

# 基于锥形单模光纤的MZI折射率传感器特性研究

刘海龙, 于卓冉, 赵燕杰\*

山东建筑大学理学院, 山东 济南

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月8日; 发布日期: 2026年5月18日

## 摘要

本文提出并制备了一种基于锥形单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)与无芯光纤(No Core Fiber, NCF)级联结构的马赫-增德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)折射率传感器。该传感器采用“SMF-NCF-Taper SMF-NCF-SMF”的级联结构, 通过在SMF段引入锥区, 利用锥形区域增强的倏逝场效应, 提升了光场与外界介质的相互作用强度。基于光束传播法进行仿真分析, 结果表明锥形结构可有效增强模式耦合效率。实验搭建了宽带光源与光谱仪组成的测试系统, 在1.34~1.38折射率范围内对传感器性能进行了测试。结果表明, 当锥区腰径为60  $\mu\text{m}$ 时, 传感器的折射率灵敏度达174.4 nm/RIU, 线性拟合系数 $R^2$ 为0.9964, 具有良好的线性响应。该传感器具有结构紧凑、制备工艺简便、灵敏度高等优势, 在生物医学检测、环境监测等领域具有良好的应用前景。

## 关键词

锥形光纤, 马赫-增德尔干涉仪, 光纤传感器

## Study on the Characteristics of MZI Refractive Index Sensor Based on Tapered Single-Mode Fiber

Hailong Liu, Zhuoran Yu, Yanjie Zhao\*

School of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Received: April 15, 2026; accepted: May 8, 2026; published: May 18, 2026

## Abstract

This paper presents the design and fabrication a Mach-Zehnder Interferometer (MZI) refractive

\*通讯作者。

**index sensor based on the cascaded structure of tapered single-mode fiber (SMF) and no-core fiber (NCF). The sensor adopts a cascaded structure of SMF-NCF-Taper SMF-NCF-SMF. By introducing a tapered region in the SMF segment, the enhanced evanescent field effect in the tapered area is utilized to improve the interaction strength between the optical field and the surrounding external medium. Simulation analysis based on the beam propagation method shows that the tapered structure can effectively enhance the mode coupling efficiency. A test system composed of a broadband light source and an optical spectrum analyzer is built experimentally, and the sensor performance is tested in the refractive index range of 1.34~1.38. The results demonstrate that when the waist diameter of the tapered region is 60  $\mu\text{m}$ , the refractive index sensitivity of the sensor reaches 174.4 nm/RIU, with a linear fitting coefficient  $R^2$  of 0.9964, indicating an excellent linear response. The sensor has the advantages of compact structure, simple fabrication process and high sensitivity, and presents promising application prospects in biomedical detection, environmental monitoring and other fields.**

## Keywords

**Tapered Fiber, Mach-Zehnder Interferometer, Fiber Optic Sensor**

Copyright © 2026 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

折射率作为物质的核心参数,其精准检测在生物医学[1]、环境水质监测[2]、化工溶液浓度分析[3]等领域具有不可替代的应用价值。开发高灵敏度、低成本的折射率传感器件已成为光学检测领域的研究热点。光纤折射率传感器凭借抗电磁干扰、结构小巧、可远程检测的特点,可适用于复杂恶劣环境,相较于传统电学传感器展现出显著应用潜力[4]-[6]。马赫-增德尔干涉仪(Mach-Zehnder-Interferometer, MZI)是由两束光通过不同的光路传播,其中一束光(传感臂)容易受到外界扰动的影响,而另一束光(参考臂)对外界变化不敏感,传统的 MZI 光纤传感器采用光纤耦合器作为分束与合束的元件,使得测量路径和参考路径存在于不同的光纤中[7]。随着微纳光学技术的发展,结构更简单紧凑的微结构 MZI 光纤传感器逐步取代了传统的两臂分离的结构。基于微结构 MZI 的液体折射率传感器其结构设计灵活、灵敏度高、易于制备,受到了广泛关注[8]。近年来,研究人员通过在 MZI 传感器中引入特种光纤(如双芯光纤、偏芯光纤)或特殊结构(如锥形、D 形)来增强光与待测介质的相互作用,从而提升折射率灵敏度。其中,光纤拉锥技术通过减小纤芯直径,使光场能量以倏逝波形式泄漏至包层及外界环境,从而增强模式耦合效率与对外界折射率检测。例如:2020 年, Mumtaz 等人[9]提出一种基于 MZI 的 SMF-多模光纤(Multimode Fiber, MMF)-刻蚀多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)-MMF-SMF 折射率与温度双参数传感器。该传感器通过将 MCF 进行化学刻蚀处理,使纤芯外芯暴露,有效增强芯模与外芯模的有效折射率差,提升模式干涉强度与外界环境相互作用。实验结果表明,在 1.334~1.370 折射率测量范围内,该传感器的折射率灵敏度达 178.20 dB/RIU。2023 年, Liu 等人[10]提出并实验验证了一种基于 MZI 的多锥形保偏光纤(Polarization-Maintaining Fiber, PMF)-MMF 的折射率与温度双参数传感器。该传感器通过在两段 MMF 之间级联 PMF,并在 PMF 纤芯上制备多道锥形区,利用锥形区增强模式干涉效应。实验结果表明,在 1.3330~1.3754 的折射率测量范围内,该传感器的折射率灵敏度达 250.861 nm/RIU;在 45 $^{\circ}\text{C}$ ~75 $^{\circ}\text{C}$  的温度测量范围内,温度灵敏度达 -78 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。现有研究虽已证实拉锥工艺能有效提升 MZI 的折射率传感灵敏度,但相关方案多

依赖特种光纤或复杂结构设计，在制备工艺的简便性与成本可控性方面仍存在明显局限。

为此，本文提出一种基于锥形 SMF-NCF-SMF-NCF-SMF 复合结构的新型光纤折射率传感器，采用光纤熔接与拉锥工艺完成器件制备，并利用宽带光源(BBS)与光频谱分析仪(OSA)搭建传感性能测试系统。通过研究该传感器在不同折射率介质中的光谱响应，计算了折射率灵敏度与线性度等关键性能指标，为光纤折射率传感器的结构简化、工艺优化提供理论与实验支撑。

## 2. 传感器结构与原理

图 1 为所设计的传感器结构示意图，光沿箭头方向依次通过入射端 SMF、NCF、Taper SMF、NCF 与出射端 SMF，形成“SMF-NCF-Taper SMF-NCF-SMF”的级联光纤结构。当光从入射端 SMF 进入 NCF 时，因模场不匹配，SMF 中的基模会耦合为 NCF 内的多阶模式。当光场通过 Taper SMF 时，随着纤芯直径减小，纤芯对光场的束缚能力减弱，锥形区域的光场能量更容易扩散到包层中，形成更强的倏逝场，增强与外界环境的相互作用。最终，各阶模式在第二个 NCF-SMF 熔接点耦合进入出射端 SMF 的纤芯。

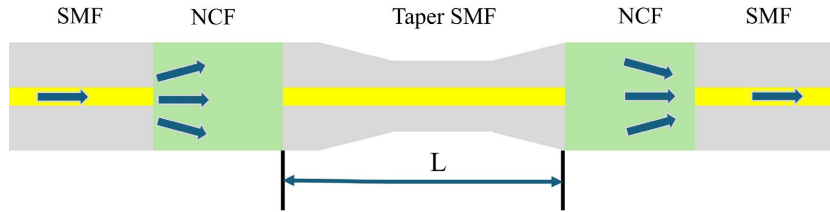


Figure 1. Schematic diagram of the sensor structure  
图 1. 传感器结构示意图

该传感结构的原理是基于多模干涉。当入射光从 SMF 进入 NCF 时，高阶模式被激发，这些模式与基模共同通过中间的锥形区域后，在第二段 NCF 内发生耦合，形成干涉。输出光谱可由以下公式进行描述：

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

$I_1, I_2$  分别代表纤芯和包层中的光强度， $\Delta\phi$  为两束光之间的相位差，它可以表示为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L \Delta n_{eff}}{\lambda} = \frac{2\pi L (\Delta n_{eff1} - \Delta n_{eff2})}{\lambda} \tag{2}$$

其中  $\lambda$  为入射光的波长， $L$  为传感区域的长度， $n_{eff1}$  和  $n_{eff2}$  分别表示传感光纤纤芯和包层的有效折射率， $\Delta n_{eff} = n_{eff1} - n_{eff2}$ ，代表光纤纤芯和包层模式之间的有效折射率差。当  $\Delta\phi$  为  $2k\pi$  ( $k$  为整数) 时，光强极值点也就是透射谱的谐振波峰会出现，透射光谱中共振波长可以表示为：

$$\lambda_{dip} = \frac{2L \Delta n_{eff}}{2k} = \frac{L \Delta n_{eff}}{k} \tag{3}$$

当外界折射率  $n_a$  变化量为  $\Delta n_a$  时，由此导致的干涉谷波长漂移  $\Delta\lambda_{dip}$  为：

$$\Delta\lambda_{dip} = \frac{L}{K} \cdot \delta(\Delta n_{eff}) \tag{4}$$

因此，折射率灵敏度(Sensitivity, S)为：

$$S = \frac{\Delta\lambda_{dip}}{\Delta n_a} = \frac{L}{K} \cdot \frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial n_a} \tag{5}$$

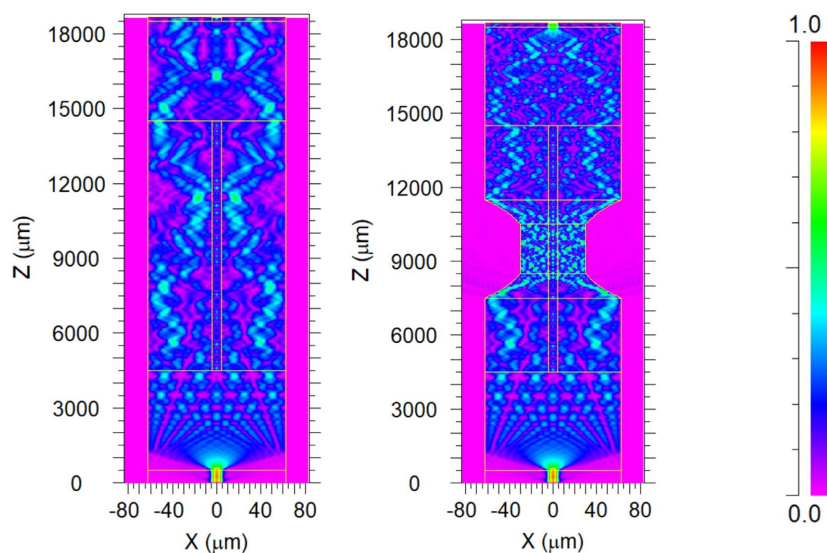
### 3. 传感器设计与制作

为进一步研究 SMF-NCF-Taper SMF-NCF-SMF 结构的光场分布特性, 采用光束传播法对该结构进行了仿真分析(仿真参数如表 1 所示)。中间 SMF 段未拉锥与拉锥结构的光场分布图如图 2 所示, 由图 2 可见光场能量在锥形结构处更集中, 并在锥形处激发出更强的倏逝场, 表明锥形结构可有效增强模式耦合效率, 提高光场与外界介质的相互作用, 为提升折射率传感灵敏度提供了理论支撑。

**Table 1.** Simulation parameters

**表 1.** 仿真参数

程序参数	数值
入射光波长(nm)	1550
背景折射率	1
单模纤芯/包层直径( $\mu\text{m}$ )	8.2/125
单模纤芯/包层折射率	1.4682/1.4628
无芯光纤包层直径( $\mu\text{m}$ )	125
无芯光纤包层折射率	1.444
锥区直径( $\mu\text{m}$ )	60



**Figure 2.** Optical field distribution of untapered and tapered fiber structures (Left: Untapered; Right: Tapered)

**图 2.** 未拉锥与拉锥结构的光场分布图(左: 未拉锥; 右: 拉锥)

传感器的具体制备流程如图 3 所示。首先将两段 NCF (YOFCCCL1010-A)与 SMF (Corning SM-28e)进行熔接, 制得 NCF-SMF-NCF 复合组件; 然后将该组件与同规格的两根 SMF 进行熔接, 构建形成 SMF-NCF-SMF-NCF-SMF 的光纤结构。最后对中间 SMF 段进行拉锥处理。为精准调控拉锥工艺参数, 采用熔融拉锥机(KF-FBT)钨丝加热的方法对 SMF 段熔融拉锥, 熔融拉锥机如图 4(a)所示。具体操作流程为: 先将光纤固定于拉锥机专用夹具, 而后设置如图 4(b)所示的锥区结构参数, 设定拉锥平台以 5 mm/s 的恒定速率进行双向同步拉伸, 最后完成对锥区的制作。图 4(c)所示为拉锥后的光纤在显微镜下的结构示意图。

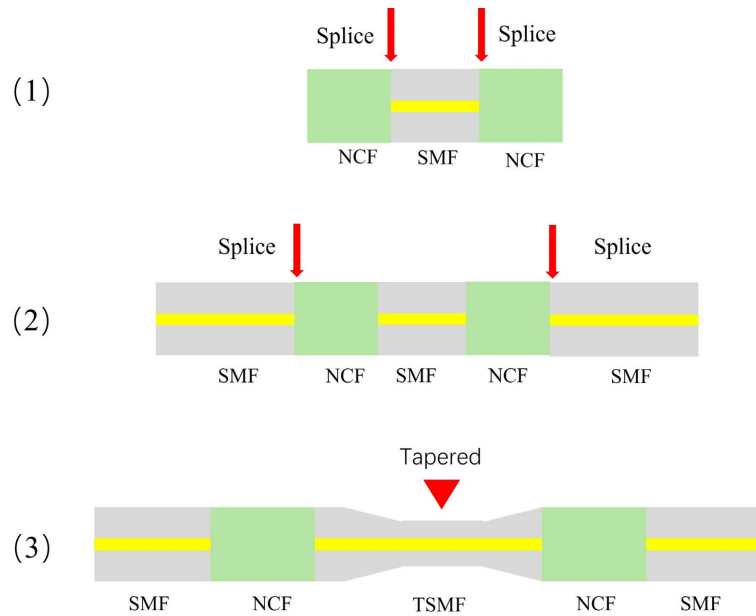


Figure 3. Fabrication process of the sensor  
图 3. 传感器制作流程

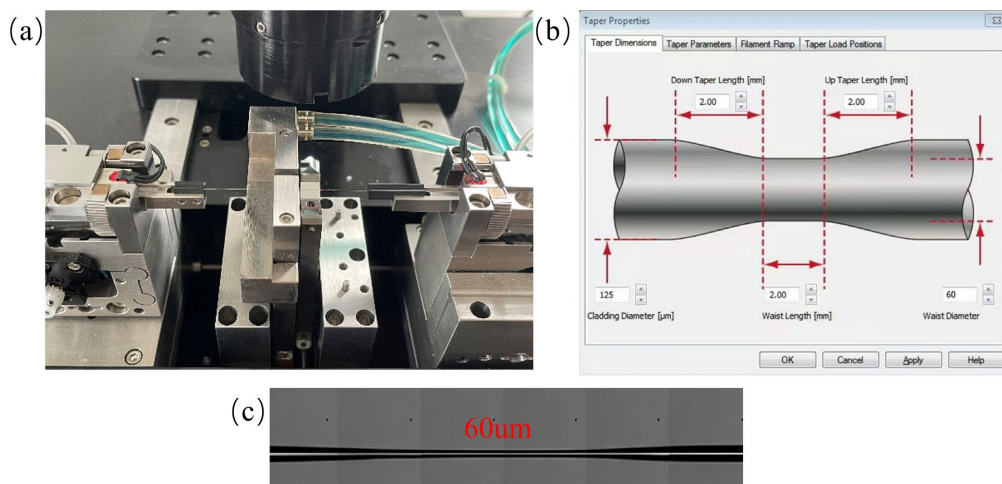
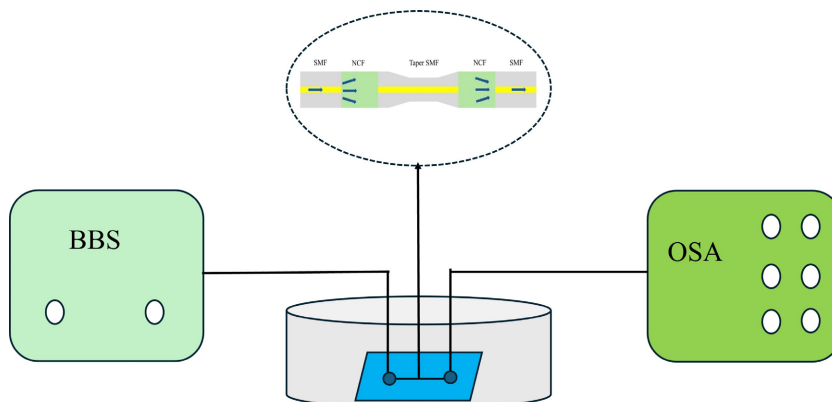


Figure 4. (a) Fusion Splicer & Taper Machine GPX-3400; (b) Parameters of the tapered region; (c) Schematic diagram of the optical fiber under a microscope  
图 4. (a) 熔融拉锥机 GPX-3400; (b) 锥区参数; (c) 显微镜下拉锥后光纤的示意图

#### 4. 分析与讨论

折射率实验系统的搭建如图 5 所示，该折射率传感实验系统以 BBS 为光源，光源发出的光经单模光纤耦合进入传感器，当外界环境的折射率发生变化时，倏逝场效应会使干涉光谱特征发生改变，OSA 接收并输出光谱信号，从而实现对环境折射率的检测。

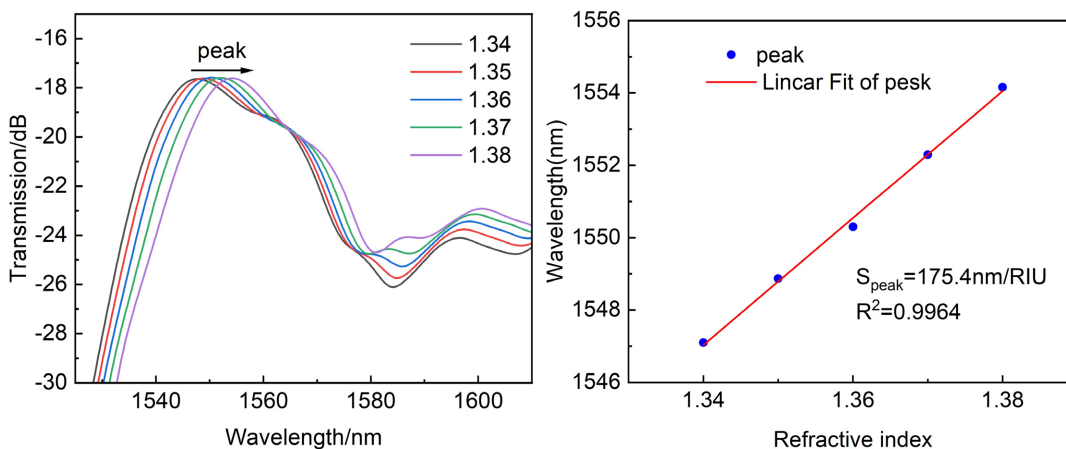
实验中将制备完成的传感器水平铺设于石英玻璃片表面，锥区敏感区居中放置，避开玻璃片边缘，在传感器两端非敏感区进行固定，操作时轻拉光纤使传感器呈一字型自然伸直，避免过度用力导致光纤弯曲，确保锥区敏感区完全裸露，不遮挡其与待测介质的接触界面，而后将传感器分别与 BBS 和 OSA 连接。



**Figure 5.** Refractive index experimental system  
**图 5.** 折射率实验系统

实验中以甘油(纯度  $\geq 99.7\%$ )与去离子水为原料, 通过阿贝尔折射仪(京飞仪器科技有限公司)配得折射率分别为 1.34、1.35、1.36、1.37、1.38 的甘油溶液。实验全程在  $25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$  恒定室温下开展, 首先利用移液管抽取目标浓度的甘油溶液, 缓慢滴至传感器表面, 确保锥区敏感区完全被溶液覆盖且无气泡残留。滴加后静置 1~2 分钟, 实时观测光谱仪输出的透射光谱, 当干涉峰值波长响应稳定时, 记录光谱数据。单次测量结束后, 用去离子水冲洗以去除残留溶液, 将传感器静置, 直至完全干燥, 避免溶液残留对后续测试产生交叉污染。重复上述操作, 依次记录不同折射率下的透射光谱。

图 6 呈现了该传感器在折射率为 1.34~1.38 区间内的折射率传感响应曲线。随着环境折射率的升高, 传感器光谱中的特征透射谷呈现明显的红移现象, 实验结果显示, 当锥区的腰径为  $60\ \mu\text{m}$  时, 传感器的折射率灵敏度为  $174.4\ \text{nm}/\text{RIU}$ , 线性决定系数  $R^2$  为 0.9964, 这表明该系列传感器在实现高灵敏度的同时, 仍保持了优异的线性响应表现。



**Figure 6.** Spectra and fitting curve of refractive index sensing characteristics  
**图 6.** 折射率传感特性光谱图与拟合曲线

### 5. 结论

本文提出并制备了一种基于锥形 SMF 结构的 MZI 折射率传感器。通过引入锥区结构, 实现了倏逝场的增强, 有效提升了折射率灵敏度。实验制备了锥区腰径为  $60\ \mu\text{m}$  的传感器, 并系统测试了折射率响应特性。测试结果表明, 该传感器在 1.34~1.38 折射率范围内灵敏度可达  $175.4\ \text{nm}/\text{RIU}$ , 且具备优异的线

性响应。该传感器兼具结构紧凑、制备工艺简便的优势，为生物医学检测、环境监测等领域提供了一种性能可靠、实用性强的新型传感方案。

## 基金项目

山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC010204)、山东省重点研发计划项目(公益类)(2019GSF111011)、泰山学者岗位资助项目(tsqn202306254)。

## 参考文献

- [1] Li, X., Chen, N., Zhou, X., Zhang, Y., Zhao, Y., Nguyen, L.V., *et al.* (2022) *In-Situ* DNA Detection with an Interferometric-Type Optical Sensor Based on Tapered Exposed Core Microstructured Optical Fiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **351**, Article 130942. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130942>
- [2] Wang, Y., Tong, R.J., Zhao, K.J., *et al.* (2023) Optical Fiber Sensor Based on SPR and MZI for Seawater Salinity and Temperature Measurement. *Optics & Laser Technology*, **162**, Article 109315. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109315>
- [3] Li, L., Zhang, Y.N., Wang, M., *et al.* (2024) Real-time *In-Situ* Thermal Monitoring of Gelation Process of Polyacrylamide Hydrogel Using PDMS Sensitized In-Fiber MZI. *Optics & Laser Technology*, **176**, Article 110930. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110930>
- [4] 余振芳, 李云飞, 郭明亮, 等. 基于多模干涉的光纤传感器研究进展[J]. 光通信研究, 2025(1): 59-66.
- [5] 顾波波. 新型结构光纤传感器及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [6] 丁小平, 王薇, 付连春. 光纤传感器的分类及其应用原理[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(6): 1176-1178.
- [7] 何茂刚, 何欣欣, 张颖, 等. 马赫-曾德尔干涉法测量液体折射率的改进[J]. 热科学与技术, 2017, 16(2): 96-101.
- [8] 陆杭林, 邵来鹏, 张帆, 等. 光纤 MZI 传感器传感机理与传感应用研究进展[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(6): 1-17.
- [9] Mumtaz, F., Dai, Y. and Ashraf, M.A. (2020) Inter-Cross De-Modulated Refractive Index and Temperature Sensor by an Etched Multi-Core Fiber of a MZI Structure. *Journal of Lightwave Technology*, **38**, 6948-6953. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.3014857>
- [10] Liu, Y., Wei, C., Shen, Z., Ren, Y., Wen, J. and Feng, Y. (2023) Multi-Tapered Polarization-Maintaining Fiber-Optic Sensor for Refractive Index and Temperature Measurements. *Optical Fiber Technology*, **81**, Article 103569. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103569>