

# 基于保偏光子晶体光纤的 Sagnac 干涉温度与应变传感特性

武彪<sup>1</sup>, 刘云东<sup>2</sup>, 陈海良<sup>1\*</sup>, 陈强<sup>1</sup>, 马明建<sup>1</sup>

<sup>1</sup>燕山大学理学院, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup>洛阳理工学院计算机与信息工程学院, 河南 洛阳 471000

**摘要** 提出一种基于 Sagnac 干涉原理的光纤传感器,并将其用于温度和应变的环境检测。实验中,选用乙醇溶液填充前后的保偏光子晶体光纤(PM-PCF)作为传感单元。首先,将未填充乙醇溶液的 PM-PCF 熔接到 Sagnac 干涉环路中,依靠 PM-PCF 基底材料的光热效应和光弹性效应,分别在 26~50 °C 温度范围内和 0~900  $\mu\epsilon$  应变范围内,实现了 -1.72 nm/°C 的温度传感灵敏度和 35.35  $\mu\text{m}/\mu\epsilon$  的应变灵敏度。然后,利用氮气加压装置,将乙醇溶液填充到 PM-PCF 包层空气孔内。这是利用功能材料的外场调谐作用来增强 Sagnac 干涉仪的传感性能。填充乙醇溶液后,该传感器的温度灵敏度达到 -2.66 nm/°C,约为原始 PM-PCF 温度灵敏度的 1.55 倍。所提出的用于温度和应变测量的 Sagnac 干涉传感器结构较为简单,具有良好的迟滞性,对提升光纤传感灵敏度具有一定的借鉴意义。

**关键词** 光纤光学; Sagnac 干涉; 保偏光子晶体光纤; 温度传感; 应变传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221955

## 1 引言

光纤干涉仪是非常重要的光学器件之一,在物理、化学、医学和生物环境监测等领域已经得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。光纤干涉传感器主要利用了不同传输途径光束之间相位差对外界环境敏感的特性。干涉光在光纤中传输时,外界因素改变导致光束之间的相位差浮动,进而导致干涉极小值偏移。因此,可以通过记录干涉极小值的位置,达到对环境参量进行测量的目的。常见的光纤干涉仪包括 Sagnac 干涉仪、Fabry-Perot 干涉仪、Michelson 干涉仪和 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[4-9]</sup>。与其他三类光纤干涉仪不同,Sagnac 干涉仪中的两束相干光沿着相反方向经过同一条路径进行传输。当传感元件受到外力作用时,两束干涉光都会受到影响,表现出很强的调制能力。凭借其高灵敏度和高分辨率的优势,基于 Sagnac 干涉仪的光纤传感器在一些传感应用领域受到广泛关注,如应变、温度和气体浓度的检测<sup>[10-12]</sup>。Sagnac 光纤传感器中需要一段具有高双折射率的光纤作为传感元件。依靠改变插入光纤的基底材料,Sagnac 光纤传感器的性能得到了显著提升。然而,受到光纤固有特性(如光弹性效应、光热效应等)的限制,基于 Sagnac 干涉仪的光纤传感器灵敏度提升受到了阻碍。因此,提升 Sagnac 传感器的灵敏度具有重

要的研究意义。

近年来,广大学者对 Sagnac 光纤传感器进行了大量理论研究。Shi 等<sup>[13]</sup>设计了一种基于乙醇填充型光子晶体光纤(PCF)的 Sagnac 温度传感器,通过将位于光纤中心以及中心附近的 3 个空气孔移除,形成一个椭圆纤芯来产生高双折射效应,并在所有空气孔中注满乙醇溶液用于温度传感。当光纤长度为 5.05 cm 时,在 45~75 °C 的温度范围内,该传感器的灵敏度可达 16.8142 nm/°C;当光纤长度缩短为 2.11 cm 时,在 10~45 °C 的范围内,其灵敏度为 16.655 nm/°C。Lü 等<sup>[14]</sup>设计了一种微结构芯光子晶体光纤 Sagnac 温度传感器,采用三角晶格排布空气孔,并通过增大位于水平轴线上的空气孔直径来形成更强的双折射效应,并在空气孔中注入温敏液体用于环境温度检测。当光纤长度为 5 cm 时,在 28.35~46.35 °C 的温度探测范围内,该光纤传感器的灵敏度高达 21.05 nm/°C。随着光纤技术和理论模拟的不断发展,Sagnac 光纤传感器的实验研究也受到了广泛关注,近年来大量的理论和实验都证实了 Sagnac 光纤传感器可应用到各类复杂环境的检测中<sup>[15-16]</sup>。Reyes-Vera 等<sup>[17]</sup>提出并验证了一种基于金属选择性填充型 PCF 的 Sagnac 温度传感器,他们将金属选择性填充到 PCF 的侧孔中,利用钢具有高热膨胀系数的特性,实现了高温度灵敏度传感。实

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2022-12-27; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(12074331)、国家重点研发计划(2019YFB2204001)、河北省自然科学基金(F2021203112)

通信作者: \*hlchen@ysu.edu.cn

验结果显示,基于钢选择性填充型 PCF 的 Sagnac 温度传感器在 22.4~46 °C 的温度范围可以实现高达 9.0 nm/°C 的超高灵敏度。与功能液体填充型 PCF 相比,金属填充型 PCF 的 Sagnac 传感器可以获得更高的灵敏度。但是,金属填充型 PCF 需要较高的制备成本,并要满足严格的技术需求。

为实现在复杂环境中进行双参量检测,本文首先设计了一种基于 Sagnac 干涉原理、可用于温度和应变检测的双参量光纤传感器。在将应变由 0 增加到 900  $\mu\epsilon$  的过程中,传感器的应变灵敏度达到 35.35 pm/ $\mu\epsilon$ 。然后,将充满乙醇溶液的保偏光子晶体光纤 (PM-PCF) 再次熔接到 Sagnac 环中,在 29~41 °C 的温度检测范围内,所设计传感器的温度灵敏度达到 -2.66 nm/°C,约为未填充乙醇溶液的传感器温度灵敏度的 1.55 倍。

## 2 Sagnac 干涉仪传感器原理

Sagnac 光纤干涉仪可将传输光分为两束正交偏振光,其归一化透射率<sup>[18]</sup>( $T$ )可以描述为

$$T = \frac{1 - \cos \varphi}{2}, \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 表示快轴和慢轴的光传输相位差。从式(1)可以看出,传输光的透射率主要取决于快轴与慢轴的相位差,它与光纤双折射系数、光纤长度以及光波长密切相关,满足公式

$$\varphi = 2m\pi, \quad (2)$$

式中: $m$ 为整数。此时,可以观察到传输光谱中出现强度最小值,即产生干涉谷。根据式(2),可进一步推导出干涉谷的波长

$$\lambda_{\text{dip}} = \frac{BL}{m}, \quad (3)$$

式中: $L$ 为光纤长度; $B = n_s - n_f$ 表示光纤的双折射系数,其中 $n_s$ 和 $n_f$ 分别为 PM-PCF 慢轴和快轴的有效折射率。在进行 Sagnac 光纤传感器研究时,干涉光谱的自由光谱范围(FSR; $\eta_{\text{FSR}}$ )是一个非常重要的参数,其计算公式为

$$\eta_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{BL}, \quad (4)$$

式中: $\lambda$ 为波长。从式(4)可以看出,光纤双折射系数与光纤长度成反比。因此,可以通过改变光纤双折射和光纤长度来获得所需的自由光谱范围。随着外界物理场(如温度和应变等)的变化,光纤双折射系数和光纤长度都会发生变化,传输光的相位差也会产生相应变化,最终导致干涉谷波长发生偏移。相位差的变化量可以描述为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(L\Delta B + B\Delta L), \quad (5)$$

式中: $\Delta B$ 表示光纤双折射系数随物理场变化而产生的变化量; $\Delta L$ 表示光纤长度的变化量。由相位差变化引

起的干涉谷波长偏移量<sup>[19]</sup>可以表示为

$$\Delta\lambda = \eta_{\text{FSR}} \frac{\Delta\varphi}{2\pi}. \quad (6)$$

因此,可以通过观察干涉谷波长的偏移来反向检测外界物理场变化。并且,以 PM-PCF 为传感元件的 Sagnac 光纤传感器可以有效监测外界环境(如温度和湿度等)<sup>[20-26]</sup>。

实验中选用的 PM-PCF (型号:LMA-PM-10)的横截面如图 1 所示。该 PM-PCF 纤芯直径约为 9.9  $\mu\text{m}$ ,空气孔包层直径约为 54.3  $\mu\text{m}$ ,光纤包层直径约为 235  $\mu\text{m}$ 。该 PM-PCF 存在两个稳定的光传输轴(即快轴和慢轴)。在空气孔两侧存在两块直径约为 74  $\mu\text{m}$  的不规则黑色区域(即应变棒),其可提供一定的应变支撑使光纤具有保偏特性。由于应变施加部分是高折射率玻璃材料,规定其水平方向为慢轴,竖直方向为快轴。该 PM-PCF 在 1064 nm 波长处的双折射系数高达  $1.4 \times 10^{-4}$ ,这为制备高灵敏度 Sagnac 干涉仪光纤传感器提供了有利条件。由于 PM-PCF 的双折射系数是固定的,只需选取合适的长度,使得相位差为  $2\pi$  的整数倍,传输光谱中即可出现干涉波谷。通常,PM-PCF 越长,自由光谱范围越窄,干涉波谷的数量越多,因此可以根据应用的光波段范围选取合适的光纤长度。由于光纤本身材质(即石英)和应变施加部分都具有一定的光热效应和热膨胀效应,该 PM-PCF 对温度极为敏感。在 Sagnac 干涉仪光纤传感器中,由温度变化引起的干涉波谷波长的偏移量<sup>[27]</sup>可表示为

$$\Delta\lambda(T) = \frac{\lambda}{B(\lambda, T)L} [\Delta B(\lambda, T) + B(\lambda, T)\Delta L]. \quad (7)$$

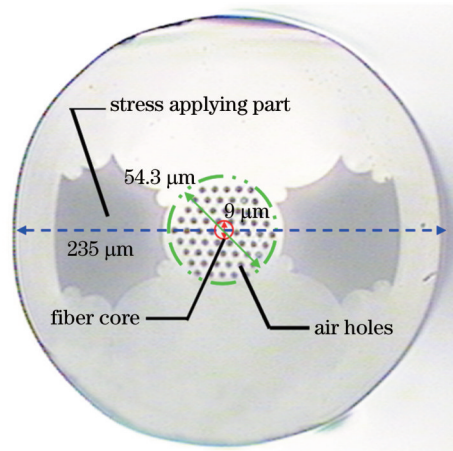


图 1 PM-PCF 的横截面图

Fig. 1 Cross section of PM-PCF

此外,光纤本身材质和应变施加部分具有一定的光弹效应,因此该 PM-PCF 也对应变敏感。当对 PM-PCF 施加一定应变( $\epsilon = \Delta L/L$ )时,PM-PCF 的双折射和长度将发生变化。由光弹效应引起的光纤折射率变化<sup>[16]</sup>可描述为

$$\Delta n_{s,f} = P_e^{s,f} n_{s,f} \epsilon, \quad (8)$$



式中： $P_e^{s,t}$ 表示慢轴和快轴的有效光弹常数。将式(8)代入式(5)和式(6)，可以得到由应变变化引起的干涉波谷波长偏移量，即

$$\Delta\lambda(\epsilon) = \lambda(1 + P'_e)\epsilon, \quad (9)$$

式中： $P'_e = (P_e^t \cdot n_e^t - P_e^s \cdot n_e^s) / B$ ，表示由应变引起的 PM-PCF 双折射系数变化的常数。从式(9)可以看出，干涉波谷波长的偏移量与应变成正比。由此可以得出，该 PM-PCF 可以用于温度和应变传感。此外，可以使用具有高热光系数的温敏液体来填充 PM-PCF 的空气孔，以进一步提升 PM-PCF 的温度敏感特性。

### 3 Sagnac 干涉仪传感器的制备

乙醇是一种有机物，具有高热光系数( $-3.94 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )和低黏度系数( $1.200 \text{ mPa}\cdot\text{s}@20 \text{ } ^\circ\text{C}$ )。因此，在本实验中选择乙醇溶液作为温敏液体填充到 PM-PCF 的空气孔中来提升 PM-PCF 的温度传感性能。图 2 给出了将乙醇溶液填充到 PM-PCF 空气孔的装置。利用压强差原理将乙醇填充到 PM-PCF 的空气孔中。首先，将一段 PM-PCF 的一端放到密闭气室内并浸入乙醇溶液中，另一端则置于密闭气室外(即空气中)，之后将气室密闭封装。然后，将密闭气室与氮气泵相连，当向密闭气室通入氮气时，密闭气室内的压强迅速增大，与密闭气室外的大气压强产生一定的压力差。需要注意的是，气室内压强持续恒定在  $60 \text{ kg/cm}^2$  ( $5.88 \text{ MPa}$ )

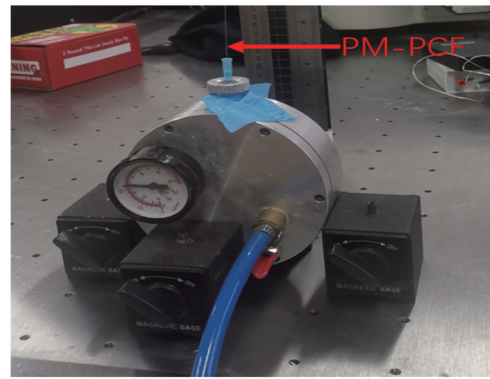


图 2 填充装置

Fig. 2 Filling device

左右，这是因为过高的气压会导致密闭气室崩裂，而过低的气压则无法将乙醇压进 PM-PCF 的空气孔中。用于填充乙醇溶液的 PM-PCF 长度为  $50 \text{ cm}$ ，填充时间为  $48 \text{ h}$ ，清晰地观察到空气中 PM-PCF 的端口有液体涌出，即填充完毕。最后，关闭气泵，解封密闭气室并取出填充好的 PM-PCF。至此，乙醇填充型 PM-PCF 制作完成。图 3 给出了乙醇填充前后的 PM-PCF 侧面图。可以看到，乙醇填充后的 PM-PCF 的包层空气孔中有明显的液体柱流动。PM-PCF 端口处存在一定的压力差，导致端口附近一小段区域没有液体，而实验中的 PM-PCF 长度比未填液体区域的长度高 3 个数量级，因此该段未填充区域对传感性能的影响可忽略不计。

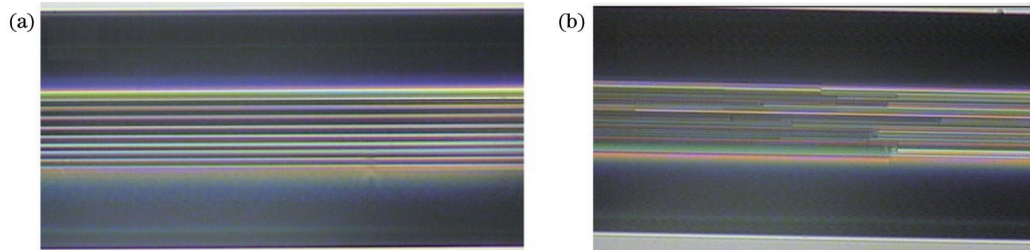


图 3 乙醇填充前后的 PM-PCF 的侧面图。(a)乙醇填充前；(b)乙醇填充后

Fig. 3 Side views of PM-PCF before and after ethanol filling. (a) Before ethanol filling; (b) after ethanol filling

乙醇填充型 PM-PCF 制作完成后，下一步需要将其与单模光纤(SMF)进行熔接。在 Sagnac 干涉仪光纤仪器中，传感元件与 SMF 之间的熔接至关重要。实验中使用的 PM-PCF 的包层存在空气孔且光纤包层直径较大，其与 SMF 进行熔接时需要合适的放电强度和放电时间，否则熔接点将产生塌陷或者气泡。塌陷将引起多模干涉，会干扰 Sagnac 干涉的输出光信号；气泡将引起法布里-珀罗干涉，也会干扰 Sagnac 干涉的输出信号，同时还会使光的输出信号强度极弱，导致无法检测到光干涉信号。造成熔接点产生塌陷和气泡的主要原因是切割的光纤端面不平整、放电时间过长以及放电强度过高。图 4(a)、(b)分别给出了 PM-PCF 与 SMF 的熔接点出现塌陷和气泡的实物图；图 4(c)中 PM-PCF 和 SMF 实现了完美熔接，它们恰好粘在一

起，有效地避免了其他干涉模式的引入，同时也保证了足够强的传输信号用于检测。实验中使用的熔接机型号为 FSM-100P+，放电强度设定为“标准+250 bit”，放电时间为  $1250 \text{ ms}$ 。此外，将 PM-PCF 与 SMF 封装在热缩管内，以避免其熔接点断裂，便于接下来的实验测试。

图 5 展示了基于 PM-PCF 的 Sagnac 传感器实验测试系统，该系统的主要实验装置包括一个宽带激光光源(ASE 光源， $1500 \sim 1652 \text{ nm}$ )、一个  $3 \text{ dB}$  光纤耦合器(OC)、一段 PM-PCF 和一个探测器(横河光谱仪，AQ6370D， $600 \sim 1700 \text{ nm}$ )。虚线框部分为乙醇填充型 PM-PCF，其放置在 Sagnac 干涉环内。ASE 光源发出的激光经过光纤耦合器时，被分成能量相同的两束光。这两束光沿着相反的方向进入 Sagnac 环，其中一

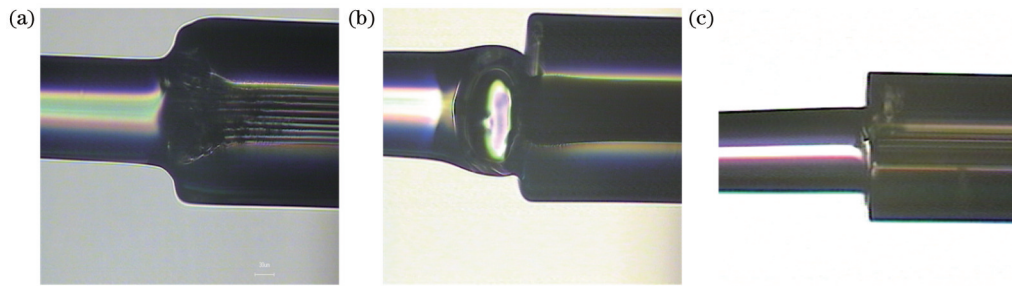


图 4 PM-PCF 与 SMF 熔接实物图。(a)有塌陷;(b)有气泡;(c)完美熔接

Fig. 4 Welding diagrams of PM-PCF and SMF. (a) With collapse; (b) with bubble; (c) perfect fusion

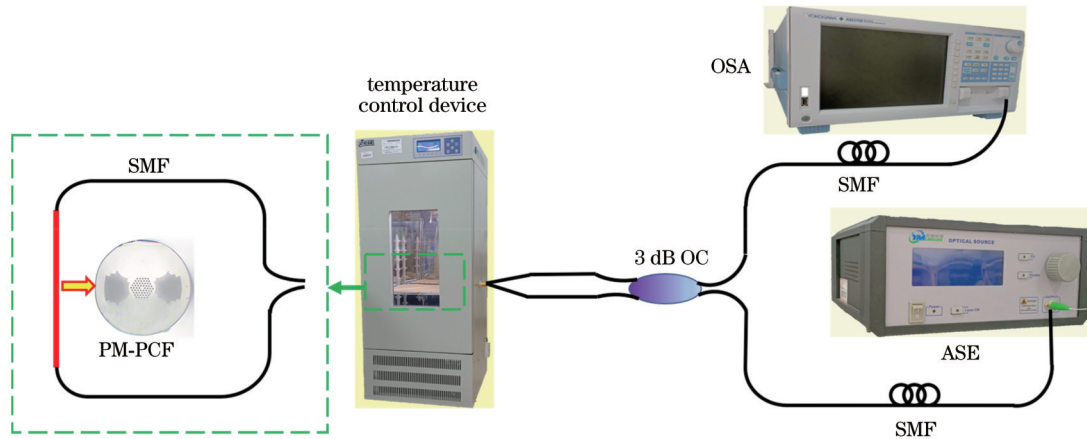


图 5 基于 PM-PCF 的 Sagnac 温度传感实验系统

Fig. 5 Sagnac temperature sensing experiment system based on PM-PCF

束沿顺时针方向传输,另外一束沿着逆时针方向传输,再次经过光纤耦合器时,两束光被耦合成一束光并继续传输到横河光谱仪。

## 4 实验结果与分析

为验证在 PM-PCF 的空气孔中填充具有高热光系数的乙醇溶液可以提升其温度敏感特性,首先实验测试了原始 PM-PCF(即未填充乙醇溶液)的温度传感特性。此外,为进一步探究原始 PM-PCF 的传感特性,还测试了其应变传感特性。

对于 Sagnac 干涉仪传感器而言,波长灵敏度是评价光纤传感器性能的重要参数<sup>[28]</sup>,可以表示为

$$S_w = \Delta\lambda_{\text{dip}}/\Delta E, \quad (10)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{dip}}$ 表示干涉谷波长的偏移; $\Delta E$ 表示外部物理场的改变量。除了使用波长灵敏度  $S_w$  来评估传感性能之外,分辨率( $R$ )也是表征传感性能的一个重要参数,描述为

$$R = \Delta\lambda_{\text{min}}/S_w, \quad (11)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{min}}$ 表示光谱分析仪的最小分辨率。

图 6 展示了基于 Sagnac 干涉效应的原始 PM-PCF 的透射光谱。可以观察到,在 1525~1625 nm 的扫描波长范围内,透射光谱中存在 3 个明显的干涉波谷(即 dip 1、dip 2 和 dip 3),它们相应的干涉波谷波长分别位

于 1550、1580、1610 nm 附近。其中,位于 1610 nm 处的干涉波谷消光比约为 10.5 dB,自由光谱范围约为 32 nm。根据式(4)可以计算出原始 PM-PCF 在 1610 nm 处的光纤快轴和慢轴折射率差约为  $1.62 \times 10^{-4}$ ,这表明该 PM-PCF 本身具有强保偏特性。

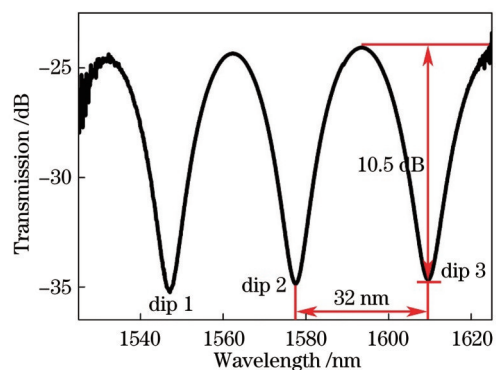


图 6 基于 Sagnac 干涉效应的原始 PM-PCF 的透射光谱

Fig. 6 Transmission spectrum of raw PM-PCF based on Sagnac interference effect

### 4.1 温度传感特性

实验中,通过将 50 cm 长的 PM-PCF 放在测温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$  的温控箱(昆山荣事达电子设备有限公司, RSD-150WS)中,测试其温度传感特性。温控箱内的 PM-PCF 的输入光纤端口和输出光纤端口经过同一个



通道,该通道用棉花和胶带密封。除此之外,为了避免损耗对 Sagnac 干涉信号的影响,需要将 PM-PCF 竖直固定在温控箱的盛物板上。

图 7(a)所示为不同温度下该原始 PM-PCF 的透射光谱。可以看到,当温度从 26 °C 升高到 50 °C 时,由原始 PM-PCF 形成的 Sagnac 干涉波谷发生蓝移。这是因为该 PM-PCF 本身具有负的热光系数,PM-PCF 的双折射系数随着温度的升高而减小,导致干涉波谷

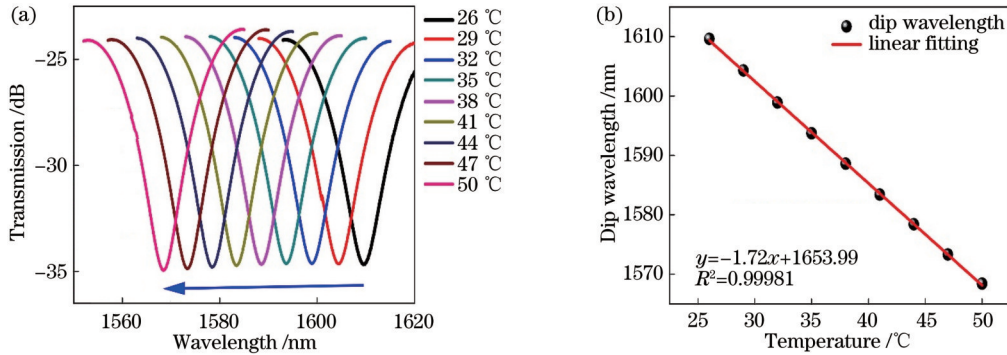


图 7 不同温度下原始 PM-PCF 的透射光谱和干涉波谷波长与温度的关系。(a)透射光谱;(b)干涉波谷波长与温度的关系

Fig. 7 Transmission spectra and relationship between interference dip wavelength and temperature for raw PM-PCF at different temperatures. (a) Transmission spectra; (b) relationship between interference dip wavelength and temperature

在温度传感器的综合性能研究中,温度传感滞后性至关重要,因此本实验进一步研究了原始 PM-PCF 的温度传感迟滞性。图 8 所示为原始 PM-PCF 在升温 and 降温过程中的干涉波谷波长变化。可以看出,在升温 and 降温过程中,Sagnac 干涉波谷的波长在相同温度下基本重合,表明该传感器具有良好的温度传感迟滞性。

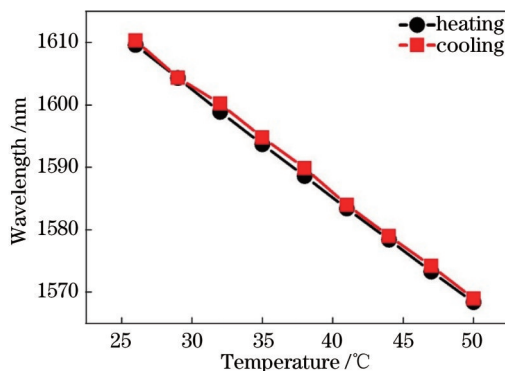


图 8 原始 PM-PCF 在升温 and 降温过程中的干涉波谷波长

Fig. 8 Interference dip wavelength of raw PM-PCF during heating and cooling process

#### 4.2 应变传感特性

为了更加深入地了解原始 PM-PCF 的传感特性,通过将 PM-PCF 固定在应变控制装置上,测试并分析其应变传感特性。图 9 所示为该传感器的应变控制装置,它的精度为  $\pm 0.01$  mm。PM-PCF 被固定在两个二维底座之间,当左端二维底座固定时,可以通过纵向

移动右端二维底座将应变施加在 PM-PCF 上。应变变化量通过将 PM-PCF 的纵向拉伸量( $\Delta L$ )除以两个固定点之间的 PM-PCF 长度( $L$ )来确定。测量中使用的 PM-PCF 长度仍保持为 50 cm,当移动 0.01 mm 时,相应的应变变化量为  $20 \mu\epsilon$ 。

图 10(a)所示为不同应变下原始 PM-PCF 的透射光谱。可以看到,当应变从 0 增加到  $900 \mu\epsilon$  时,由原始 PM-PCF 形成的 Sagnac 干涉波谷发生红移。这是因为该 PM-PCF 本身具有正的光弹性系数,其长度与应变呈正相关,因此干涉波谷波长需要向长波长方向移动,以保持一定的相位差 $[\varphi/(2\pi)$ 为整数]。图 10(b)所示为原始 PM-PCF 的干涉波谷波长与应变之间的线性拟合曲线,其线性拟合方程为  $y=35.35x+1566.21$ ,相应的线性拟合度  $R^2=0.99969$ 。因此,基于 Sagnac 干涉效应得到原始 PM-PCF 的应变灵敏度为  $35.35 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,相应的应变分辨率为  $0.56577 \mu\epsilon$ 。

对于应变传感器而言,应变传感迟滞性同样重要。本实验测试了原始 PM-PCF 的应变传感迟滞性。图 11 所示为原始 PM-PCF 在应变增加 and 降低过程中的干涉波谷波长变化,发现在应变增加 and 降低过程中,基于原始 PM-PCF 形成的 Sagnac 干涉波谷波长在同一应变下也基本重合,这表明该 PM-PCF 也具有良好

的应变传感迟滞性。

#### 4.3 乙醇填充后 PM-PCF 的温度传感特性

本实验测试并分析了乙醇填充后 PM-PCF 的温度传感特性。在制作新的传感探头时,需要切割 PM-PCF,在与 SMF 的熔接过程中消耗了 10 cm 的 PM-

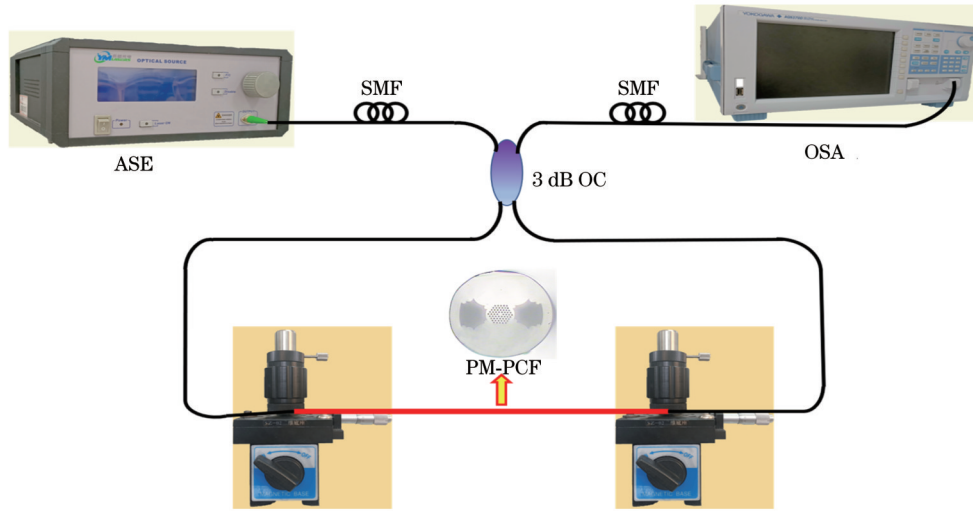


图 9 PM-PCF 的应变控制装置

Fig. 9 Strain control device of PM-PCF

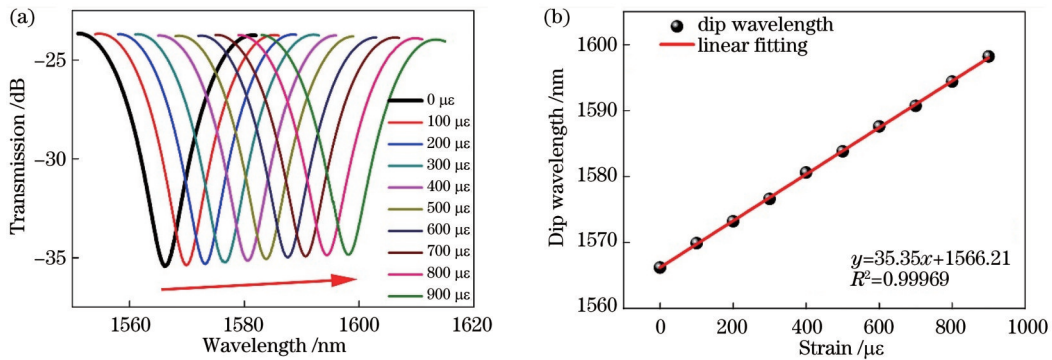


图 10 不同应变下原始 PM-PCF 的透射光谱和干涉波谷波长与应变的关系。(a)透射光谱;(b)干涉波谷波长与应变的关系

Fig. 10 Transmission spectra and relationship between interference dip wavelength and strain for raw PM-PCF at different strains.

(a) Transmission spectra; (b) relationship between interference dip wavelength and strain

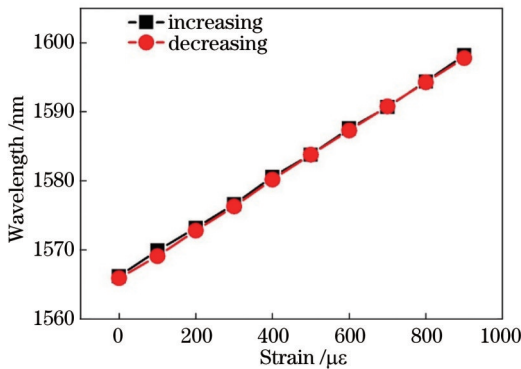


图 11 原始 PM-PCF 在应变增加和降低过程中的干涉波谷波长

Fig. 11 Interference dip wavelengths of raw PM-PCF during strain increasing and decreasing process

PCF, 因此用于实验测试的乙醇填充型 PM-PCF 的长度为 40 cm。

首先测试并分析了乙醇填充后 PM-PCF 的干涉波谷信号。仍然使用 ASE 激光源的光强谱线作为参考谱。图 12 所示为乙醇填充型 PM-PCF 的透射光谱。

可以看到, 在 1525~1625 nm 波长范围内, 由乙醇填充型 PM-PCF 形成的 Sagnac 干涉光谱中仅存在 2 个干涉波谷(即 dip 1' 和 dip 2'), 其原因有两个: 一是光纤熔接时产生的切割损耗, 使得 PM-PCF 的长度缩短为 40 cm; 二是 PM-PCF 的空气孔中填充了乙醇溶液。dip 1' 和 dip 2' 的干涉波谷分别位于 1565 nm 和 1605 nm 附近。其中, 位于 1605 nm 波长处的干涉波谷消光比约为 8.5 dB, 自由光谱范围约为 39 nm。由此, 可以计算出该乙醇填充型 PM-PCF 在 1605 nm 处快轴和慢轴的折射率差约为  $1.65 \times 10^{-4}$ 。

图 13(a) 所示为不同温度下乙醇填充型 PM-PCF 的透射光谱。可以看到, 当温度从 29 °C 升高到 41 °C 时, 由乙醇填充型 PM-PCF 形成的 Sagnac 干涉波谷仍然发生蓝移。这是因为乙醇也具有负的热光系数, 其与 PM-PCF 本身的温度敏感特性一致, 使得乙醇填充后 PM-PCF 的双折射系数继续随着温度的升高而减小, 从而导致干涉波谷波长仍然发生蓝移以维持相位差为  $2\pi$  的整数倍。乙醇填充型 PM-PCF 的干涉波谷波长与温度之间的线性拟合曲线如图 13(b) 所示, 其

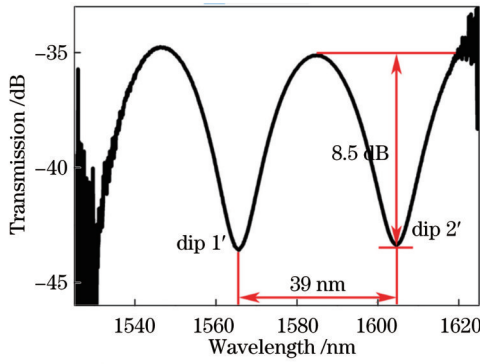


图 12 基于 Sagnac 干涉效应的乙醇填充型 PM-PCF 的透射光谱

Fig. 12 Transmission spectrum of ethanol-filled PM-PCF based on Sagnac interference effect

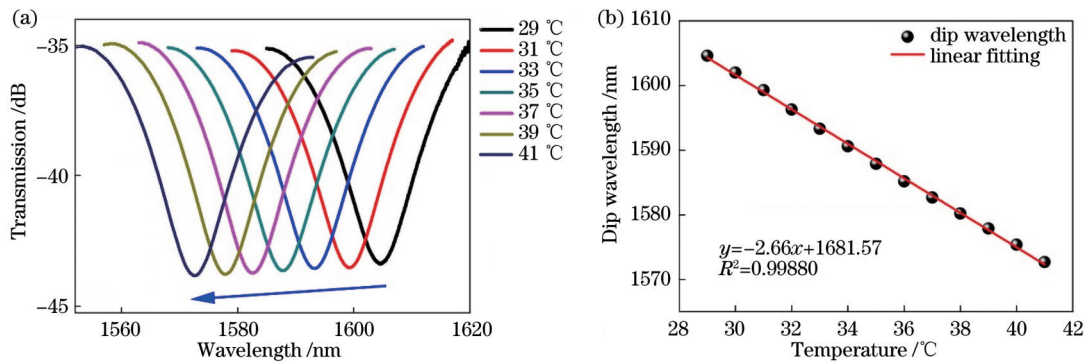


图 13 不同温度下乙醇填充型 PM-PCF 的透射光谱和干涉波谷波长与温度的关系。(a) 透射光谱; (b) 干涉波谷波长与温度的关系  
Fig. 13 Transmission spectra and relationship between interference dip wavelength and temperature for ethanol-filled PM-PCF at different temperatures. (a) Transmission spectra; (b) relationship between interference dip wavelength and temperature

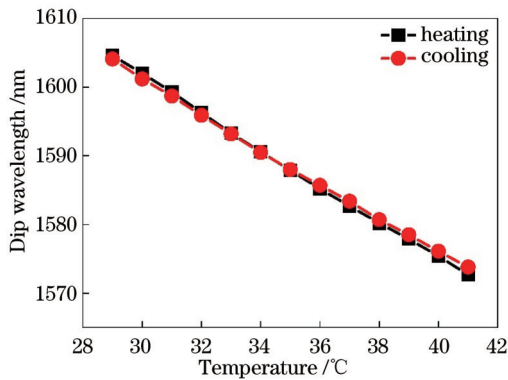


图 14 乙醇填充型 PM-PCF 在升温 and 降温过程中的干涉波谷波长

Fig. 14 Interference dip wavelengths of ethanol-filled PM-PCF during heating and cooling process

## 5 结 论

提出一种基于 Sagnac 干涉原理的温度和应变传感器。实验结果显示,在 0~900  $\mu\epsilon$  应变范围内,该传感器的应变灵敏度达到 35.35  $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。将乙醇溶液填充到 PM-PCF 的包层空气孔中,可有效提升传感器的温度灵敏度。在 29~41  $^{\circ}\text{C}$  的温度检测范围内,该传感

线性拟合方程为  $y = -2.66x + 1681.57$ , 相应的线性拟合度  $R^2 = 0.99880$ 。因此,基于 Sagnac 效应可以得到乙醇填充型 PM-PCF 的温度灵敏度为  $-2.66 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ , 相应的温度分辨率为  $0.00752 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。乙醇填充型 PM-PCF 的温度灵敏度约为原始 PM-PCF 温度灵敏度的 1.55 倍。实验研究表明,在 PM-PCF 的空气孔中填充乙醇有助于提升光纤的温度传感特性。

最后,测试并分析了乙醇填充型 PM-PCF 的温度传感迟滞性。图 14 所示为乙醇填充型 PM-PCF 在升温 and 降温过程中的干涉波谷波长变化。可以看到,在升温 and 降温过程中,乙醇填充型 PM-PCF 的干涉波谷波长在相同温度下也基本重合。这进一步证明乙醇填充型 PM-PCF 具有良好的温度传感迟滞性。

器的温度灵敏度达到  $-2.66 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ , 是未填充乙醇溶液的传感器温度灵敏度的 1.55 倍, 相应的温度分辨率提升到  $0.00752 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在乙醇溶液填充前后, 传感器都表现出良好的传感迟滞性。该温度和应变传感器的结构简单, 且具有良好的稳定性, 可以实现温度和应变的双参量检测, 在光纤传感器领域具有一定的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Gong H P, Song H F, Zhang S L, et al. Curvature sensor based on hollow-core photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 777-780.
- [2] 高朋, 赵勇, 李晋. 基于乙醇填充的光子晶体光纤温度传感器[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(10): 1369-1373. Gao P, Zhao Y, Li J. Temperature sensor with photonic crystal fiber filled with ethanol as probe[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(10): 1369-1373.
- [3] Luo Y, Fan R H, Zhang Y P, et al. Novel optical fiber refractive sensor fabricated with an alcohol-filled photonic crystal fiber based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 278-282.
- [4] Chen H L, Zheng Y, Li B C, et al. Bubble microcavity strain and gravity sensor with temperature and bending insensitivity using an ultra-thin core optical fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107193.
- [5] Wang J, Pei L, Wang J S, et al. A high sensitivity dual-parameter sensor based on glycerin filled fine-core polarization



- maintaining photonic crystal fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 55: 102139.
- [6] 彭敏, 鲁志琪, 刘昌宁. FP腔与MZI级联的三参量同时测量的光纤传感器[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0106003.  
Peng M, Lu Z Q, Liu C N. Fiber optic sensor for simultaneous measurement of three parameters in FP cavity and MZI cascade [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0106003.
- [7] 徐廷廷, 杨玉强, 杨文龙, 等. 基于PDMS膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0806004.  
Xu T T, Yang Y Q, Yang W L, et al. Cascaded double-cavity temperature sensor based on hollow fibers encapsulated by PDMS membrane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0806004.
- [8] Yang Y H. Temperature sensor based on PNR in Sagnac interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(5): 259-261.
- [9] Xu O, Lu S H, Feng S C, et al. A novel fiber-laser-based fiber Bragg grating strain sensor with high-birefringence Sagnac fiber loop mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 818-820.
- [10] Xu B, Zhao C L, Yang F, et al. Sagnac interferometer hydrogen sensor based on panda fiber with Pt-loaded  $\text{WO}_3/\text{SiO}_2$  coating[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1594-1597.
- [11] 蔡菲, 辛奕, 董新永, 等. 基于乙醇灌注边孔光纤的Sagnac干涉型温度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010601.  
Qi F, Xin Y, Dong X Y, et al. Sagnac interferometer based temperature sensor with alcohol-filled side-hole fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010601.
- [12] Zhao J C, Zhao Y, Bai L, et al. Sagnac interferometer temperature sensor based on microstructured optical fiber filled with glycerin[J]. *Sensors and Actuators A*, 2020, 314: 112245.
- [13] Shi M, Li S G, Chen H L. A high-sensitivity temperature sensor based on Sagnac interferometer employing photonic crystal fiber fully filled with ethanol[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(6): 94.
- [14] Lü L L, Liu Q, Xue P S. The sensing characteristics of microstructure-core photonic crystal fiber filled with liquid based on Sagnac interferometer[J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103198.
- [15] Zhao Y, Wu D, Lü R Q, et al. Magnetic field measurement based on the Sagnac interferometer with a ferrofluid-filled high-birefringence photonic crystal fiber[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(6): 1503-1507.
- [16] Wang H R, Zhang W, Chen C C, et al. A new methane sensor based on compound film-coated photonic crystal fiber and Sagnac interferometer with higher sensitivity[J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102817.
- [17] Reyes-Vera E, Cordeiro C M B, Torres P. Highly sensitive temperature sensor using a Sagnac loop interferometer based on a side-hole photonic crystal fiber filled with metal[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 156-162.
- [18] 杨远洪, 王欢, 杨福铃, 等. 基于Sagnac干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0806004.  
Yang Y H, Wang H, Yang F L, et al. Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0806004.
- [19] Han T T, Liu Y G, Wang Z, et al. Control and design of fiber birefringence characteristics based on selective-filled hybrid photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15002-15016.
- [20] Liu Y D, Chen H L, Chen Q, et al. Experimental study on dual-parameter sensing based on cascaded Sagnac interferometers with two PANDA fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(9): 3090-3097.
- [21] Dong X Y, Tam H Y, Shum P. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(15): 151113.
- [22] Naeem K, Kim B H, Kim B, et al. Simultaneous multi-parameter measurement using Sagnac loop hybrid interferometer based on a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric cores[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3589-3601.
- [23] Rota-Rodrigo S, Perez-Herrera R A, Ibanez I, et al. Multiwavelength fiber ring laser based on optical add-drop multiplexers and a photonic crystal fiber Sagnac interferometer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 72-74.
- [24] Zuo J, Han T T, Yang J P, et al. High sensitivity temperature sensor with an avoided-crossing based selective-filling high birefringent photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 45527-45533.
- [25] Kaczmarek C. Measurement of the temperature sensitivity of modal birefringence of polarization maintaining fibers using a Sagnac interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3627-3632.
- [26] Yang Y H, Yang F L, Wang H, et al. Temperature-insensitive hydrogen sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2566-2571.
- [27] Wu D, Zhao Y, Hu H F. Experimental research on FLM temperature sensor with an ethanol-filled photonic crystal fiber [J]. *Sensors and Actuators A*, 2014, 209: 62-67.
- [28] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1403-1410.

## Temperature and Strain Sensing Characteristics of Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber Based on Sagnac Interference

Wu Biao<sup>1</sup>, Liu Yundong<sup>2</sup>, Chen Hailiang<sup>1\*</sup>, Chen Qiang<sup>1</sup>, Ma Mingjian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;

<sup>2</sup>School of Computer and Information Engineering, Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471000, Henan, China

### Abstract

**Objective** The optical fiber interferometer is a very important optical device, which has been widely used in the fields of physics, chemistry, medicine, and biological environment monitoring. By changing the substrate material of the inserted



optical fiber, the performance of the Sagnac optical fiber sensor has been effectively improved. However, limited by the inherent characteristics of optical fiber (such as photoelastic effect and photothermal effect), the sensitivity improvement of optical fiber sensors based on Sagnac interference is hindered. Therefore, improving the sensitivity of the Sagnac sensor is of important research significance. The Sagnac sensors with metal-filled photonic crystal fiber (PCF) can obtain higher sensitivity. However, manufacturing metal-filled PCF requires more stringent technology and costs. The manufacturing of functional liquid-filled PCF is simpler than that of metal-filled PCF. At present, most optical fiber sensors are used for single-element detection, which greatly limits the application of optical fiber sensors. In order to realize two-parameter detection in complex environments, a two-parameter optical fiber sensor based on the Sagnac interference principle is designed to detect temperature and strain.

**Methods** The polarization-maintaining PCF (PM-PCF) model selected in the experiment is LMA-PM-10. The PM-PCF's core diameter is about  $9.9 \mu\text{m}$ . The diameter of the air hole cladding is about  $54.3 \mu\text{m}$ . The diameter of PM-PCF's cladding is about  $235 \mu\text{m}$ . The PM-PCF has a strain-sensitive material that is the strain-applying part of the PM-PCF. Therefore, strain detection can be effectively realized through the shift of the Sagnac spectrum. Moreover, the material of the fiber itself and the strain-applying part have a good photothermal effect and thermal expansion effect. Therefore, the PM-PCF is also extremely sensitive to ambient temperature. The sensor can be used for temperature detection because the change in the outside temperature will cause an obvious shift in the interference spectrum. The temperature transformation can be calculated by the movement of the interference spectrum. In addition, by using the nitrogen pressurization device, the ethanol solution is filled into the air hole of PM-PCF. By extending the filling time, each air hole of the optical fiber is filled with ethanol. The filling of temperature-sensitive materials can greatly improve the temperature sensitivity of optical fiber sensors, which is the reason for filling ethanol in the PM-PCF. Experiments have proved that the sensing performance of the sensor has been improved.

**Results and Discussions** First of all, the strain sensitivity of the sensor is tested. Before connecting the optical path, the PM-PCF is welded into the Sagnac ring. The clamp is used to fix the optical fiber in the strain test device. The strain is gradually increased according to the principle of screw micrometer. The strain sensitivity achieves  $35.35 \text{ pm}/\mu\epsilon$  in the strain range of  $0\text{--}900 \mu\epsilon$ . During repeated measurements, the sensor shows excellent hysteresis. Then, the temperature sensitivity of the sensor is detected. The whole sensor is placed in the temperature control box for temperature detection. The sensor achieves a temperature-sensing sensitivity of  $-1.72 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  within the temperature range of  $26\text{--}50^\circ\text{C}$  when the PM-PCF is not filled with ethanol. The PM-PCF is placed in a closed air chamber, and each air hole is filled with ethanol by a nitrogen pressurization device. After the temperature detection, the sensor temperature sensitivity reaches  $-2.66 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , which is 1.55 times that of the raw PM-PCF. This phenomenon effectively proves the importance of filling ethanol. During repeated temperature detection, the sensor shows excellent hysteresis. The Sagnac interferometric sensor for temperature and strain detection has outstanding stability.

**Conclusions** In this paper, an optical fiber sensor based on the Sagnac interference principle is reported, which is used to detect temperature and strain in the environment. In the experiment, the PM-PCF is selected as the sensing unit. First, the PM-PCF without ethanol is fused into the Sagnac interference loop. The sensor relies on the photothermal effect and photoelastic effect of PM-PCF substrate material to achieve a temperature sensing sensitivity of  $-1.72 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  within the temperature range of  $26\text{--}50^\circ\text{C}$  and achieve a strain sensitivity of  $35.35 \text{ pm}/\mu\epsilon$  in the strain range of  $0\text{--}900 \mu\epsilon$ , respectively. The sensing performance of the Sagnac interferometer can be enhanced by using the external field's tuning effect of functional materials. In this way, ethanol is filled into the air hole of PM-PCF cladding by a nitrogen pressurization device. The temperature sensitivity is  $-2.66 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , which is 1.55 times that of the raw PM-PCF. The Sagnac interferometric sensor for temperature and strain detection has a simple structure and excellent hysteresis, which can be used to improve the sensing sensitivity.

**Key words** fiber optics; Sagnac interference; polarization-maintaining photonic crystal fiber; temperature sensing; strain sensing