

基于锥形光纤的马赫 - 曾德尔干涉传感器用于温度和折射率同时测量

王一帆

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2024年4月19日; 录用日期: 2024年5月15日; 发布日期: 2024年5月22日

摘要

本文提出了一种基于锥形光纤的MZI + LPFG传感器用于同时测量温度和折射率。该结构是将一段锥形光纤两端各熔接一段无芯光纤(no-core fiber, NCF), 构成马赫 - 曾德尔(Mach-Zehnder interference, MZI)结构来测量外界温度和折射率, 其中两端的无芯光纤来充当分束器和耦合器, 再利用长周期光纤光栅(Long period fiber grating, LPFG)进行温度补偿。通过MZI和LPFG的测量结果来建立灵敏度矩阵, 用以同时测量温度和折射率的变化。整体结构为“单模光纤 - 无芯光纤 - 锥形光纤 - 无芯光纤 - 单模光纤 - 长周期光纤光栅 - 单模光纤”。其中MZI结构的温度灵敏度为 $51.4 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, 折射率灵敏度为 $-140.7 \text{ nm}/\text{RIU}$; 长周期光纤光栅的温度灵敏度为 $254 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

关键词

马赫 - 曾德尔, 温度, 折射率, 锥形光纤, 长周期光纤光栅

Mach-Zehnder Interferometer Sensor Based on Tapered Fiber for Simultaneous Measurement of Temperature and Refractive Index

Yifan Wang

College of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Apr. 19th, 2024; accepted: May 15th, 2024; published: May 22nd, 2024

Abstract

This article proposes an MZI + LPFG sensor based on tapered fibers for simultaneous measure-

ment of temperature and refractive index. The structure consists of a tapered optical fiber fused with a segment of no-core fiber (NCF) at each end, forming a Mach-Zehnder interference (MZI) structure for measuring external temperature and refractive index. The no-core fibers at both ends serve as beam splitters and couplers, and temperature compensation is achieved using long-period fiber gratings (LPFG). A sensitivity matrix is established based on the measurement results of MZI and LPFG to simultaneously measure changes in temperature and refractive index. The overall structure is “single-mode fiber - no-core fiber - tapered fiber - no-core fiber - single-mode fiber - long-period fiber grating fiber - single-mode fiber”. The temperature sensitivity of the MZI structure is $51.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, and the refractive index sensitivity is $-140.7 \text{ nm}/\text{RIU}$; the temperature sensitivity of the long-period fiber grating fiber is $254 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

Keywords

Mach-Zehnder, Temperature, Refractive Index, Tapered Fiber, Long Period Fiber Grating

Copyright © 2024 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

在石油、化工以及电池生成领域中，使用最广泛的测温仪器是热电偶温度计，但其本身的带电属性可能会在燃料泄露、电池破损等情况下造成引燃引爆等危险。而光纤传感器具有良好的抗腐蚀性、抗拉伸性、高介电性和耐高温性等特性，应用于电池内部、石油化工环境中具有明显的稳定性和良好的温度及应变的探测能力。但由于光纤的光学特性往往受到多个物理量共同影响，所以在解调时无法判断具体是哪个物理量引起的变化，这就是光纤的交叉敏感问题。锥形光纤光栅出现后，研究人员研究锥形光纤光栅光学性质时，发现锥形光纤光栅具有对应力敏感而对温度不敏感的特性，能够较好解决交叉敏感问题，实现双参量测量、甚至多参量研究[1] [2] [3]。

迄今为止，已经开发了各种基于光纤的干涉仪，用于感测各种参数。在这些方法中，马赫-曾德尔干涉仪(MZI)常用于折射率和温度的感测。相较于其他干涉仪，MZI 传感器由于其简单的构造而具有许多优势。研究还探讨了在 MZI 模式下使用锥形或普通光纤进行折射率和温度的同时测量[4]。例如，Jasim [5] 等人使用了锥形塑料光纤进行 MZI 感测，而 Yao [6] 等人则利用 MZI 光纤布拉格光栅。Lu [7] 等人还研究了类似的系统用于折射率测量[8] [9] [10]。尽管这些研究已经证明了在类似范围内的灵敏度，但诸如其他因素例如温度也可能会影响数据，从而影响传感性能。所以本文设计制作了一种基于“单模-无芯-锥形-无芯-单模”结构的 MZI，再结合长周期光纤光栅实现对温度和折射率同时测量。

2. 传感器结构与原理

2.1. 传感器的结构与工作原理

本次设计的传感器采用“单模-无芯-锥形-无芯-单模”等光纤拼接构成马赫-曾德尔干涉结构，再熔接长周期光纤光栅进行温度补偿。具体结构如图 1 所示，其中无芯光纤，是由武汉长飞公司制造，具有 $125 \mu\text{m}$ 的包层直径和 1.444 的包层折射率；另一种是普通单模光纤，其纤芯直径为 $9 \mu\text{m}$ ，包层直径同样为 $125 \mu\text{m}$ ，纤芯和包层的折射率分别为 1.45 和 1.44。此外，还采用了长周期光纤光栅，其栅区长度为 3 cm。

实验步骤是先在锥形光纤两端各熔接一段 NCF，用来充当分束器和耦合器，从而构成“NCF-锥形光纤-NCF”的 MZI 干涉结构，其投射光谱如图 2 所示。

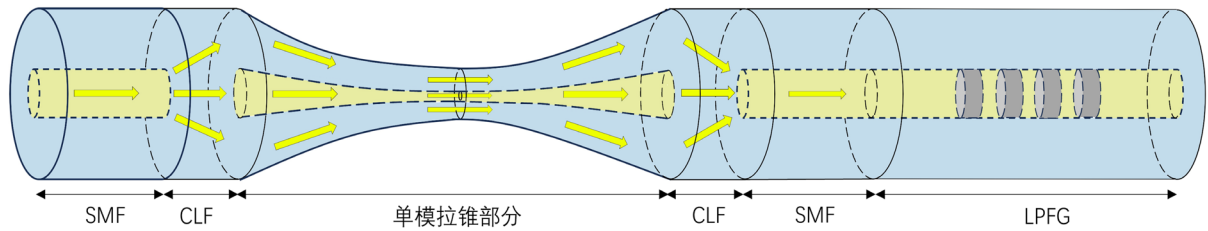


Figure 1. Schematic diagram of MZI structure composed of tapered optical fibers

图 1. 锥形光纤构成的 MZI 结构示意图

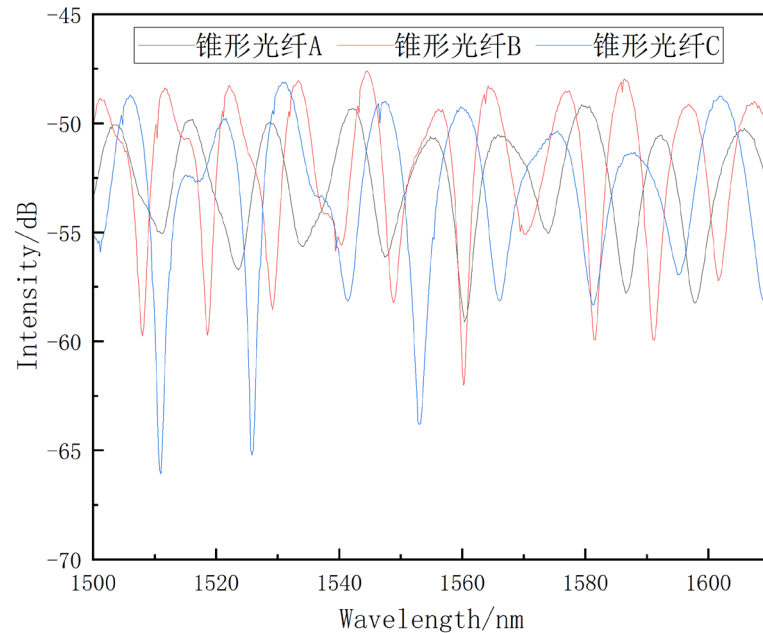


Figure 2. Transmission spectra of MZI with different tapers

图 2. 不同锥度的 MZI 的透射光谱图

光束从宽带光源发出后, 经过第一个 NCF 时, 光同时穿过纤芯和包层, 导致高阶模式和基模的存在。当这些模式经过锥形区域后, 它们在第二个 NCF 处重新结合, 然后耦合回单模光纤。在这个过程中, 基模和高阶模之间的相互作用会导致干涉现象, 从而在检测端产生可观测的干涉条纹。再在输出端熔接 LPFG 进行温度补偿。为避免因为光纤弯曲、挤压对传感器测量折射率和温度带来影响, 对 MZI 进行拉直固定操作, 将光纤置于载玻片上轻微受力拉直, 在两端使用 UV 紫外胶固定; LPFG 使用热缩管进行封装, 使其几乎不受外界环境折射率变化的影响, 只对温度变化敏感。

2.2. 传感器传感原理

本次设计的传感器的透射光谱图主要是包层模和纤芯模在一定条件下发生干涉形成的, 其传感器的透射强度可以表示为[11]:

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

式中: $I_1(\lambda)$, $I_2(\lambda)$ 分别为基模和高阶模的强度; $\Delta\varphi$ 为基模与高阶模的相位差, 可以表示为[12]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda} = \frac{2\pi(n_{eff}^1 - n_{eff}^2)L}{\lambda} \quad (2)$$

式中： λ 为中心波长； n_{eff}^1 与 n_{eff}^2 分别为基模和高阶模的有效折射率； $\Delta n_{eff} = n_{eff}^1 - n_{eff}^2$ 为基模与高阶模之间的有效折射率之差； L 是传感单元的长度。当 $\Delta\varphi$ 为 $(2m+1)\pi$ (m 为正整数) 时，干涉光强达到最小值，出现干涉波谷。根据式(2)可以得到波谷的波长为：

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

当外界环境温度变化时，受到热光效应和热膨胀效应的影响，传感长度 L 和有效折射率差 Δn_{eff} 也将变化。若外界环境变化量为 ΔT ，则光纤长度和模式折射率的变化可以表示为[13]

$$L(T) \approx L(T_0) + \alpha_s L(T_0) \Delta T \tag{4}$$

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

式中： $\alpha_s = 5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 是光纤的热膨胀系数， T_0 为环境初始温度； T 为变化后的环境温度； $L(T)$ 和 $L(T_0)$ 分别是外界环境温度为 T_0 和 T 时光纤的长度， $\Delta n_{eff}(T_0)$ 和 $\Delta n_{eff}(T)$ 分别是外界温度为 T_0 和 T 时纤芯模和包层模的有效折射率差。根据式(4)和式(5)可知，当外界环境温度升高时， L 和 Δn_{eff} 都会增大，由式(3)可得，干涉波谷将向长波长方向偏移，特征波长的温度灵敏度 K_T 可以表示为[14]：

$$K_T = \frac{\partial \lambda_m}{\partial T} = \frac{2L(T_0)}{2m+1} \left[\Delta n_{eff}(T_0) \alpha_s + \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Delta T (1 + 2\alpha_s \Delta T) \right] \tag{6}$$

式中： λ_m ($m=1,2,3,\dots$) 为波谷的波长。

当外界环境折射率增大时，包层模的有效折射率变大，而纤芯模几乎不变，所以二者的有效折射率差 Δn_{eff} 减小，由式(3)可知，干涉波谷将向短波长方向偏移。

当光纤外界环境的折射率发生变化时，特征波长的折射率灵敏度 S_{RI} 可以表示为[15]：

$$K_{RI} = \frac{\partial \lambda_{Dip}}{\partial n_{ext}} = \frac{-2L \frac{\partial n_m}{\partial n_{ext}}}{1 - \frac{2L}{2m+1} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda}} \tag{7}$$

式中： n_{ext} 表示外界环境的折射率， n_m 表示第 m 阶包层模的有效折射率。

3. 实验结果及分析

3.1. 温度传感实验

实验装置如图 3 所示，MZI 两端的 NCF 处各连接一段 SMF 作为光束的输入端和输出端，其中输入端的 SMF 连接宽带光源(ASE-CL，深圳郎光科技有限公司生产，波长范围在 1525~1610 nm)，输出部分的 SMF 与 LPFG 熔接在一起，LPFG 另一端连接到光谱分析仪(OSA，波长范围在 600~1700 nm，波长测量精度为 0.02 nm)，将传感器传感部分整体放入到装有特殊油性材料(可将温度上升至 300°C)的集热式恒温加热器中，通过观察不同温度下光谱分析仪的波形变化来测量温度，实物图如图 4 所示。

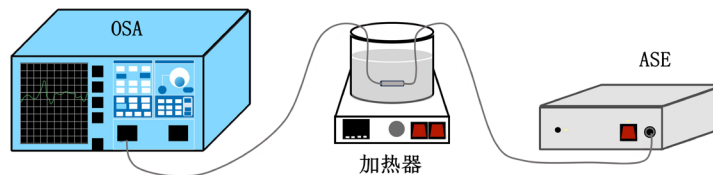


Figure 3. Experimental setup diagram
图 3. 实验装置图

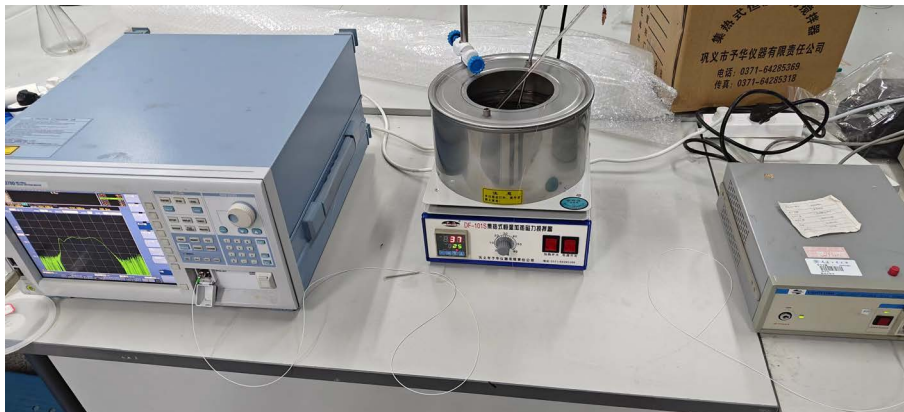


Figure 4. Physical image

图 4. 实物图

在温度变化的情况下，光纤的热光效应和热膨胀特性会导致有效长度和有效折射率等参数的变化。这些参数的变动会影响 MZI 的干涉条件，进而引起干涉光谱波形的位移。这种波形偏移可用于精确地监测环境温度的变化。其透射光谱如图 5 所示。

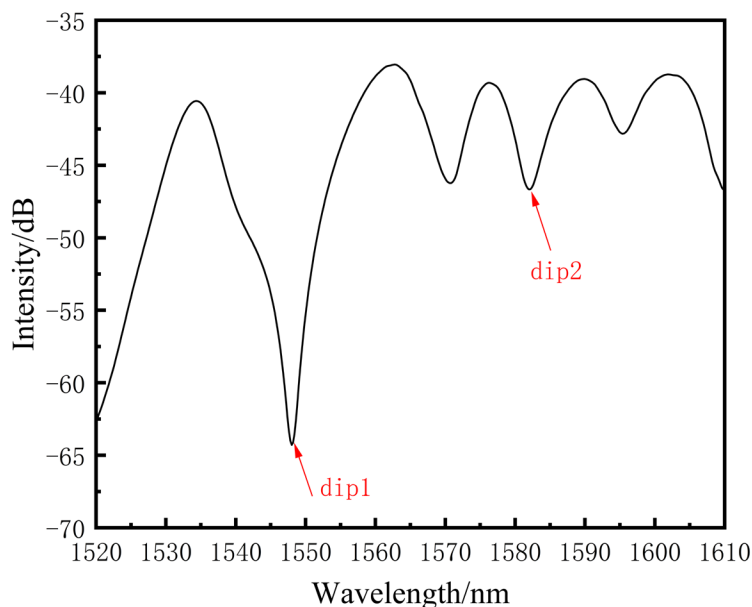


Figure 5. Transmission spectrum of the sensor

图 5. 传感器透射光谱图

实验收集了传感器在 20℃~160℃ 范围内的透射光谱图，其中 LPFG 的中心波长为 1548 nm，LPFG 中心波长处不同温度的透射光谱图和中心波长与温度进行线性拟合曲线如图 6 所示，MZI 中选取灵敏度较大的干涉波谷为 1582 nm，MZI 特征波长处不同温度的透射光谱图如图 7 所示，由图 6 和图 7 可知，特征波长漂移量和温度变化有着很好的线性关系，其 LPFG 的温度灵敏度为 254 pm/℃，相关系数 R^2 为 0.9924；MZI 的温度灵敏度为 51.4 pm/℃，相关系数 R^2 为 0.9911。

3.2. 折射率传感实验

由于我们测温实验中采用了油性材料充当加热溶液，所以为保证折射率测量的准确性，我们先将传

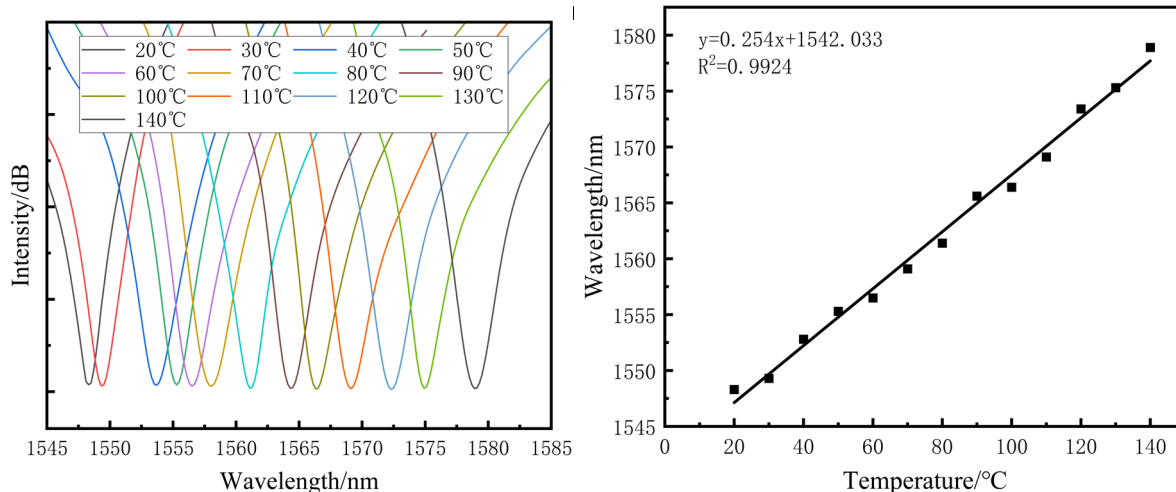


Figure 6. Transmission spectra and fitting curves at different temperatures at the center wavelength of LPFG
图 6. LPFG 中心波长处不同温度透射光谱图及拟合曲线

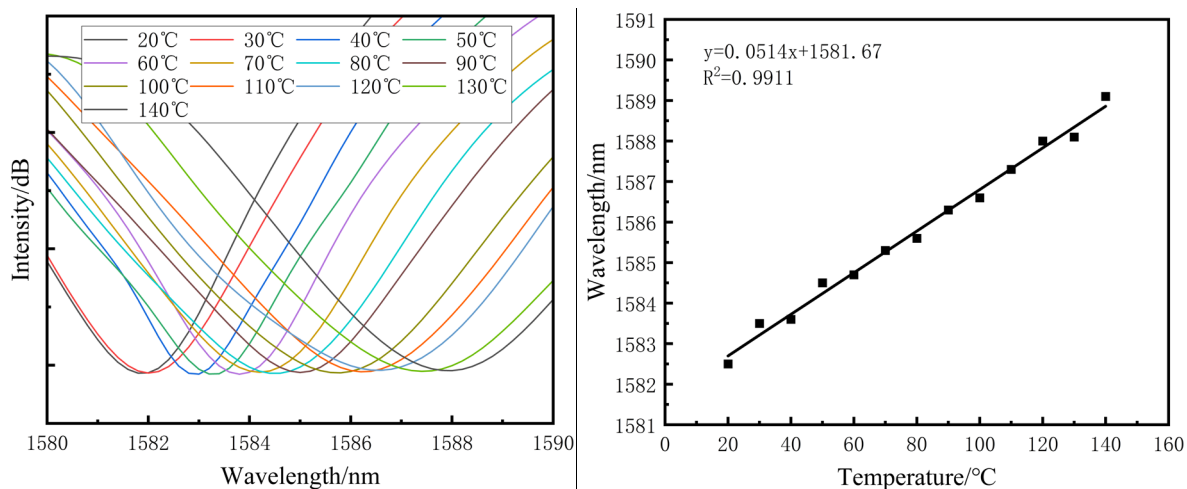


Figure 7. Transmission spectra and fitting curves at different temperatures at MZI characteristic wavelengths
图 7. MZI 特征波长处不同温度的透射光谱图及拟合曲线

传感器从集热式恒温加热器中取出，放入到蒸馏水中清洗浸泡 10 min，之后将传感器放入烧杯中，实验装置如图 8 所示。再往烧杯中倒入不同浓度的 NaCl 溶液，观察传感器在不同折射率下的透射光谱图，不同浓度 NaCl 溶液的折射率[16]如表 1 所示。

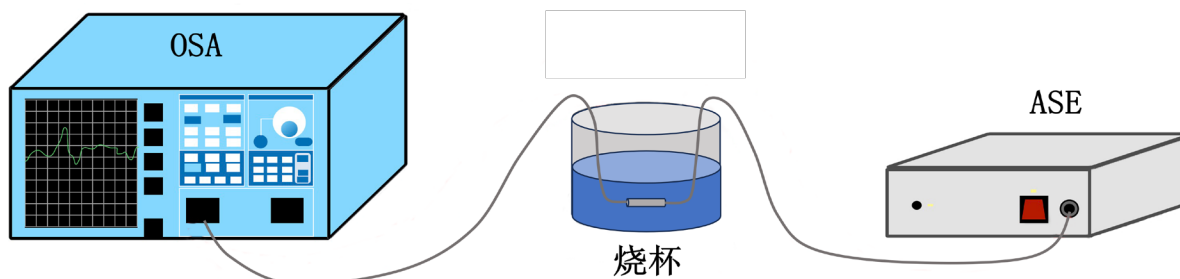


Figure 8. Refractive index measurement device
图 8. 折射率测量装置

Table 1. Refractive index of NaCl solutions with different concentrations
表 1. 不同浓度 NaCl 溶液的折射率

NaCl 浓度	5%	10%	15%	20%	25%
折射率	1.3475	1.3586	1.3728	1.3856	1.4021

由于 LPFG 的光栅区域采用热缩管封装，我们近似可认为外界环境折射率改变对 LPFG 的透射光谱图无影响。MZI 的折射率测量实验中特征波长选择与温度测量实验同一波谷处。其在不同折射率下的透射光谱图及拟合曲线如图 9 所示。

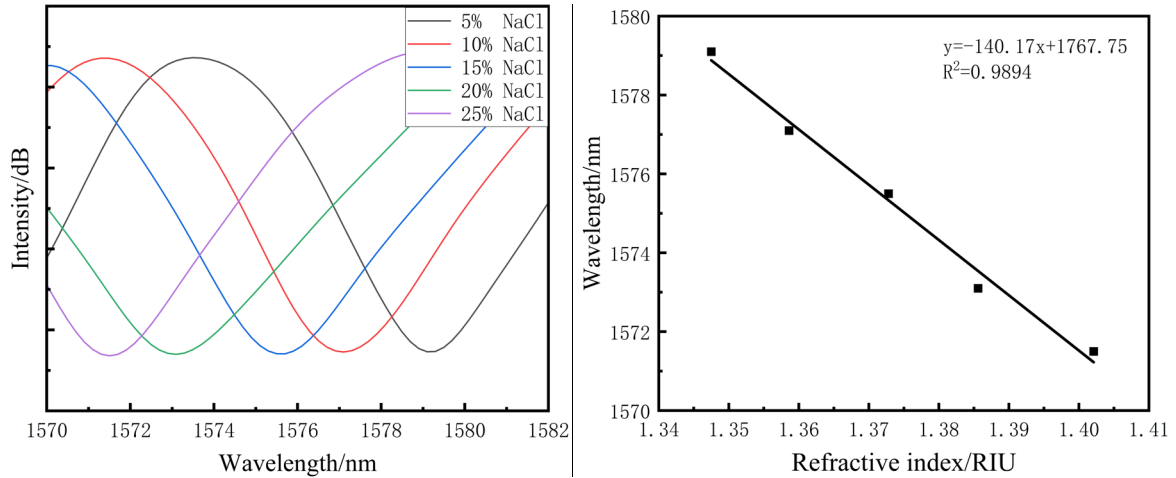


Figure 9. Transmission spectra and fitting curves of different refractive indices at MZI characteristic wavelengths
图 9. MZI 特征波长处不同折射率的透射光谱图及拟合曲线

由图 9 可知，折射率增大特征波长向短波方向漂移，其波长漂移量和折射率变化量呈现较好的线性关系，由拟合曲线可得其折射率灵敏度为-140.17 nm/RIU，相关系数 R^2 为 0.9894。

3.3. 结果分析

由上述实验结果可知，波长漂移量由温度和折射率共同影响，当温度和折射率同时变化时，波长漂移量可表示为[17]：

$$\Delta\lambda = K_{RI} \Delta R + K_T \Delta T \tag{8}$$

式中： K_{RI} 和 K_T 为折射率灵敏度和温度灵敏度； ΔR 和 ΔT 分别为折射率和温度的变化量。

因为本次实验选择的 LPFG 和 MZI 的波长偏移量与折射率和温度变化量的对应关系不同，所以可以建立灵敏度矩阵，当外界环境折射率和温度同时发生变化所引起的波长偏移可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{MZI,RI} & K_{MZI,T} \\ K_{LPFG,RI} & K_{LPFG,T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta T \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中： $K_{MZI,RI}$ 和 $K_{MZI,T}$ 分别为 MZI 的折射率和温度灵敏度系数； $K_{LPFG,RI}$ 和 $K_{LPFG,T}$ 分别为 LPFG 的折射率和温度灵敏度系数； $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为 MZI 和 LPFG 的波长变化量。

将实验结果带入式(9)可得：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -140.17 & 0.0514 \\ 0 & 0.254 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta T \end{bmatrix} \tag{10}$$

求(10)的逆矩阵可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0071 & 0.0014 \\ 0 & 3.9370 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)可知, 我们只需要知道 LPFG 和 MZI 的波长偏移量就可以得到温度和折射率的变化量, 可以做到温度和折射率同时测量。

4. 结论

本文提出了一种基于锥形光纤的 MZI + LPFG 传感器用于同时测量温度和折射率。其结构采用“单模 - 无芯 - 锥形 - 无芯 - 单模 - 长周期光纤光栅 - 单模”, 当温度和折射率同时发生变化时, 我们根据 LPFG 和 MZI 的特征波长偏移量, 带入到灵敏度矩阵中就可以得到温度和折射率的变化, 实现双参量测量。根据实验表明该传感器的温度灵敏度为 51.4 pm/°C 和 254 pm/°C, 折射率灵敏度为 -140.17 nm/RIU。该传感器结构简单、易于制作、灵敏度高, 在测量石油、天然气等危险物品内部温度及浓度时具有很好的应用价值。

参考文献

- [1] 江微微, 赵瑞峰, 卫延, 等. 基于熔融拉锥光纤布拉格光栅的光谱特性[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2565-2569.
- [2] Dong, X.W., Liu, W.K. and Zhao, R.F. (2013) Liquid-Level Sensor Based on Tapered Chirped Fiber Grating. *Science China (Technological Sciences)*, **56**, 471-474. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-5095-z>
- [3] Osuch, T., Markowski, K. and Jedrzejewski, K. (2016) Fiber-Optic Strain Sensors Based on Linearly Chirped Tapered Fiber Bragg Gratings with Tailored Intrinsic Chirp. *IEEE Sensors Journal*, **16**, 7508-7514. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2601332>
- [4] Li, L., Xia, L., Xie, Z. and Liu, D. (2012) All-Fiber Mach-Zehnder Interferometers for Sensing Applications. *Optics Express*, **20**, 11109-11120. <https://doi.org/10.1364/OE.20.011109>
- [5] Jasim, A.A., Hayashi, N., Harun, S.W., Ahmed, H., Penny, R., Mizuno, Y. and Nakamura, K. (2014) Refractive Index and Strain Sensing Using Inline Mach-Zehnder Interferometer Comprising Perfluorinated Graded-Index Plastic Optical Fiber. *Sensors and Actuators A*, **219**, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.07.018>
- [6] Yao, Q., Meng, H., Wang, W., Xue, H., Xiong, R., Huang, B., Tan, C. and Huang, X. (2014) Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on a Core-Offset Mach-Zehnder Interferometer Combined with a Fiber Bragg Grating. *Sensors and Actuators A*, **209**, 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.017>
- [7] Lu, L., Sooley, K. and Chen, Q. (2009) Tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature. *Applied Physics Letters*, **94**, Article ID: 131110. <https://doi.org/10.1063/1.3115029>
- [8] Yang, H.Z., Ali, M.M., Islam, M.R., Lim, K.-S., Gunawardena, D.S. and Ahmed, H. (2015) Cladless Few Mode Fiber Grating Sensor for Simultaneous Refractive Index and Temperature Measurement. *Sensors and Actuators A*, **228**, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.03.001>
- [9] Li, L., Xia, L., Xie, Z., Hao, L., Shuai, B. and Liu, D. (2012) In-Line Fiber Mach-Zehnder Interferometer for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on Thinned Fiber. *Sensors and Actuators A*, **180**, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.04.014>
- [10] Wu, Q., Semenova, Y., Yan, B., Ma, Y., Wang, P., Yu, C. and Farrell, G. (2011) Fiber Refractometer Based on a Fiber Bragg Grating and Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber Structure. *Optics Letters*, **36**, 2197-2199. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002197>
- [11] 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**, Article ID: 6801710. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2538958>
- [12] 张静, 李永倩. 基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 462-468.
- [13] 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>
- [14] 董婧斐, 刘颖刚, 黄亮, 等. 一种熔融拉锥型折射率和温度传感器[J]. 压电与声光, 2021, 43(6): 766-770.
- [15] 刘婷, 张静, 李永倩, 等. 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.

-
- [16] 李硕, 赵婉婷, 罗浩, 等. 增加平面玻璃板的反射率测量不同浓度 NaCl 液体折射率[J]. 大学物理实验, 2019, 32(2): 25-27.
- [17] Li, X., Nguyen, L.V., Becker, M., Ebendorff-Heidepriem, H., Pham, D. and Warren-Smith, S.C. (2019) Simultaneous Measurement of Temperature and Refractive Index Using an Exposed Core Microstructured Optical Fiber. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **26**, Article ID: 5600107. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2908557>