

基于光纤 LP_{01} - LP_{11} 模式干涉温升负响应的游标增敏

孟德帅 贾鹏 任宗祥 文晓艳 武瑞妮 林国辉 吕海飞 黎敏 李明钰

Vernier sensitization based on optical fiber LP_{01} - LP_{11} modal interference temperature rise negative response

MENG Deshuai, JIA Peng, REN Zongxiang, WEN Xiaoyan, WU Ruini, LIN Guohui, LYU Haifei, LI Min, LI Mingyu

引用本文:

孟德帅, 贾鹏, 任宗祥, 等. 基于光纤 LP_{01} - LP_{11} 模式干涉温升负响应的游标增敏[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 187-195. DOI: 10.5768/JAO202647.0103002

MENG Deshuai, JIA Peng, REN Zongxiang, et al. Vernier sensitization based on optical fiber LP_{01} - LP_{11} modal interference temperature rise negative response[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 187-195. DOI: 10.5768/JAO202647.0103002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0103002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于游标效应的双芯光子晶体光纤温度传感器

Dual-core photonic crystal fiber temperature sensor based on vernier effect

应用光学. 2022, 43(3): 551-556 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0308002>

基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics based on coreless- few mode-coreless optical fiber structure

应用光学. 2022, 43(1): 167-170 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108003>

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462-468 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器

Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission

应用光学. 2025, 46(2): 458-464 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0208001>

双动镜平动式与双动臂旋转式干涉仪动态性能对比

Comparative on dynamic performance of double-moving mirror translational interferometer and double-moving arm rotary interferometer

应用光学. 2025, 46(5): 988-995 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501005>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755-760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0187-09

引用格式: 孟德帅, 贾鹏, 任宗祥, 等. 基于光纤 LP_{01} - LP_{11} 模式干涉温升负响应的游标增敏 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 187-195.

MENG Deshuai, JIA Peng, REN Zongxiang, et al. Vernier sensitization based on optical fiber LP_{01} - LP_{11} modal interference temperature rise negative response[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 187-195.



在线阅读

基于光纤 LP_{01} - LP_{11} 模式干涉温升 负响应的游标增敏

孟德帅¹, 贾 鹏², 任宗祥², 文晓艳¹, 武瑞妮³, 林国辉⁴, 吕海飞¹, 黎 敏¹, 李明钰¹

(1. 武汉理工大学 物理与力学学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中交三公局第三工程有限公司, 湖北 武汉 430000; 3. 武汉华工正源光子技术有限公司 无线电信产品部, 湖北 武汉 430223; 4. 中兴通讯公司 无线及算力产品经营部, 广东 深圳 518000)

摘 要: 研究了两模光纤 (two-mode fiber, TMF) LP_{01} 、 LP_{11} 模式特性、模式干涉及其游标增敏特性。对两个模式的色散与温敏特性进行了仿真, 揭示了 LP_{01} - LP_{11} 模式干涉的温度负响应特性 (随温度升高干涉谱蓝移), 灵敏度为 $-0.068 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。制作了基于该干涉的两模光纤马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI), 其温度灵敏度实测为 $-0.058 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。将该干涉仪分别与两种温度正响应的干涉仪级联形成增强型游标, 一种是紫外固化胶 (即 UV 胶) 法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Pérot interferometer, FPI), 另一种是单模光纤 (single-mode fiber, SMF) MZI。在 $30^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 范围内, TMF MZI 与 UV 胶 FPI 级联结构温度响应为正, 灵敏度为 $1.450 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 是单元 TMF MZI 的 25 倍, 单元 UV 胶 FPI 的 8 倍。而 TMF MZI 与 SMF MZI 级联的温度响应为负, 灵敏度为 $-0.794 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 是单元 TMF MZI 的 13.7 倍, 单元 SMF MZI 的 18.5 倍。分析了两种级联结构温度响应趋势相反的原因, 即级联结构光谱包络的漂移方向与自由光谱范围较小的单元干涉仪一致。本研究可为少模光纤的研究和应用提供理论与实验依据。

关键词: 马赫-曾德尔干涉仪; 两模光纤; 模间干涉; 游标效应

中图分类号: TN913.7; O436

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0103002

Vernier sensitization based on optical fiber LP_{01} - LP_{11} modal interference temperature rise negative response

MENG Deshuai¹, JIA Peng², REN Zongxiang², WEN Xiaoyan¹, WU Ruini³, LIN Guohui⁴,
LYU Haifei¹, LI Min¹, LI Mingyu¹

(1. School of Physics and Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070 China; 2. The Third Engineering Co., Ltd. of the Third Highway Engineering of China Communications Construction Company, Wuhan 430000, China; 3. Wireless Telecom Product Division, Wuhan HGGenuine Optics Tech Co., Ltd, Wuhan 430223, China; 4. Wireless and Computing Product Operation Division, ZTE Corporation, Shenzhen 518000, China)

Abstract: This thesis investigates the modal characteristics of the LP_{01} and LP_{11} modes in a two-mode fiber (TMF), their modal interference behavior, and the corresponding vernier effect-based sensitivity enhancement characteristics. The dispersion and temperature sensitivity of the two modes were simulated, revealing that the LP_{01} - LP_{11} modal interference exhibits a negative temperature response, specifically, the interference spectrum undergoes a blue shift with increasing temperature, with a sensitivity of $-0.068 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. A TMF-based Mach-

收稿日期: 2025-01-14; 修回日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (62075174)

第一作者: 孟德帅, E-mail: 285411@whut.edu.cn

通信作者: 文晓艳, E-mail: wenxy@whut.edu.cn

Zehnder interferometer (MZI) was fabricated using this interference mechanism, and its measured temperature sensitivity was determined to be $-0.058 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. This TMF MZI was cascaded separately with two types of interferometers featuring positive temperature responses to construct enhanced vernier structures: one is an ultraviolet (UV)-cured adhesive Fabry-Pérot interferometer (FPI), and the other is a single-mode fiber (SMF) MZI. Within the temperature range of 30°C to 80°C , the cascaded structure of the TMF MZI and UV-cured adhesive FPI exhibited a positive temperature response with a sensitivity of $1.450 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, which is 25 times that of the standalone TMF MZI and 8 times that of the standalone UV-cured adhesive FPI. In contrast, the cascaded structure of the TMF MZI and SMF MZI showed a negative temperature response with a sensitivity of $-0.794 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, which is 13.7 times that of the standalone TMF MZI and 18.5 times that of the standalone SMF MZI. The underlying reason for the opposite temperature response trends of the two cascaded structures was analyzed: the drift direction of the spectral envelope of the cascaded structure is consistent with that of the individual interferometer with a smaller free spectral range. The findings of this study provide solid theoretical and experimental foundations for the further research and practical application of few-mode fibers.

Key words: Mach-Zehnder interferometer; two-mode fiber; modal interference; vernier effect

引 言

全光纤模式干涉传感器可在一根光纤内产生模式干涉,并可集成分束、干涉腔与合束等功能,因而受到广泛关注^[1-6]。有多种类型的光纤可用于构建全光纤模式干涉仪,包括多模光纤^[7]、细芯光纤^[8-9]、空心光纤^[10-11]、无芯光纤^[12-13]和色散补偿光纤^[14]等。基于多模光纤的干涉仪因激发了多个模式,模式数量难以控制,模间干涉成分复杂,光谱畸变严重,基于细芯光纤的传感器衰减损耗大,而空芯光纤和无芯光纤制作成本高,影响大规模应用,色散补偿光纤的补偿效果在不同环境条件下效果不一。而只允许少数几个模式传输的少模光纤,其相对于单模光纤,可传输模式数量更多,基于不同模式光传输的差异能获取更丰富的信息;而相对于多模光纤,其模式数量又大大减少,有利于规整模间干涉光谱,提高对比度^[15-21]。其独特的有限个模式及模间干涉特性,为探究新型光纤温度传感器提供了新路径、新方法。

以最简单的两模光纤为例,其纤芯仅可容纳两个模式 LP_{01} 和 LP_{11} 的传输。基于 LP_{01} - LP_{11} 干涉的传感器近年来受到了广泛关注。JIN Y 等提出了一种基于锥形孔辅助的双芯光纤的折射率传感结构,该结构采用拉锥技术实现光纤 LP_{01} - LP_{11} 的模间干涉,可实现不同溶液折射率的测量,在折射率为 1.335~1.360 的范围内,其灵敏度为 $936.69 \text{ nm}/\text{RIU}$,其温度串扰较低^[22]。刘强等基于少模光纤 LP_{01} - LP_{11} 的模间干涉制作了单模-少模-单模光纤传感器,其温度响应为正,灵敏度为 $0.158 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ^[23]。

张静等制作的无芯-少模-无芯结构,利用少模光纤和无芯光纤实现 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的激发与耦合,温度灵敏度为 $0.068 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ^[24]。齐跃峰等利用少模光纤制作了一种单模-少模光纤 FBG-单模结构,温度灵敏度 $-0.062 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ^[25]。

在实际应用中,如制药、生物化工等精细化工领域,对温度实施精确控制与监测至关重要。少模光纤温度传感器凭借其高灵敏度与抗电磁干扰特性,能够稳定、精准地获取温度数据,避免因温度监测误差导致的产品质量问题与安全事故。因此,少模光纤温度传感器具有有较大研究意义和研究价值。

本文研究了两模光纤 LP_{01} 、 LP_{11} 的模式特性、模间干涉及两模光纤与不同干涉仪的级联特性,并且对 LP_{01} 、 LP_{11} 的色散与温敏特性进行了仿真,构造了基于 LP_{01} - LP_{11} 模间干涉的 TMF MZI。此外,本文研究了 TMF MZI 的游标增敏特性,将该干涉仪分别与两种温度正响应的干涉仪级联以形成增强型游标,一种是 UV 胶 FPI,另一种是 SMF MZI,获得了显著的增敏效果。分析了两种级联结构温度响应趋势相反的原因,总结了其规律,为少模光纤的研究及应用提供理论与实验依据。

1 原理与仿真

在基于 In-Line MZI 的模式干涉中,两种模式干涉的输出光强可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi L(n_1 - n_2)}{\lambda}\right] \quad (1)$$

式中: I_1 和 I_2 为参与干涉的模式强度; $n_1 - n_2$ 为模式间的有效折射率差; L 为传感区的干涉腔长度; λ 为入射光波长。对于宽谱光源, 当波长满足以下条件时, 干涉光强最小。

$$\lambda_i = \frac{2L(n_1 - n_2)}{2i + 1} \quad (2)$$

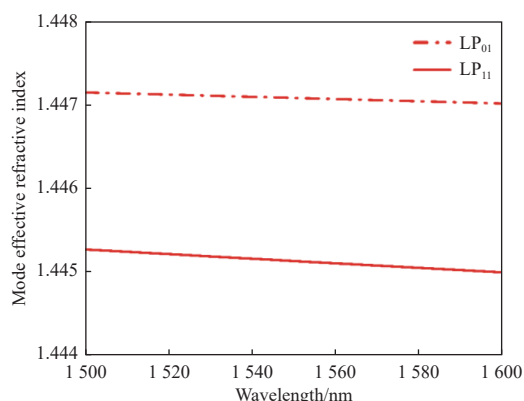
干涉光谱对环境温度的响应为

$$\frac{d\lambda_i}{dT} = \lambda_i \left[\frac{1}{n_1 - n_2} \frac{\partial(n_1 - n_2)}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right] \quad (3)$$

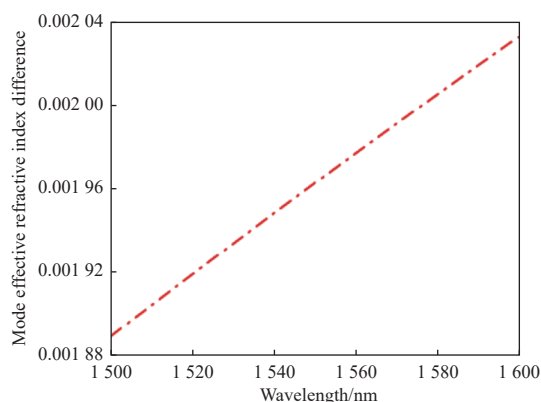
式中: 括号里的第一项表示有效折射率差随温度的变化, 即热光系数; 第二项是腔长随温度的变化, 即热膨胀系数; T 为温度。可以得出, 基于模式干涉的光纤传感器, 其温度灵敏度与热光系数和热膨胀系数有关。

本研究所选择的少模光纤为两模光纤, 故对两模光纤中 LP₀₁、LP₁₁ 两个模式的色散及温度特性进行仿真研究。仿真参数为: TMF 纤芯直径为 14 μm , 包层直径为 125 μm 。纤芯折射率为 1.449, 包层折射率为 1.444。两者热光系数分别为 $8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 热膨胀系数为石英光纤的热膨胀系数, 为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。首先, 我们研究了两种模式在光纤传播过程中的色散特性。图 1(a) 为 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的有效折射率随入射光波长的变化, 可以看出, LP₀₁ 模式的有效折射率明显高于 LP₁₁ 模式。随着入射光波长的增加, LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式之间的有效折射率差逐渐增大, 如图 1(b) 所示。此外, 我们探究了环境温度变化对 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式有效折射率及有效折射率差的影响, 如图 1(c) 和图 1(d) 所示。结果表明, 随着温度的升高, 两种模式的有效折射率均增大, 有效折射率差也在增大。

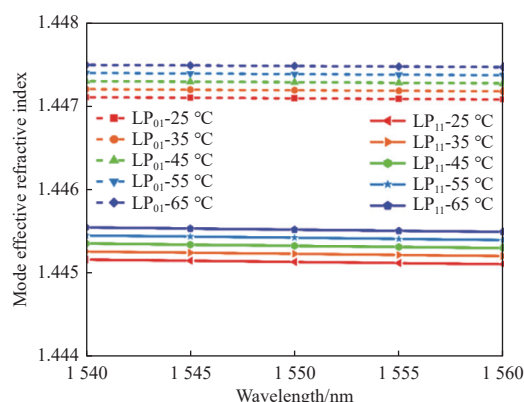
我们进一步对 TMF MZI 中 LP₀₁-LP₁₁ 模间干涉谱及其温度特性进行了仿真研究, 干涉仪由两



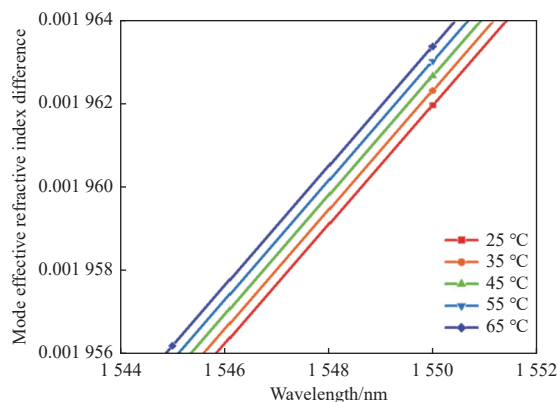
(a) TMF 中 LP₀₁、LP₁₁ 模式有效折射率的色散特性



(b) LP₀₁、LP₁₁ 模式有效折射率差的色散特性



(c) TMF 中 LP₀₁、LP₁₁ 模式有效折射率随温度的变化

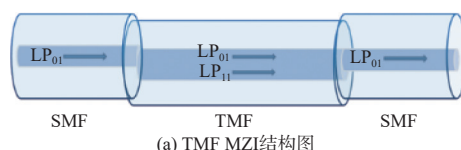


(d) LP₀₁、LP₁₁ 模式有效折射率差随温度的变化

图 1 TMF LP₀₁ 与 LP₁₁ 模式特性仿真结果

Fig. 1 Simulation results of TMF LP₀₁ and LP₁₁ mode characteristics

段 SMF 夹一段 TMF 构成, 如图 2(a) 所示。其温度响应如图 2(b) 所示, 可见随环境温度升高干涉谱发生蓝移, 表明其对温度呈现负响应, 灵敏度为 $-0.068 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。



(a) TMF MZI 结构图

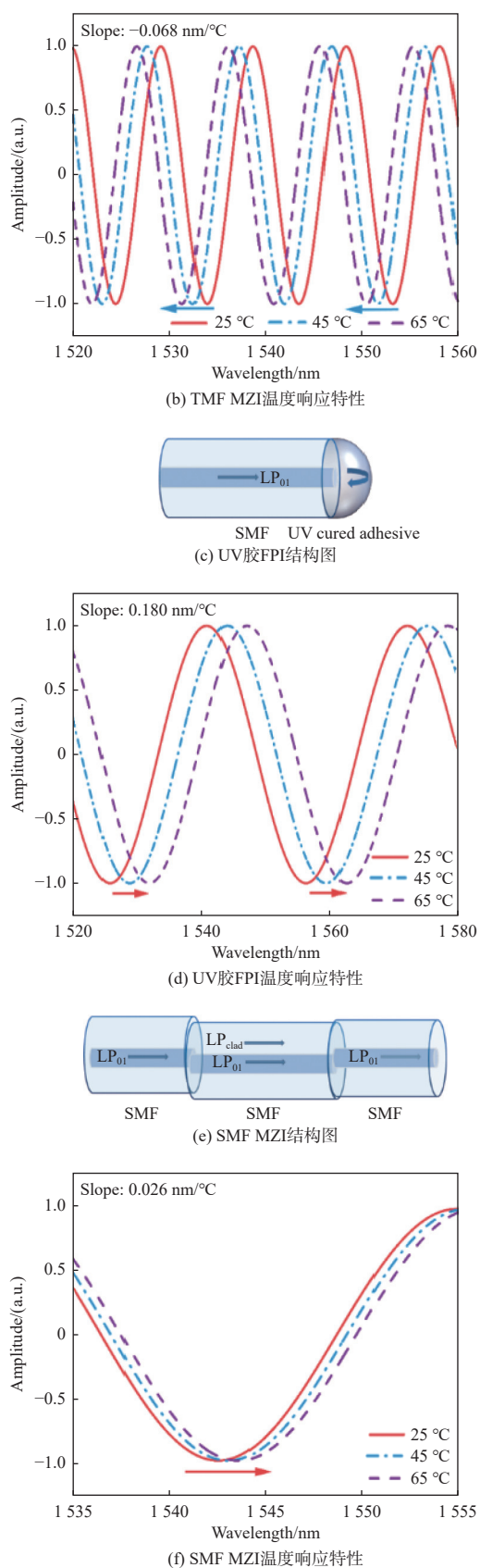


图 2 光纤传感结构及其温度响应仿真

Fig. 2 Optical fiber sensing structure and its temperature response simulation

通过级联两个 FSR 相近、响应趋势相反的单元干涉仪可以获得增强型游标效应^[26]。为研究 TMF MZI 的游标增敏特性,设计制作了两种不同的单元干涉仪与 TMF MZI 单元干涉仪级联,一种是单模光纤 MZI,另一种是 UV 胶 FPI,两者的温度响应均与 TMF MZI 相反,即随温度上升红移^[26-27]。

基于 UV 胶 NOA 61 的 FPI 结构示意图如图 2(c)所示。所用 NOA61 的折射率为 1.504,热膨胀系数为 $2.2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,热光系数为 $-1.17 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。仿真计算了 UV 胶 FPI 的温度响应特性,结果如图 2(d)所示,其干涉光谱随温度上升红移,温度灵敏度为 $0.180 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。

基于单模光纤的 MZI 结构如图 2(e)所示。单模光纤仿真参数为:纤芯直径为 $8.2 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,纤芯和包层折射率分别为 1.4682 和 1.4628,此外,两者的热光系数分别为 $8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,热膨胀系数为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。单模光纤的包层模有多种,本次仿真选取最为常见的 LP_{02} 模。仿真的单模光纤芯包干涉温度响应特性如图 2(f)所示,其干涉光谱温度响应为正,温度灵敏度为 $0.026 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。

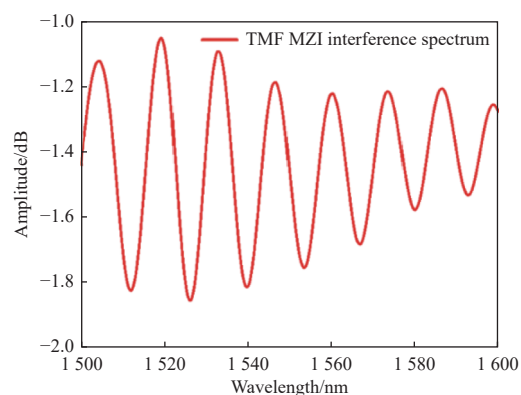
2 级联传感器制作与性能测试

2.1 TMF MZI 制作

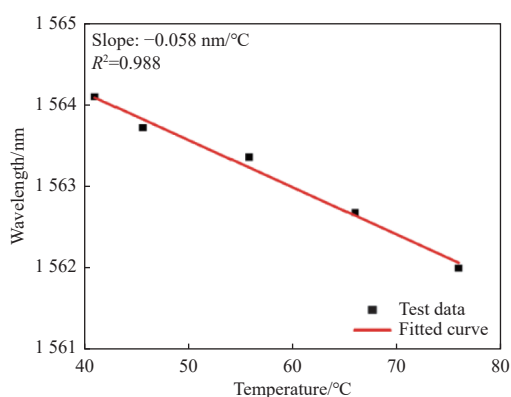
首先,我们制作 TMF MZI 单元干涉仪。SMF 与 TMF 利用熔接机(Fujikura FSM-60S)偏芯熔接,偏芯量为 $3 \mu\text{m}$,放电时间为 2 000 ms,放电强度为标准。熔接好后,将 TMF 切割至 33 cm,并和另一段切割好的 SMF 手动偏芯熔接,偏芯量与放电强度与上述相同。将制作好的 TMF MZI 放在温度控制箱(RGDS-100,苏瑞环试)中进行温度响应测试。以超发光二极管(super-luminescent light-emitting diode, SLED)作为入射光源,由光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370C)接收光信号。TMF MZI 的光谱如图 3(a)所示,随着温度的升高,干涉光谱蓝移,拟合后的温度灵敏度为 $-0.058 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,如图 3(b)所示,温度响应趋势与仿真图 2(b)一致。

2.2 TMF MZI 与 UV 胶 FPI 级联

然后,我们制作 UV 胶 FPI。在 CCD(NA-CCD-HDMI-2M, 勤确科技)监测下,在光纤端面滴加 UV 胶并用紫外灯固化,固化后的 UV 胶 FPI 腔长为 $94 \mu\text{m}$ 。为了让 UV 胶完全老化,将制作好的 UV 胶 FPI 探头置于 50°C 温箱中加热 12 h。UV 胶



(a) 干涉谱



(b) 温度响应

图3 TMF MZI 的干涉谱及其温度响应

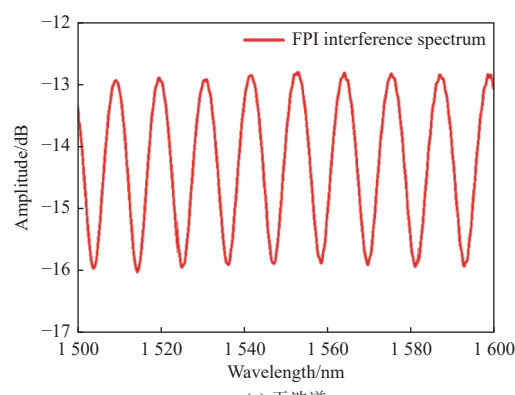
Fig. 3 Measured interference spectrum of TMF based MZI and its temperature response

FPI 单元干涉仪的干涉光谱如图 4(a) 所示, 随着温度的升高, 干涉光谱红移, 拟合后的温度灵敏度为 0.175 nm/°C, 如图 4(b) 所示。温度响应趋势与仿真图 2(d) 一致。

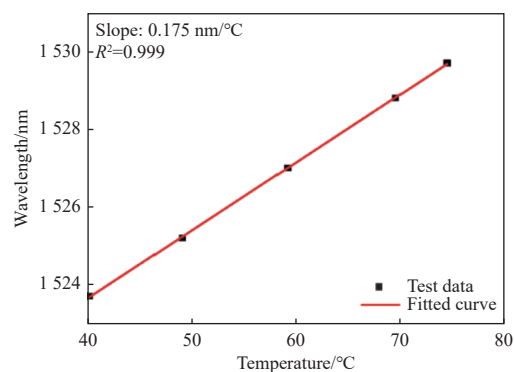
将 TMF MZI 和 UV 胶 FPI 级联并测试其温度响应特性。级联干涉光谱如图 5(a) 所示。对级联光谱进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 获得两个干涉仪的空间频率, 如图 5(b) 所示。然后提取两个干涉仪的空间频率峰进行反傅里叶变换得到包络谱^[28], 如图 5(c) 所示。包络谱随温度的变化如图 5(d) 所示, 拟合得到温度灵敏度为 1.450 nm/°C, 如图 5(e) 所示。可见, TMF MZI 与 UV 胶 FPI 级联结构的温度灵敏度相对于两个单元结构均有大幅提升, 相对于单一的 UV 胶 FPI 提升了 8 倍, 相对于单一的 TMF MZI 提升了 25 倍。

2.3 TMF MZI 与 SMF MZI 级联

进一步制作 SMF MZI 单元干涉仪与 TMF MZI 级联。SMF MZI 为 3 段 SMF 偏芯 6 μm 熔接构成,



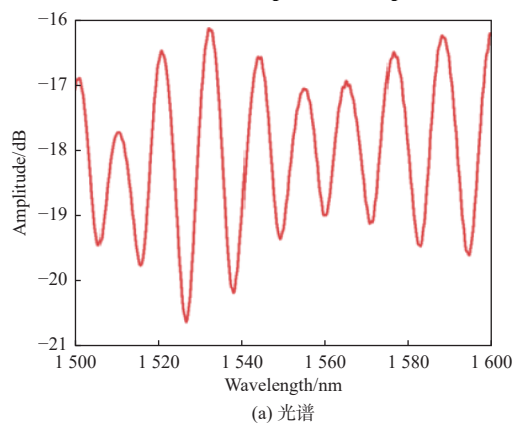
(a) 干涉谱



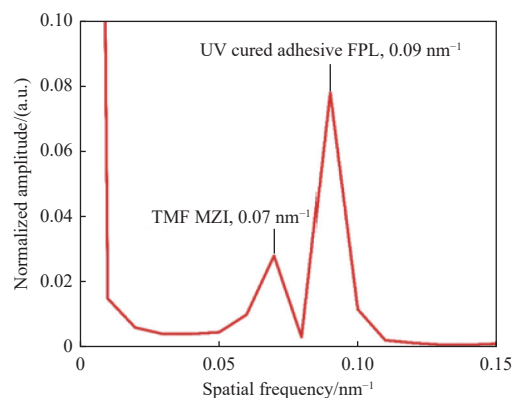
(b) 温度响应

图4 UV 胶 FPI 的干涉谱及其温度响应

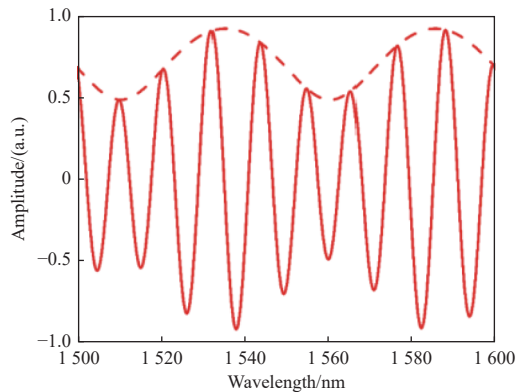
Fig. 4 Measured interference spectrum of UV cured adhesive FPI and its temperature response



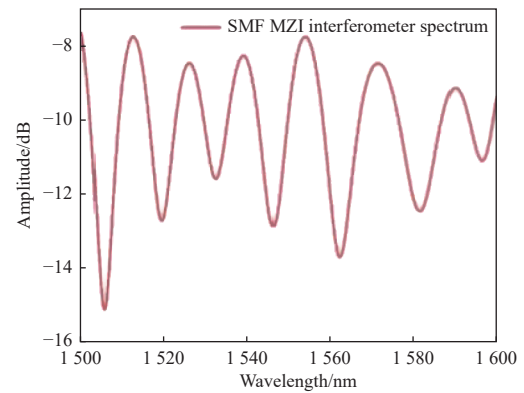
(a) 光谱



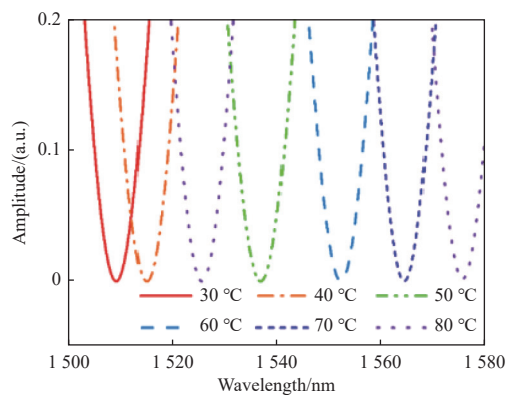
(b) 空间频谱



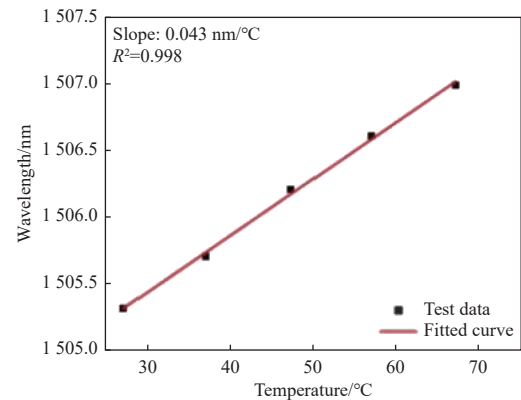
(c) 包络谱



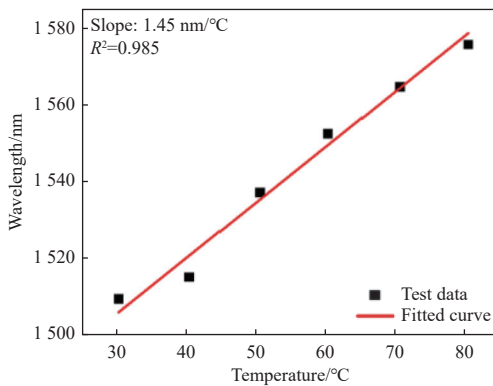
(a) 干涉谱



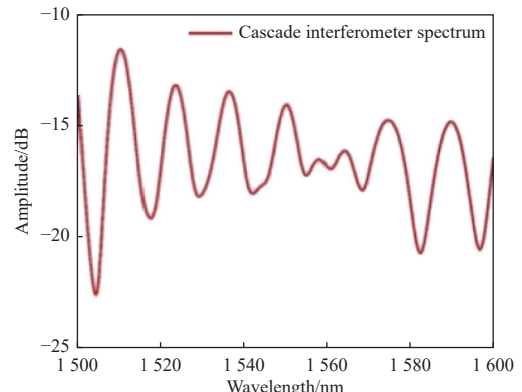
(d) 光谱随温度的变化



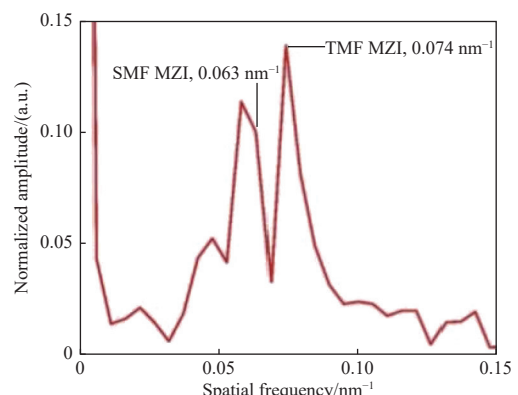
(b) 温度响应



(e) 温度响应灵敏度拟合结果



(c) 光谱



(d) 空间频谱

图5 TMF MZI-UV 胶 FPI 级联结构及温度响应结果

Fig. 5 Cascaded structure of TMF MZI-UV adhesive FPI and its temperature response results

放电时间为 2 000 ms, 放电强度为标准, 中间段 SMF 的长度为 4 cm。SMF MZI 单元干涉仪的光谱如图 6(a) 所示, 随着温度的升高, 干涉光谱红移, 拟合后的温度灵敏度为 0.043 nm/°C, 如图 6(b) 所示, 温度响应趋势与仿真图 2(f) 一致。

将 TMF MZI 和 SMF MZI 级联, 然后对级联结构进行温度响应测试。级联干涉光谱如图 6(c) 所示, 空间频谱如图 6(d) 所示, 级联干涉仪包络的温度响应如图 6(e) 所示, 拟合后的温度灵敏度为

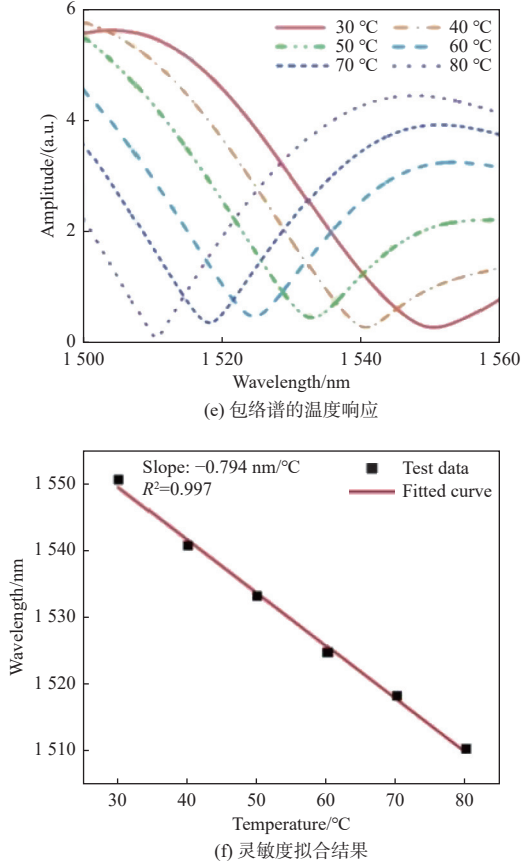


图6 TMF MZI-SMF MZI 级联结构及温度响应结果

Fig. 6 Cascaded structure of TMF MZI-SMF MZI and its temperature response results

-0.794 nm/°C, 如图 6(f) 所示。可见, TMF MZI 与 SMF MZI 级联结构的温度灵敏度相对于两个单元结构均有大幅提升, 相对于 SMF MZI 单元干涉仪提升了 18.5 倍, 相对于 TMF MZI 单元干涉仪提升了 13.7 倍。

2.4 两种级联结构温度响应特性对比

上述实验结果表明, 两个级联结构的温度响应趋势相反, 接下来对该差异进行分析。如果级联结构中的两个单元干涉仪都用作传感器, 则其包络灵敏度 S 为

$$S = S_1 \cdot M_1 + S_2 \cdot M_2 \quad (4)$$

式中: S_1 和 S_2 分别为两个单元干涉仪的灵敏度; M_1 和 M_2 分别为级联结构相对于两个单元干涉仪的放大倍数, 其表达式分别为

$$M_1 = \frac{F_{SR2}}{F_{SR2} - F_{SR1}} \quad (5)$$

$$M_2 = \frac{F_{SR1}}{F_{SR1} - F_{SR2}} \quad (6)$$

式中, F_{SR1} 和 F_{SR2} 分别为两个传感干涉仪的自由光谱范围。自由光谱范围的倒数即为空间频率 ξ ,

则(4)式可改写为

$$S = \frac{S_1}{\xi_1 - \xi_2} \left(\xi_1 - \frac{S_2}{S_1} \xi_2 \right) \quad (7)$$

式中, ξ_1 和 ξ_2 分别为两个单元干涉仪的空间频率。

对于增强型游标效应, 两个单元干涉仪的温度响应趋势相反, 即 S_1 和 S_2 一正一负。则由(7)式可知, S 的正负(即包络随温度的漂移方向)只和 S_1 、 $\xi_1 - \xi_2$ 有关。

根据游标增敏原理, ξ_1 和 ξ_2 接近但不相等。当 $\xi_1 > \xi_2$ 时, $\xi_1 - \xi_2 > 0$, 此时 S 的正负和 S_1 同号, 即若传感干涉仪 1 温度响应为正, 则包络温度响应亦为正, 反之亦然。而当 $\xi_1 < \xi_2$ 时, $\xi_1 - \xi_2 < 0$, 此时 S 的正负和 S_1 异号, 即若传感干涉仪 1 温度响应为正, 则包络温度响应为负。

对于 TMF MZI 级联 UV 胶 FPI 结构, 令 TMF MZI 为干涉仪 1, 其空间频率为 ξ_1 , UV 胶 FPI 为干涉仪 2, 空间频率为 ξ_2 。级联结构的频率如图 5(b) 所示, 可知 $\xi_1 < \xi_2$ 。由图 3(b) 可知, TMF MZI 单元干涉仪温度响应为负, 而由图 5(e) 可知, 级联结构温度响应为正, 两者相反, 即实验与上述理论分析一致。

类似的, 对于 TMF MZI 级联 SMF MZI 结构, 令 TMF MZI 为干涉仪 1, 其空间频率为 ξ_1 , SMF MZI 为干涉仪 2, 其空间频率为 ξ_2 。级联结构频率如图 6(d) 所示, 可知 $\xi_1 > \xi_2$, 由图 6(f) 可知, 级联包络温度响应为负, 与干涉仪 1 相同, 再次说明实验与理论一致。

以上分析说明, 对于增强型游标(两个单元干涉仪均参与传感且两者响应趋势相反), 级联包络的响应趋势与两个干涉仪中空间频率数值较大的单元干涉仪一致。因此, 可以通过调控单元干涉仪空间频率的大小, 即 F_{SR} 的大小, 来调控级联光谱包络的漂移方向, 继而调控光谱及传感结构。

3 结论

本文研究了两模光纤 LP₀₁、LP₁₁ 的模式特性及模间干涉特性, 构造了基于该干涉的 TMF MZI, 将该干涉仪分别与两种温度正响应的干涉仪级联以形成增强型游标, 一种是 UV 胶 FPI, 另一种是 SMF MZI。两者都实现了温度灵敏度的大幅提升, 但响应趋势存在差异, 对此分析了两种级联结构温度响应趋势相反的原因。本文研究可为光纤模式的研究、控制及应用提供理论与实验依据。

参考文献:

- [1] ZHANG F, QI B, SU B, et al. High sensitivity all-fiber bend sensor based on modal interferences in a ring core fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(5): 051201.
- [2] TODA K, KISHIZAWA K, TOYODA Y, et al. Characterization of modal interference in multi-core polymer optical fibers and its application to temperature sensing[J]. *Applied Physics Express*, 2022, 15(7): 072002.
- [3] ZHANG L, XIONG Y, REN N, et al. Design and temperature sensing performance of a modal interference sensor with the core mismatch-offset structure[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2021, 42(5): 569-579.
- [4] LEE C L, LEE L H, HWANG H E, et al. Highly sensitive air-gap fiber Fabry-Pérot interferometers based on polymer-filled hollow core fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(2): 149-151.
- [5] YANG K, HE J, WANG Y, et al. Ultrasensitive temperature sensor based on a fiber Fabry-Pérot interferometer created in a mercury-filled silica tube[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 6803509.
- [6] TAN X L, GENG Y F, LI X J, et al. UV-curable polymer microhemisphere-based fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 7800208.
- [7] YANG X, LUO B, SHI S, et al. High-sensitivity temperature sensor based on sandwich multimode fiber Mach-Zehnder interferometer with virtual vernier effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 1706002.
- [8] HU C, JIANG C, LI L, et al. Thin-core fiber-based Mach-Zehnder interferometer sensor for monitoring temperature, pressure, and humidity[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2024, 52(5): 536-554.
- [9] LU Z, DONG R, LIU C. Temperature and humidity sensor based on tapered thin-core fiber coated with graphene quantum dots-polyvinyl alcohol[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(1): 244-251.
- [10] RODRIGUES G L, CORDEIRO C, AMRANI C, et al. High-temperature sensing using a hollow-core fiber with thick cladding tubes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(16): 25769-25776.
- [11] GAO J, JIANG C, LI L, et al. High sensitivity temperature and gas pressure sensor based on PDMS sealed tapered hollow-core fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2024, 82: 103634.
- [12] ZHU X, QIAN J, LIU W, et al. Temperature and curvature microfiber Mach-Zehnder interferometer sensor based on double peanut-shaped structures and tapered coreless fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(6): 433-436.
- [13] ZHU X, WANG Y, QIAN J, et al. A curvature Mach-Zehnder interferometer fiber sensor based on triple cladding and coreless fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(15): 929-932.
- [14] WANG F, WANG Q, JIANG Y, et al. Effect of irradiation on temperature performance of dispersion-compensation no-core cascade optical-fiber sensor coated with polydimethylsiloxane film[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33(9): 10-20.
- [15] ZHAO Y, GUO Y, CHEN S, et al. Fiber specklegram sensor based on reflective mode rotation in few-mode fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(16): 25763-25768.
- [16] GUO J, WANG W, DONG L, et al. Highly sensitive magnetic field sensor based on few-mode fiber interferometry[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(10): 16179-16187.
- [17] IRAWATI N, GRÜNER-NIELSEN L, RISHØJ L S, et al. Strain and temperature sensor using few-mode fiber, designing guidelines and results[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 80: 103465.
- [18] YU H, TONG Z, ZHANG W, et al. Temperature-insensitive refractive index sensor based on a spindle-shaped few-mode fiber modal interferometer[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(11): 2727-2733.
- [19] 裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 42-53.
PEI Li, WANG Jianshuai, ZHENG Jingjing, et al. Research on specialty and application of space-division-multiplexing fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 42-53.
- [20] 刘强, 毕卫红, 付兴虎, 等. 基于少模光纤长周期光栅叠栅的折射率传感特性[J]. *光子学报*, 2018, 47(1): 99-105.
LIU Qiang, BI Weihong, FU Xinghu, et al. Refractive index sensing characteristic of superimposed long period gratings on few mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 99-105.
- [21] 邵伯成, 黄勇林. 少模光纤光栅温度和应变双参量传感

- 研究[J]. *光通信研究*, 2024, 2024(4): 61-65.
- SHAO Bocheng, HUANG Yonglin. Research on temperature and strain dual parameter sensing of few mode fiber grating[J]. *Study on Optical Communications*, 2024, 2024(4): 61-65.
- [22] JIN Y, YANG J, GUAN C Y, et al. Dual-channel refractive index sensor based on coupling between LP₀₁ and LP₁₁ modes in the tapered hole-assisted dual-core fiber[J]. *Optics express*, 2022, 30(18): 31634-31642.
- [23] 刘强, 毕卫红, 王思文, 等. 基于 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式干涉的少模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0206001.
- LIU Qiang, BI Weihong, WANG Siwen, et al. Few-mode fiber temperature sensor based on interference between LP₀₁ and LP₁₁ modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0206001.
- [24] 张静, 李永倩. 基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 167-170.
- ZHANG Jing, LI Yongqian. Temperature sensing characteristics based on coreless-few mode-coreless optical fiber structure[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 167-170.
- [25] 齐跃峰, 贾翠, 许丽媛, 等. 基于少模光纤组合传感器的温度及折射率传感特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 855-860.
- QI Yuefeng, JIA Cui, XU Liyuan, et al. Temperature and refractive index sensing properties based on combined sensor for few mode fiber[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 855-860.
- [26] WEN X, LIN G, JIA X, et al. Modal interference discrepancy and its application to a modified fiber Mach-Zehnder vernier interferometer[J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 42875-42891.
- [27] LEE C L, YOU Y W, DAI J H, et al. Hygroscopic polymer microcavity fiber Fizeau interferometer incorporating a fiber Bragg grating for simultaneously sensing humidity and temperature[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 222: 339-346.
- [28] 武瑞妮, 林国辉, 吕海飞, 等. 少模光纤模式反射迈克尔孙干涉仪及其游标增敏应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(19): 1906006.
- WU Ruini, LIN Guohui, LYU Haifei, et al. Few-mode fiber mode reflection Michelson interferometer and its vernier sensitization application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19): 1906006.