

基于游标效应的飞秒激光直写波导温度传感器

陶天龙, 刘书辉, 柯志宏, 王子杰

武汉工程大学光电信息与能源工程学院、数理学院, 武汉

收稿日期: 2025年2月20日; 录用日期: 2025年3月15日; 发布日期: 2025年3月24日

摘要

本文提出了一种基于游标效应的飞秒激光直写波导温度传感器。通过利用飞秒激光直写波导技术, 在单模光纤(SMF)中制备了两个自由光谱范围(FSR)相近的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。光纤内的波导能够将光纤芯内传输的光耦合出来, 并引导其沿着包层传输, 最终再耦合回纤芯。波导内传输的光与纤芯内传输的光发生干涉, 形成马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。通过级联两个MZI, 利用游标效应实现了温度灵敏度的放大。在进行传感MZI和级联传感器的温度实验后, 发现传感器的温度灵敏度由 $-17.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 提升至 $-94.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 灵敏度放大因子为5.2。该传感器具有结构紧凑、鲁棒性强的特点, 展现出广泛的应用前景。

关键词

飞秒激光刻波导, 马赫-曾德尔干涉仪, 游标效应

Femtosecond Laser Direct Writing Waveguide Temperature Sensor Based on Vernier Effect

Tianlong Tao, Shuhui Liu, Zhihong Ke, Zijie Wang

School of Optical Information and Energy Engineering, School of Mathematics and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Feb. 20th, 2025; accepted: Mar. 15th, 2025; published: Mar. 24th, 2025

Abstract

This article proposes a femtosecond laser direct writing waveguide temperature sensor based on the vernier effect. Two Mach Zehnder interferometers (MZIs) with similar free spectral range (FSR) were fabricated in a single-mode fiber (SMF) using femtosecond laser direct writing waveguide technology.

文章引用: 陶天龙, 刘书辉, 柯志宏, 王子杰. 基于游标效应的飞秒激光直写波导温度传感器[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(2): 200-210. DOI: 10.12677/jsta.2025.132020

Light propagating in the fiber core is coupled out partially to the waveguide and traveling along a path in the fiber cladding region before being coupled back into the fiber core, thus forming an MZI. And temperature sensitivity amplification was achieved by cascading two MZIs to generate a vernier effect. Temperature experiments were conducted on both MZI and cascaded sensors, and the temperature sensitivity of the sensors was amplified from $-17.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ to $-94.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, with an amplification factor of 5.2. Such a sensor has a compact structure, good robustness, and broad application prospects.

Keywords

Femtosecond Laser Direct Writing, Temperature Sensor, Vernier Effect

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

由于光纤传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、长寿命等优势,这些特点使其能够精确测量温度、应变、曲率、磁场、湿度、环境折射率等多种参数[1]-[7]。然而,许多现有光纤传感器的灵敏度已无法满足研究需求,因此,提高光纤传感器灵敏度成为亟待解决的关键问题。

游标效应可以显著提高检测精度,因此被广泛应用于多个测量领域。最初,游标效应用于游标卡尺中,以提高长度测量的精度。游标微分尺通过放大微小的长度差异,利用副尺的比例变化实现高分辨率的长度测量。近年来,这一原理也被引入光纤传感技术[8] [9]。通过将两个具有相似自由光谱范围(FSR)的干涉仪或谐振器级联或并联,生成叠加光谱,并通过光谱分析提取包络,从而实现了更高的灵敏度[8]。

近年来,许多基于游标效应的光纤传感器被提出。2009年,Dai [10]通过将两个环形谐振器级联,制成了一种高折射率灵敏度传感器,灵敏度高达 $10^5 \text{ nm}/\text{RIU}$ 量级。2015年,Shao [11]等人将两个光纤 Sagnac 干涉仪级联,制备出了一种级联温度传感器,单个光纤 Sagnac 干涉仪的温度灵敏度为 $-1.46 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,经过游标效应放大后的温度灵敏度达到了 $-13.36 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,温度灵敏度放大了 9 倍。2017年,Liao [12]等人将两个单模光纤错位拼接制作的 MZI 传感器级联,构成双参量传感器,测得温度和曲率灵敏度为 $397.36 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $-36.26 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$,相比单个 MZI 传感器,灵敏度放大了 9 倍。2019年,Yao [13]等人并联两个法布里-珀罗干涉仪(FPI),构成折射率传感器,测得折射率灵敏度为 $30801.53 \text{ nm}/\text{RIU}$,相比单一传感器灵敏度放大了 33 倍。2019年,Wang [14]等人并联两个由不同光纤熔接构成的 MZI,制作成温度传感器,测得温度灵敏度为 $528.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,相比单一传感器灵敏度放大了 18.3 倍。

本文利用飞秒激光直写波导的方式在单模光纤中制备两个 FSR 相似的 MZI,并通过级联产生游标效应放大温度灵敏度。实验测得该传感器温度灵敏度为 $-94.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,相比单一传感器,温度灵敏度放大了 5.2 倍。该传感器鲁棒性较好,使用寿命长,制作简单,具有较好的应用前景。

2. 传感器原理分析

2.1. MZI 原理

飞秒激光在单模光纤内刻写波导的光纤内 MZI 的工作原理如图 1 所示。单模光纤内传输的光被分成两部分:一部分沿单模光纤的纤芯传播,另一部分沿飞秒激光刻写的波导路径传输。当两束光传输到波导末端时重新组合,形成相干叠加。假设 I_1 和 I_2 分别表示纤芯和波导中传输的光强,则 MZI 的输出光强为:

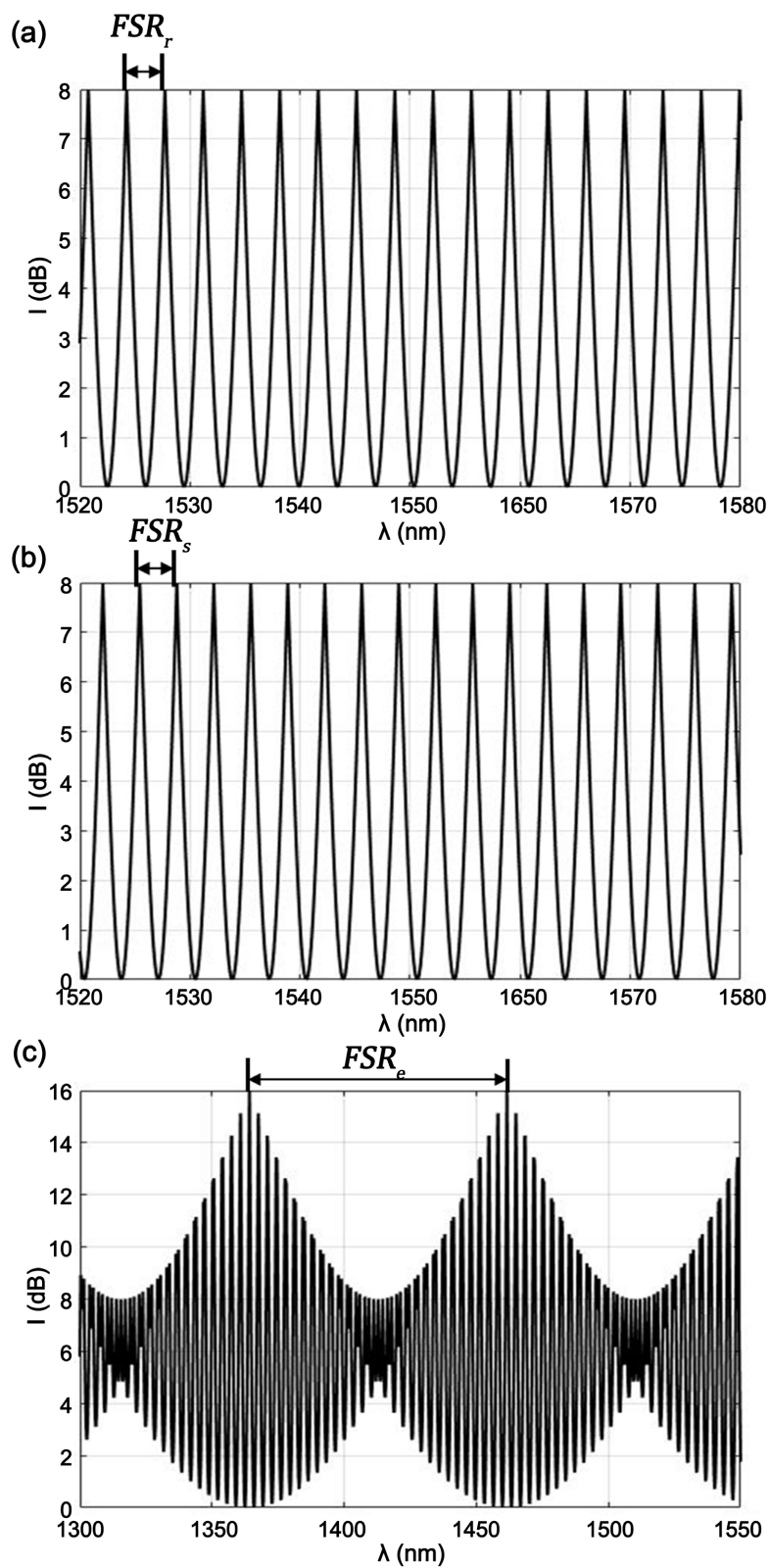


Figure 1. Working mechanism of the vernier effect (a) Transmission spectrum of the reference interferometer; (b) Transmission spectrum of the sensing interferometer; (c) Superimposed spectrum of the cascaded sensor

图 1. 游标效应工作机制 (a) 参考干涉仪传输谱; (b) 传感干涉仪传输谱; (c) 级联传感器的叠加光谱

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \times \cos \left[\frac{2\pi \Delta(nL)}{\lambda} \right] \quad (1)$$

其中, I 为干涉条纹强度, λ 为光波长, $\Delta(nL)$ 为两个干涉臂的光程差(OPD), 当 $2\pi \Delta(nL)/\lambda = (2m+1)\pi$, m 为整数时, dip 所在波长为:

$$\lambda_{dip} = \frac{2\Delta(nL)}{2m+1} \quad (2)$$

其自由光谱范围(FSR)可以表示为:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{\Delta(nL)} \quad (3)$$

2.2. 游标效应原理

游标效应来源于游标卡尺, 利用主尺和游标尺之间的微小刻度差来提高测量精度。近年来, 研究者们成功将游标效应引入到制作增敏型光纤传感器上。与游标卡尺的原理类似, 其中一个干涉仪作为传感部分, 另一个作为参考部分。两个干涉谱叠加, 并在传输谱上形成一个包络谱。当传感元件受到外界扰动时, 传感光谱的微小变化会引起包络谱的显著移动。因此, 通过追踪包络线的变化, 与单一干涉仪或谐振器相比, 可以显著提高检测灵敏度。

基于游标效应的传感器原理图如图 1 所示, 图 1 中(a)和(b)分别为参考干涉仪和传感干涉仪传输光谱, 图 1(c)为传感干涉仪和参考干涉仪级联后的传输光谱, 可以看到, 级联后的传输谱为周期性的梳状谱。参考干涉仪和传感干涉仪的自由光谱范围分别为 FSR_r 和 FSR_s , FSR_r 和 FSR_s 近似但不相等, 当传感干涉仪和参考干涉仪传输谱的峰对齐时, 两个干涉仪级联传输谱反射率达到最大, 经过数个周期后, 两个传输谱峰会再次对齐, 因此级联谱的包络也是周期性的。包络的自由光谱范围 FSR_e 为:

$$FSR_e = \frac{FSR_r FSR_s}{|FSR_r - FSR_s|} \quad (4)$$

当参考干涉仪传输谱保持稳定, 传感干涉仪光谱发生变化时, 两个干涉仪传输谱的峰对齐的位置会发生显著变化, 因此包络会产生较大变化, 对传感器的灵敏度会产生放大作用。传感器的放大倍数 M 可以表示为:

$$M = \frac{FSR_r}{|FSR_r - FSR_s|} \quad (5)$$

当传感元件的光谱略有移动, 参考元件保持稳定时, 包络谱会发生较大的移动。由公式(5)可以看出, 参考干涉仪的 FSR_r 与传感干涉仪 FSR_s 越近, 放大因子 M 的值就越大。在理论上, 可以无限期地扩展灵敏度。然而, 也应该考虑器件的稳定性和级联光谱的 FSR 。

3. 实验过程和结果分析

3.1. 传感器制作

飞秒激光直写波导制备的 MZI 结构如图 1 所示。所使用的单模光纤(SMF-28, Corning)直径为 125 μm , 纤芯直径为 8.3 μm , 纤芯和包层的有效折射率分别为 1.448 和 1.444 (1550 nm)。MZI 结构的制备在激光微加工平台上完成, 该平台具备高精度的三维运动控制功能。刻写波导使用的飞秒激光参数如下: 重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 100 fs, 工作波长为 800 nm, 单脉冲能量为 600 nJ。聚焦镜头采用 100 倍油浸

物镜，数值孔径(NA)为 1.25，写作速度为 5 $\mu\text{m/s}$ 。最终将波导与纤芯的夹角设置为 1.2°，以实现更高的光耦合效率。为了使两个马赫 - 曾德尔干涉仪的自由光谱范围相近，传感 MZI 的波导总长度设计为 15 mm，参考 MZI 的波导总长度设置为 13 mm。通过这种设计，两个 MZI 的 FSR 得以接近，从而为后续的游标效应放大提供了基础。

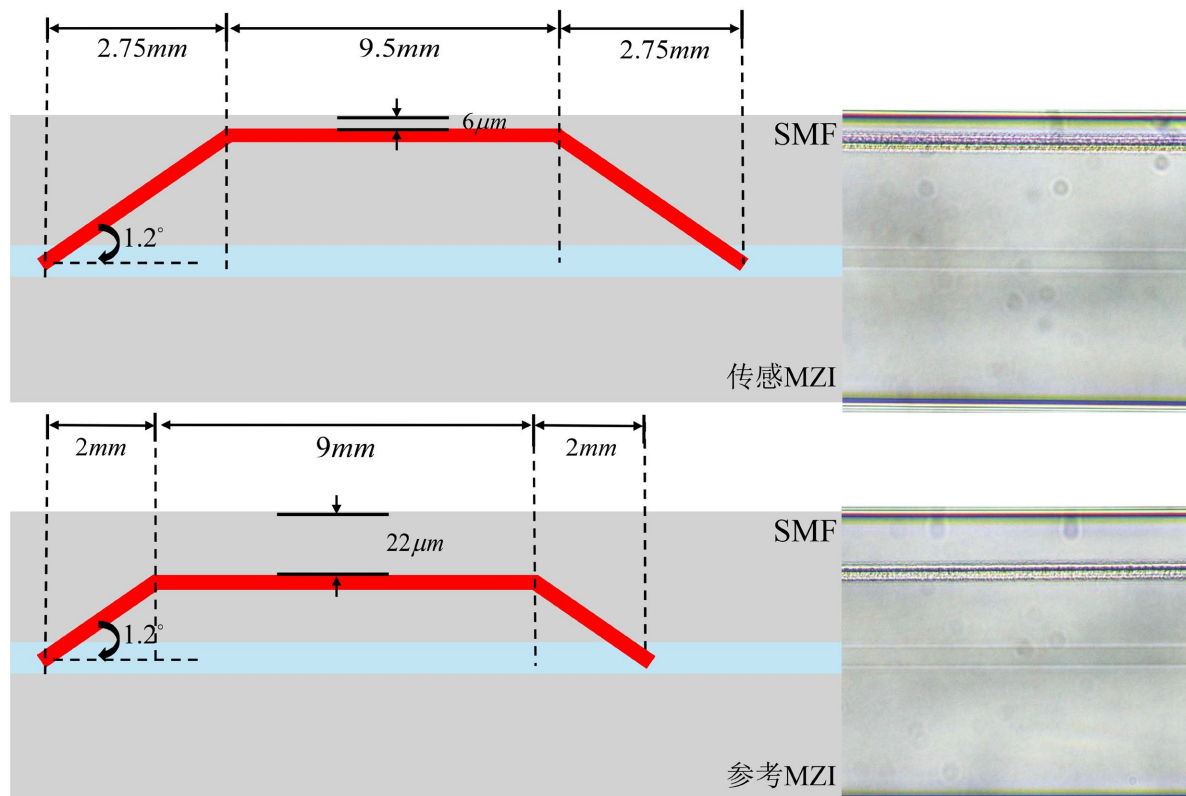


Figure 2. Schematic diagram of the sensing MZI and the reference MZI
图 2. 传感 MZI 和参考 MZI 原理图

3.2. 传感器光谱分析

两个 MZI 的透射谱和空间频谱如图 2 所示，从透射谱可以得到，传感 MZI 和参考 MZI 的自由光谱范围(FSR)分别为 34.84 nm 和 45.04 nm，参考 MZI 的干涉谱消光比较小，是由于从纤芯耦合到波导的光功率较小。从传感 MZI 和参考 MZI 的空间频谱中可以观察到干涉谱存在多个模式，其中主要频率分别为 0.0287 nm^{-1} 和 0.0224 nm^{-1} 。通过公式(6)可以计算出纤芯和波导模式的折射率差[15] [16]。

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2 \xi}{L} \tag{6}$$

其中， ξ 表示空间频率，计算得到 Δn_{eff} 约为 3.5×10^{-3} ，这与其他学者实验研究中的结果相似[17]。

通过公式(4)和公式(5)可计算出包络的自由光谱范围(FSR_e)和放大倍数，分别为 158 nm 和 4.4。此外，根据两个 MZI 的空间频率，可得包络的空间频率为 0.0064 nm^{-1} 。图 3 展示了叠加光谱的空间频谱和透射谱。从图中可以看出，叠加光谱中难以找到明显的包络。这主要由多种因素引起：首先，两个 MZI 的级联导致多种模式相互干扰；其次，波导写作长度过长会降低干涉的消光比。波导长度控制在约 15 mm，由于传感 MZI 和参考 MZI 的 FSR 较大，为获得较小的包络 FSR，将传感 MZI 和参考 MZI 的 FSR 差值

设置为接近 10 nm，从而实现较小的放大系数。未来的工作将着重优化波导质量，以实现更长的波导长度，进一步减小 FSR 并提升放大系数。通过图 4 中两个 MZI 级联的叠加光谱与空间频谱的对比，可以清晰地看到传感 MZI 和参考 MZI 的主要频率与图 3 中级联 MZI 的空间频率一致。对叠加光谱的空间频谱进行了带通滤波，滤波范围为 0.005 nm^{-1} 到 0.007 nm^{-1} ，随后通过傅里叶逆变换提取出包络，如图 5 所示。从图中可以看出，包络的消光比较小，这是由于在图 3 中包络所对应的频率分量强度较低所致。

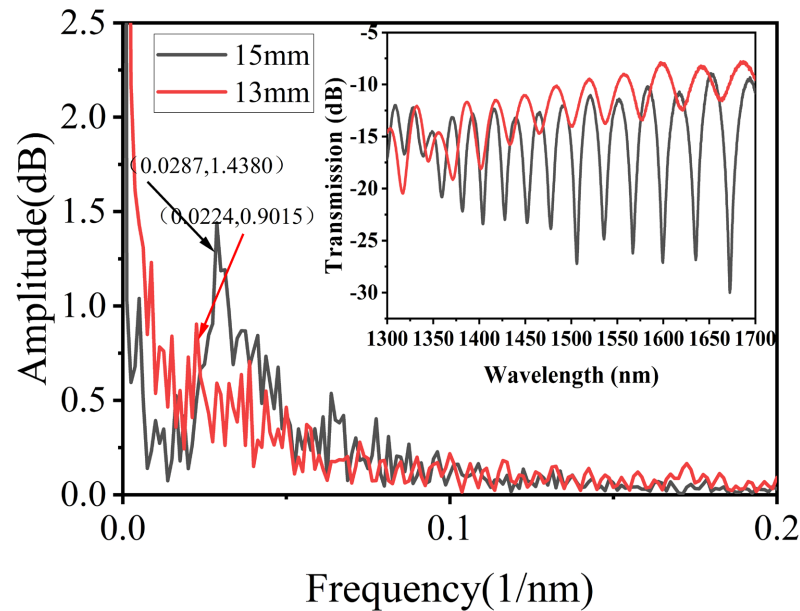


Figure 3. Spatial frequency spectrum and superimposed spectrum of two cascaded MZIs
图 3. 级联两个 MZI 的空间频谱和叠加光谱

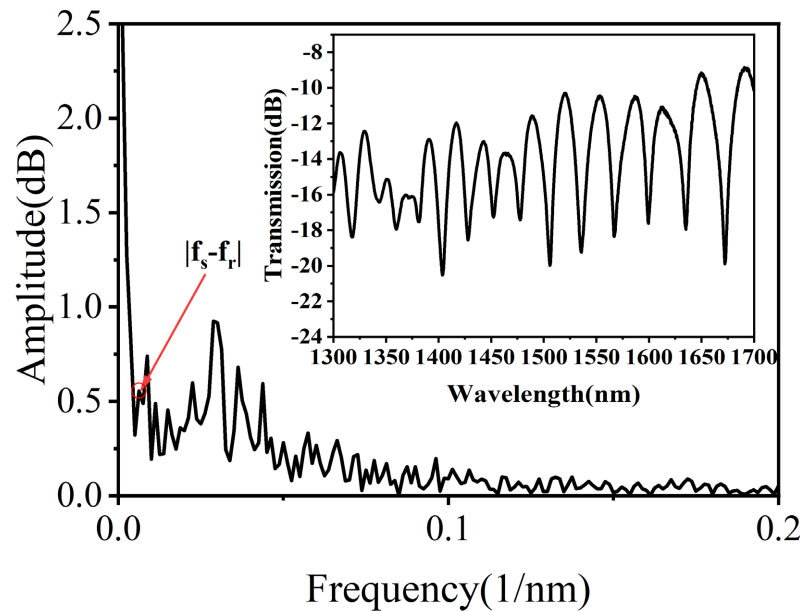


Figure 4. Spatial frequency spectrum and transmission spectrum of two MZIs
图 4. 两个 MZI 的空间频谱和透射谱

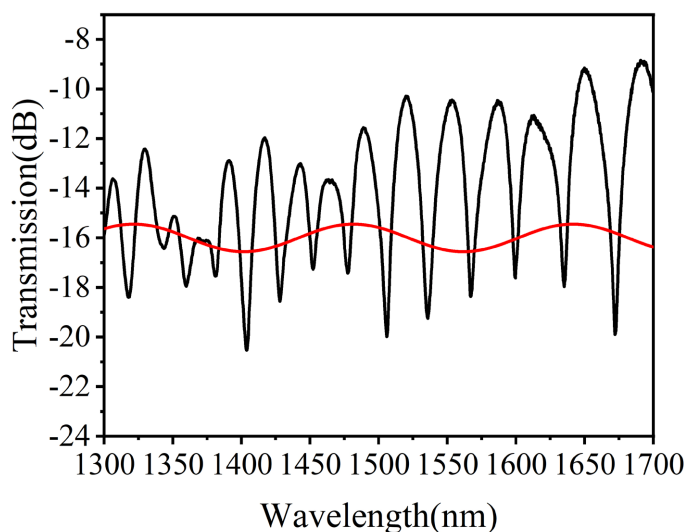


Figure 5. Superimposed spectrum and envelope curve diagram
图 5. 叠加光谱和包络曲线图

3.3. 温度测量

实验装置如图 6 所示, 将传感器置于加热装置(COLUMN OVEN LCO 102)内进行加热, 采用宽带光源(OYSL SC46)作为输入光源, 光谱仪(YOKOGAWA AQ6370C)用于记录传感器的光谱信号。温度设置在 25℃至 55℃范围内, 步长为 10℃, 并在每个目标温度下保持约 3 分钟, 以确保光谱稳定。随着温度升高, 干涉光谱出现蓝移, 如图 7 所示。选取 1525 nm 附近的光谱进行追踪分析, 并对得到的数据进行拟合, 如图 8 所示, 计算出温度灵敏度为 $-17.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 拟合系数为 0.9646, 这表明干涉光谱与温度具有良好的线性关系。

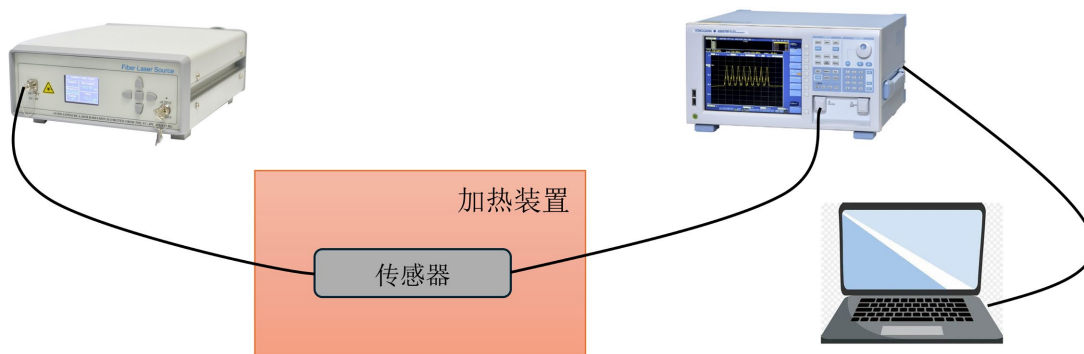


Figure 6. Diagram of the sensor temperature measurement apparatus
图 6. 传感器温度测量装置图

将两个 MZI 级联后, 对传感 MZI 重复上述温度实验, 得到的叠加光谱经解调后包络随温度变化的趋势如图 9 所示。对包络波长 1565 nm 附近追踪, 得到包络谱与温度间的关系如图 10 所示, 实验结果表明, 级联 MZI 传感器的温度灵敏度为 $-94.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 相比单个传感 MZI 的温度灵敏度, 放大了约 5.2 倍。这一结果与理论计算存在一定差异, 主要原因在于飞秒激光刻写波导制作的 MZI 具有较小的偏振依赖性, 轻微的环境抖动可能引起光谱的微小变化。当两个 MZI 级联后, 这种影响被放大, 从而导致测量结果出现一定误差。

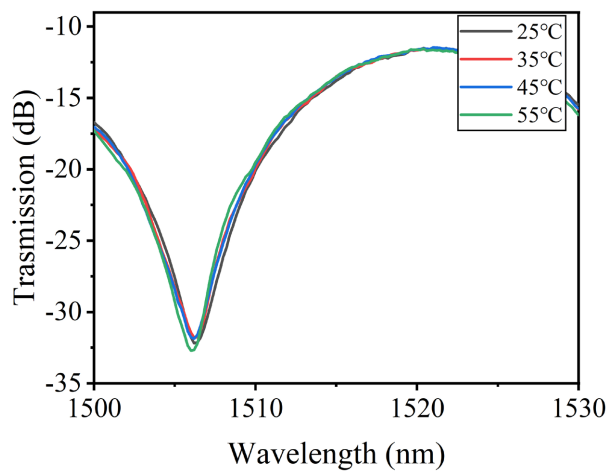


Figure 7. Transmission spectra of the sensing MZI at different temperatures
图 7. 不同温度下传感 MZI 的透射光谱

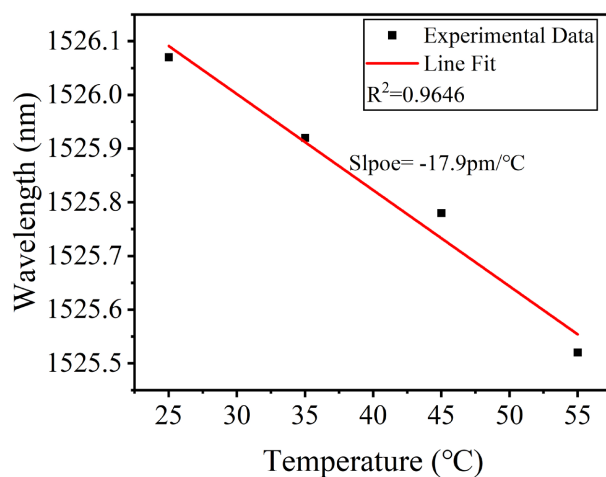


Figure 8. Temperature sensitivity fitting curve of the sensing MZI
图 8. 传感 MZI 温度灵敏度拟合图

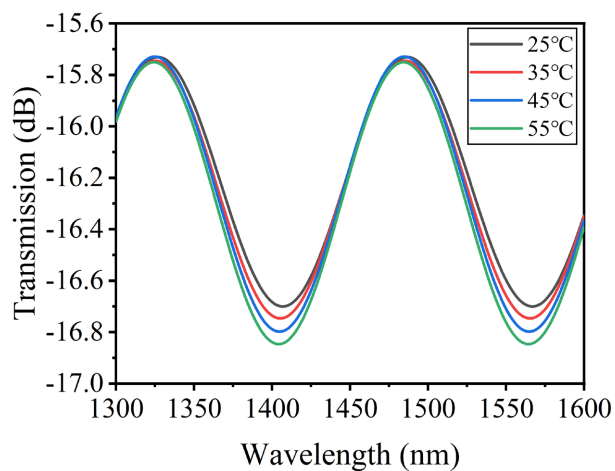


Figure 9. Envelope variation diagram extracted from the superimposed spectrum at different temperatures
图 9. 不同温度下从叠加光谱提取的包络变化图

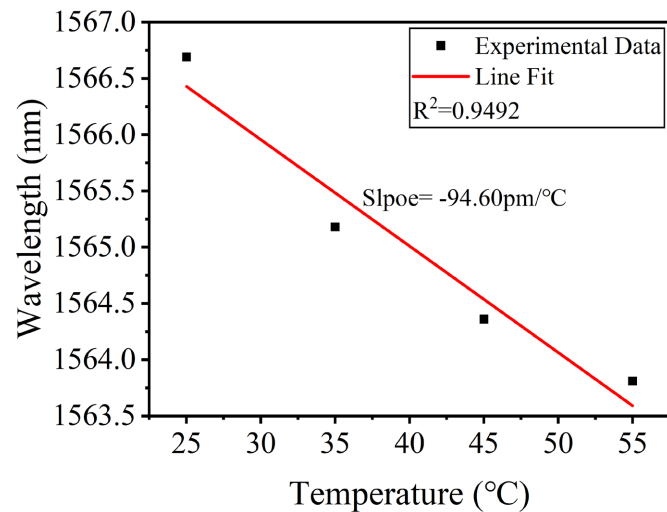


Figure 10. Temperature sensitivity fitting curve of the envelope
图 10. 包络温度灵敏度拟合图

Table 1. Comparison of different types of temperature sensors based on the Vernier effect
表 1. 不同类型基于游标效应的温度传感器比较

Technique	Sensitivity of temperature/(nm/°C)	Range of temperature/°C	Re.f
MZI and MZI, the MZI is fabricated by splicing different types of optical fibers	0.5285	0~100	[14]
FPI and FPI, the FPI is fabricated by splicing a glass tube and filling it with PDMS	17.758	40~70	[18]
FPI and FPI, the FPI is fabricated by splicing a glass tube	67.35	20~25	[19]
FPI and FPI, the FPI is fabricated by splicing different types of optical fibers	0.0154	200~1200	[20]
MZI and MZI, the MZI is fabricated using femtosecond laser direct writing of waveguides.	0.0946	25~55	This work

表 1 展示了本文提出的传感器与其他同类型光纤传感器的性能对比。从表中可以看出，本文提出的光纤传感器在温度灵敏度和测量范围方面仍有提升空间。然而，与其他传感器相比，本文提出的传感器在制作工艺和结构稳定性方面具有显著优势。其他传感器的干涉仪通常采用拼接不同类型光纤或填充其他材料的方式制作，这种方法难以精确控制自由光谱范围(*FSR*)，尤其是在制作法布里-珀罗干涉仪(FPI)时，需要对谐振腔长度进行严格调控，这使得游标效应的实现变得复杂且困难。此外，此类干涉仪的结构稳定性较差，在复杂环境中的应用受到限制。相比之下，本文提出的基于飞秒激光直写波导制作的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)具有显著优势：一方面，*FSR* 可以精确控制，制作工艺简单；另一方面，传感器结构稳定性强，适用于复杂环境。未来，通过进一步优化，有望实现更高的灵敏度放大倍数，并可扩展至其他物理参量的测量。

4. 结语

本文提出了一种基于游标效应的飞秒激光直写波导温度传感器，使用飞秒激光直写波导的方式在单模光纤上制备两个 *FSR* 相近的 MZI，先对单个 MZI 进行温度测量。将两个 MZI 级联，对温度测量，并对叠加光谱进行分析，提取包络的频率分量，用 IFFT 提取叠加谱包络。实验结果表明，传感 MZI 温度

灵敏度 $-17.9\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 放大为 $-94.6\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ，放大倍数为5.2。该传感器制作简单，灵活性高，成本低，使用寿命长，具有广阔的应用前景。

基金编号

国家自然科学基金(12004290, 51909195)。

参考文献

- [1] Velázquez-González, J.S., Monzón-Hernández, D., Moreno-Hernández, D., Martínez-Piñón, F. and Hernández-Romano, I. (2017) Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Using a Spr-Based Fiber Optic Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **242**, 912-920. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.164>
- [2] Chen, Q., Wang, D.N. and Gao, F. (2021) Simultaneous Refractive Index and Temperature Sensing Based on a Fiber Surface Waveguide and Fiber Bragg Gratings. *Optics Letters*, **46**, 1209-1212. <https://doi.org/10.1364/ol.419636>
- [3] Jing, L., Liu, B., Liu, D., Liu, D., Wang, F., Guan, C., et al. (2024) Femtosecond Laser Inscribed Excessively Tilted Fiber Grating for Humidity Sensing. *Sensors*, **24**, Article 342. <https://doi.org/10.3390/s24020342>
- [4] Zhao, R., Liu, H. and Shu, X. (2023) High-performance Vector Torsion Sensor Based on High Polarization-Dependent In-Fiber Mach-Zehnder Interferometer. *Optics Express*, **31**, 8844-8854. <https://doi.org/10.1364/oe.483885>
- [5] Yin, X.L., Wang, N., Yu, X.D., et al. (2021) Theoretical Analysis and Optimization of Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Optical-Fiber Humidity-Sensor Structures. *Current Optics and Photonics*, **5**, 652-659.
- [6] Xu, B., He, J., Du, B., Xiao, X., Xu, X., Fu, C., et al. (2021) Femtosecond Laser Point-By-Point Inscription of an Ultra-Weak Fiber Bragg Grating Array for Distributed High-Temperature Sensing. *Optics Express*, **29**, 32615-32626. <https://doi.org/10.1364/oe.437479>
- [7] Tian, Q., Xin, G., Lim, K., He, Y., Liu, J., Ahmad, H., et al. (2020) Cascaded Fabry-Perot Interferometer-Regenerated Fiber Bragg Grating Structure for Temperature-Strain Measurement under Extreme Temperature Conditions. *Optics Express*, **28**, 30478-30488. <https://doi.org/10.1364/oe.403716>
- [8] Liu, Y., Li, X., Zhang, Y. and Zhao, Y. (2021) Fiber-optic Sensors Based on Vernier Effect. *Measurement*, **167**, Article ID: 108451. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108451>
- [9] 朱熙平. 基于游标效应的高灵敏度光纤传感器[D]: [硕士学位论文]. 黄石: 湖北师范大学, 2024.
- [10] Dai, D. (2009) Highly Sensitive Digital Optical Sensor Based on Cascaded High-Q Ring-Resonators. *Optics Express*, **17**, 23817-23822. <https://doi.org/10.1364/oe.17.023817>
- [11] Shao, L., Luo, Y., Zhang, Z., Zou, X., Luo, B., Pan, W., et al. (2015) Sensitivity-Enhanced Temperature Sensor with Cascaded Fiber Optic Sagnac Interferometers Based on Vernier-Effect. *Optics Communications*, **336**, 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.09.075>
- [12] Liao, H., Lu, P., Fu, X., Jiang, X., Ni, W., Liu, D., et al. (2017) Sensitivity Amplification of Fiber-Optic In-Line Mach-Zehnder Interferometer Sensors with Modified Vernier-Effect. *Optics Express*, **25**, 26898-26909. <https://doi.org/10.1364/oe.25.026898>
- [13] Yao, T., Pu, S., Zhao, Y. and Li, Y. (2019) Ultrasensitive Refractive Index Sensor Based on Parallel-Connected Dual Fabry-Perot Interferometers with Vernier Effect. *Sensors and Actuators A: Physical*, **290**, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.011>
- [14] Wang, Z., Huang, L., Liu, C., Wang, H., Sun, S. and Yang, D. (2019) Sensitivity-enhanced Fiber Temperature Sensor Based on Vernier Effect and Dual In-Line Mach-Zehnder Interferometers. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 7983-7987. <https://doi.org/10.1109/jсен.2019.2916891>
- [15] Theodosiou, A., Ioannou, A. and Kalli, K. (2019) All-In-Fiber Cladding Interferometric and Bragg Grating Components Made via Plane-By-Plane Femtosecond Laser Inscription. *Journal of Lightwave Technology*, **37**, 4864-4871. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2925263>
- [16] Choi, H.Y., Kim, M.J. and Lee, B.H. (2007) All-Fiber Mach-Zehnder Type Interferometers Formed in Photonic Crystal Fiber. *Optics Express*, **15**, 5711-5720. <https://doi.org/10.1364/oe.15.005711>
- [17] Yang, W., Wu, T., Wu, Z., Wang, X., Shum, P.P., Wang, X., et al. (2022) In-Line Mach-Zehnder Interferometer and Bragg Grating Integrated by Femtosecond Laser for Discrimination of Temperature and Directional Torsion. *Optics Express*, **30**, 41933-41942. <https://doi.org/10.1364/oe.473333>
- [18] Hou, L., Zhao, C., Xu, B., Mao, B., Shen, C. and Wang, D.N. (2019) Highly Sensitive PDMS-Filled Fabry-Perot Interferometer Temperature Sensor Based on the Vernier Effect. *Applied Optics*, **58**, 4858-4865. <https://doi.org/10.1364/ao.58.004858>

- [19] Zhang, J., Liao, H., Lu, P., Jiang, X., Fu, X., Ni, W., *et al.* (2018) Ultrasensitive Temperature Sensor with Cascaded Fiber Optic Fabry-Perot Interferometers Based on Vernier Effect. *IEEE Photonics Journal*, **10**, 1-11.
<https://doi.org/10.1109/jphot.2018.2865449>
- [20] Lei, X. and Dong, X. (2019) Sensitivity-Enhanced Fiber Interferometric High Temperature Sensor Based on Vernier Effect. *Photonics and Education in Measurement Science* 2019, Jena, 17-19 September 2019, 17-19.
<https://doi.org/10.1117/12.2530864>