腔(空气腔),腔长为  $L_1$ ;  $M_2$  和  $M_3$  之间构成 FP2 腔(PDMS),腔长为  $L_2$ ;  $M_1$  和  $M_3$  之间构成 FP3(复合腔),腔长为  $L_1 + L_2$ 。图 1(b)为该传感器的显微图。其中反射面  $M_2$  为弧面,这是由液态 PDMS 毛细现象造成的<sup>[18]</sup>。

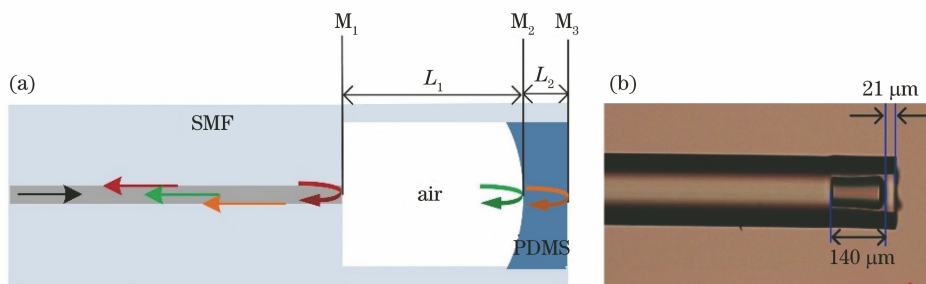


图 1 光纤 FPI 温度传感器结构。(a) 光纤 FPI 结构简示意图;(b) 光纤 FPI 光学显微图

Fig. 1 Diagram of fiber FPI structure. (a) Schematic diagram of fiber FPI structure; (b) optical micrograph of fiber FPI

入射光进入 FPI 传感器后被  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  依次反射回 SMF, 总反射光复振幅  $E_r$  可表示为

$$E_r(\lambda) = A + B \exp(-j\varphi_1) + C \exp(-j\varphi_1 + \varphi_2), \quad (1)$$

$$A = E_0 \sqrt{R_1}, \quad (2)$$

$$B = E_0(1 - \gamma_1)(1 - R_1) \sqrt{R_2}, \quad (3)$$

$$C = E_0(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)(1 - R_1)(1 - R_2) \sqrt{R_3}, \quad (4)$$

式中,  $E_r$  为反射谱的总反射电场,  $E_0$  为入射光的电场,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别是反射面  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  的反射系数,  $R_1 = (n_1 - n_3)^2 / (n_1 + n_3)^2$ 、 $R_2 = R_3 = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$ ,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  分别代表空气、PDMS 和 SMF 的折射率,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别为 FP1 腔和 FP2 腔的光场传输损耗,  $\varphi_1 = 4\pi n_1 L_1 / \lambda$ 、 $\varphi_2 = 4\pi n_2 L_2 / \lambda$  分别为 FP1 腔和 FP2 腔的相位, 其中  $L_1$ 、 $L_2$  分别表示 FP1 腔和 FP2 腔的长度,  $\lambda$  代表入射光波波长。总反射光强可以表示为

$$I_r(\lambda) = I_{dc} + 2AB \cos \varphi_1 + 2BC \cos \varphi_2 + 2AC \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (5)$$

式中,  $I_{dc} = A^2 + B^2 + C^2$  表示干涉谱直流分量,  $2AB \cos \varphi_1$ 、 $2BC \cos \varphi_2$  和  $2AC \cos(\varphi_1 + \varphi_2)$  分别表示 FP1 腔、FP2 腔和 FP3 腔的干涉光谱, 其自由光谱范围  $F_{SR_1}$ 、 $F_{SR_2}$ 、 $F_{SR_3}$  可分别表示为

$$\begin{cases} F_{SR_1} = \frac{\lambda^2}{2n_1 L_1} \\ F_{SR_2} = \frac{\lambda^2}{2n_2 L_2} \\ F_{SR_3} = \frac{\lambda^2}{2(n_1 L_1 + n_2 L_2)} \end{cases} \quad (6)$$

受传输损耗的影响, FP1、FP2 和 FP3 腔的干涉谱振幅满足  $2AB > 2AC > 2BC$ , 因此, 该传感器的反射谱主要由 FP1 腔和 FP3 腔的干涉谱构成。为了便于分析, 将(5)式简化为

$$I_r(\lambda) = 2AB \cos \varphi_1 + 2AC \cos(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (7)$$

当 FP1 腔与 FP3 腔的自由光谱范围接近时 (PDMS 膜比较薄), 该传感器将产生游标效应, 即干涉谱中将呈现干涉谱包络。该干涉谱包络以及自由光谱为  $F_{SREnvelope}$  可表示为

$$I_{Envelope}(\lambda) = D \cos\left(\frac{4\pi n_2 L_2}{\lambda}\right), \quad (8)$$

$$F_{SREnvelope} = \frac{F_{SR_1} \cdot F_{SR_3}}{|F_{SR_1} - F_{SR_3}|}, \quad (9)$$

式中,  $D$  为干涉包络振幅。由文献[7]可知, 该传感

器的温度灵敏度  $S_{Envelope}$  可表示为

$$S_{Envelope} = M(S_2 - S_1), \quad (10)$$

式中,  $S_1$  和  $S_2$  分别为 FP1 腔和 FP3 腔的温度灵敏度,  $M$  为游标效应放大倍率, 可表示为

$$M = \frac{F_{SR_1}}{|F_{SR_1} - F_{SR_3}|} = \frac{n_1 L_1 + n_2 L_2}{n_2 L_2}. \quad (11)$$

假设 PDMS 向两侧均匀热膨胀, 石英的热膨胀和热光系数远小于 PDMS, 则 FP1 腔和 FP3 腔的温度灵敏度可分别表示为

$$\begin{cases} S_1 = -\alpha \lambda_m \frac{L_2}{2L_1} \\ S_2 = \frac{n_2 L_2 \lambda_m}{n_1 L_1 + n_2 L_2} \left( \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{n_2} \right) \end{cases}, \quad (12)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为 PDMS 的热膨胀系数和热光系数。对于 PDMS,  $\alpha = 9.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  [19],  $\beta = -4.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  [8],  $n_2 = 1.41$ , 将其代入(12)式可得  $S_1 < 0$ 、 $S_2 > 0$ , 即 FP1 腔和 FP3 腔具有相反的温度响应。

## 2.2 仿真分析

基于上述原理分析, 本研究对该温度传感器的干涉谱进行了数值仿真, 仿真参数如下:  $E_0 = 1$ ;  $\gamma_1 = 0.5$ ,  $\gamma_2 = 0.3$ ;  $L_1 = 140 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 21 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1.41$ ,  $n_3 = 1.46$ ;  $\alpha = 9.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ,  $\beta = -4.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  (其中  $L_1$  和  $L_2 = 21 \mu\text{m}$  为传感器的实测结果)。图 2 为传感器各腔干涉谱, 由图 2 可知, FP1 和 FP3 腔的自由光谱范围接近且明显小于 FP2 腔的自由光谱范围, FP1、FP3 和 FP2 腔的干涉谱幅值依次减小。图 3(a) 为三腔共同作用下传感器的干涉谱, 由图 3(a) 可知, 传感器干涉谱有明显的包络现象。为了深入探究传感器各腔对干涉谱的贡献, 图 3(b)、图 3(c) 和图 3(d) 给出了三腔不同组合下传感器的干涉谱。从图中可以看出, 忽略 FP1 或 FP3 腔贡献前后传感器干涉谱包络有明显变化, 而忽略 FP2 腔贡献前后传感器干涉谱峰值大小略

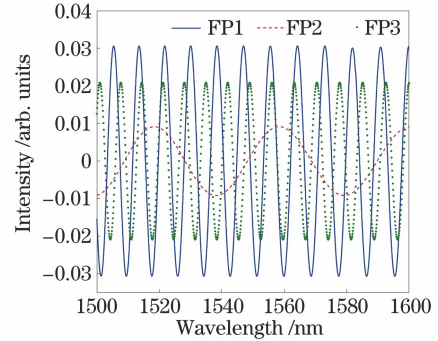


图 2 传感器各腔干涉谱

Fig. 2 Interference spectra of each cavity of the sensor



有变化,而峰值波长不变,由此可知,该传感器包络主要由 FP1 腔和 FP3 腔干涉产生,而 FP2 腔的贡

献较少,几乎可忽略不计。

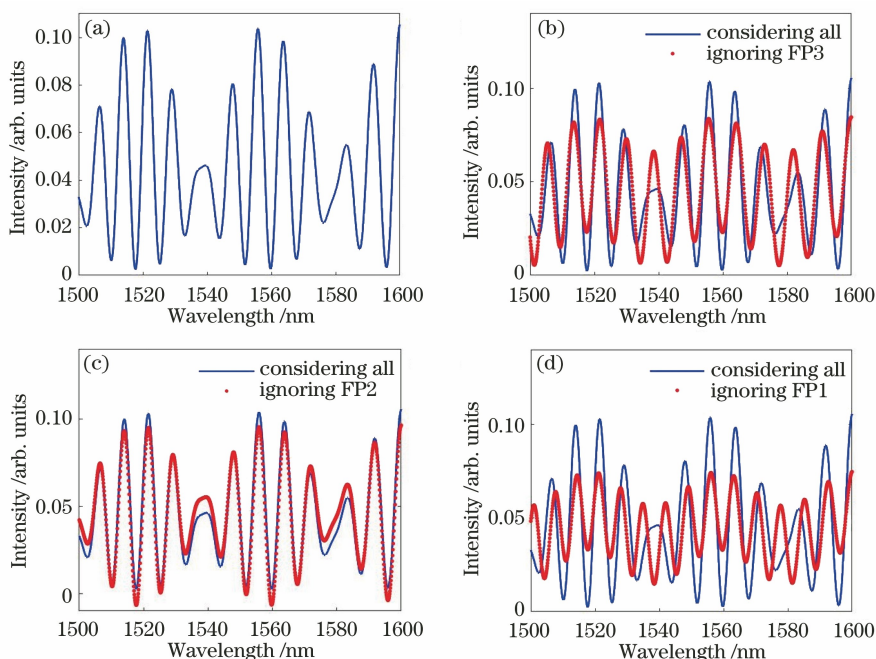


图 3 传感器干涉谱。(a)三腔共同作用;(b)忽略 FP3 腔;(c)忽略 FP2 腔;(d)忽略 FP1 腔

Fig. 3 Interference spectra of the sensor. (a) Considering all cavities; (b) ignoring FP3; (c) ignoring FP2; (d) ignoring FP1

图 4 为 FP1 腔和 FP3 腔的级联干涉谱包络形成过程,图中 FP1 腔和 FP3 腔的自由光谱范围分别为 8.6 nm 和 7.8 nm,对应空气腔和 PDMS 膜的厚度分别为 140  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$ 。当 FP1 和 FP3 的波峰重合时,其对应的级联干涉谱峰值最大;当 FP1 的波峰与 FP3 的波谷重合时,其对应的级联干涉谱峰值最小;级联干涉谱的其他峰值介于最大值和最小

值之间,且由最大值向最小值方向逐渐减弱。从而,形成了如图 4(b)所示的干涉谱包络。当 FP1 腔和 FP3 腔的干涉谱存在相对移动时,干涉谱包络随之移动,且移动量远大于单个 FP1 腔或单个 FP3 腔;当 FP1 腔和 FP3 腔的干涉谱相对移动量等于参考腔的自由光谱范围时,则干涉谱包络的移动量也为其自由光谱范围。由于干涉谱包络的自由光谱范围

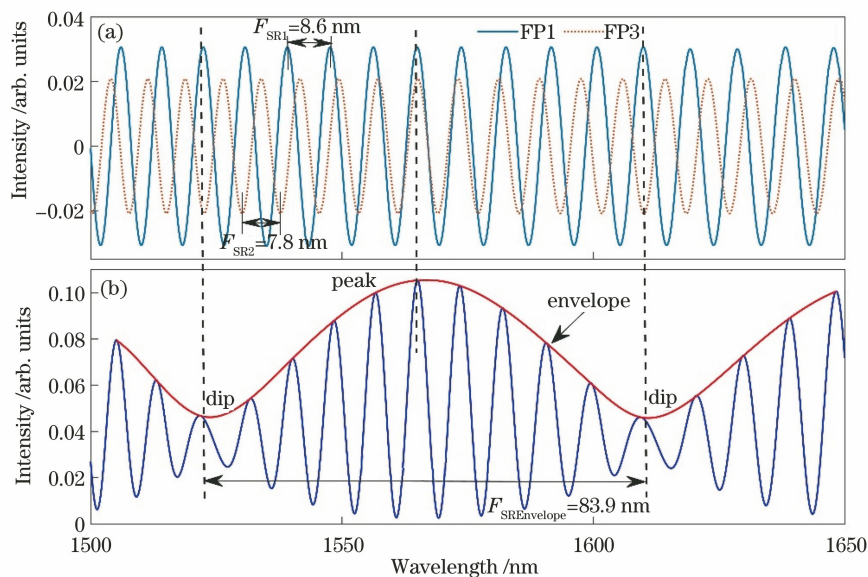


图 4 级联干涉谱包络形成过程。(a) FP1 腔和 FP3 腔干涉谱;(b)级联干涉谱

Fig. 4 Formation of spectral envelope. (a) Spectra of FP1 and FP3; (b) spectrum of cascaded structure

为参考腔的  $M$  倍,因此,级联双腔的灵敏度放大了  $M$  倍。

图 5(a)和图 5(b)分别为不同温度下,FP1 腔和 FP3 腔的干涉谱,由图 5(a)和图 5(b)可知随温度的增加,FP1 腔和 FP3 腔向相反的方向移动,FP1 腔的干涉谱向短波方向移动,FP3 腔的干涉谱向长波方向移动。图 5(c)为不同温度下,FP1 腔和 FP3 腔的级联干涉谱,干涉谱中包络明显,随着温度的增加

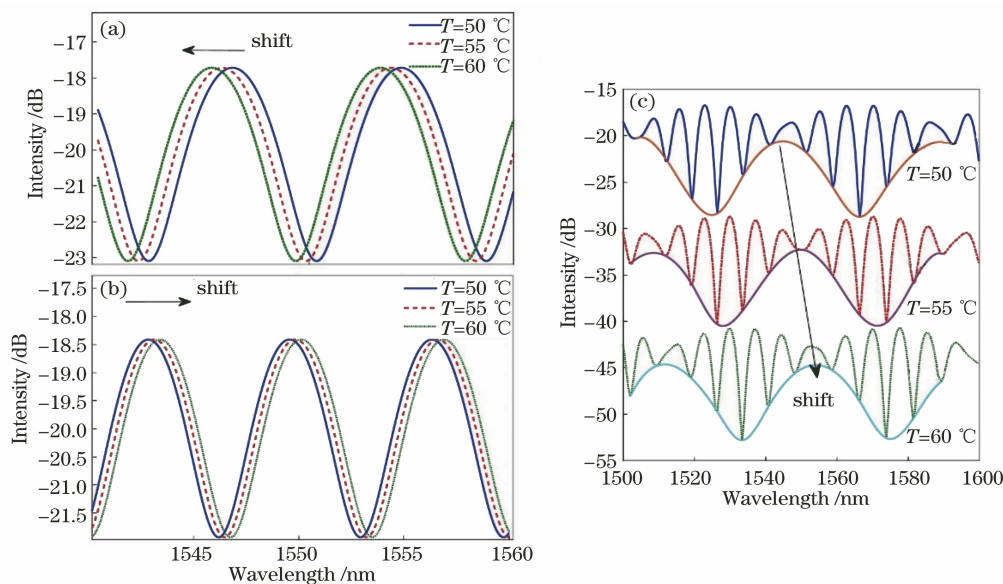


图 5 不同温度下单腔和级联双腔干涉谱。(a) FP1 腔;(b) FP3 腔;(c)级联双腔

Fig. 5 Interference spectra of single and cascaded cavities at different temperatures. (a) FP1 cavity; (b) FP3 cavity; (c) cascaded double cavities

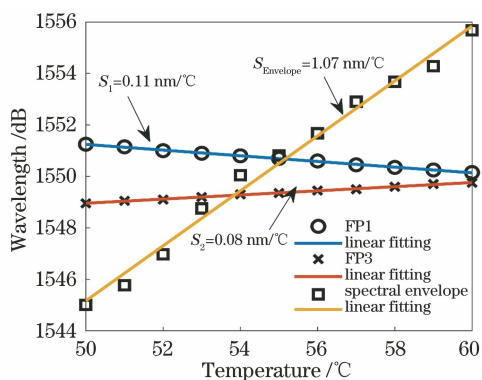


图 6 FP1 腔和 FP3 腔和级联双腔温度灵敏度

Fig. 6 Temperature sensitivities of FP1 and FP3 cavities and cascaded double cavities

为分析不同 PDMS 厚度(FP2 腔长)对传感器灵敏度的影响,仿真分析了 PDMS 厚度分别为 10、16、25  $\mu\text{m}$  时,传感器干涉谱变化及其温度响应,结果如图 7 所示。仿真过程中,对于以上三种情况均假设空气腔长度为 140  $\mu\text{m}$ 。由图 7 可知,当 PDMS 厚度  $F_{p2}$  分别为 10、16、25  $\mu\text{m}$  时,该传感器的游标

干涉谱包络明显红移。图 6 为 FP1 腔和 FP3 腔干涉谱峰值以及级联双腔干涉谱包络随温度的变化曲线,由线性拟合结果可知:FP1 腔和 FP3 腔的温度灵敏度符号相反,分别为  $S_1 = -0.11 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $S_2 = 0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ;级联双腔的温度灵敏度为  $S_{\text{Envelope}} = 1.07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。将以上数据代入(10)式,得游标效应放大倍率  $M = 5.6$ ,该放大倍率与(11)式计算结果( $M = 5.7$ )基本相符。

效应放大倍率分别为 10.9、7.2、5.0,灵敏度分别为 0.93、0.99、1.24  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。也就是说,对于该传感器,随着 PDMS 厚度的增加,游标效应放大倍率逐渐减小,但温度灵敏度逐渐增大。根据此结论,为了提高灵敏度,应尽可能选择增加 PDMS 厚度,但是,当 PDMS 厚度大于 25  $\mu\text{m}$  时,干涉谱包络的放大倍率将小于 5(干涉谱包络内子峰数量小于 5),此时干涉谱包络寻峰比较困难且误差较大。因此,建议 PDMS 膜的厚度应尽量控制在 10~25  $\mu\text{m}$  范围内。

### 3 实 验

本研究搭建的基于 PDMS 填充膜的级联双腔温度传感器实验系统如图 8 所示。该实验系统由 BBS 光源(1500 ~ 1600 nm)、OSA 光谱仪(AQ6370C)、光纤环形器、级联双腔传感器和温控箱(ZKXFB-1)构成。BBS 光源发出的宽谱光经环形器进入级联双腔传感器,经级联双腔反射后的干涉信号被光谱仪接收。

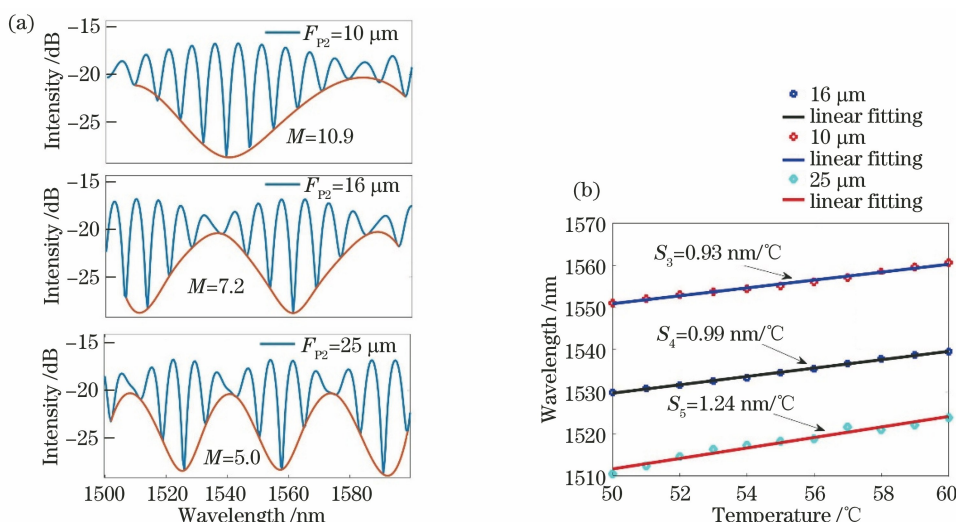


图 7 不同 PDMS 厚度时级联双腔干涉谱及温度响应。(a) 干涉谱;(d) 温度响应

Fig. 7 Interference spectra and temperature response of the sensor. (a) Interference spectra; (b) temperature response

本实验制备的级联双腔温度传感器如图 8 所示,该传感器的空气腔(FP1)和 PDMS 腔(FP2)腔长分别为 140 μm 和 21 μm,其制备过程如下:1)准备一段端面平整的 SMF 与 HCF 放入熔接机(中电 41 所 AV6481A1)中进行熔接;2)将熔接后的 SMF 和 HCF 移至光学显微镜(MC-D200UVA)下,用切割刀将 HCF 切割成预设长度,然后将其放置在石英片上备用;3)调配液态 PDMS:将 Sylgard184-A 和 Sylgard184-B 按照 10:1 的比例放入试管中用玻

璃棒均匀搅拌混合,然后在室温下静置 15 min,以去除搅拌过程中产生的微小气泡;4)制备 PDMS 薄膜:先将 HCF 的自由端垂直插入配制好的 PDMS 液体中,利用毛细现象使 PDMS 溶液进入 HCF 腔内,5 s 后将其取出;然后用酒精棉将 HCF 外壁上的 PDMS 溶液擦去,此时是 HCF 内将形成 PDMS 膜;将注入 PDMS 的 HCF 放入到温控箱中加热固化,温度控制在 80 °C,等待 1 h 后取出,此时形成如图 8 中所示的级联双腔。

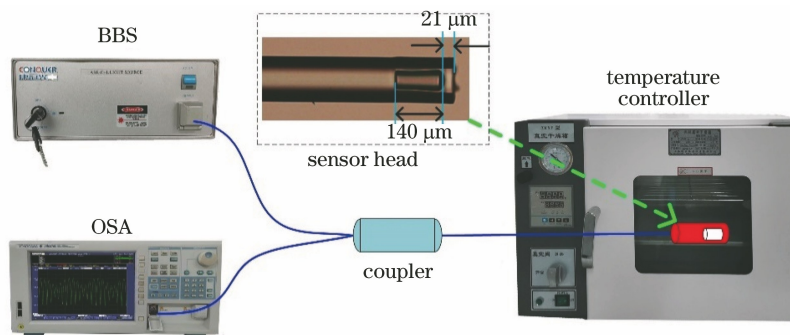


图 8 PDMS 填充膜的双腔级联温度传感器实验装置

Fig. 8 PDMS membrane filled double cavities cascaded temperature sensor experimental device

图 9 为温度在 50、55、60 °C 时级联双腔温度传感器响应时间结果所对应的干涉谱图。由于干涉谱图可知干涉谱呈现明显的包络现象,随温度的增加干涉谱包络呈现明显的红移现象。在 50~60 °C 温度范围内,对该传感器做了升降温实验,结果如图 10 所示。每间隔 1 °C 记录 1 次干涉谱包络峰值波长,将所得数据线性拟合,得到干涉谱包络峰值波长随温度的变化曲线如图 10 所示。结果表明,升温过程传感器灵敏度为  $S_{Envelope} = 1.32 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,降温过程温

度灵敏度为  $S_{Envelope} = 1.34 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ;升温和降温过程传感器灵敏度基本相同,误差约为 1.5%,由此可见该传感器具有较好的重复性。此外,实验所得温度灵敏度(1.32 nm/°C 或 1.34 nm/°C)略高于仿真结果(1.07 nm/°C),造成该结果的原因主要有两方面:1)是仿真过程所用 PDMS 热膨胀和热光系数由文献查得,可能与实际值略有差异;2)是显微镜下传感器双腔的三个反射面难以精确判断,导致 HCF 和 PDMS 腔的长度测量值与实际值略有差异。



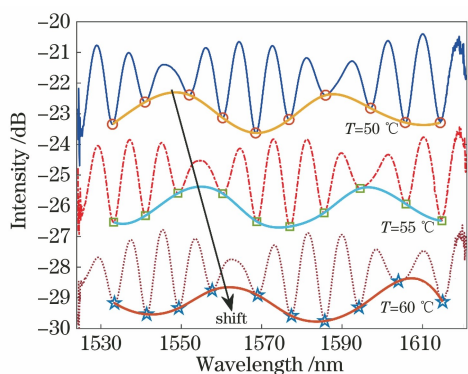


图 9 不同温度下级联双腔温度传感器的干涉谱  
Fig. 9 Interference spectra of cascade double cavity temperature sensors at different temperatures

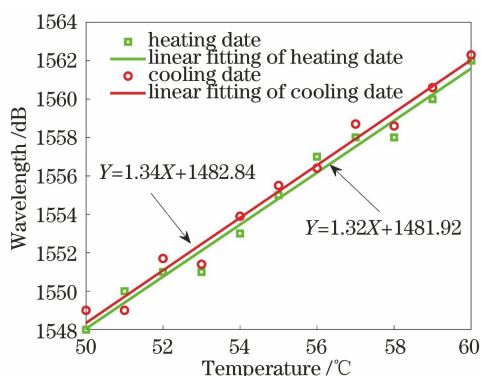


图 10 干涉谱包络升降温峰值变化曲线  
Fig. 10 Interference spectrum envelope peak change curve with temperature rise and drop

## 4 结 论

提出并制备了一种基于 PDMS 膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器,该传感器中 PDMS 膜的厚度远小于空气腔长度,从而使 FP1 腔和 FP3 腔产生游标效应。实验结果表明,该传感器干涉谱呈现明显的包络现象,在 50~60 °C 范围内,随温度的增加,干涉谱包络逐渐红移,温度灵敏度为 1.32 nm/°C。该结果与理论分析结果基本相符。该传感器具有体积小、结构轻、灵敏度高、制备简单等优点,在生物、医疗等领域具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y, Huang Q, Zhu W J, et al. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity based on FBG and FP interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(9): 833-836.
- [2] Wang S S, Miao Y P, Fei C W, et al. A high-sensitivity temperature sensor based on a liquid

- cladding tapered microfiber [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 6152-6157.
- [3] Fu G W, Liu C, Wang M M, et al. Tapered multimode fiber temperature sensor based on surface graphene modification[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0906002.  
付广伟, 刘畅, 王梦梅, 等. 基于表面石墨烯修饰的锥形多模光纤温度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0906002.
- [4] Lang C P, Liu Y, Liao Y Y, et al. Ultra-sensitive fiber-optic temperature sensor consisting of cascaded liquid-air cavities based on Vernier effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(10): 5286-5291.
- [5] Feng W L, Peng J, Yu J H, et al. Double Fabry-Pérot fiber optic temperature sensor based on end-face corrosion [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 766-770.  
冯文林, 彭进, 余佳浩, 等. 端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 766-770.
- [6] Peng J, Feng W L, Yue Z Z, et al. Fiber-optic Fabry-Pérot temperature sensor based on the ultraviolet curable glue-filled cavity and two-beam interference principle [J]. Zeitschrift Für Naturforschung A, 2021, 76(2): 175-179.
- [7] Liu G G, Han M, Hou W L. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7237-7247.
- [8] Markos C, Vlachos K, Kakarantzas G. Bending loss and thermo-optic effect of a hybrid PDMS/silica photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 24344-24351.
- [9] Park C S, Joo K I, Kang S W, et al. A PDMS-coated optical fiber Bragg grating sensor for enhancing temperature sensitivity [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2011, 15(4): 329-334.
- [10] 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.
- [11] Hernández-Romano I, Cruz-García M A, Moreno-Hernández C, et al. Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay [J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5654-5661.
- [12] He C Y, Fang J B, Zhang Y A, et al. High performance all-fiber temperature sensor based on coreless side-polished fiber wrapped with polydimethylsiloxane[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9686-9699.
- [13] Zhang P, Tang M, Gao F, et al. Cascaded fiber-optic

- Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and magnetic field [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19581-19588.
- [14] Yang Y Q, Wang Y G, Zhao Y X, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor by hybrid cascaded configuration of a Sagnac loop and a F-P cavity [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33290-33296.
- [15] Quan M G, Tian J J, Yao Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and vernier effect [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4891-4894.
- [16] Liu F L, Zhang Y M, Zhuang W, et al. Fiber temperature sensor with composite structure based on vernier effect and substrate sensitization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1506002.  
刘福祿, 张钰民, 庄炜, 等. 基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器 [J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1506002.
- [17] Fang S S, Wu X Q, Zhang G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the Vernier effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106004.  
方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106004.
- [18] Yang Y Q, Wang Y G, Zhao Y X, et al. Ultrasensitive temperature sensor based on fiber-optic Fabry-Pérot interferometer with Vernier effect [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2019, 40(3): 243-248.
- [19] Chen M Q, Zhao Y, Xia F, et al. High sensitivity temperature sensor based on fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer with PDMS-filled hollow-core fiber [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 275: 60-66.