

引用:石聪,庞清顺,张丽强,等. 基于波导空隙型马赫曾德干涉器的光纤扭转传感器研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(6): 874-881.

Citation:SHI Cong, PANG Qingshun, ZHANG Liqiang, YAO Yicun Research on fiber-optic torsion sensor based on air-gap-embedded waveguide Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(6):874-881.

文章编号 1672-6634(2025)06-0874-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025030024

基于波导空隙型马赫曾德干涉器的 光纤扭转传感器研究

石聪,庞清顺,张丽强,姚一村

(聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059)

摘要 包层波导马赫-曾德干涉器具有光谱规律性好、灵敏度高等特点,适用于多种光纤传感器结构。本工作中,飞秒激光微加工技术被用于在标准单模光纤中直接刻写光波导,构建包层波导内联马赫-曾德干涉器。通过在波导结构中留存空隙,实现了对干涉光谱对比度的提升。对该传感器进行扭转实验时,其强度灵敏度和波长灵敏度在 $-13.08\sim 13.08$ rad/m 范围内分别可达 -1.007 dB/(rad $\cdot$ m $^{-1}$)和 1.478 nm/(rad $\cdot$ m $^{-1}$)。与传统结构相比,空隙的留存使该传感器对扭转响应更加灵敏,且对轴向应变实现了补偿,实现了较低的交叉响应,在高灵敏光纤扭转传感领域具有潜在的应用价值。

关键词 飞秒激光微加工;马赫-曾德干涉器;光纤扭转传感

中图分类号 TP212

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research on fiber-optic torsion sensor based on air-gap-embedded waveguide Mach- Zehnder interferometer

SHI Cong, PANG Qingshun, ZHANG Liqiang, YAO Yicun

(School of Physical Sciences and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Cladding waveguide Mach-Zehnder interferometers (MZIs) exhibit advantages such as well-defined spectral characteristics and high sensitivity, making them suitable for various fiber-optic sensor configurations. In this work, femtosecond laser micromachining technology was employed to directly inscribe optical waveguides within standard single-mode fibers, constructing an inline cladding waveguide MZI. By intentionally introducing air gaps within the waveguide structure, the contrast of the interference spectrum was significantly enhanced. During torsion experiments, the sensor demonstrated intensity and wavelength sensitivities of up to -1.007 dB/(rad $\cdot$ m $^{-1}$) and 1.478 nm/(rad $\cdot$ m $^{-1}$), respectively, within the range

收稿日期:2025-03-27

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022MF258);聊城大学博士科研基金项目(318052168)资助

通信作者:姚一村,男,汉族,博士,副教授,研究方向:光纤传感,E-mail:yaoyicun@lcu.edu.cn.

of -13.08 rad/m to 13.08 rad/m . Compared with conventional structures, the incorporation of air gaps not only improved the torsion response sensitivity but also achieved compensation for axial strain, resulting in reduced cross-sensitivity. This configuration shows promising potential for high-sensitivity fiber-optic torsion sensing applications in fields such as structural health monitoring and biomimetic robotics.

Keywords femtosecond laser micromachining; Mach-Zehnder interferometer; fiber-optic torsion sensing

0 引言

随着工业领域对高精度机械参量测量的需求日益增长,光纤扭转传感器因其小型化、抗电磁干扰及高灵敏度的特性备受关注^[1-2]。目前,光纤扭转传感器主要可分为两大类:光纤光栅传感器^[3-5]和光纤干涉型传感器^[5-8]。光纤光栅扭转传感器(如长周期光栅、光纤布拉格光栅)因其成熟的制造工艺和稳定性,在扭转传感领域占据重要地位。然而,此类传感器普遍面临灵敏度受限、温度交叉敏感等问题,限制了其在复杂环境下的应用。相比之下,以马赫-曾德尔干涉仪(MZI)为代表的光纤干涉型传感器,通过光程差调制实现传感,具有灵敏度高、干涉光谱规律、设计灵活等优势,在扭转传感领域展现出独特潜力。

近年来,飞秒激光直写波导技术因其高精度三维加工能力、结构设计灵活、材料低损伤等特性为光纤干涉器件的制备提供了革新性方案^[9-11]。例如2022年,Yang等人利用飞秒激光加工技术制造出一种与二阶光纤布拉格光栅级联的新型全内反射波导,但需要通过光纤布拉格光栅以补偿温度交叉敏感的问题^[9]。2023年,Zhao等人采用飞秒激光加工技术直接在单模光纤的芯包层边界上写入直线波导,相比于与传统的掩模版技术显著减少了制造时间,在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的扭转角范围内,基于强度调制的扭转灵敏度可达 $5.763 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$,但应变和温度串扰问题依然明显^[10]。上述研究表明,现有的飞秒激光加工 MZI 传感器仍面临干涉谷对比度低、温度敏感性与应变串扰等瓶颈。因此,亟需开发一种高对比度、高灵敏度、且抗温度和应变干扰的光纤扭转传感器。

针对上述问题,本文介绍了一种基于包层波导的空隙型光纤内联 MZI 传感器。利用飞秒激光直写技术在光纤包层中刻写波导 MZI 结构^[12-14],并通过在两段直波导间留存未刻写空隙的方式,显著提升了干涉光谱的对比度与扭转灵敏度。实验表明,该结构打破了标准单模光纤的对称性,增强了传感器的偏振依赖性^[15-17],空隙的留存补偿了轴向应变干扰,其在 -13.08 rad/m 到 13.08 rad/m 的扭转范围内强度灵敏度可达 $-1.007 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$,波长灵敏度可达 $1.478 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 且对轴向应变具有较低的交叉响应。相比传统无空隙结构,其性能提升显著,为建筑监测、仿生机械等领域的精密扭转测量提供了新思路。

1 波导空隙型光纤内联马赫曾德尔干涉器的工作原理

波导空隙型光纤内联马赫曾德尔干涉器原理图如图1所示。包层波导刻写在一根标准单模光纤(SMF 28e)中,纤芯中的光经模式耦合将部分光耦合到包层波导,经包层波导和空隙的传播后再耦合回光纤芯与纤芯中剩余的光发生干涉,从而形成典型的双光束马赫-曾德尔干涉。

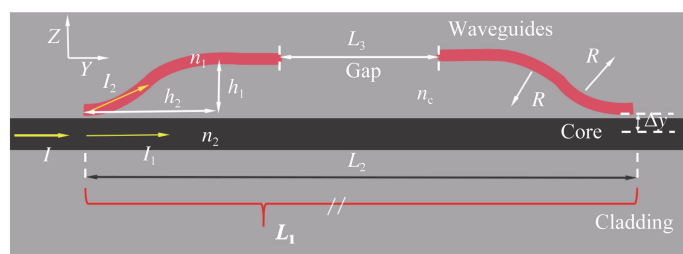


图1 波导空隙型光纤内联马赫曾德尔干涉器原理图

Fig. 1 Schematic of an in-fiber air-gap-embedded waveguide Mach-Zehnder interferometer

假设通过桥状波导传播的光的强度为 I_1 ,而在光纤纤心中的剩余部分为 I_2 。所得到的干涉强度将被表示为^[18]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (n_1 L_1 + n_c L_3 - n_2 L_2) \right], \quad (1)$$

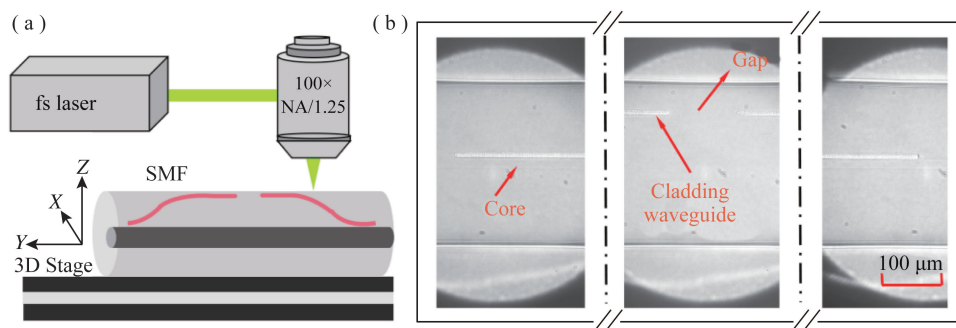
式中 n_1 、 n_2 和 n_c 分别表示波导模、光纤芯模和包层模的有效折射率。 L_1 、 L_2 、 L_3 分别为波导总长度, 光纤芯长度和两段直波导中间留存空隙的长度。该式表明干涉光谱呈现典型的余弦函数周期性规律, 其干涉谷对应的干涉波长可以通过等式(2)推导出^[19]:

$$\lambda_{\text{Dip}} = \frac{2(n_1 L_1 + n_c L_3 - n_2 L_2)}{2m + 1}, \quad (2)$$

式中 λ_{Dip} 代表干涉光谱谷(光强最低位置)的波长, m 代表干涉光谱谷的阶数。干涉光谱的余弦特性表明, 干涉谷波长随相位差线性漂移, 而空隙长度的引入通过调控包层模光程($n_c \times L_3$)提供了额外的自由度。当传感器受扭转时, 由于未刻写的空隙部分(光纤包层)具有与波导不同的色散响应, 因此一定程度上补偿了应变引起的总光程变化, 从而抑制了应变交叉响应。

2 波导空隙型光纤内联马赫曾德尔干涉器的制作

基于实验设计与理论分析, 选用了掺镱固体激光器作为光源在单模光纤中刻写包层波导。该激光器的中心波长设定为 520 nm, 重复频率设定为 200 kHz, 通过 100×油浸物镜(数值孔径为 1.25)聚焦, 结合半波片与格兰-泰勒棱镜调节单脉冲能量至 1.2 μJ , 控制激光以 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的扫描速度一次性完成单线波导的刻写, 飞秒激光刻写包层波导的过程如图 2(a)所示^[20]。所制备的干涉器由两段 S 型弯曲波导和两段与光纤芯平行中间留存空隙的直波导构成, 总长度(L_2)为 7 819.16 μm , 单段 S 型弯曲波导首尾两端在 Z 方向的间距(h_1)为 40 μm , 在 Y 方向的间距(h_2)为 1 909.58 μm , S 型弯曲波导与纤芯中心的偏移量(Δy)为 7 μm 。两段直波导的长度分别为 1 950 μm , 两段直波导之间的空隙(L_3)为 100 μm 。中间留存 100 μm 空隙的包层波导光纤内联 MZI 在 40 倍物镜下的照片如图 2(b)所示。



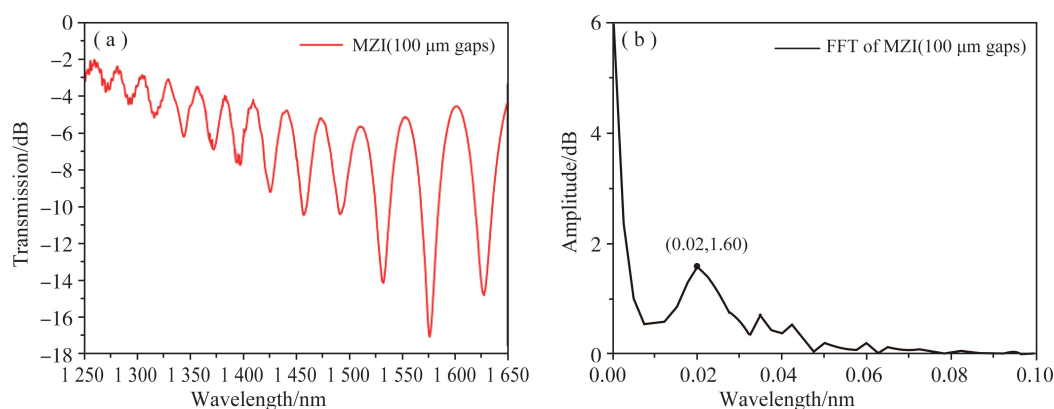
注:(a)飞秒激光直写包层波导示意图;(b)中间留存 100 μm 空隙的包层波导光纤内联 MZI 在 40 倍物镜下的照片。

图 2 中间留存 100 μm 空隙的包层波导光纤内联 MZI 飞秒激光刻写及实拍图

Fig. 2 Femtosecond laser writing and real-shot images of in-line MZI in cladding waveguide fiber with a 100 μm gap reserved in the middle

采用超连续谱光源(Superluminescent Diode, SLD)作为输入, 利用光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)测量中间留存 100 μm 空隙的光纤包层内联 MZI 的透射光谱, 如图 3(a)所示。该透射光谱呈现规律的余弦函数特性且干涉谷的最强对比度可达 12 dB, 干涉现象明显。经快速傅里叶变换后的空间频谱如图 3(b)所示, 在空间频谱中存在单一的主峰, 表明该传感结构主要涉及双光束干涉。

为了进一步验证参与干涉信号的来源, 将甘油与水按一定比例混合, 配置折射率为 1.37~1.42 的多组溶液进行液体折射率传感测试, 测试结果表明光谱漂移量小于 0.1 nm, 光谱基本稳定。因此可以说明波导空隙型光纤内联马赫曾德尔干涉器中的光不会泄露到包层之外, 不存在额外的包层模式作用, 干涉信号主要来自于光纤纤芯和包层波导。



注:(a)中间留存 100 μm 空隙包层波导光纤内联 MZI 的透射光谱;(b)中间留存 100 μm 空隙包层波导光纤内联 MZI 的空间频谱。

图 3 中间留存 100 μm 空隙包层波导光纤内联 MZI 的透射光谱及空间频谱

Fig. 3 Transmission spectrum and spatial frequency spectrum of in-line MZI in cladding waveguide fiber with a 100 μm gap reserved in the middle

3 扭转传感实验与结果分析

为探究波导空隙型光纤内联 MZI 的传感特性,搭建了如图 4 所示的测试装置。将制备的传感器夹持于高精度旋转夹具上,两夹具间距固定为 20 cm,传感区域居中以消除弯曲干扰。测试过程中,光纤始终保持拉直状态,固定一侧夹具,另一侧逐步施加扭转,记录光谱变化。

空隙的长短将直接影响光的传播和透射谱的对比度,在扭转传感实验之前,制备了与中间留存 100 μm 空隙的包层波导光纤内联 MZI 其他参数相同,空隙长度不同(0 μm 、200 μm)的两组传感器并分别测试其透射光谱,如图 5(a)所示,中间留存 100 μm 空隙的包层波导光纤内联 MZI 在 1 560 nm 附近透射谱最强对比度更高,可达 12.5 dB,高于 0 μm (8.7 dB)和 200 μm (2 dB),更容易区分扭转信号与噪声干扰。

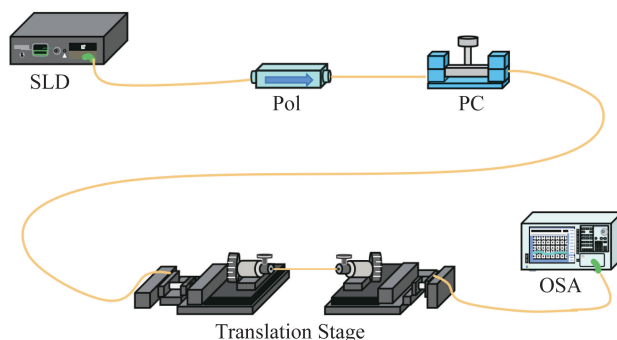
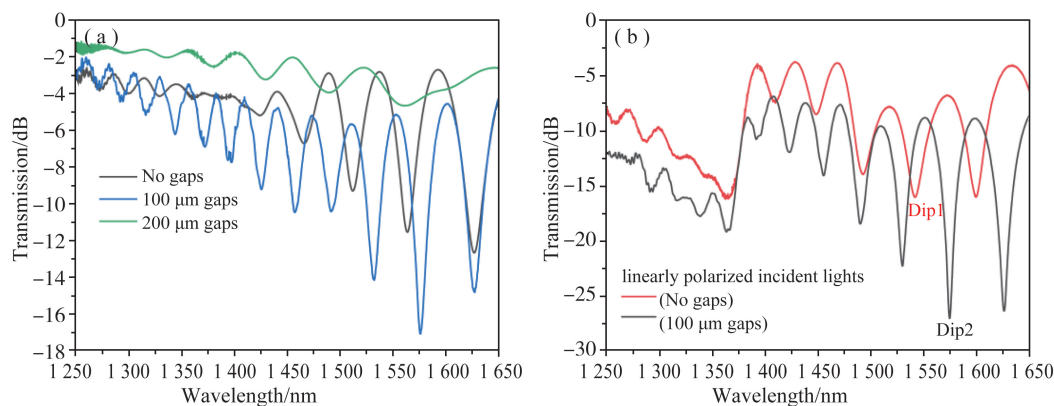


图 4 扭转响应的测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the test setup for torsion response

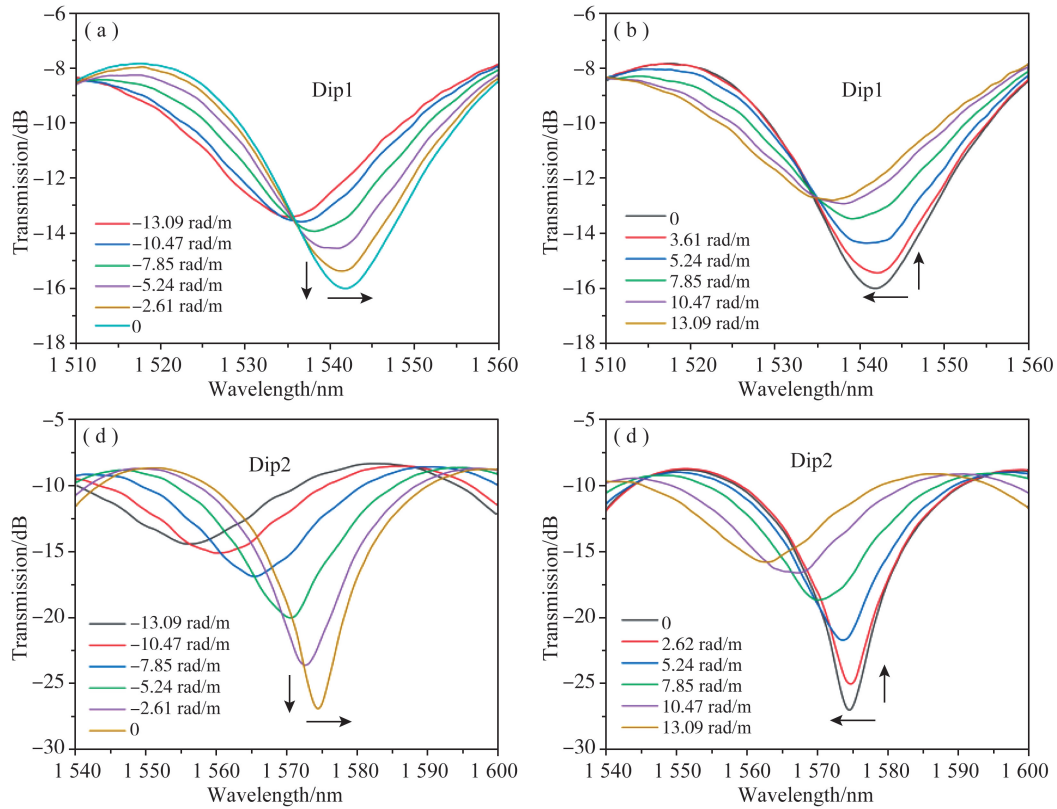


注:(a)不同空隙的包层波导光纤内联 MZI 透射谱;(b)接入偏振器后无空隙、中间留存 100 μm 空隙的光纤内联 MZI 的透射谱,其中 Dip1 和 Dip2 分别表示 1 560 nm 附近的最低干涉谷。

图 5 不同空隙长度的包层波导光纤内联 MZI 在接入偏振器前后的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra of in-line MZIs in cladding waveguide fibers with different gap lengths before and after inserting polarizers

将中间无空隙和 $100\ \mu\text{m}$ 空隙的光纤内联 MZI 按图 4 装置连接,通过串联起偏器(Pol)和偏振控制器(PC)调控入射光场的偏振态。避免不同偏振态的入射光在波导中传播时,其有效折射率和模场分布发生变化,进而影响干涉光谱的对比度和相位差。通过起偏器将入射光转换为线偏振光,消除非偏振光引起的随机干扰,通过偏振控制器调节偏振态,使干涉仪工作在最佳偏振条件下,从而最大化干涉谷对比度。如图 5(b) 所示,在 $1560\ \text{nm}$ 附近干涉谷 Dip1 的对比度由 $8.7\ \text{dB}$ 提升至 $9.2\ \text{dB}$;Dip2 的对比度由 $12.5\ \text{dB}$ 提升至 $18.2\ \text{dB}$ 。



注:(a)、(b) 分别表示无空隙的包层波导光纤内联 MZI 的扭转量从 $-13.08\ \text{rad/m}$ 增加到 0 , 0 增加到 $13.08\ \text{rad/m}$ 时 Dip1 的强度及波长变化;(c)、(d) 分别表示中间留存 $100\ \mu\text{m}$ 空隙的包层波导光纤内联 MZI 的扭转量从 $-13.08\ \text{rad/m}$ 增加到 0 , 0 增加到 $13.08\ \text{rad/m}$ 时 Dip2 的强度及波长变化。

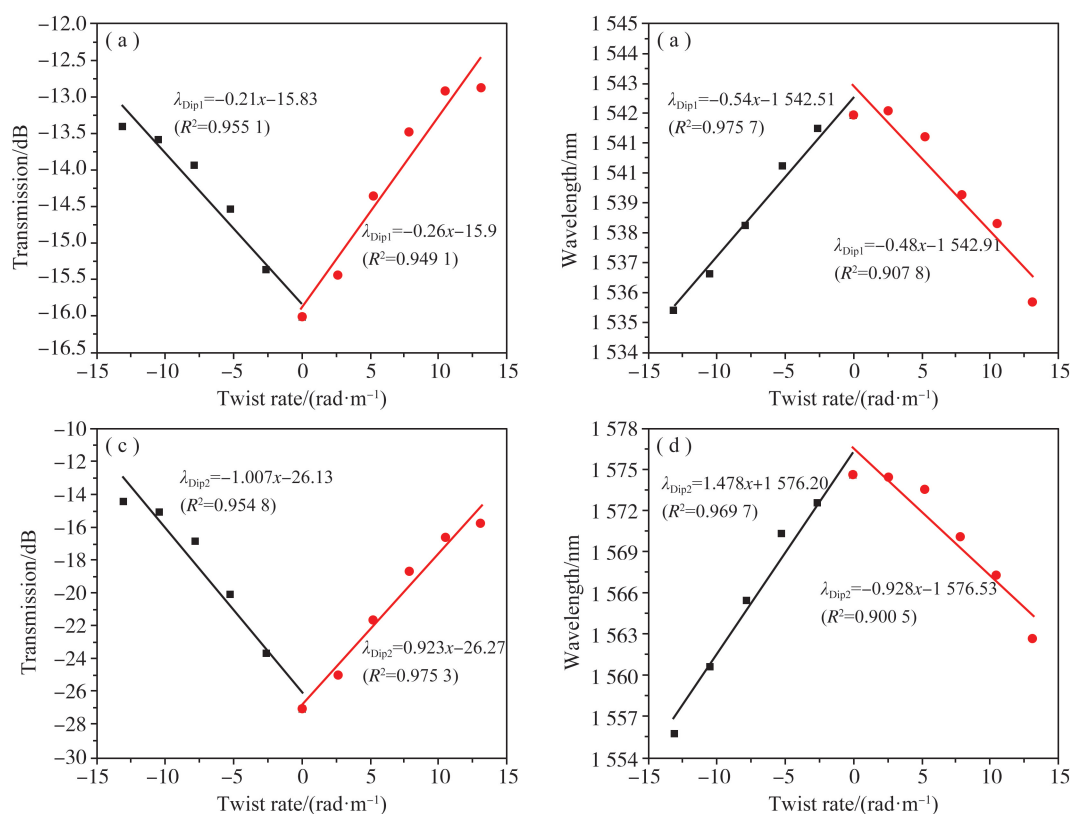
图 6 中间无空隙及留存 $100\ \mu\text{m}$ 空隙包层波导光纤内联 MZI 在 $-13.08\ \text{rad/m}$ 到 $13.08\ \text{rad/m}$ 扭转范围内干涉谷的强度及波长变化

Fig. 6 The intensity and wavelength changes of interference valleys in in-line MZIs of cladding waveguide fibers with no gap and a $100\ \mu\text{m}$ gap in the middle within the torsion range from $-13.08\ \text{rad/m}$ to $13.08\ \text{rad/m}$

如图 6(a~b)所示,当中间无空隙的包层波导内联 MZI 的扭转量从 $-13.09\ \text{rad/m}$ 增加到 0 时,Dip1 的强度下降 $2.611\ \text{dB}$;光谱向长波长方向漂移 $6.53\ \text{nm}$ 。当扭转量从 0 增加到 $13.09\ \text{rad/m}$ 时,Dip1 的强度上升 $3.132\ \text{dB}$;光谱向短波长方向漂移 $6.23\ \text{nm}$ 。图 7(a~b)分别表示 Dip1 的强度及波长与扭转率之间的关系,可以看出,Dip1 的强度和波长的偏移与扭转率的变化呈线性关系,Dip1 的强度灵敏度分别为 $-0.21\ \text{dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 和 $0.26\ \text{dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$,波长灵敏度分别为 $0.54\ \text{nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 和 $-0.48\ \text{nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ [21]。

如图 6(c~d)所示,当中间留存 $100\ \mu\text{m}$ 空隙的包层波导光纤内联 MZI 的扭转量从 $-13.08\ \text{rad/m}$ 增加到 0 ,Dip2 的强度下降 $12.685\ \text{dB}$,光谱向长波长方向漂移 $18.92\ \text{nm}$ 。当扭转量从 0 增加到 $13.08\ \text{rad/m}$,Dip2 的强度上升 $11.311\ \text{dB}$,光谱向长波长方向漂移 $11.97\ \text{nm}$ 。通过图 7(c~d)可以看出,Dip2 的强度和波长的偏移与扭转率的变化同样呈线性关系,Dip2 基于强度的扭转灵敏度提升到 $-1.007\ \text{dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 和 $0.923\ \text{dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$,相比 Dip1 分别提升的 4.8 倍和 3.6 倍;Dip2 的波长灵敏度提升到 $1.478\ \text{nm}/$

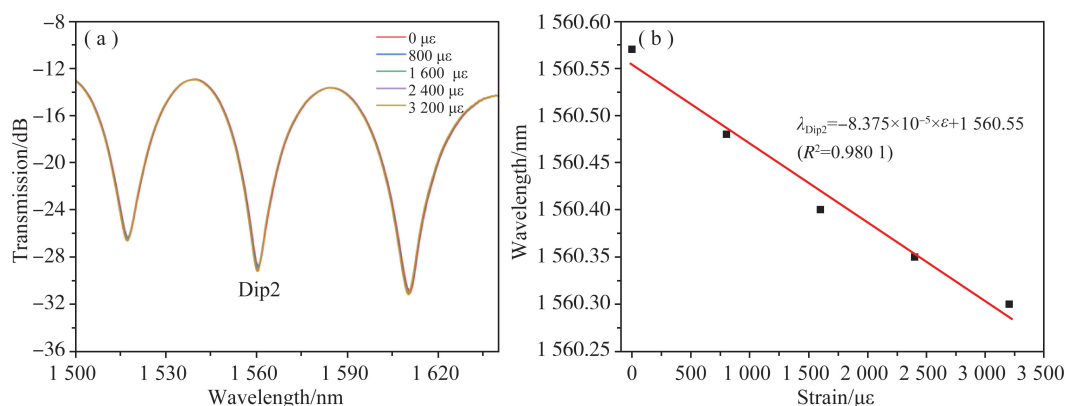
($\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$) 和 $-0.928 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$, 相比 Dip1 分别提升 2.7 倍和 2 倍。实验结果表明, 中间留存 $100 \mu\text{m}$ 空隙的包层波导光纤内联 MZI 施加扭转时响应更加明显, 中间留存 $100 \mu\text{m}$ 空隙的包层波导光纤内联 MZI 扭转传感器灵敏度明显高于无空隙的传感结构, 能够通过检测谐振强度变化和倾角波长偏移两方面来确定扭转物理量的变化。



注: (a) Dip1 强度与扭转率的扭转响应; (b) Dip1 波长偏移与扭转率的扭转响应; (c) Dip2 强度与扭转率的扭转响应; (d) Dip2 波长偏移与扭转率的扭转响应

图 7 -13.08 rad/m 到 13.08 rad/m 扭转范围内, Dip1 与 Dip2 的强度及波长偏移与扭转率的扭转响应

Fig. 7 The torsion response of the intensity and wavelength shift of Dip1 and Dip2 to the torsion rate within the range from -13.08 rad/m to 13.08 rad/m



注: (a) 中间留存 $100 \mu\text{m}$ 空隙包层波导光纤内联 MZI 对轴向应变的串扰; (b) Dip2 对 0 到 $3200 \mu\epsilon$ 的轴向应变的敏感性。

图 8 中间留存 $100 \mu\text{m}$ 空隙包层波导光纤内联 MZI 的轴向应变串扰及轴向应变敏感性

Fig. 8 Axial strain crosstalk and axial strain sensitivity of in-line MZI in cladding waveguide fiber with a $100 \mu\text{m}$ gap reserved in the middle

其次,由于光纤扭转传感器通常受到轴向应变的干扰,还测试了中间留存 100 μm 空隙的包层波导光纤内联 MZI 对轴向应变的串扰,将传感器头固定在同轴的两个支架上,将其一边固定,另一个边沿轴向向外移动。当轴向应变从 0 增加到 3 200 $\mu\epsilon$ 时,如图 8(a)所示,Dip2 的波长和强度变化在可见的透射光谱上变化不明显,经拟合计算可知其轴向应变敏感性为 $-8.375 \times 10^{-5} \text{ nm}/\mu\epsilon$,轴向应变响应非常弱,远小于传感器本身的扭转灵敏度,因此该传感器的轴向应变串扰几乎可以忽略,如图 8(b)所示。

4 结论

本研究基于飞秒激光微加工技术,在标准单模光纤包层中直接刻写光波导,成功构建了一种新型包层波导空隙型光纤内联马赫-曾德干涉器(MZI)。实验结果表明,该结构打破了标准单模光纤的对称性,增强了传感器的偏振依赖性,通过在两段直波导间留存 100 μm 空隙,实现了干涉光谱对比度的提升,空隙部分能够在一定程度上抑制应变交叉响应。在 -13.08 rad/m 至 13.08 rad/m 的扭转范围内,传感器的强度灵敏度与波长灵敏度分别可达 $-1.007 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 和 $1.478 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$,相较于传统无空隙结构,灵敏度分别提升了 4.8 倍(强度)和 2.7 倍(波长)。此外,轴向应变测试表明,器件在 $0 \sim 3\,200 \mu\epsilon$ 范围内几乎轴向应变响应非常弱,验证了其优异的轴向应变不敏感性。本研究提出的空隙型 MZI 传感器兼具高灵敏度、低交叉响应和紧凑结构等优势,为建筑健康监测、仿生机械臂精密控制等领域的动态扭转测量提供了创新解决方案,具有重要的工程应用潜力。

参 考 文 献

- [1] CAUCHETEUR C, GUO T, ALBERT J. Polarization-assisted fiber Bragg grating sensors: Tutorial and review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 35(16): 3311-3322.
- [2] ZHANG H L, WU Z F, SHUM P P, et al. Highly sensitive strain sensor based on helical structure combined with Mach-Zehnder interferometer in multicore fiber[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 46633.
- [3] CEBALLOS-HERRERA D E, TORRES-GÓMEZ I, MARTÍNEZ-RÍOS A, et al. Torsion sensing characteristics of mechanically induced long-period holey fiber gratings[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(7): 1200-1205.
- [4] GAO R, JIANG Y, JIANG L. Multi-phase-shifted helical long period fiber grating based temperature-insensitive optical twist sensor[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15697-15709.
- [5] XIAN L L, WANG P, LI H P. Power-interrogated and simultaneous measurement of temperature and torsion using paired helical long-period fiber gratings with opposite helicities[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20260-20267.
- [6] FRAZÃO O, SILVA R M, KOBELKE J, et al. Temperature and strain-independent torsion sensor using a fiber loop mirror based on suspended twin-core fiber[J]. Optics Letters, 2010, 35(16): 2777-2779.
- [7] LIU T, ZHANG H, XUE L F, et al. Highly sensitive torsion sensor based on side-hole-fiber Sagnac interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7378-7382.
- [8] HUANG B, SHU X W. Highly sensitive torsion sensor with femtosecond laser-induced low birefringence single-mode fiber based Sagnac interferometer[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4563-4571.
- [9] YANG W Q, WU T H, WU Z F, et al. In-line Mach-Zehnder interferometer and Bragg grating integrated by femtosecond laser for discrimination of temperature and directional torsion[J]. Optics Express, 2022, 30(23): 41933-41942.
- [10] ZHAO R, LIU H Y, SHU X W. High-performance vector torsion sensor based on high polarization-dependent in-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2023, 31(5): 8844-8854.
- [11] CHEN P C, SHU X W, SUGDEN K. Ultra-compact all-in-fiber-core Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4059-4062.
- [12] 徐堃, 玄成聪, 张燕青, 等. 基于飞秒激光刻写的微腔型波导马赫-曾德干涉器及其折射率传感性能研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(5): 76-83.
- [13] KONG Y J, SHU X W. In-fiber hybrid cladding waveguide by femtosecond inscription for two-dimensional vector bend sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(7): 2194-2204.
- [14] BUDINSKI V, DONLAGIC D. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: a review[J]. Sensors, 2017, 17(3): 443.

- [15] LI X Y, ZHANG W G, CHEN L, et al. Helical fiber interferometer using flame-heated treatment for torsion sensing application[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 29(1): 161-164.
- [16] YANG K, LIU Y G, WANG Z, et al. Twist sensor based on long period grating and tilted Bragg grating written in few-mode fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-8.
- [17] YING G L, FU Q J, YANG P X, et al. Direction-discriminating torsion sensor based on optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108461.
- [18] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306003.
- [19] 杨翔文, 罗彬彬, 石胜辉, 等. 基于虚拟游标效应的夹层多模光纤马赫-曾德尔干涉仪高灵敏温度传感器[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1706002.
- [20] 孙翔宇, 陈智, 王宇莹, 等. 飞秒激光直写光波导放大器与激光器[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(3): 0314003.
- [21] FU X H, MA S Y, ZHANG Y X, et al. Seven-core fiber torsion sensor with microcavity structure based on intensity measurement[J]. Optics Communications, 2022, 502: 127412.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 873 页)

- [28] NG M N, CHIANG K S. Thermal effects on the transmission spectra of long-period fiber gratings[J]. Optics Communications, 2002, 208(4/5/6): 321-327.
- [29] ZHONG X Y, WANG Y P, LIAO C R, et al. Long period fiber gratings inscribed with an improved two-dimensional scanning technique [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 2201508.
- [30] LI Q Y, CHENG P Y, ZHAO R, et al. Mode-locked fiber laser based on a small-period long-period fiber grating inscribed by femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2023, 48(9): 2241-2244.
- [31] YANG F, ZHANG L Q, WANG M H, et al. Wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on an all-fiber Mach-Zehnder interferometer filter[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(4): 041401.
- [32] KHATTAK A, TATEL G, WEI L. Tunable and switchable erbium-doped fiber laser using a multimode-fiber based filter[J]. Applied Sciences, 2018, 8(7): 1135.
- [33] ZHU X J, WANG C, ZHANG G A, et al. Tunable dual-and triple-wavelength mode-locked all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser [J]. Applied Physics B, 2015, 118(1): 69-73.
- [34] GRUBSKY V, FEINBERG J. High-dispersion long-period fiber gratings for dispersion compensation[J]. Optics Letters, 2000, 25(4): 203-205.
- [35] 孔梅, 汤伟中, 周文. 长周期光纤光栅的相移和色散特性[J]. 半导体光电, 1999, 20(1): 47-49.

(责任编辑:赵海军)