

光学学报

基于二模-单模微纳光纤 Sagnac 环的高灵敏度光纤温度传感器

范维文, 万洪丹*, 陈彧芳, 赵津津, 毛静怡, 周瑞

南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出并研究了一种基于二模-单模光纤复合型微纳光纤 Sagnac 环(TS-MSL)的高灵敏度光纤温度传感器。TS-MSL 采用两段单模光纤中间熔接一段二模光纤并经熔融拉锥制备而成, 基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料进行封装。实验结果表明, TS-MSL 的光场干涉增强效应结合 PDMS 材料的光热敏感特性, 有效提升了微纳光纤的温度感知能力, 实现了高灵敏度温度传感。相比于普通单模微纳光纤 Sagnac 环, 该光纤传感器的温度灵敏度提升了 120 倍, 高达 8.13 nm/°C。该传感器具有较高的灵敏度, 在有毒气体和腐蚀环境等特殊场合的精确温度监测中有较大的实用价值。

关键词 光纤光学; 二模-单模光纤复合; 微纳光纤 Sagnac 环; 干涉; 温度传感; 高灵敏度

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1606001

Highly Sensitive Fiber Optic Temperature Sensor Based on Two-Mode-Single-Mode Microfiber Sagnac Loop

Fan Weiwen, Wan Hongdan*, Chen Yufang, Zhao Jinjin, Mao Jingyi, Zhou Rui

College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract We propose and investigate a highly sensitive fiber optic temperature sensor based on a two-mode-single-mode microfiber Sagnac loop (TS-MSL). The TS-MSL is fabricated by fused biconical tapering after a section of two-mode optical fiber is spliced between two sections of single-mode optical fibers, and it is packaged by the polydimethylsiloxane (PDMS) material. The experimental results reveal that the temperature sensing performance of the proposed sensor is effectively improved due to the optical field interference enhancement of TS-MSL as well as the photothermal sensitivity of the PDMS material. The temperature sensitivity of the proposed fiber sensor is up to 8.13 nm/°C, which is about 120 times higher than that of the ordinary single-mode microfiber Sagnac loop. With high sensitivity, the proposed temperature sensor is of high practical significance for accurate temperature monitoring in special occasions such as toxic gases and corrosive environments.

Key words fiber optics; two-mode-single-mode fiber composite; microfiber Sagnac loop; interference; temperature sensing; high sensitivity

1 引言

近年来,随着微纳加工工艺的不断发展,微纳光纤器件成为光纤通信和传感领域的研究重点^[1-4]。微纳光纤温度传感器以其全光纤、灵敏度高、结构紧凑、抗电磁干扰等优势,成为高灵敏度温度监测的重要器件,在工业过程控制、光伏器件效率、健康监测、生物

分子活动和化学反应调节等领域具有重要研究意义^[5-7]。

当前提出的光纤温度传感器主要包括微纳光纤耦合器、法布里-珀罗光学腔和马赫-曾德尔干涉仪等^[8-10]。近年来很多研究者设计出新型微纳结构以提高光纤温度传感器的灵敏度。2017年, Militky 等^[11]基于石英单模光纤(SMF)和高双折射光纤级联的游

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12174199)、国家自然科学基金青年项目(11704199)、中国博士后基金项目(2021M701765)、江苏省研究生创新基金项目(SJKY19_0807)、南京邮电大学 STITP 项目(SZDG2021013)

通信作者: hdwan@njupt.edu.cn

标效应制作出微纳光纤环形谐振器,其温度灵敏度为 -0.3 nm/K 。2019年,Cao等^[12]通过在Sagnac光纤环形区加入布拉格光纤光栅,制成混合型微纳光纤环形谐振器,将灵敏度提高到 $0.033 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。2019年,本课题组利用稀土掺杂光纤制备双花生结微纳结构,基于掺铒和掺镱光纤的双花生结温度灵敏度分别为 $1268 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ 和 $-2343 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ ^[13]。热敏材料凭借其极大的热膨胀系数,能够有效提高光纤的温度传感性能。2019年Fan等^[14]将微纳光纤结型耦合器与聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料结合,其温度灵敏度达到 $1.67 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。Wu等^[15]基于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料制备微纳光纤结型谐振器,其灵敏度由几十 $\text{pm/}^\circ\text{C}$ 提升为 $0.266 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。2021年,付广伟等^[16]提出一种基于表面石墨烯修饰的锥形多模光纤温度传感器,温度灵敏度达到 $0.1589 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ 。然而,现有微纳光纤传感器仍然受结构、材料和封装等方面的限制,如何实现超高温灵敏度传感,仍然是业内关注的焦点。

本文提出并实现了一种基于二模-单模混合型微纳光纤Sagnac环(TS-MSL)的超高灵敏度温度传感器。通过光纤熔融耦合方法制备TS-MSL,获得了增强的Sagnac干涉效应。基于PDMS材料进行封装,实现高灵敏度温度传感。实验表明,普通单模微纳光纤Sagnac环的温度灵敏度仅为 $67.52 \text{ pm/}^\circ\text{C}$,而本文提出的TS-MSL结合PDMS材料封装后,其温度灵敏度高达 $8.13 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,灵敏度提高了120倍。本文提出的具有超高温灵敏度的TS-MSL,在工业过程控制、健康监测、生化学反应控制等领域具有重要的应用价值。

2 器件工作原理

图1为基于TS-MSL超高灵敏度温度传感器的结构示意图,其中 d 为耦合区直径, L 为耦合长度。该传感器由一根SMF组成的Sagnac环形区和由二模光纤(TMf)熔融拉锥耦合而成的耦合器构成。由于芯径不匹配,光场由输入端到达SMF和TMf的熔接点时,在TMf纤芯中激发出高阶模式。光场在耦合区实现干涉。Sagnac环形的存在使得光传输(正向、逆向)一周后再次向耦合区会聚,实现二次干涉。

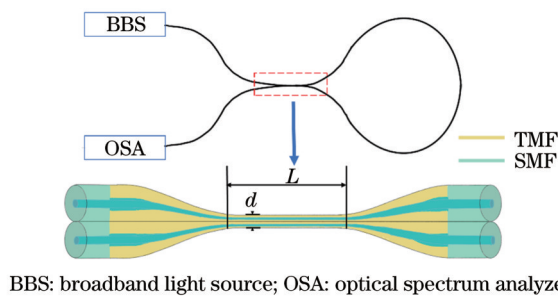


图1 TS-MSL超高灵敏度温度传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TS-MSL ultra-high sensitive temperature sensor structure

由于芯径不匹配,光由SMF进入TMF会激发部分高阶模传输。光到达耦合区时,同时激发奇、偶超模,二者在耦合区中传输并相互干涉,TS-MSL输出端口的功率^[17]为

$$P = P_{in} \sin^2(\Delta\varphi), \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L \Delta n_{eff}}{\lambda} = \frac{2\pi L (n_{eff}^{even} - n_{eff}^{odd})}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: P_{in} 为入射光功率; λ 为入射光波长; L 为耦合长度; $\Delta\varphi$ 为相位差; Δn_{eff} 为奇、偶超模的有效折射率差; n_{eff}^{even} 和 n_{eff}^{odd} 分别为偶、奇超模的有效折射率。当 $\Delta\varphi = (2N-1)\pi$ 时,透射光谱处于波谷,此时波长^[18]为

$$\lambda_N = \frac{2L(n_{eff}^{even} - n_{eff}^{odd})}{2N-1}, \quad (3)$$

式中: N 为正整数, $n=1,2,3,\dots$ 。当器件外界的环境温度变化时,其波谷会由于传输模式的有效折射率和光纤长度的变化而发生偏移,波长偏移量为

$$\Delta\lambda_{N,T} = \lambda_{N,T+\Delta T} - \lambda_{N,T} = \frac{2(\Delta n_{eff} + \Delta n_T)(L + \Delta L)}{2N-1} - \frac{2\Delta n_{eff}L}{2N-1}, \quad (4)$$

式中: Δn_T 和 ΔL 分别为器件的有效折射率差和光纤长度在 ΔT 温度变化下的改变量, Δn_T 是由热光系数表示的, ΔL 是由热膨胀系数表示的,二氧化硅材料的热膨胀系数非常小,可忽略光纤长度的改变量,因此式(4)可写为

$$\Delta\lambda_{N,T} = \frac{\Delta n_{eff}}{\Delta T} \lambda_{N,T0} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,波谷的偏移量在同样的温度变化范围内,与奇偶超模的有效折射率差成正比。接下来对该器件的单模和二模两种情况进行仿真计算。

图2所示为采用光束传播算法(BPM)仿真模拟不同微纳光纤Sagnac环耦合区两光纤中功率的传输与转换过程。图2中mode 0、mode 1分别表示基模与 LP_{11} 模,1、2分别代表监测的两条路径(两条耦合光纤),色度条代表能量强度的大小。光沿着 Z 轴由下至上传输。在该仿真中,耦合区直径 d 设置为 $5 \mu\text{m}$,耦合区长度 L 为 1.5 mm 。SMF的包层直径为 $125 \mu\text{m}$,纤芯直径为 $8 \mu\text{m}$;TMf的包层直径为 $125 \mu\text{m}$,纤芯直径为 $19 \mu\text{m}$ 。当拉锥完成后,SMF和TMf的包层直径只有 $2.5 \mu\text{m}$ 左右(纤芯在拉锥的过程中尺寸同比例减小,可忽略不计),因此在仿真的参数设置中,忽略了SMF和TMf的纤芯尺寸。拉锥后TMf和SMf的包层与空气形成新的波导,设置TS-MSL周围介质折射率为1.0,光纤包层折射率为1.4468。网格尺寸设为 $1 \mu\text{m}$,边界条件为理想匹配(PML)。

从图2中可以看出:普通SMF微纳光纤Sagnac环中主要是基模的传输与能量转换,能量耦合周期约 $700 \mu\text{m}$ 。TS-MSL中主要是高阶模 LP_{11} 模的传输与能量转换,能量耦合周期约为 $150 \mu\text{m}$ 。TMf中的高阶模式能量交换速度要快于SMf中的基模能量交换速度。由式(2)可知:能量交换速度快,说明奇偶超模

的有效折射率差 Δn_{eff} 大。因此 TMF 中高阶模式的奇偶超模有效折射率差要大于 SMF 中奇偶超模的有效

折射率差。在同样的温度变化范围内, TMF 谐振波长的波谷偏移量更大, 即 TMF 的温度灵敏度更高。

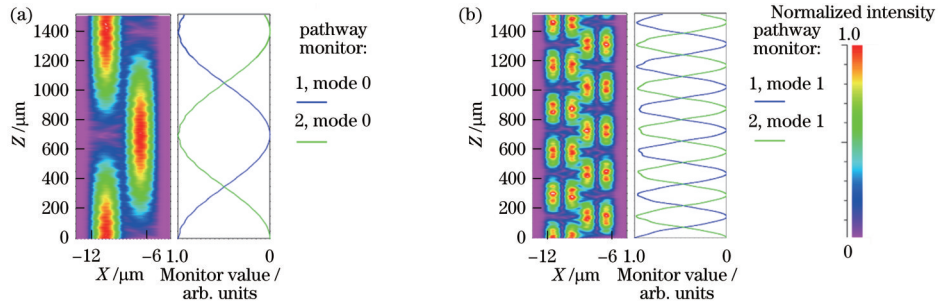


图 2 不同微纳光纤 Sagnac 环在耦合区域的光场传输仿真分析结果。(a)普通 SMF 微纳光纤 Sagnac 环;(b) TS-MSL
Fig. 2 Simulation analysis results of optical field transmission of different micro-nano fiber Sagnac rings. (a) Ordinary SMF micro-nano fiber Sagnac ring; (b) TS-MSL

TMF 耦合区域长度对透射谱影响的仿真结果如图 3 所示, 在仿真软件中分别设置耦合区域长度为 30000, 35000, 40000, 45000 μm , 并扫描透射谱, 测定其自由光谱范围(FSR), 4 种耦合区域长度的透射谱仿真结果如图 3 所示, 对应的 FSR 分别约为 7.4, 6.4, 5.6, 5.0 nm。仿真结果表明: 耦合区域越长, 相应的 FSR 越小。

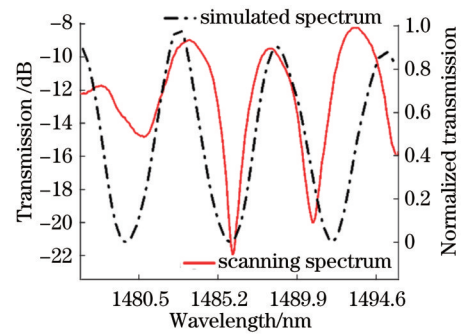


图 4 TMF 实验透射谱与 45000 μm 仿真透射谱对比图
Fig. 4 Comparison between experimental transmission spectrum of TMF and simulated transmission spectrum at 45000 μm

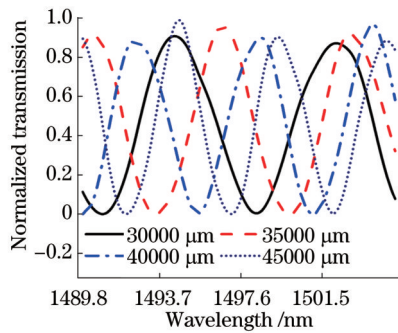


图 3 不同耦合区长度下的仿真分析结果
Fig. 3 Simulation results of different coupling lengths

将仿真结果与实验测得的 45000 μm 处透射谱进行对比, 其结果如图 4 所示。TMF 光场传输实验中测得的耦合区域 FSR 约为 4.8 nm, 与实验结果相一致。

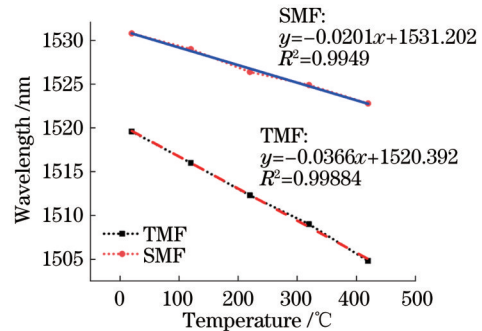


图 5 基于 SMF 和 TMF 的微纳光纤 Sagnac 环温度灵敏度仿真结果对比图
Fig. 5 Comparison of temperature sensitivity simulation results of micro-nano fiber Sagnac rings based on SMF and TMF

为对比 SMF 和 TMF 的温度灵敏度, 在仿真中考虑光纤的热膨胀性和热光性, 以 20 $^{\circ}\text{C}$ 为参考室温, 耦合区长度设为 45000 μm , 在不同温度下计算出耦合区对应的半径、长度和折射率, 扫描透射谱并进行比较, SMF 和 TMF 比较结果如图 5 所示。可以发现, 基于 SMF 和 TMF 的微纳光纤 Sagnac 环的温度灵敏度分别约为 20 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 36.6 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$, 后者具有更高的温度传感灵敏度。

该 TS-MSL 传感器随温度的改变而产生的波长变化^[19]可表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha_s + \beta_s + \alpha_p + \beta_p)\Delta T, \quad (6)$$

式中: $\Delta\lambda$ 表示波长的漂移量; α_s 和 β_s 分别表示二氧化硅材料的热膨胀系数和热光系数, 其值分别为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; α_p 和 β_p 分别表示 PDMS 材料的热膨胀系数和热光系数, 其值分别为 $9.6 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 $-4.5 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。因此, 由于 PDMS 具有较大的热膨胀系数和热光系数, 该 TS-MSL 可实现高于普通石英光纤器件的温度灵敏度。

3 实验结果与讨论

采用氢氧火焰熔融拉锥的方法制备 TS-MSL。先将约 40 cm 的 SMF (纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$) 和两段长度分别约为 3 cm 的 TMF (纤芯直径为 $19\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$) 熔接为一根光纤, 形成 SMF-TMF 结构。再将两根 TMF 的另一端分别熔接两段 SMF 作为尾纤。接着将 40 cm 的 SMF 弯曲, 使两段 TMF 并排放置, 并置于氢氧火焰

下加热熔融拉锥, 使其耦合在一起。采用提拉镀膜法将 PDMS 材料封装在器件的耦合区。首先将配备好的 PDMS 溶胶凝胶涂覆于器件的耦合区域。在 $80\ ^\circ\text{C}$ 温度下加热 10 min 使得 PDMS 固化, 最终在器件表面形成一层 PDMS 膜层。图 6 为该器件 TMF 锥形区域覆盖 PDMS 涂层后的显微镜实物图, 锥形区域光纤直径约为 $5\ \mu\text{m}$, 锥区长度约为 5 mm, 插图为该器件锥形区域未封装 PDMS 时的光纤横截面实物照片。

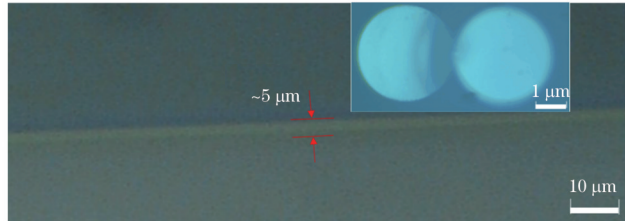


图 6 TS-MSL 实物图(封装 PDMS 后的锥区显微镜示意图, 插图为 TMF 锥形区横截面图)

Fig. 6 Physical image of TS-MSL (diagram of cone area microscope after packaging PDMS, with insert image showing TMF cross-sectional view of cone area)

图 7 为温度传感实验装置图。将光纤温度传感器放入温控精度为 $0.1\ ^\circ\text{C}$ 的温度控制箱中。宽带光源 (波长范围为 $1250\sim 1650\ \text{nm}$) 通过光纤熔接的方式

连接至 TS-MSL 的输入端。由光谱仪 (YOKOGAWA AQ6370D, 分辨率带宽为 $0.02\ \text{nm}$) 实时记录输出的干涉光谱。

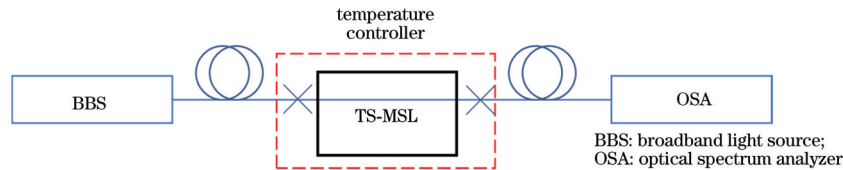


图 7 实验装置图

Fig. 7 Diagram of experimental setup

为证明二模-单模混合结构对光场干涉的增强效果, 首先测试了耦合区为普通单模微纳光纤 Sagnac 环的温度传感特性。图 8 为实验测试的三种不同锥区直径的普通单模微纳光纤 Sagnac 环的干涉光谱结果。结果表明, 在普通单模微纳光纤 Sagnac 环中, d 为 $3\ \mu\text{m}$ 和 $7\ \mu\text{m}$ 的结构对应的最大信噪比分别为 $14.86\ \text{dB}$ 和 $7.47\ \text{dB}$ 。当 $d=5\ \mu\text{m}$ 时, 该结构光谱的消光比达到最大且损耗最小, 分别为 $25.37\ \text{dB}$ 和 $0.84\ \text{dB}$ 。

将 $d=5\ \mu\text{m}$ 的普通 SMF 微纳光纤 Sagnac 环放入温度控制箱中, 温度变化范围为 $25\sim 75\ ^\circ\text{C}$, 每隔 $5\ ^\circ\text{C}$ 测定一次获得的光谱漂移情况, 如图 9(a) 所示。随着温度逐渐增大, 光谱产生蓝移。图 9(b) 为对应的温度与波长的拟合关系, 灵敏度为 $-67.52\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, 线性度约为 0.99156 。

将 SMF 替换为 TMF, 将制备获得的 TS-MSL ($d=5\ \mu\text{m}$) 放入温度控制箱 (温度变化范围为 $25\sim 80\ ^\circ\text{C}$) 进行温度传感, 光谱漂移情况如图 10(a) 所示。随着温度逐渐增大, 光谱产生蓝移。图 10(b) 为对应的温度与波长的拟合关系, 温度灵敏度

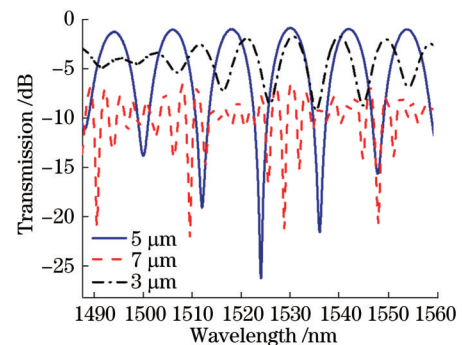


图 8 三种不同锥区直径下普通单模微纳光纤 Sagnac 环的干涉谱对比图

Fig. 8 Comparison of interference spectra of normal single-mode micro-nano fiber Sagnac loop under three different cone diameters

为 $-115.18\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, 线性度为 0.99712 。与单模微纳光纤 Sagnac 环相比, 基于 TS-MSL 的结构温度灵敏度提升约 2 倍。

图 11 为 TS-MSL 涂覆 PDMS 薄膜前后的干涉谱对比。可以看出, 进行 PDMS 材料封装后, TS-MSL

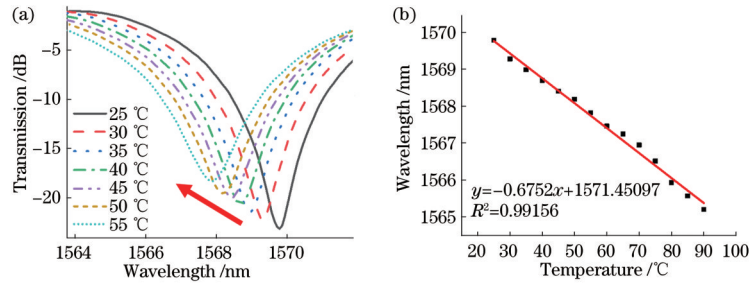


图 9 普通 SMF 微纳光纤 Sagnac 环温度传感实验结果。(a)不同温度下干涉光谱图;(b)波长-温度的拟合曲线

Fig. 9 Temperature sensing experiment results of normal SMF micro-nano fiber Sagnac ring. (a) Interference spectra at different temperatures; (b) fitting curve of wavelength-temperature

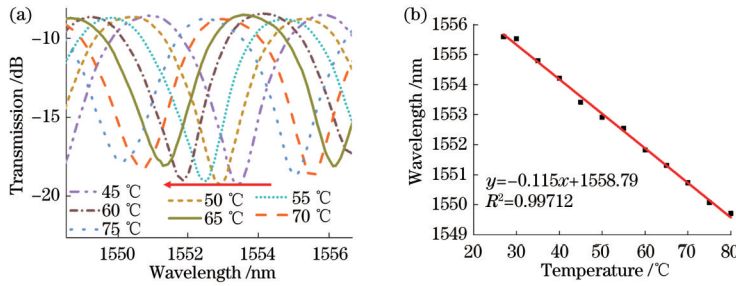


图 10 TS-MSL 温度传感实验结果。(a)不同温度下干涉光谱图;(b)波长-温度拟合曲线

Fig. 10 Experimental results of TS-MSL temperature sensing. (a) Interference spectra at different temperatures; (b) fitting curve of wavelength-temperature

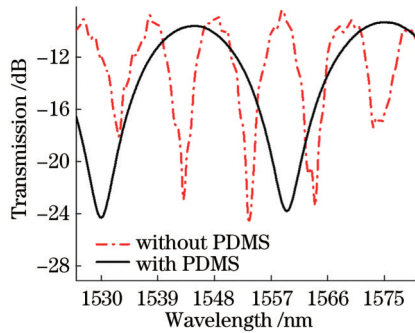


图 11 封装 PDMS 前后 TS-MSL 的干涉谱对比图

Fig. 11 Comparison of interference spectra of TS-MSL before and after packaging PDMS

干涉谱的 FSR 增大了 2 倍(由原来的 10.3 nm 增加为 29.5 nm),消光比(约 15 dB)以及损耗基本维持

不变。

TS-MSL 器件的透射谱中相邻两个 dip 之间的 FSR 可表示为

$$X_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{\Delta n'_{\text{eff}} L}, \quad (7)$$

式中: $\Delta n'_{\text{eff}}$ 为纤芯和包层的有效折射率差。PDMS 材料覆盖在光纤包层外部,在计算有效折射率差时,将光纤包层和 PDMS 视为一个整体。实验中采用的 PDMS 材料(实验室环境下的折射率约为 1.4571,略大于光纤包层 1.4468 的折射率)包裹光纤表面,封装后使得式(7)中有效折射率差变小,在其他条件不变时,透射谱的 FSR 的值变大。

将 PDMS 封装后的 TS-MSL 放入温度控制箱中,其温度传感实验结果如图 12 所示,随着温度增大,光谱产生蓝移,温度灵敏度达到 8.13 nm/°C,相比

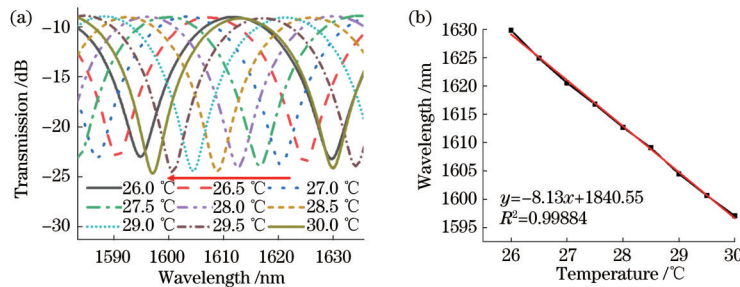


图 12 加入 PDMS 封装后 TS-MSL 的温度传感实验结果。(a)不同温度下干涉光谱图;(b)波长-温度的拟合曲线

Fig. 12 Temperature sensing experiment results of TS-MSL after adding PDMS package. (a) Interference spectra at different temperatures; (b) fitting curve of wavelength-temperature

单模微纳光纤 Sagnac 环提高了 120 倍,线性度达到 0.99884,能够实现超高灵敏度温度传感。TS-MSL 的波长漂移可由式(6)得出,相对于二氧化硅材料,PDMS 的 α_p 和 β_p 增大了三个数量级,因此 PDMS 材料能够大幅提高器件温度传感灵敏度。

下面对该器件的重复性进行实验,在同样的温度变化范围内将 TS-MSL 进行降温测试,每隔 0.5 °C 取一次数据,其实验结果如图 13 所示。PDMS 和二氧化硅材料存在热效应引起的残余应力,导致了升降温的温度漂移曲线存在部分数据不一致。

由于 PDMS 是一种有机硅聚合物材料,它与二氧化硅材料有良好的附着力和化学惰性,该器件的响应时间约为 26 s^[14]。表 1 列举出本文 TS-MSL 和其他

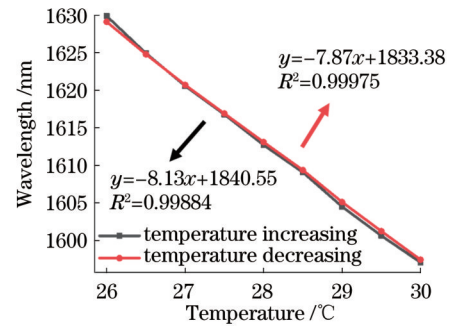


图 13 TS-MSL 升降温时温度漂移线性拟合曲线对比图
Fig. 13 Linear fitting curves of wavelength shifts for temperature rise and fall

温度传感器的参数对比。

表 1 所提 TS-MSL 与其他温度传感器的参数对比

Table 1 Comparison of parameters between proposed TS-MSL and other temperature sensors

Sensor	Response time /s	Temperature sensitivity / (nm·°C ⁻¹)	Measurement range /°C	Year of publication
Sensor in Ref. [14]	<26	1.67	24-38	2019
Sensor in Ref. [20]	—	1.7	50-63	2017
Sensor in Ref. [21]	—	0.101	20-100	2019
Sensor in Ref. [22]	—	0.22	20-100	2021
Sensor in Ref. [23]	—	1.63	21-25	2021
Proposed sensor	~26	8.13	26-30	—

4 结 论

提出并实现了一种基于 TS-MSL 的高灵敏度温度传感器。通过熔融拉锥法制备二模-单模混合结构 Sagnac 环,并与 PDMS 相结合。基于 TMF 较强的倏逝场和 PDMS 热敏感效应,所提器件相比于普通单模微纳光纤 Sagnac 环,温度灵敏度提升了 120 倍,达 8.13 nm/°C,且线性度接近于 1。该器件具有全光纤、灵敏度高、制作简单等优点,在有毒气体和腐蚀环境等特殊场合的精确温度监测中有较高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 白雪,陈烽. 飞秒激光制备超疏水表面的研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114003.
Bai X, Chen F. Recent advances in femtosecond laser-induced superhydrophobic surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114003.
- [2] 马喆,王逸璇,江俊峰,等. 光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306008.
Ma Z, Wang Y X, Jiang J F, et al. Research on dynamic range expansion method of fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306008.
- [3] 汪海,周文超,李凯伟,等. 微纳光纤耦合器无标生物传感特性[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0306005.
Wang H, Zhou W C, Li K W, et al. Label-free biosensing characteristics of micro/nano-fiber coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306005.

- [4] 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.
- [5] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z Y, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect[J]. Optics Communications, 2015, 336: 73-76.
- [6] Zhang Z, Liao C R, Tang J, et al. Hollow-core-fiber-based interferometer for high-temperature measurements [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 16720096.
- [7] Liu Y G, Liu X, Zhang T, et al. Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 111: 167-171.
- [8] Zhao L, Zhang Y D, Wang J F, et al. Highly sensitive temperature sensor based on an isopropanol-sealed optical microfiber coupler[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(11): 111901.
- [9] Kou J L, Qiu S J, Xu F, et al. Demonstration of a compact temperature sensor based on first-order Bragg grating in a tapered fiber probe[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18452-18457.
- [10] Jasim A A, Harun S W, Arof H, et al. Inline microfiber Mach-Zehnder interferometer for high temperature sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2): 626-628.
- [11] Militky J, Kadulova M, Ciprian D, et al. Fiber optic temperature sensing with enhanced sensitivity based on spectral interferometry[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 33: 45-50.

- [12] Cao Y P, Zhang H M, Miao Y P, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on microfiber Bragg Grating in Sagnac loop[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47: 147-151.
- [13] 陈彧芳, 万洪丹, 陈乾, 等. 基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0110001.
Chen Y F, Wan H D, Chen Q, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110001.
- [14] Fan R, Yang J T, Li J, et al. Temperature measurement using a microfiber knot ring encapsulated in PDMS[J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(12): 125706.
- [15] Wu Y, Rao Y J, Chen Y H, et al. Miniature fiber-optic temperature sensors based on silica/polymer microfiber knot resonators[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18142-18147.
- [16] 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.
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.
- [17] Yang W L, Li C X, Wang M, et al. The polydimethylsiloxane coated fiber optic for all fiber temperature sensing based on the multithin-multifiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 51-56.
- [18] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, et al. High sensitivity temperature sensor using microfiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 84217U.
- [19] Payne F P, Hussey C D, Yataki M S. Modelling fused single-mode-fibre couplers[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(11): 461-462.
- [20] Zhao Y, Liu X, Lü R Q, et al. Simultaneous measurement of RI and temperature based on the combination of Sagnac loop mirror and balloon-like interferometer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 243: 800-805.
- [21] Gong J Q, Shen C Y, Xiao Y K, et al. High sensitivity fiber temperature sensor based PDMS film on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102029.
- [22] Wang F, Lu Y H, Wang X, et al. A highly sensitive temperature sensor with a PDMS-coated tapered dispersion compensation fiber structure[J]. *Optics Communications*, 2021, 497: 127183.
- [23] Wang H X, Liao M M, Xiao H F, et al. High sensitivity temperature sensor based on a PDMS-assisted bow-shaped fiber structure[J]. *Optics Communications*, 2021, 481: 126536.