

基于无芯 - 多模 - 无芯光纤的温度和折射率传感特性研究

乔彦淞

天津工业大学物理与科学技术学院, 天津

收稿日期: 2025年4月24日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

提出了一种无芯 - 多模 - 无芯光纤结构的温度和折射率双参量测量传感器, 并对传感器进行理论分析和实验研究。此传感器将多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF)和无芯光纤(Coreless Fiber, CLF)同轴熔接, 构成无芯 - 多模 - 无芯的光纤结构, 在连接的结构两端熔接单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)作为输入和输出光纤。当光从单模光纤进入到无芯光纤时, 由于没有纤芯的限制, 光束发生衍射扩散, 形成较大的光场, 扩展后的光场进入多模光纤, 与多模光纤中的多个传播模式耦合, 这些模式在多模光纤中传播时, 由于光程差会相互干涉, 形成干涉光谱, 最终模式干涉后的光场在第二段无芯光纤中传播后进入输出单模光纤。当外界温度发生变化时, 干涉光谱的干涉波谷会发生偏移, 选取2个不同的干涉波谷作为特征波长, 进行实验分析。实验结果表明, 波长在1554.6 nm和1567.9 nm附近的干涉波谷均发生红移, 相应的温度灵敏度分别为75.9 pm/°C和71.7 pm/°C, 折射率灵敏度分别为-3.23 nm/RIU和-4.66 nm/RIU。该传感器结构简单, 易于制造和集成。

关键词

无芯光纤, 多模光纤, 温度传感

Research on Temperature and Refractive Index Sensing Characteristics Based on Coreless-Multimode-Coreless Optical Fibers

Yansong Qiao

College of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 28th, 2025

文章引用: 乔彦淞. 基于无芯-多模-无芯光纤的温度和折射率传感特性研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 560-569. DOI: 10.12677/jsta.2025.133055

Abstract

In this paper, a coreless-multimode-coreless fiber structure with dual parameters of temperature and refractive index measurement sensor was proposed, and the sensor was theoretically analyzed and experimentally studied. This sensor splices multi-mode fiber (MMF) and coreless fiber (CLF) coaxially to form a coreless-multimode-coreless fiber structure, and splices single-mode fiber (SMF) at both ends of the connected structure as input and output fibers. When the light enters the coreless fiber from the single-mode fiber, due to the limitation of the core, the beam undergoes diffraction diffusion to form a larger light field, and the expanded light field enters the multi-mode fiber and is coupled with multiple propagation modes in the multi-mode fiber, when these modes propagate in the multi-mode fiber, they will interfere with each other due to the difference in optical path to form an interference spectrum, and the light field after the final mode interference in the second section of the coreless fiber propagates and enters the output single-mode fiber. When the external temperature changes, the interference troughs of the interference spectrum will be shifted, and two different interference troughs will be selected as the characteristic wavelengths for experimental analysis. The experimental results show that the interference troughs around 1554.6 nm and 1567.9 nm are redshifted, and the corresponding temperature sensitivities are 75.9 pm/°C and 71.7 pm/°C, respectively, and the refractive index sensitivities are -3.23 nm/RIU and -4.66 nm/RIU, respectively. The sensor is simple in structure and easy to manufacture and integrate.

Keywords

Multi-Mode Fiber, Coreless Fiber, Temperature Sensing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光纤传感器具有体积小、制作方便、实时性、耐腐蚀性、电磁抗扰性和长距离传输等优点，广泛应用于折射率、温度、气体浓度、应力、液位等环境参量的测量[1]-[4]。光纤模式干涉仪[5] (Fiber Mode Interferometer) 是一种利用光纤的多模干涉原理来进行测量或传感的设备。这类干涉仪通常基于光纤中不同模式之间的相干干涉现象，可以用来测量诸如温度、压力、应变、位移等物理量。光纤模式干涉仪的基本原理是利用光纤中不同传播模式的相位差来产生干涉效应。一般来说，光纤中会有多个传播模式，光的传播不仅限于基本模式(LP01 模式)，还包括高阶模式(如 LP11 模式、LP21 模式等)。这些不同模式的光波在传播过程中会因为折射率分布的不同而发生相位差异，最终导致干涉。外界环境变化对纤芯模和包层模的影响不同，从而使两路光相位差发生改变，导致干涉条纹出现漂移。通过测量干涉条纹的漂移量，实现对外界环境参量变化的测量。光纤干涉仪可以应用在温度、应变、压力传感、生物医学[6]-[8]等传感领域，尤其是精密测量和高灵敏度传感方面。多模光纤传感器作为一种新型的传感器，具有低成本、高光功率承载、抗干扰能力强、灵敏度高等优点，近年来得到了研究人员的广泛关注。田野等使用多模光纤与 Sagnac 干涉仪相结合，制作了一种基于多模干涉的可测量振动频率的新型 Sagnac 干涉型振动传感器结构[9]。张涵等提出了一种基于单模-多模-单模(SMS)结构的干涉型高灵敏光纤曲率传感器[10]。刘婷等使用多模光纤制作了一种单模-多模-细芯-多模-单模结构用于折射率和温度的同时测量的马赫-曾德干涉结构的传感器[11]。

本文提出了一种结构简单、易于制作的马赫-曾德尔干涉仪[12] (Mach-Zehnder Interferometer, MZI), 传感器结构是在无涂覆的多模光纤两端熔接两段无芯光纤, 构成 CMC 型结构。选取 MZI 干涉谱中的 2 个特征光谱作为特征波长, 利用特征波长的偏移量测量液体的温度和折射率。

2. 传感器的制作及工作原理

本文设计的传感器结构示意图如图 1 所示, 从左到右依次为输入单模光纤、无芯光纤、多模光纤、无芯光纤、输出单模光纤。在此传感器中, 光从光源进入输入 SMF 后, 仅以基模传输。由于 SMF 的纤芯直径小, 高阶模被抑制, 光场能量高度集中在纤芯内, 形成稳定的高斯分布。当光从 SMF 进入无芯光纤(CLF)时, 由于 CLF 无纤芯结构, 光场迅速扩散至包层, 形成自由空间光束。当扩散光束进入 MMF 时, MMF 的纤芯较粗允许多个高阶模式被激发, 形成多模分束。每个模式以不同的传播常数和速度在 MMF 中传输, 外界物理量(如温度、应变、折射率)的变化会改变 MMF 的物理长度或有效折射率, 导致不同模式间的相位差。多模光从 MMF 进入第二段 CLF 后再次扩散, 并被耦合至输出 SMF。由于 SMF 仅支持基模传输, 高阶模式在此被滤除, 仅保留能与基模耦合的光场分量, 形成模间干涉。

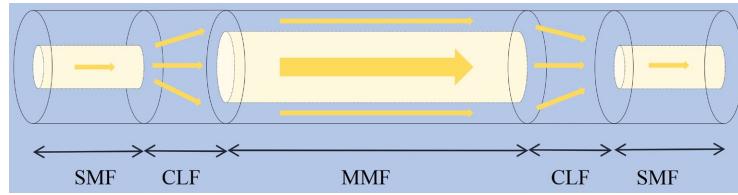


Figure 1. Diagram of the sensor structure
图 1. 传感器结构图

根据相关文献可知, MZI 的传输强度可表示为[13]:

$$I = I_{core} + I_{clad} + 2\sqrt{I_{core} \cdot I_{clad}} \cos \Delta\varphi \quad (1)$$

式中: I_{core} 和 I_{clad} 表示两种耦合模式的强度; $\Delta\varphi$ 是纤芯模式和每个特定模式之间相位差, 可表示为[14]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{core} - n_{clad}) L = \frac{2\pi\Delta n_{eff} L}{\lambda} \quad (2)$$

式中: λ 为特征波长, n_{core} 和 n_{clad} 分别是纤芯模和第 m 个包层模的有效折射率, Δn_{eff} 代表参与干涉的纤芯模和包层模之间的有效折射率差, L 是两个传感单元之间的长度。当 $\Delta\varphi$ 为 $(2m+1)\pi$ (m 为正整数) 时, 干涉光强最小, 形成干涉波谷。根据式(2)可得到波谷的波长为:

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

式中: λ_m ($m=1,2,3,\dots$) 为波谷的波长。

在环境温度变化时, 会引发光纤内部的热光效应与热膨胀效应, 进而导致传感单元长度 L 与有效折射率差 Δn_{eff} 的相应变动。当环境参数变化量为 ΔT 时, 对应的光纤传感单元长度变化和折射率变化为[15]:

$$L(T) \approx L(T_0) + \alpha_s L(T_0) \Delta T \quad (4)$$

$$\Delta n_{eff}(T) = \Delta n_{eff}(T_0) + \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Delta T \quad (5)$$

式(4)和(5)中: $\alpha_s = 5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 表示光纤的热膨胀系数, 初始环境温度为 T_0 ; 变化后的环境温度用 T 表示; 当外界环境温度为 T_0 和 T 时, $L(T)$ 和 $L(T_0)$ 分别表示光纤的长度, $\Delta n_{eff}(T_0)$ 和 $\Delta n_{eff}(T)$ 反映温度变

化对光纤几何尺寸的影响。

根据文献可知, MZI 折射率灵敏度可表示为[15] [16]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\delta(\Delta n_{eff})} = \frac{\lambda}{\Delta n_{eff}} \quad (6)$$

波长变化量可表示为:

$$\Delta\lambda = -\frac{\delta n_{eff}^{cl,m} L}{2k+1} \quad (7)$$

当环境的折射率低于光纤包层时, 若环境折射率提升, 则光纤包层对光模场的束缚作用会削弱, 从而光纤包层对传播光波的控制效能也会随之减退。在实际实验中表现为谐振波长的具体数值倾向更短波长端移动转变。基于此, 当介质的折射率提升, 入射光线在包层中行进的速度会相应降低, 这一机制是其运作的核心。这一变化进而调整了光波在介质中传播的谐振条件, 即光谱向蓝端偏移的现象。包层模态与纤芯模态之间的耦合效率呈现出随环境折射率变动而动态调整的趋势。随着包层对光线引导能力的下降, 包层模式与纤芯模式间的相互作用减弱, 由此降低了能量传输的效率。

3. 实验结果及分析

3.1. 传感器温度特性研究

实验系统原理图如图 2 所示, 所设计的传感器分别连接宽带光源(ASE)和光谱分析仪(OSA)。ASE 光源波长范围为 1525~1610 nm, 光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)由日本横河公司研发制造, 其波长测量区间为 600~1700 nm。完成 ASE (光源)与 OSA (光谱分析仪)的连接之后, 记录了传感器在室温环境下的透射光谱图, 透射谱图如图 2 所示。

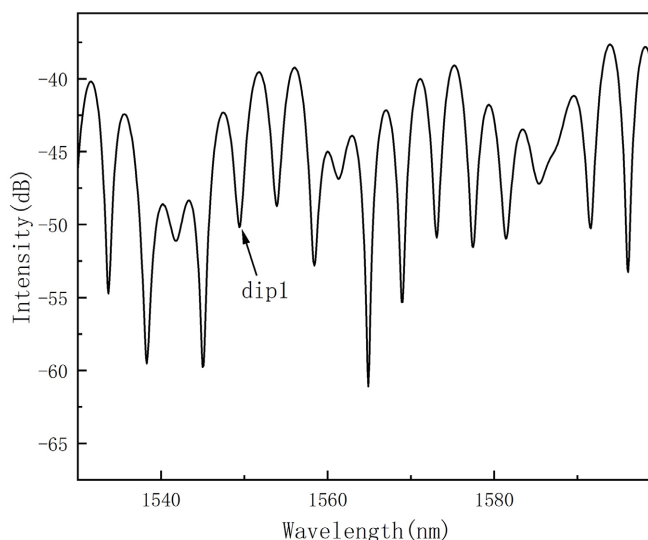


Figure 2. Transmission spectrum of CMC type sensor
图 2. CMC 型传感器透射光谱图

实验选取传感器透射光谱图中的 dip1 波谷作为研究对象, 该位置对变化较为敏感, 并且在波形位移后, 波谷的位置易于识别。dip1 指的是 1550 nm 左侧的首个波谷, 对应波长为 1549.8 nm。在实验过程中, 将制备好的 MZI 传感器结构置于水浴锅内, 并确保其与载玻片平铺且完全浸入水中。经由调整水浴

锅温度控制面板, 将温度自 30℃ 稳步提升至 80℃。在实验过程中, 每隔 10℃ 记录一组数据, 待温度调整完毕后静置 5 分钟, 以确保光谱分析仪的透射光谱达到平稳状态, 随后进行下一轮数据采集。数据处理后的结果如图 3 所示。根据图表所示, 当温度从 30℃ 提升至 80℃, dip1 位置的光谱呈现出向长波段偏移的趋势, 波长由 1549.8 nm 移动到 1553.7 nm, 总偏移量为 3.9 nm。

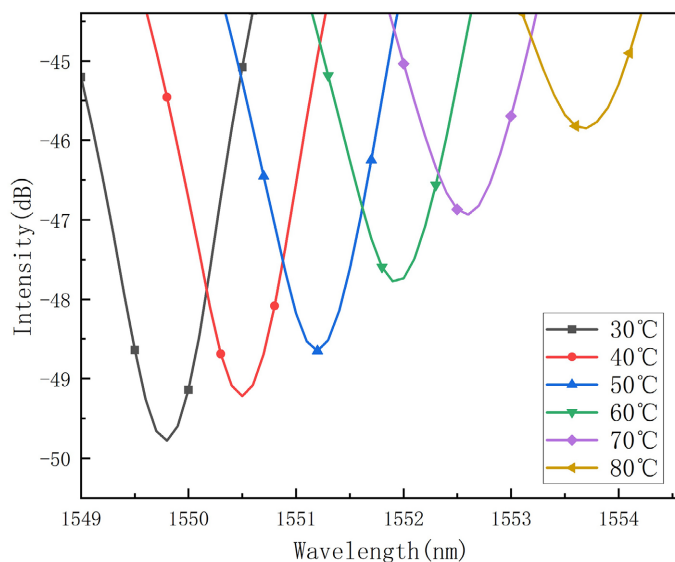


Figure 3. Transmission spectra at different temperatures at dip1

图 3. dip1 处不同温度透射光谱图

通过应用 Origin 软件执行线性拟合, 探究了特定 dip1 位置下波长与温度的相关性, 拟合结果如图 4 所示。图表以散点形式展现了在各种温度下 dip1 所对应的波长分布特征。图表以散点形式展示了在不同温度条件下 dip1 波长分布特性。依据图表所示, 在 30℃ 至 80℃ 的范围内, 传感器的温度灵敏度为 75.71 pm/℃, 波长偏移量与温度变化之间存在良好的线性相关性, 且线性拟合度 R^2 为 0.99058。

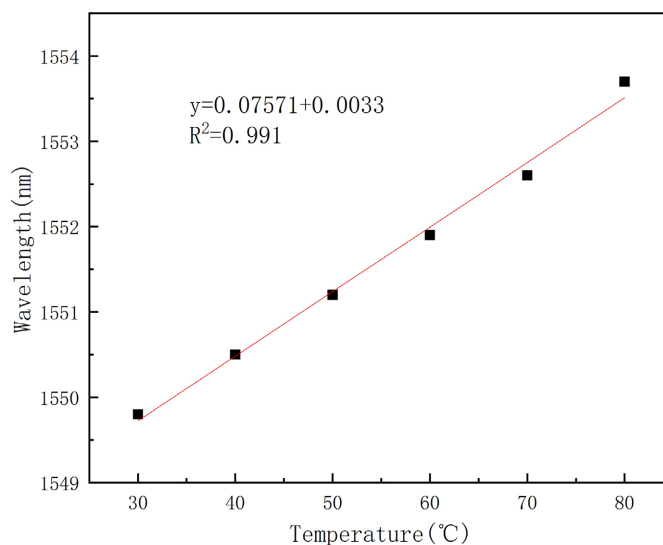


Figure 4. Temperature fit plot at dip1

图 4. dip1 处温度拟合图

3.2. 传感器折射率特性研究

此实验选取 NaCl 溶液作为模拟介质,旨在通过改变浓度以模拟折射率的变动。在实验阶段,我们首先在玻璃容器内添加预先设定浓度的 NaCl 溶液,以确保传感器处于稳定状态并全面浸泡于溶液之中。随后,通过调整不同浓度的溶液并依次执行连续的折射率测量。数据处理后的结果如图 5 所示,从图中可以观察到,当 NaCl 溶液浓度从 0% 提升至 25% 时, dip1 位置的光谱呈现出向短波段偏移的趋势,波长由 1548.62 nm 移动到 1548.488 nm,总偏移量为 -0.132 nm。

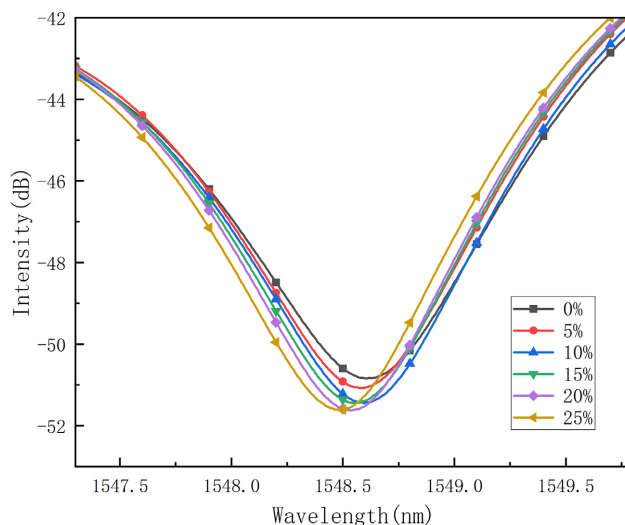


Figure 5. Transmission spectra of different concentrations of NaCl solution at dip1

图 5. dip1 处不同浓度 NaCl 溶液透射光谱

通过应用 Origin 软件执行线性拟合,探究了特定 dip1 位置下波长与折射率的相关性,拟合结果如图 6 所示。图 6 以散点形式在各种折射率条件下的 dip1 与对应波长分布特性。依图表所示,在折射率介于 1.33 至 1.37 区间内,传感器的折射率灵敏度达到 -3.23 nm/RIU,并且波长偏移量与折射率变化之间存在良好的线性相关性,线性拟合度 R^2 为 0.99749。

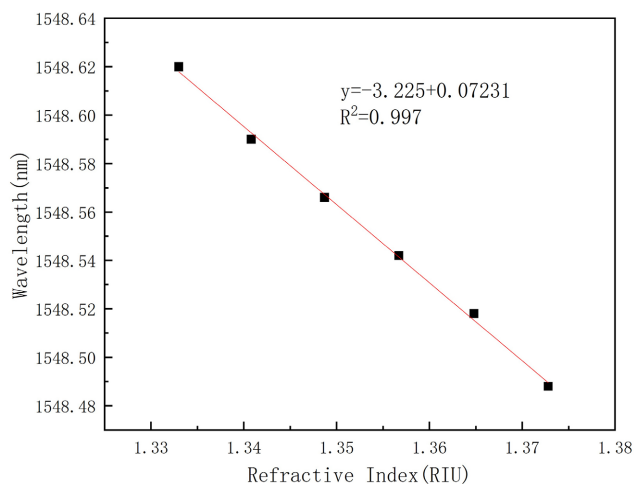


Figure 6. Refractive index fitting plot at dip1

图 6. dip1 处折射率拟合图

3.3. 双参量传感特性研究

再选取 dip2 作为研究对象, 测量传感器的灵敏度, dip2 为 dip1 右数第七个波谷, 如图 7 所示, 该波谷更深更宽, 移动时更容易识别, 这有助于提高实验的准确性。

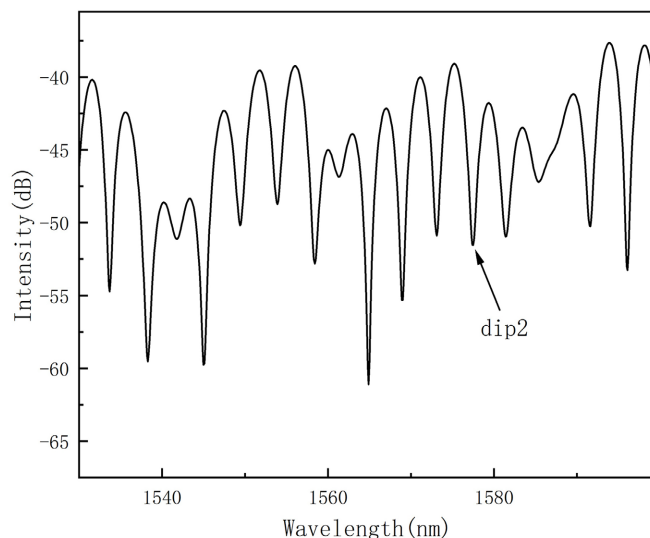


Figure 7. dip2 to select the location

图 7. dip2 选择位置

dip2 的波长为 1577.9 nm, 测量 dip2 的温度灵敏度方法与计算 dip1 温度灵敏度的方法一致, 将制备完成的 MZI 传感器结构置于水浴锅内, 确保其与载玻片紧密贴合且完全浸没于水中。通过调整水浴锅的温控面板, 将温度自 30℃ 提升至 80℃。数据处理后的结果如图 8 所示。依图表所示, 当温度从 30℃ 提升至 80℃, dip2 位置的光谱呈现出向长波段偏移的趋势。波长由 1577.9 nm 移动到 1581.5 nm, 总偏移量为 3.6 nm。

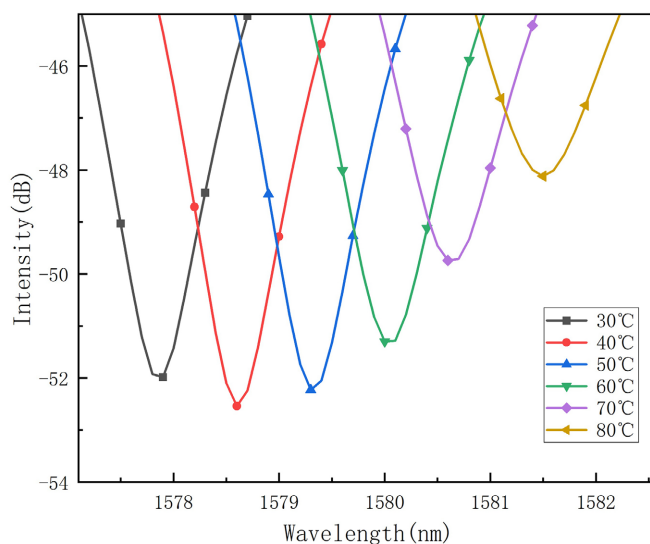


Figure 8. dip2 temperature transmission spectra

图 8. dip2 温度透射光谱图

通过应用 Origin 软件执行线性拟合, 探究了特定 dip2 位置下波长与温度的相关性, 拟合结果如图 9 所示。图表以散点形式展现了在各种温度下 dip2 所对应的波长分布特征。图表展示了不同温度条件下 dip2 对应波长分布的特性。依图表所示, 在 30℃至 80℃的区间内, 传感器的温度敏感为 71.7 pm/℃, 波长偏移量与温度变化之间存在良好的线性相关性, 且线性拟合度 R^2 为 0.99886。

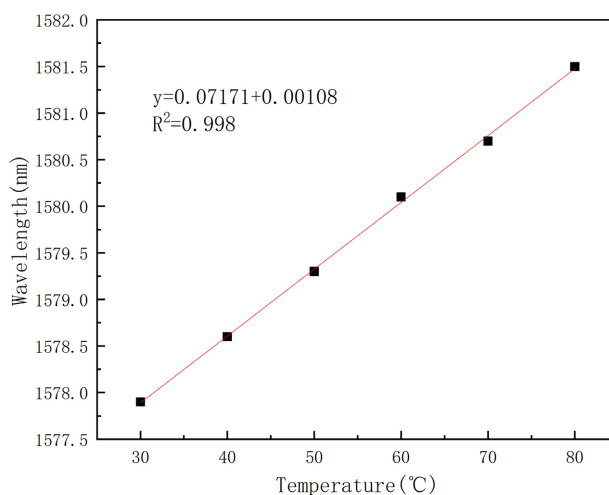


Figure 9. dip2 temperature fitting plot

图 9. dip2 温度拟合图

dip2 折射率灵敏度的测量方法同样与 dip1 一致, 将传感器浸入水中, 待光谱波形稳定后记录数据。然后将传感器浸入在 5%浓度的 NaCl 溶液中, 于光谱波形稳定后, 记录数据。将传感器移出, 置入纯水之中, 轻柔摇晃并让其浸渍大约一分钟, 以去除表面残留。待传感器完全干燥后, 进行下一组实验。按照相同操作步骤, 依次测量 0%至 25%浓度 NaCl 溶液的光谱数据。数据处理后的结果如图 10 所示。依图表所示, 当 NaCl 溶液浓度从 0%提升至 25%时, dip2 位置的光谱向短波段方向移动。波长由 1576.51 nm 移动到 1576.325 nm, 总偏移量为-0.185 nm。

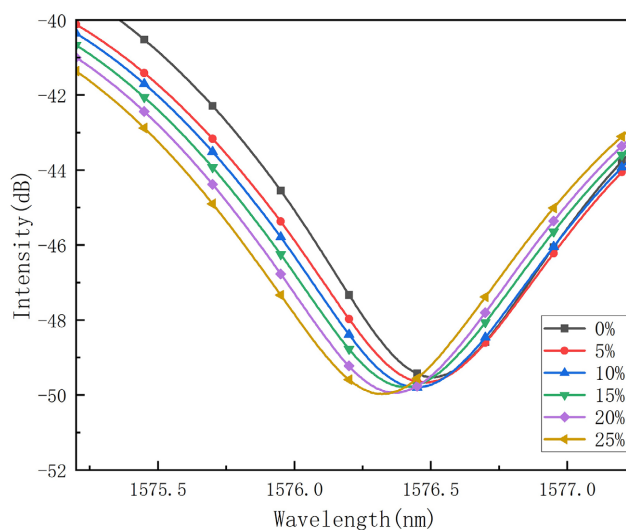


Figure 10. Transmission spectra of dip2 with different concentrations of NaCl

图 10. dip2 不同浓度 NaCl 透射光谱图

通过应用 Origin 软件执行线性拟合, 探究了特定 dip2 位置下波长与折射率的相关性, 拟合结果如图 11 所示。图表以散点形式展示了不同折射率条件下 dip2 对应的波长分布特性。依图表所示, 在 1.33 至 1.37 的折射率区间内, dip1 的折射率灵敏度达到 -4.66 nm/RIU , 且线性拟合度 R^2 为 0.99789。数据表明, 波长偏移量与折射率之间存在良好的线性相关性。

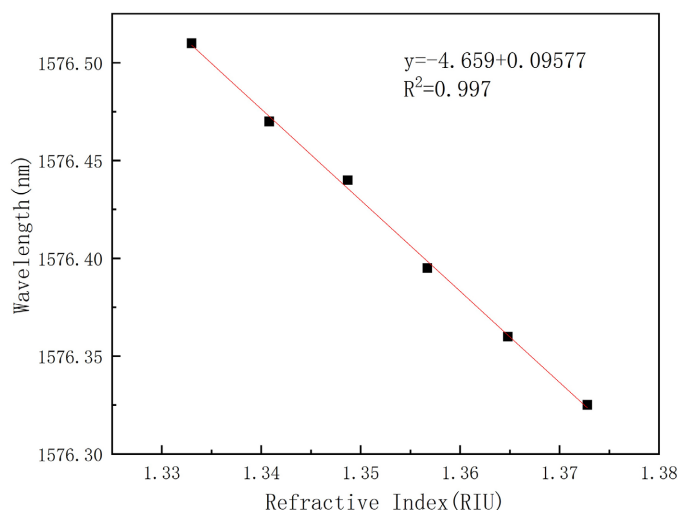


Figure 11. dip2 refractive index fitting plot

图 11. dip2 折射率拟合图

4. 结论

本文提出并制作了一种测量温度的 MZI 传感器, 其结构为单模光纤 - 无芯光纤 - 多模光纤 - 无芯光纤 - 单模光纤。通过实验验证此方法的可行性, 实验结果表明, 传感器的特征波长与温度呈良好的线性关系, 在测量温度范围内, 传感器温度灵敏度分别为 $75.71 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ 和 $71.7 \text{ pm/}^\circ\text{C}$, 折射率灵敏度分别为 -3.23 pm/RIU 和 -4.66 pm/RIU 。因此, 本文所设计的传感器制作简单, 灵敏度较高。受恒温实验装置所限, 未进行较大温度范围的实验测量, 但传感器有望应用于更高的测量场景。

参考文献

- [1] 韩军, 高波, 张芳, 高教波. 变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 494-498.
- [2] Prerana, P., Varshney, R.K., Pal, B.P. and Nagaraju, B. (2010) High Sensitive Fiber Optic Temperature Sensor Based on a Side-Polished Single-Mode Fiber Coupled to a Tapered Multimode Overlay Waveguide. *Journal of the Optical Society of Korea*, **14**, 337-341. <https://doi.org/10.3807/josk.2010.14.4.337>
- [3] Cho, J.Y., Lim, J.H. and Lee, K.S. (2005) Optical Fiber Twist Sensor with Two Orthogonally Oriented Mechanically Induced Long-Period Grating Sections. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 453-455. <https://doi.org/10.1109/lpt.2004.840073>
- [4] Kim, D.W., Shen, F., Chen, X. and Wang, A. (2005) Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on a Reflection-Mode Long-Period Grating and an Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Sensor. *Optics Letters*, **30**, 3000-3002. <https://doi.org/10.1364/ol.30.003000>
- [5] Lee, B.H., Kim, Y.H., Park, K.S., Eom, J.B., Kim, M.J., Rho, B.S., et al. (2012) Interferometric Fiber Optic Sensors. *Sensors*, **12**, 2467-2486. <https://doi.org/10.3390/s120302467>
- [6] Yurtsever, G., Považay, B., Alex, A., Zabihiyan, B., Drexler, W. and Baets, R. (2014) Photonic Integrated Mach-Zehnder Interferometer with an On-Chip Reference Arm for Optical Coherence Tomography. *Biomedical Optics Express*, **5**, 1050-1061. <https://doi.org/10.1364/boe.5.001050>
- [7] Singh, L., Singh, R., Kumar, S., Zhang, B. and Kaushik, B.K. (2020) Development of Collagen-Iv Sensor Using Optical

- Fiber-Based Mach-Zehnder Interferometer Structure. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **56**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/jqe.2020.3003022>
- [8] Wang, R., Zhao, J., Sun, Y., Yu, H., Zhou, N., Zhang, H., *et al.* (2020) Wearable Respiration Monitoring Using an In-Line Few-Mode Fiber Mach-Zehnder Interferometric Sensor. *Biomedical Optics Express*, **11**, 316-329. <https://doi.org/10.1364/boe.376782>
- [9] 田野, 黎键, 杨光, 赵敏, 陈海艳, 王晓航. 多模与 Sagnac 复合干涉型振动传感器[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(10): 75-80.
- [10] 毛莉莉, 张涵, 雷婉婷, 戴俊宇, 潘诗宇, 刘理. 基于多模光纤温度不敏感的曲率传感器[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(8): 88-91.
- [11] 刘婷, 张静, 李永倩, 武佳琪, 张雨微, 赵旭. 一种基于马赫-曾德尔干涉仪的折射率和温度同时测量传感器[J]. 光电子激光, 2023, 34(8): 785-791.
- [12] Ji, Y., Chung, Y., Sprinzak, D., Heiblum, M., Mahalu, D. and Shtrikman, H. (2003) An electronic Mach-Zehnder Interferometer. *Nature*, **422**, 415-418. <https://doi.org/10.1038/nature01503>
- [13] Yu, X., Bu, D., Chen, X., Zhang, J. and Liu, S. (2016) Lateral Stress Sensor Based on an In-Fiber Mach-Zehnder Interferometer and Fourier Analysis. *IEEE Photonics Journal*, **8**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/jphot.2016.2538958>
- [14] 王钧, 杨树. 一种基于双模干涉的光纤折射率传感器[J]. 半导体光电, 2020, 41(4): 476-479.
- [15] Coviello, G., Finazzi, V., Villatoro, J. and Pruneri, V. (2009) Thermally Stabilized PCF-Based Sensor for Temperature Measurements up to 1000°C. *Optics Express*, **17**, 21551-21559. <https://doi.org/10.1364/oe.17.021551>
- [16] 张珊珊. 新型光纤 MZI 干涉传感结构及特性研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2014.