

文章编号: 1672-8785(2024)01-0027-09

金属基底增敏的干涉型 高温光纤传感器

刘 滔 马成举* 李东明 张贻歆 刘芊震
邬佳芮 胡 辉 李霆宇

(西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了实现对井下潜油电泵机组温度的实时监测, 设计了一种由粗锥型单模-多模-单模(Coarse Cone Singlemode-Multimode-Singlemode, CCSMS)构成的马赫-曾德尔干涉(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)型高温光纤传感器。该结构采用直接熔接的方法将单模光纤与多模光纤相熔接; 接着通过调整熔接机的熔接参数, 在单模光纤上制作出粗锥结构; 最后将制备的结构嵌入铜基板的U型槽中, 实现传感器的增敏封装。对封装后的传感器的温度响应特性进行了测试。实验结果表明, 在40~250°C的温度范围内, 该传感器实现了灵敏度为124.9 pm/°C的温度传感。对其稳定性和重复性进行了测试。结果表明, 传感器的稳定性最大误差约为0.44%, 重复性最大误差约为2.29 pm/°C。该传感器具有灵敏度高、重复性和稳定性好的特点, 有望用于油气井下潜油电泵机组的温度监测。

关键词: 光纤传感器; 马赫-曾德尔干涉仪; 单模光纤; 温度

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.01.004

Interferometric High-Temperature Optical Fiber Sensor Sensitized by Metal Substrate

LIU Ming, MA Cheng-ju*, LI Dong-ming, ZHANG Yi-xin, LIU Qian-zhen,
WU Ji-rui, HU Hui, LI Ting-yu

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to achieve real-time monitoring of the temperature of the downhole submersible electric pump unit, a Mach-Zehnder interferometer (MZI) high-temperature fiber optic sensor composed of coarse cone singlemode-multimode-singlemode (CCSMS) was designed. The structure adopts a direct fusion method to fuse the single-mode fibers with the multi-mode fibers. Then, by adjusting the fusion parameters of the fusion splicer, a thick cone structure is fabricated on the single-mode fibers. Finally, the prepared structure is em-

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018GY-062); 西安石油大学创新与实践能力的培养项目(YCS21211084)

作者简介: 刘滔(1999-), 男, 湖南长沙人, 硕士, 主要研究方向为光纤温度传感技术。

***通讯作者:** E-mail: chengjuma@xsyu.edu.cn

bedded in the U-shaped groove of the copper substrate to achieve the sensitization packaging of the sensor. The temperature response characteristics of the packaged sensor were tested. The experimental results show that the sensor achieves a temperature sensing sensitivity of 124.9 pm/°C in the temperature range of 40°C to 250°C. The stability and repeatability of the sensor were tested. The results show that the maximum stability error of the sensor is about 0.44%, and the maximum repeatability error is about 2.29 pm/°C. The sensor has the characteristics of high sensitivity, good repeatability and stability, and is expected to be used for the temperature of the electric submersible pump unit in oil and gas wells.

Key words: optical fiber sensor; Mach-Zehnder interferometer; single mode fiber; temperature

0 引言

潜油电泵是油田生产中应用最广泛的人工举升设备之一^[1]。对潜油电泵的绕组温度进行实时有效的监测,能够延长其维修保养周期,并降低潜油电泵发生故障的概率。目前用于潜油电泵井下温度监测的传感器以电类传感器为主,其具有精度高、响应速度快的优点,但存在抗氧化能力差、易受电磁干扰等问题,长时间在高温环境下工作会导致性能下降。相较于电类传感器,光纤传感器具有体积小、多路复用、抗电磁干扰^[2]和抗氧化能力强等显著优势。目前已报道了基于不同结构的高温光纤传感器,比如基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)^[3-4]、法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)^[5-6]、迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer, MI)^[7-8]和 MZI^[9-10]等结构的高温光纤传感器。其中,基于 MZI 结构的高温光纤传感器具有灵敏度高、分辨率高和结构紧凑等优点^[11],备受科研人员的关注。Li H 等^[12]提出了一种由七芯光纤和两个单模光纤球拼接而成的 MZI 光纤传感器。在 50~130°C 的范围内,该传感器的灵敏度为 76.38 pm/°C。Zhang C B 等^[13]提出了一种由一段少模光纤与一段七芯光纤拼接而成的微型光纤温度传感器。当温度从室温上升到 110°C 时,该传感器的灵敏度为 91.8 pm/°C。Bao W J 等^[14]提出了一种基于细芯光纤的 MZI 传感器。该传感器由夹在两根标准单模光纤之间的一小段细芯光纤组成,在 900°C 内的灵敏度为 94.3 pm/°C。可以看出,全光纤 MZI 温度传感器具有测温

范围大、制备简单等优点,但存在灵敏度偏低、重复性和稳定性有待提高的问题。

本文设计并制作了一种 CCSMS 高温光纤传感器,利用铜热膨胀系数大的特点,将光纤传感器封装在铜板的 U 型槽中,从而提升了该传感器的灵敏度。实验结果表明,在 40~250°C 温度范围内,该传感器的温度响应灵敏度为 124.9 pm/°C,线性相关系数为 0.98657,稳定性误差最大约为 0.44%,重复性误差最大约为 2.29 pm/°C。所制作的高温光纤传感器具有灵敏度高、重复性和稳定性好、成本低廉等特点,有望用于油气井下潜油电泵机组温度监测。

1 传感器结构的设计、制作及封装

CCSMS 高温光纤传感器的结构如图 1 所示。首先,在单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)上熔接 2 mm 长的多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF),形成单模-多模结构。然后将两段 SMF 手动熔接,形成粗锥结构。最后,将两部分结构拼接起来,形成干涉长度为 L 的传感器。在该结构中,MMF 起到了光束分离的作用。光经过 MMF 后,一部分在 SMF 的包层中传输,形成包层模;另一部分则继续在纤芯中传输,形成纤芯模。当传输到粗锥结构时,包层中的光耦合进输出 SMF 的纤芯中,与纤芯模发生干涉,形成 MZI。为了提高该传感器的灵敏度,本文将其封装在了铜板的 U 型槽中。

实验所用 MMF(长飞光纤光缆股份有限公司生产)和 SMF(康宁公司生产)的纤芯/包层直径分别为 105 μm /125 μm 和 9 μm /125 μm 。

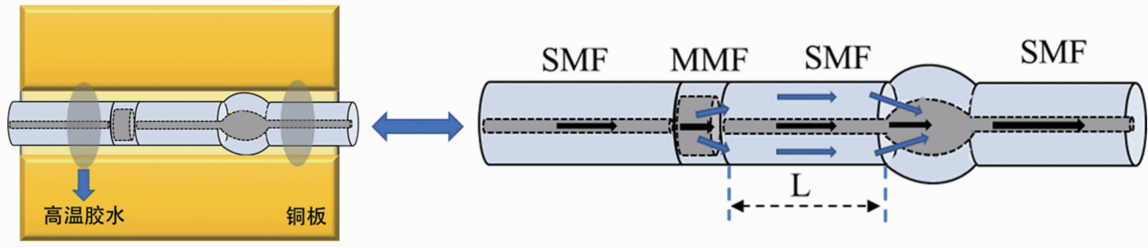


图 1 CCSMS 传感器的结构示意图

该传感器的制备步骤如下: 首先, 将 S177 光纤熔接机(Furukawa 公司生产)的熔接程序调成自动熔接模式, 然后将 SMF 与 MMF 放置于光纤熔接机中。熔接后形成单模-多模结构。接着将熔接程序转换成手动模式来熔接粗锥结构, 并将熔接参数设置如下: 放电强度为 180 mA, 预熔时间为 200 ms, 推进距离为 350 μm 。熔接程序设置完成后, 将两根 SMF 置于光纤熔接机中进行放电, 即可制备出光纤粗锥结构。如图 2 所示, 粗锥的直径为 170 μm 。最后, 将熔接程序转换成自动熔接模式, 并将制备好的两部分结构放置在熔接机中进行熔接, 制成 MZI 型高温光纤传感器。

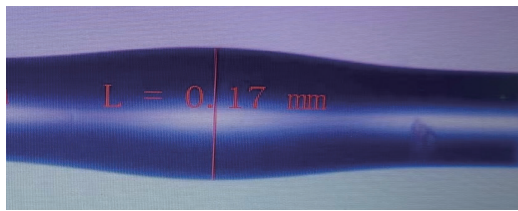


图 2 粗锥结构的显微图

增敏封装步骤如下: 首先, 用刻刀和直尺在铜板表面刻出 U 型槽, 并用磨砂纸反复打磨, 直至槽内光滑平整。然后将铜板放置在加热台上, 将传感器放入槽内并拉直固定。接着用 YK8969 高温胶粘住传感器的两端, 打开加热开关。等温度升至 200 $^{\circ}\text{C}$ 后, 保持 30 min, 使胶水完全固化。至此, 高温光纤传感器封装完成。

2 实验结果分析

2.1 干涉光谱分析

本文制备了干涉长度 L 分别为 12 mm、18 mm 和 24 mm 的三个 CCSMS 高温光纤传感器, 并用解调仪观测了该结构的透射光谱(见

图 3(a))。

从图 3(a)中可以看出, 光在该 MZI 结构中传输时能够产生干涉。基于 MZI 的干涉理论, CCSMS 高温光纤传感器的输出光强 I 可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi \quad (1)$$

式中, I_1 表示干涉臂 SMF 中纤芯模的强度; I_2 表示干涉臂 SMF 中包层模的强度; $\Delta\varphi$ 为干涉臂 SMF 中纤芯模与包层模之间的相位差, 可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \Delta n_{eff} L}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff}^o - n_{eff}^d) L \quad (2)$$

式中, λ 为输入波长; L 为干涉长度; n_{eff}^o 为 SMF 中的纤芯模的有效折射率; n_{eff}^d 为 SMF 中的包层模的有效折射率; $\Delta n_{eff} = n_{eff}^o - n_{eff}^d$, 表示 SMF 中的纤芯模与包层模的有效折射率差。当式(2)中的 $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$ 时(m 为整数), 干涉光谱中的干涉谷波长可表示为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{eff} L}{2m+1} \quad (3)$$

干涉光谱中两个相邻波峰或波谷之间的距离称为自由光谱范围(Free Spectrum Range, FSR), 可表示为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L} \quad (4)$$

可以看出, 在有效折射率差 n_{eff}^d 和输入波长 λ 不变的情况下, FSR 与干涉长度 L 成反比。

为了进一步分析传感器的模式耦合机理, 对三种不同干涉长度的传感器的透射光谱进行了快速傅里叶变换, 得到了图 3(b)所示的空间频谱。三种传感器在空间频谱上均存在多个峰, 说明存在多个阶次的包层模; 同时可以看到, 长度为 12 mm、18 mm、24 mm 的干涉光

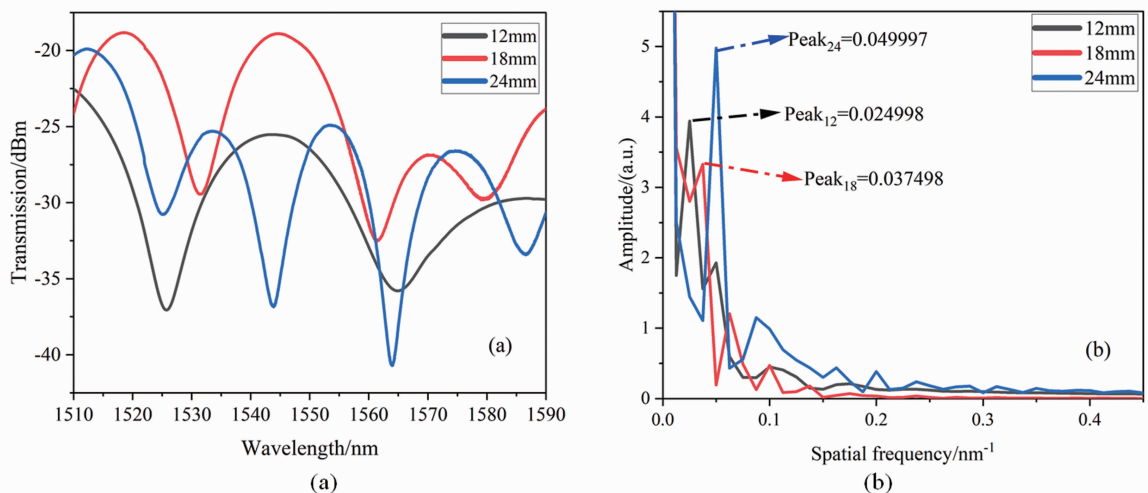


图3 (a)传感器的光谱图; (b)传感器的空间频谱图

谱上各有一个主峰,其振幅大于其它次峰,且空间频率随干涉长度的增大而增大。以长度为12 mm的干涉仪为例,可以看到,其主峰位于空间频率为 0.024998 nm^{-1} 处。根据公式 $\epsilon = \Delta n_{\text{eff}} L / \lambda^2$,可以计算出对应的有效折射率差(0.005004)。通过有效折射率差可知,参与干涉的主要包层模^[15]为 LP_{08} 。

本文采用光束传播法对CCSMS结构中的光传播进行了仿真分析。设置入射光波长为 $1.55 \mu\text{m}$,单模光纤的纤芯/包层折射率为1.45/1.445,多模光纤的纤芯/包层折射率为1.458/1.441,粗锥直径为 $170 \mu\text{m}$ 。仿真结果如图4所示。可以看出,光在输入SMF中的传输损耗非常小;经过MMF后,由于MMF和SMF纤芯不匹配,可以看到一部分光能量进入SMF的包层中,另一部分光仍在SMF的纤芯中传输。当光经过粗锥结构时,包层中大部分的光能量耦合到输出SMF的纤芯中,与纤芯中的光发生干涉,形成了图3(a)所示的干涉光谱。

2.2 温度响应实验

由于对传感器进行了增敏封装,在温度测试中,随着温度的升高,干涉波谷的漂移量增大。因此,为了避免不同干涉波谷之间出现重叠,要求干涉光谱具有较大的FSR。同时,为了使传感器结构更紧凑,本文最终采用 L 为12 mm的传感器进行温度实验。

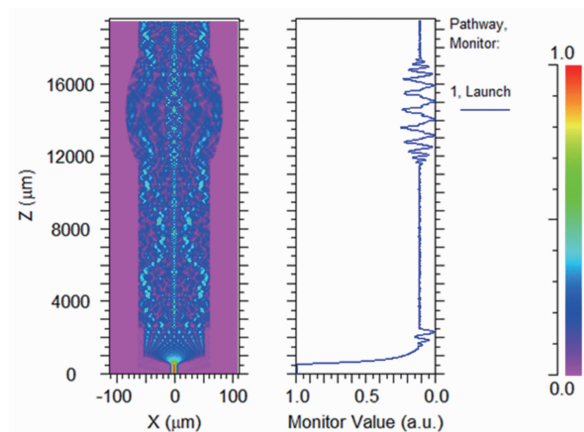


图4 CCSMS传感器结构的光场纵向分布图

如图5所示,温度响应实验装置主要由101-2AB电热鼓风干燥箱(天津泰斯特公司生产)、sm125解调仪(Micro-optics公司生产)、电脑和CCSMS高温光纤传感器组成。其中,解调仪的波长分辨率为 0.001 nm 。将传感器固定在电热鼓风干燥箱中。解调仪的激光光源发出的光从端口1传输到传感器结构上;经过传感器后,传输到解调仪的端口2中,并由解调仪进行解调;解调之后的光谱最终通过电脑显示出来。

实验时,将传感器放置于电热鼓风干燥箱内,并将干燥箱内的温度逐渐升高到 250°C (保持30 min),以消除光纤内部残余应力,使传感器达到稳定状态。待温度自然冷却到 40°C 后,记录此时的光谱。接着以 30°C 为步长,将温度从 40°C 逐渐加热到 250°C 。每个温

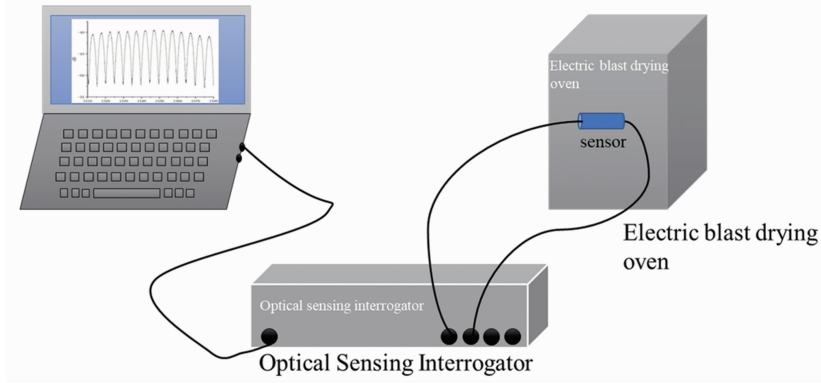


图 5 温度传感实验装置示意图

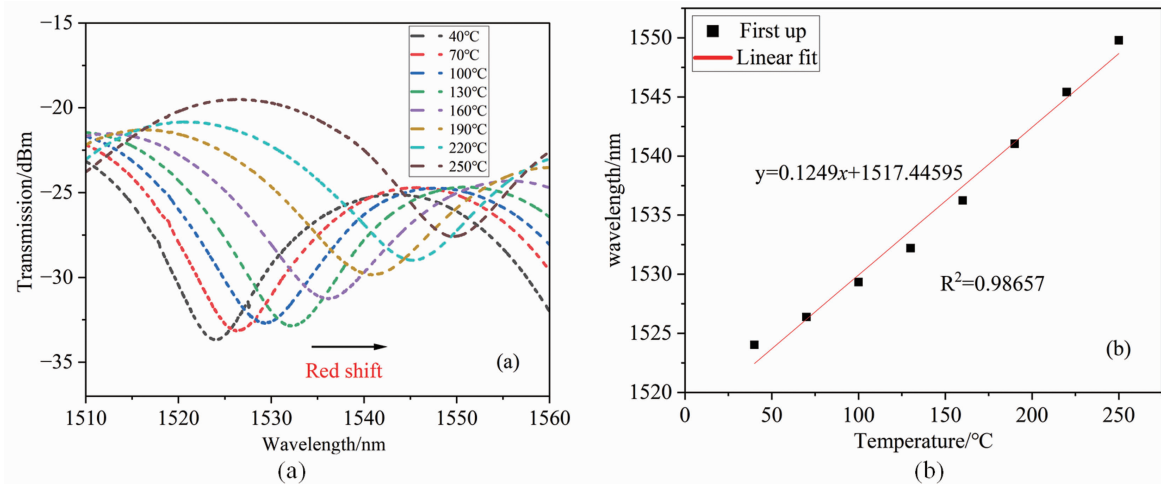


图 6 (a)传感器的温度光谱漂移图; (b)温度线性度

度点的停留时间为 10 min。确保干涉光谱稳定后,再记录光谱。实验记录了 1525 nm 附近的干涉谷波长的漂移情况。在 40~250°C 温度范围内, L 为 12 mm 的传感器的温度响应如图 6 (a)所示。随着温控箱内部温度的升高,干涉谷波长出现红移现象。对温度范围为 40~250°C 的测量结果进行了线性拟合。拟合结果如图 6 (b)所示,其温度响应灵敏度为 124.9 pm/°C,线性相关系数为 0.98657。

通过观察图 6 中传感器的温度响应现象,可以对 CCSMS 高温光纤传感器的温度响应特性进行以下分析:干涉谷波长 λ_m 由有效折射率差 Δn_{eff} 和干涉长度 L 决定;当传感器周围的温度发生变化时,热光效应会导致光纤的纤芯和包层的有效折射率改变,热膨胀效应会导致光纤的长度发生变化,从而引起干涉谷波长漂移。因此可以得到传感器的温度灵敏度的表

达式:

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \lambda_m \left[\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{1}{\Delta n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}^o}{\partial T} - \frac{\partial n_{eff}^d}{\partial T} \right) \right] \quad (5)$$

式中, $\frac{\partial n_{eff}^o}{\partial T}$ 、 $\frac{\partial n_{eff}^d}{\partial T}$ 代表光纤的热光效应, $\frac{\partial L}{\partial T}$

代表光纤的热膨胀效应。由式(5)可知,增大光纤的热光系数或热膨胀系数,可以提高高温光纤传感器的灵敏度。因此,本文采用热膨胀系数大的铜板对传感器进行封装,其原理如下:当温度升高时,铜板受热膨胀,会使光纤受到轴向应力,导致光纤传感器的干涉长度发生变化,干涉谷波长的漂移量增大,从而提高传感器的灵敏度。用 α_s 代表铜板的热膨胀系数,封装后光纤温度传感器的灵敏度可表示为

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \lambda_m \left[\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{1}{\Delta n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}^o}{\partial T} - \frac{\partial n_{eff}^d}{\partial T} \right) + (1 - \nu_s) \left(\alpha_s - \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right) \right] \quad (6)$$

表 1 不同结构的灵敏度对比

结构	温度灵敏度/ $\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	温度测量范围/ $^\circ\text{C}$	文献
单模-细芯-单模	65	25~80	[16]
三芯光纤+长周期光纤光栅	47	40~140	[17]
双球型单模-多模-单模	37.372	30~540	[18]
单模-少模-单模	48.2	室温~1000	[19]
微锥形 MZI	116	89~950	[20]
粗锥型单模-多模-单模	124.9	40~250	本文

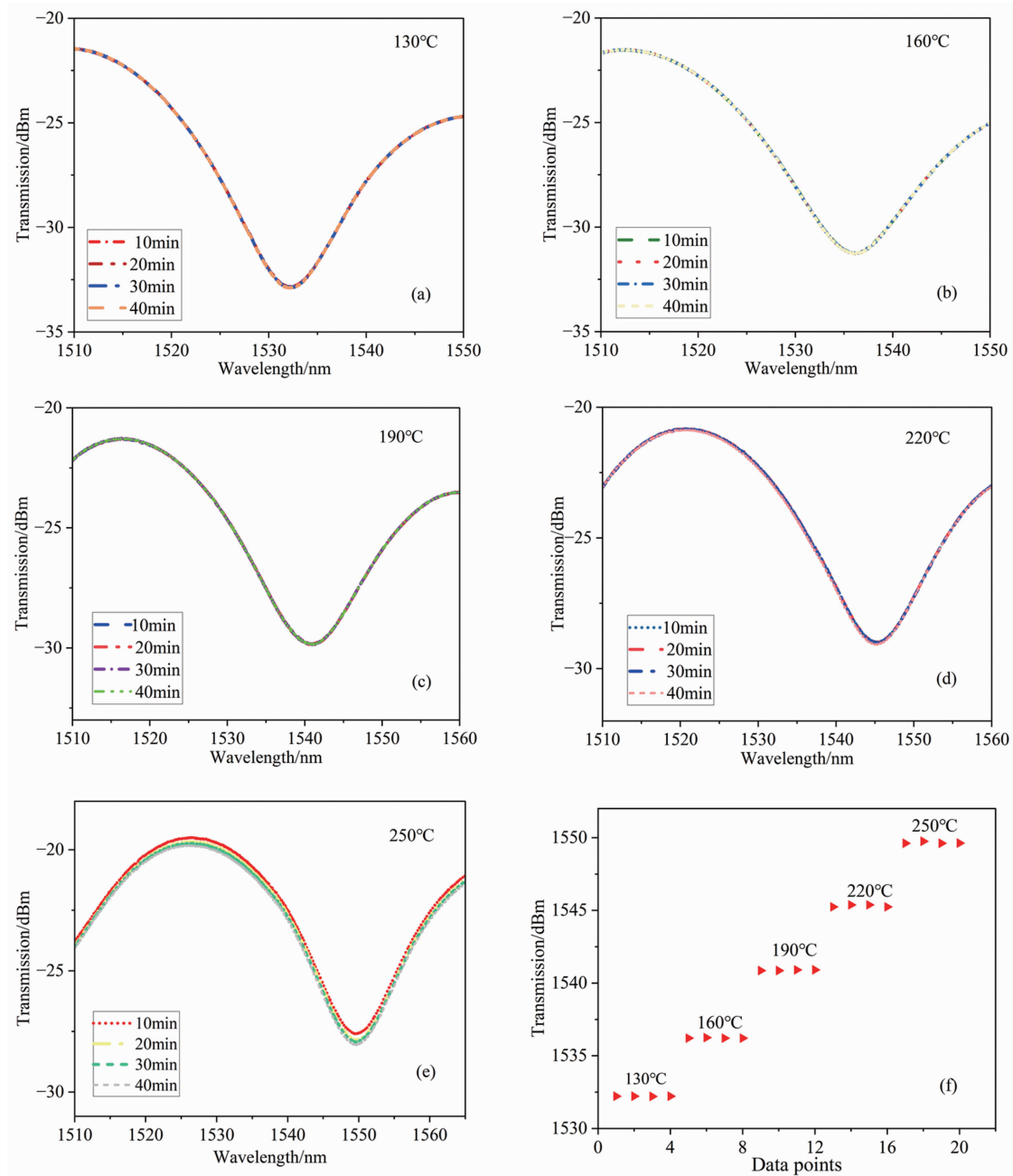


图 7 (a)传感器在 130 $^\circ\text{C}$ 下的透射光谱；(b)传感器在 160 $^\circ\text{C}$ 下的透射光谱；(c)传感器在 190 $^\circ\text{C}$ 下的透射光谱；(d)传感器在 220 $^\circ\text{C}$ 下的透射光谱；(e)传感器在 250 $^\circ\text{C}$ 下的透射光谱；(f)不同温度下 4 次测量得到的波谷偏差

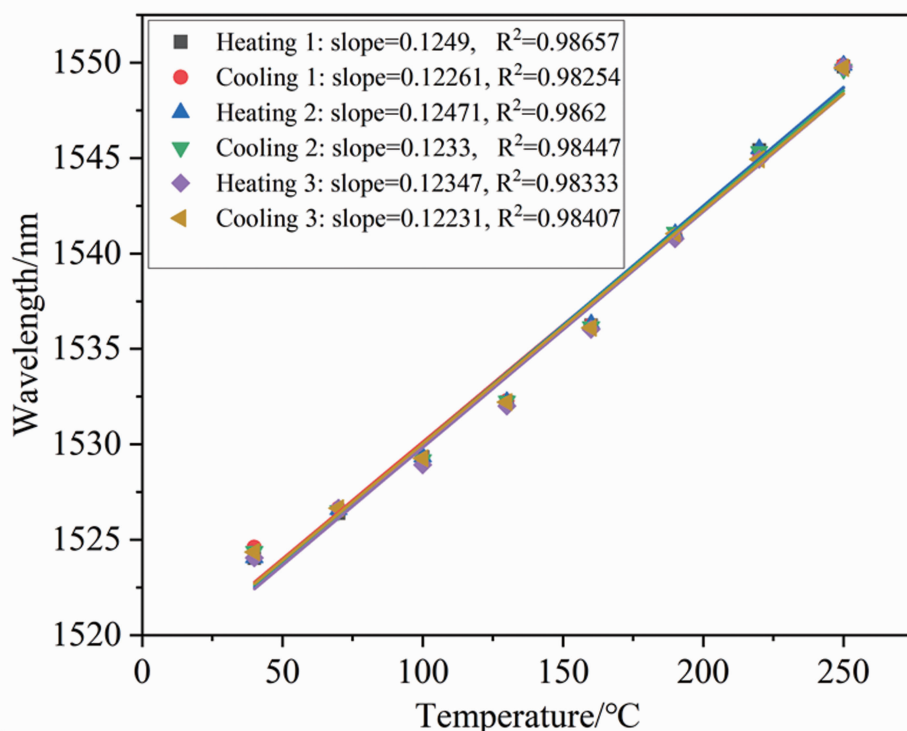


图 8 传感器的重复性测试结果

式中, p_e 为光纤的弹光系数(纯石英光纤的弹光系数约为 0.22)。由于铜板的热膨胀系数 $\alpha_s = 1.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 远大于光纤的热膨胀系数 $0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 因此式(6)可简化为

$$\frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \lambda_m \left[\frac{1}{\Delta n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}^{\omega}}{\partial T} - \frac{\partial n_{eff}^d}{\partial T} \right) + (1 - p_e) \alpha_s \right] \quad (7)$$

本文对比了已报道的全光纤温度传感器的灵敏度(见表 1)。通过比较发现, 本文采用铜板对 CCSMS 高温光纤传感器进行增敏封装, 实现了高温下的高灵敏度温度传感。

3 传感器稳定性和重复性测试

3.1 传感器稳定性测试

为了研究传感器的稳定性, 我们将以下 5 个温度点各保温 40 min, 每 10 min 记录一次干涉光谱, 共计 4 次(结果见图 7)。从图 7(a)~图 7(e)中可以看到, 在 130~250°C 的温度范围内, 每个温度点下, 4 组干涉光谱基本保持重合。但随着温度升高, 干涉光谱出现了微小的移动。为了更直观地观察波谷之间的偏移, 本文记录了不同温度下的 4 组干涉光谱的波谷位置, 并计算了波谷的位置偏移量(结果

见图 6(f))。在 130°C、160°C、190°C、220°C 和 250°C 下, 波谷位置的偏移量分别为 0.009 nm、0.036 nm、0.053 nm、0.105 nm 和 0.137 nm, 其中最大的波谷位置偏移量为 0.137 nm。通过计算可以得到 CCSMS 高温光纤传感器的稳定性误差最大约为 0.44%。造成误差较大的原因可能是电热鼓风机干燥箱体积较大, 温度分布不均匀。

3.2 传感器重复性测试

考虑到温度升高会对 CCSMS 结构产生影响, 我们对传感器进行了重复性测试。在测试重复性时, 以 30°C 为步长, 将温控箱内的温度从 40°C 逐渐升温至 250°C, 然后逐渐冷却至 40°C。重复上述步骤三次, 结果如图 8 所示。3 次测试得到的升温 and 降温的灵敏度分别为 124.9 pm/°C 和 122.61 pm/°C、124.71 pm/°C 和 123.3 pm/°C、123.47 pm/°C 和 122.31 pm/°C。在 3 组测试中, 重复性误差分别为 2.29 pm/°C、1.41 pm/°C 和 1.16 pm/°C, 其中最大误差为 2.29 pm/°C。实验结果表明, 该传感器的灵敏度重复性误差较小, 具有良好的重复性。

4 结束语

本文设计和制作了一种基于 CCSMS 结构的 MZI 型高温光纤传感器, 然后将它嵌入铜板的 U 型槽中进行增敏封装, 并对其温度响应进行了实验研究。结果表明, 在 40~250℃ 温度范围内, 该传感器的温度响应灵敏度为 124.9 pm/℃, 线性度为 0.98657。对传感器的稳定性和重复性进行了测试。结果表明, 该传感器的最大稳定性误差约为 0.44%, 最大重复性误差约为 2.29 pm/℃。与已有的高温光纤传感器相比, 本文设计的传感器不仅具有很高的温度灵敏度, 而且还有很好的稳定性和重复性。此外, 该传感器制备简单, 且具有很高的机械强度, 有望应用于油井下潜油电泵绕组温度的监测。然而, 在实际应用中, 往往需要同时测量多种参量, 如温度、振动、压力等。因此, 下一步的工作重点是对传感器结构进行优化, 并对改进后的传感器进行详细的理论分析和实验研究, 实现从单参量传感到多参量传感的转化。

参考文献

- [1] Zhu J J, Zhang H Q. A Review of Experiments and Modeling of Gas-liquid Flow in Electrical Submersible Pumps [J]. *Energies*, 2018, **11**(1): 180.
- [2] Liu Y, Peng W, Liang Y Z, et al. Fiber-optic Mach-Zehnder Interferometric Sensor for High-sensitivity High Temperature Measurement [J]. *Optics Communications*, 2013, **300**: 194-198.
- [3] 王浩, 曹珊珊, 苏俊豪, 等. 基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控 [J]. *物理学报*, 2022, **71**(10): 274-282.
- [4] Guo Q, Jia Z X, Pan X P, et al. Sapphire-derived Fiber Bragg Gratings for High Temperature Sensing [J]. *Crystals*, 2021, **11**(8): 946.
- [5] Lei X Q, Dong X P. High-sensitivity Fabry-Perot Interferometer High-temperature Fiber Sensor Based on Vernier Effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, **20**(10): 5292-5297.
- [6] 杨易, 徐贲, 刘亚铭, 等. 基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器 [J]. *物理学报*, 2017, **66**(9): 195-201.
- [7] Han Y, Liu B, Wu Y F, et al. Ultra-compact Silicon-microcap Based Improved Michelson Interferometer High-temperature Sensor [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(5): 6703-6713.
- [8] Cao H R, Shu X W. Miniature All-fiber High Temperature Sensor Based on Michelson Interferometer Formed with a Novel Core-mismatching Fiber Joint [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(11): 3341-3345.
- [9] Sigifredo M G, Iván H R, Daniel A M A, et al. In-line Mach-Zehnder Interferometers Based on a Capillary Hollow-core Fiber Using Vernier Effect for a Highly Sensitive Temperature Sensor [J]. *Sensors*, 2021, **21**(16): 5471.
- [10] Wu D, Zhu T, Chang 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] 卞继城, 郎婷婷, 董新永, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的保偏光纤温度传感器研究 [J]. *光子·激光*, 2016, **27**(7): 687-691.
- [12] Li H, Li H B, Meng F Y, et al. All-fiber MZI Sensor Based on Seven-core Fiber and Fiber Ball Symmetrical Structure [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, **112**: 1-6.
- [13] Zhang C B, Ning T G, Zheng J J, et al. Miniature Optical Fiber Temperature Sensor Based on FMF-SCF Structure [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, **41**(1): 217-221.
- [14] Bao W J, Hu N F, Qiao X G, et al. High-temperature Properties of a Thin-core Fiber MZI with an Induced Refractive Index Modification [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(20): 2245-2248.
- [15] 赵娜, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(6): 1722-1726.
- [16] Wang Q Z, Meng H Y, Fan X F, et al. Optical Fiber Temperature Sensor Based on a Mach-Ze-

- hnder Interferometer with Single-mode-thin-core-single-mode Fiber Structure [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, **91**(1): 015006.
- [17] Geng T, He J, Yang W L, et al. Modal Interferometer Using Three-core Fiber for Simultaneous Measurement Strain and Temperature [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(4): 1–8.
- [18] Tan J C, Feng G Y, Zhang S L, et al. Dual Spherical Single-mode-multimode-single-mode Optical Fiber Temperature Sensor Based on a Mach-Zehnder Interferometer [J]. *Laser Physics*, 2018, **28**(7): 075102.
- [19] Liu J, Luo C W, Yang H, et al. Mach-Zehnder Interferometer for High Temperature (1000°C) Sensing Based on a Few-mode Fiber [J]. *Photonic Sensors*, 2021, **11**: 341–349.
- [20] Liao Y C, Liu B, Liu J, et al. High Temperature (Up to 950°C) Sensor Based on Micro Taper inline Fiber Mach-Zehnder Interferometer [J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(12): 2394.