

激光与光电子学进展

多芯光纤构成的马赫-曾德尔干涉仪的应变特性

宋娇, 江超*, 申万梅, 孙四梅**, 郭小珊, 王赛玉

湖北师范大学物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002

摘要 提出了一种基于多芯光纤的马赫-曾德尔干涉仪, 其由单模-多芯-多模-单模光纤拼接而成, 其中多模光纤充当耦合器, 单模光纤与多芯光纤错位熔接形成不对称结构。实验研究了干涉仪的弯曲应变与轴向应变特性。实验结果表明, 当干涉仪弯曲时, 干涉仪透射谱波长发生线性漂移。利用波长变化可调制出弯曲的曲率大小, 并且最大弯曲曲率灵敏度为 -16.88 nm/m^{-1} 。当干涉仪向 0° 和 180° 方向弯曲时, 波谷波长漂移方向相反, 由此可初步判断弯曲方向。此外, 干涉仪对轴向应变也有较好的敏感性, 利用测得的弯曲曲率与轴向应变灵敏度构建测量矩阵, 可实现弯曲曲率与轴向应变的同时测量, 并消除交叉敏感。

关键词 激光光学; 光纤弯曲传感器; 马赫-曾德尔干涉仪; 多芯光纤; 错位熔接; 曲率; 轴向应变

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314002

Strain Characteristic of Mach-Zehnder Interferometer Made of Multi-Core Fiber

Song Jiao, Jiang Chao*, Shen Wanmei, Sun Simei**, Guo Xiaoshan, Wang Saiyu

College of Physics and Electronic Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China

Abstract A Mach-Zehnder interferometer based on multi-core fiber, which composes of a single-mode, multi-core, multi-mode, and single-mode fiber, is proposed in this study. In the proposed interferometer, the multi-mode fiber functions as a coupler, whereas the single-mode fiber and the multi-core fiber form an asymmetric structure by offset splicing. Further, the bending and axial strain characteristics of the interferometer are studied experimentally. The experimental results show that the wavelength of the transmission spectrum of the interferometer is linearly shifted when the interferometer bends. The wavelength change can be used to modulate the curvature, and the maximum sensitivity of bending curvature is -16.88 nm/m^{-1} . When the interferometer bends to the directions of 0° and 180° , the wave-valley wavelengths shift in the opposite direction, allowing for a preliminary determination of the bending direction. In addition, the interferometer is also sensitive to axial strain. By using the measured bending curvature and axial strain sensitivity to construct the measurement matrix, the simultaneous measurement of bending curvature and axial strain can be realized, and the cross sensitivity can be eliminated.

Key words laser optics; fiber bending sensor; Mach-Zehnder interferometer; multi-core fiber; offset splicing; curvature; axial strain

OCIS codes 140.3390; 230.2285; 280.4788

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-03-03; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 湖北省自然科学基金青年项目 (2020CFB46)、湖北省教育厅科学研究计划项目 (B2020136)

通信作者: *jiangchao1969@126.com; **simeisun@hbnu.edu.cn

1 引言

在大型土木工程、钢结构制造、高层建筑等领域中,需要准确了解建筑物或者工件的弯曲幅度与弯曲方向,这有利于工程中的变形识别和应力检测。弯曲传感器是必备的检测器件之一,其中光纤弯曲传感器具有结构简单、响应速度快、灵敏度高优点,故被广泛应用于对上述领域的健康监测中^[1-4]。光纤弯曲传感器有多种结构设计,归纳起来主要包括光纤光栅弯曲传感器^[5-7]与光纤干涉仪弯曲传感器^[8-15]。其中,光纤光栅弯曲传感器需要专门设备刻写光纤光栅,并且其无法判别弯曲方向,测量范围较小,灵敏度较低。光纤干涉仪弯曲传感器主要由光纤干涉仪构成,具有结构简单、制作容易、灵敏度高优点,进而得到了广泛关注。

多芯光纤(MCF)是在同一包层中存在多个纤芯的特种光纤,能够实现长距离、低串扰的空分复用光信号传输,可极大提高通信容量。近年来,人们利用MCF制作的光纤传感器能够用于高温、折射率、压力和应变等物理量的测量^[16-22]。同时,利用MCF构成的光纤弯曲传感器也得到了人们的极大关注^[23-27]。在MCF上刻写长周期光纤光栅^[23-24]或者布拉格光栅^[25]后构成的曲率传感器性能优良,但具有制作难度较大、测量范围较小和灵敏度低等缺点。基于三芯光纤^[26]或者双芯光纤^[27]干涉仪结构的弯曲矢量传感器具有灵敏度高、能够判别弯曲方向等优点。本文利用七芯光纤与单模光纤错位熔接制作了一款马赫-曾德尔干涉仪,并对干涉仪的弯曲应变与轴向应变特性进行了研究。所提干涉仪具有结构简单、制作容易、灵敏度高的优点,在大型构件与建筑物的应变测量中具有一定的应用价值。

2 干涉仪结构与传感原理分析

七芯光纤是MCF的一种,其同一包层中均匀分布着7个纤芯,其中1个纤芯居中分布,另外6个

纤芯均匀分布在周围,并且纤芯芯径相同,每个纤芯之间的间距也相同。七芯光纤由武汉长飞光纤光缆股份有限公司生产,纤芯芯径为7.9 μm,芯间距为42.4 μm,包层直径为150 μm。选用的单模光纤(SMF)与多模光纤(MMF)也是武汉长飞光纤光缆股份有限公司生产的,MMF的芯径为105 μm、包层直径为125 μm,SMF的芯径为9 μm、包层直径为125 μm。图1(a)为马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的结构示意图,其制作过程:1)将MCF、MMF和输出SMF正对拼接。大芯径MMF在与其他光纤连接时有很高的耦合效率,此处将MMF作为耦合器,长度取为2 mm。经过多次实验尝试,将MCF的长度取为3.8 cm。当MCF与MMF正对熔接时,由于MMF的芯径为105 μm,故可以将MCF中所有纤芯的光都耦合到MMF的纤芯中,从而可以获得很高的耦合效率,更容易实现干涉。2)将MCF的另外一端与输入SMF错位熔接,在错位熔接时将结构的一端连接至宽带光源,另一端连接至光谱分析仪。然后,手动操作熔接机,控制光纤错位量变化,并观察MZI的透射谱。经过反复对比与优化发现,当透射谱具有较好的条纹显示度时错位量为最佳,在最终制备的MZI中MCF与SMF的错位量约为4 μm。

图1(b)为多芯光纤构成的MZI的光路图。由于SMF和MCF纤芯直径不匹配,当光进入到MCF时会激发出不同的模式,并且这些模式会沿着不同的方向传播。不同模式的光在传输过程中会产生光程差,进而在输出SMF中耦合形成一个MZI^[18]。为了便于分析,假设干涉主要由中间纤芯中的传输模式与周围纤芯中的传输模式引起,根据干涉的相位条件,可得到MZI透射谱波谷的波长,其表达式为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m + 1}, m \in \mathbf{N}^+, \quad (1)$$

式中: λ_m 是MZI未弯曲时 m 阶谐振峰波谷的波长; Δn_{eff} 是MZI未弯曲情况下多芯光纤的中间纤芯和周围纤芯的有效折射率差; L 是MZI的有效长度。

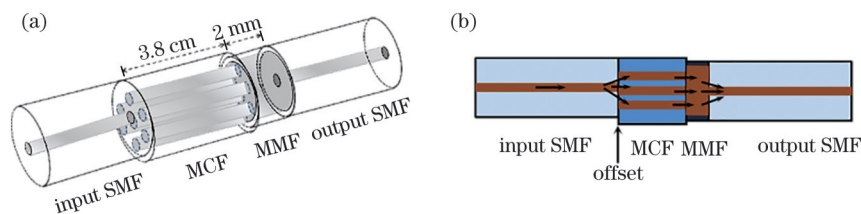


图1 MZI的结构示意图与光路图。(a)结构示意图;(b)光路图
Fig. 1 Structural diagram and lightpath diagram of MZI. (a) Structural diagram; (b) lightpath diagram

当 MZI 弯曲时,多芯光纤的中间纤芯与周围纤芯会产生应变,进而两个纤芯的折射率会发生变化,中间纤芯与周围纤芯之间的应变差^[27]为

$$\Delta\epsilon = D/R = D \cdot C, \quad (2)$$

式中: D 是中间纤芯与周围纤芯之间的距离; R 是弯曲半径; C 是曲率。MZI 弯曲后的有效折射率差^[27]为

$$\Delta n_{\text{eff}}^b = \Delta n_{\text{eff}} + k\Delta\epsilon = \Delta n_{\text{eff}} + kD \cdot C, \quad (3)$$

式中: k 为应变-折射率系数,其是一个常数。MZI 弯曲后透射谱谐振峰波谷的波长为

$$\lambda_m^b = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + kD \cdot C)L}{2m + 1}, m \in \mathbf{N}^+. \quad (4)$$

由(4)式可知,曲率 C 的变化会造成 λ_m^b 的漂移。因此,当 MZI 弯曲引起曲率 C 变化时,通过考察

MZI 弯曲后透射谱谐振峰波谷的波长 λ_m^b 的漂移,利用漂移量便可以解调出曲率的大小。同时,依据漂移方向可以初步判断弯曲方向。

图 2 为 MZI 的透射谱与空间频谱。在图 2(a)所示的透射谱中存在大量谐振峰,选择波谷 Dip1 与 Dip2 来研究 MZI 的弯曲与轴向应变。其中, Dip1 的中心波长为 $\lambda_1=1573$ nm,峰值强度为 $A_1=-35.99$ dB。Dip2 的中心波长为 $\lambda_2=1457$ nm,峰值强度为 $A_2=-25.69$ dB。MZI 的空间频谱如图 2(b)所示。可以发现,在空间频谱中零频基模与两个低阶模提供了绝大部分功率,对干涉起主要贡献。随后的 4 个高阶模也对干涉贡献了一部分功率。虽然之后的更高阶模也对干涉贡献少了部分能量,但对干涉谱形成所起的作用较小。

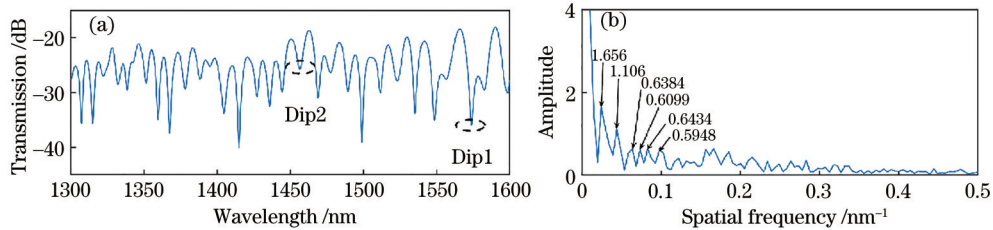


图 2 MZI 的透射谱与空间频谱。(a)透射谱;(b)空间频谱

Fig. 2 Transmission spectrum and spatial frequency spectrum of MZI. (a) Transmission spectrum; (b) spatial frequency spectrum

3 实验结果与分析

3.1 弯曲实验

MZI 的弯曲与轴向应变实验装置如图 3(a)所示。图 3(b)给出了 SMF 和 MCF 错位的截面示意图,错位只发生在上下方向。利用两个可以旋转 360°的夹具固定 MZI,并将两个夹具固定在精密位移平台上,利用固定夹具与位移平台将 MZI 拉紧绷直。在测试过程中,通过调节右边精密位移平台千分尺以向内推动位移平台,使干涉仪弯曲,进而实现不同曲率下的弯

曲测量。通过同时旋转固定干涉仪的两个旋转夹具,可实现不同方向及不同曲率下的弯曲测量。必须注意的是,当完成一个方向的曲率测量后,需要将光纤重新拉回至绷直状态,然后调节旋转夹具使干涉仪旋转一个角度,再进行另一个方向的弯曲实验。

千分尺移动的位移量 d 和弯曲曲率 C 之间的换算关系^[20]为

$$C = \frac{1}{R} = \sqrt{\frac{24d}{L_1^3}}, \quad (5)$$

式中: L_1 表示固定干涉仪的两个平台之间的距离。

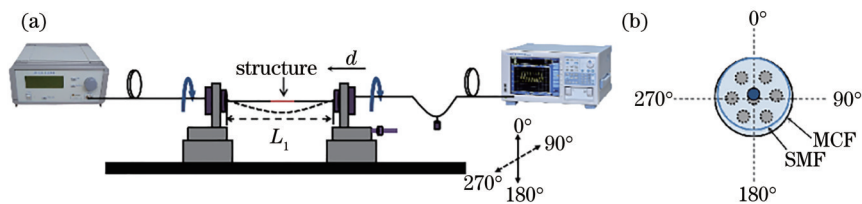


图 3 弯曲与轴向应变实验装置和错位熔接截面示意图。(a)弯曲与轴向应变实验装置示意图;(b)错位熔接截面示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of bending and axial strain experimental equipments and offset splicing section. (a) Schematic diagram of bending and axial strain experimental equipments; (b) schematic diagram of offset splicing section

3.1.1 MZI 透射谱谐振峰 Dip1 的弯曲特性

图 4 为 MZI 向不同方向弯曲时波谷 Dip1 的位

置随曲率 C 的变化曲线,其中箭头表示 Dip1 位置的移动方向。可以发现,当 MZI 向 0°方向弯曲时,波

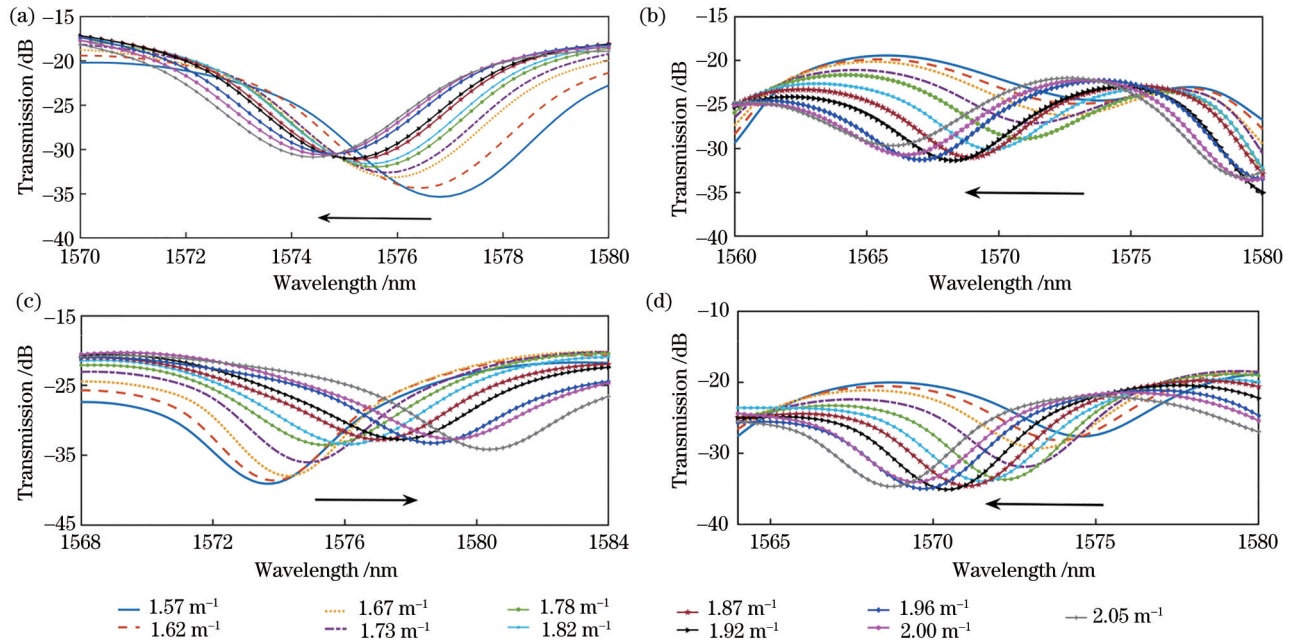


图 4 当 MZI 向不同方向弯曲时, Dip1 的位置随 C 的变化。(a) 0° ; (b) 90° ; (c) 180° ; (d) 270°

Fig. 4 Position of Dip1 varying with C when MZI bends to different directions. (a) 0° ; (b) 90° ; (c) 180° ; (d) 270°

谷 Dip1 的位置随曲率 C 的增加向短波长方向漂移, 且 C 越大, Dip1 的中心波长越小。当 MZI 向 90° 方向弯曲时, 波谷 Dip1 的位置随曲率 C 的增加向短波长方向漂移, 且 C 越大, Dip1 的中心波长越小。当 MZI 向 180° 方向弯曲时, 波谷 Dip1 的位置随曲率 C 增大向长波长方向漂移, 且 C 越大, Dip1 的中心波长越大, 波长漂移方向与 0° 和 90° 的情况相反。当 MZI 向 270° 方向弯曲时, 波谷 Dip1 的位置随曲率 C 的增加向短波长方向漂移, 且 C 越大, Dip1 的中心波长越小。图 5 为 MZI 向 45° 方向弯曲时, Dip1 的位置随曲率 C 的变化曲线, 图中箭头表示 Dip1 位置的移动方向。可以发现, 此时波谷 Dip1 的位置随曲率 C 的增加向短波长方向漂移, 且 C 越大, Dip1 的中心波长越小。

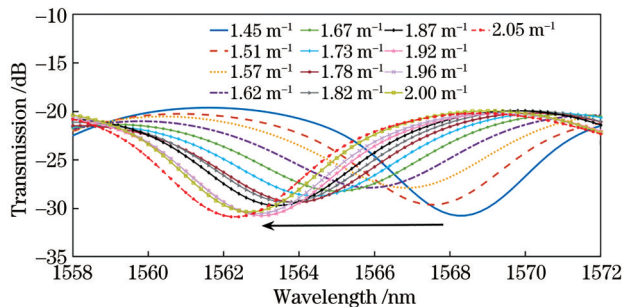


图 5 当 MZI 向 45° 方向弯曲时, Dip1 的位置随曲率 C 的变化
Fig. 5 Position of Dip1 varying with C when MZI bends to direction of 45°

图 6(a) 为 MZI 向 4 个特定方向弯曲时, 谐振峰 Dip1 的波长随曲率的变化, 其中 R^2 和 W 分别为线性拟合度和线性拟合方程。图 6(b) 为 MZI 向 45° 方向弯曲时, 谐振峰 Dip1 的中心波长随曲率的变化。可以发现, 当曲率在 $1.45 \sim 1.96 m^{-1}$ 内变化时, 在 5 个弯曲方向下 Dip1 的中心波长漂移量与曲率变化量之间有很好的线性关系, 故可以利用波长解调法测量曲率大小。当 MZI 向 0° 和 180° 方向弯曲时, Dip1 中心波长的变化是相反的, 2 个方向的曲率灵敏度分别为 $-4.617 nm/m^{-1}$ 和 $14.13 nm/m^{-1}$ 。当 MZI 向 90° , 270° 和 45° 方向弯曲时, Dip1 中心波长的变化趋势都是相同的, 三者的曲率灵敏度分别为 -16.88 , -11.97 , $-10.04 nm/m^{-1}$, 与 0° 情况下的变化趋势是一致的。此外, 还可以发现, 除了 MZI 向 180° 方向弯曲时曲率灵敏度为正数以外, MZI 向其他方向弯曲时的曲率灵敏度均为负数。因此, 该传感器只能区分 0° 和 180° 弯曲方向, 而无法区分其他的弯曲方向。然而, 由于传感器结构不完全对称, 即各个弯曲方向的曲率灵敏度是不一样的, 故可以依据曲率灵敏度的大小进行弯曲方向的初步判断。

3.1.2 MZI 透射谱谐振峰 Dip2 的弯曲特性

为了研究 MZI 对曲率与应变同时测量的可能性, 本节研究了 MZI 向 0° 方向弯曲时波谷 Dip2 的弯曲特性。图 7(a) 为 Dip2 的位置随曲率 C 的变化曲线, 其中箭头表示 Dip2 位置的移动方向。可以发

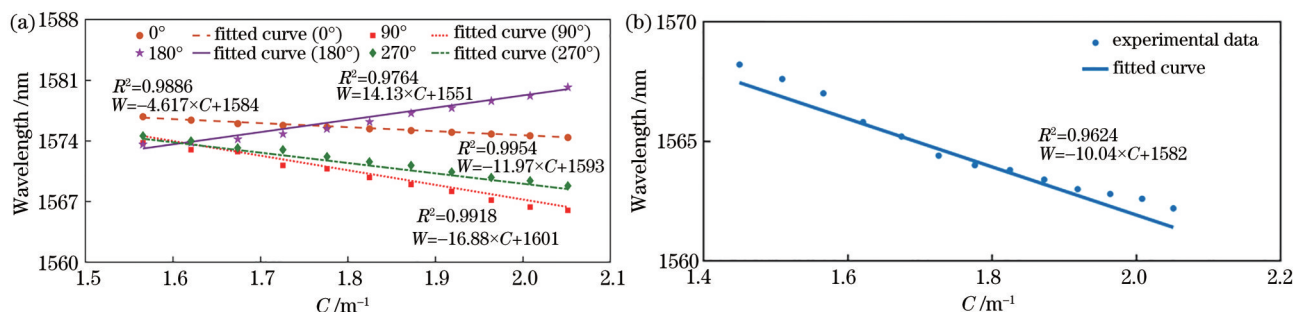


图6 MZI向不同方向弯曲时, Dip1的波长随C的变化。(a) 4个特定方向;(b) 45°

Fig. 6 Central wavelength of Dip1 varying with C when MZI bends to different directions. (a) Four specific directions; (b) 45°

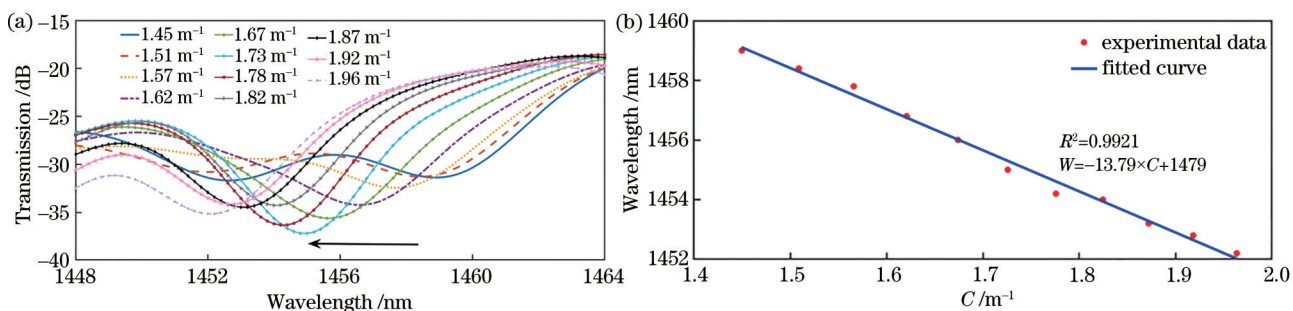


图7 当MZI向0°方向弯曲时, Dip2的位置和波长随C的变化。(a) Dip2的位置随C的变化;(b) Dip2的波长随C的变化

Fig. 7 Position and wavelength of Dip2 varying with C when MZI bends to direction of 0°. (a) Position of Dip2 varying with C; (b) wavelength of Dip2 varying with C

现, Dip2的位置随曲率C的增加向短波长方向漂移,且C越大, Dip2的中心波长越小。图7(b)为Dip2的波长随曲率C的变化曲线。经拟合发现, Dip2的中心波长与曲率C之间有很好的线性关系,此时R²为0.9921,曲率灵敏度为-13.79 nm/m⁻¹。

3.2 轴向应变实验

为了研究轴向应变对弯曲变化的影响,对MZI进行了轴向应变实验。测量轴向应变响应的实验装置如图3(a)所示,将MZI结构固定在两个平台之间并保持绷直拉紧状态,利用右边的精密位移平台往外拉伸干涉仪,拉伸范围为0~0.36 mm,且每次

拉伸0.04 mm。同时,利用光谱仪记录轴向应变变化时MZI透射谱的变化情况。主要研究了MZI向0°方向弯曲时谐振峰Dip1和Dip2的轴向应变情况。

图8为Dip1的位置和波长随轴向应变的变化,其中M_{slope}为斜率,箭头表示Dip1位置的移动方向。可以发现,当轴向应变增加时,Dip1的位置向短波长方向漂移,Dip1中心波长与轴向应变间有极好的线性关系,此时R²为0.9947,应变灵敏度为-1.353 pm/με。图9为Dip2的位置和波长随轴向应变的变化,其中箭头表示Dip2位置的移动方向。可以发现,当轴向应变增加时,Dip2的位置向

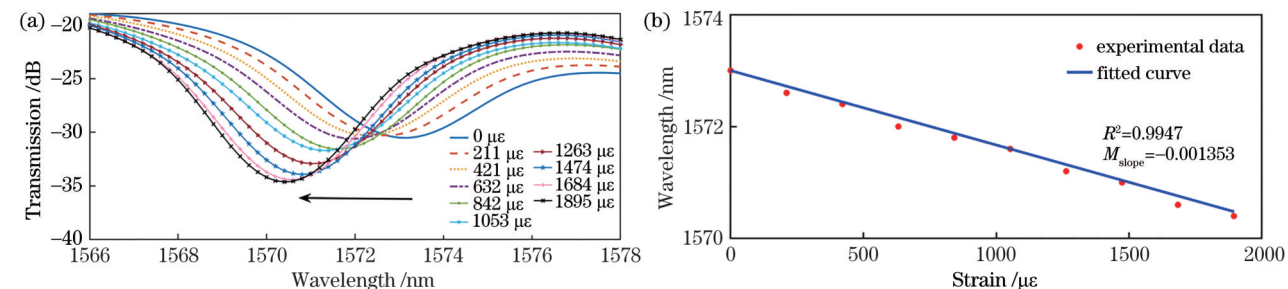


图8 当MZI向0°方向弯曲时, Dip1的位置和波长随轴向应变的变化。(a) Dip1的位置随轴向应变的变化;(b) Dip1的波长随轴向应变的变化

Fig. 8 Position and wavelength of Dip1 varying with axial strain when MZI bends to direction of 0°. (a) Position of Dip1 varying with axial strain; (b) wavelength of Dip1 varying with axial strain

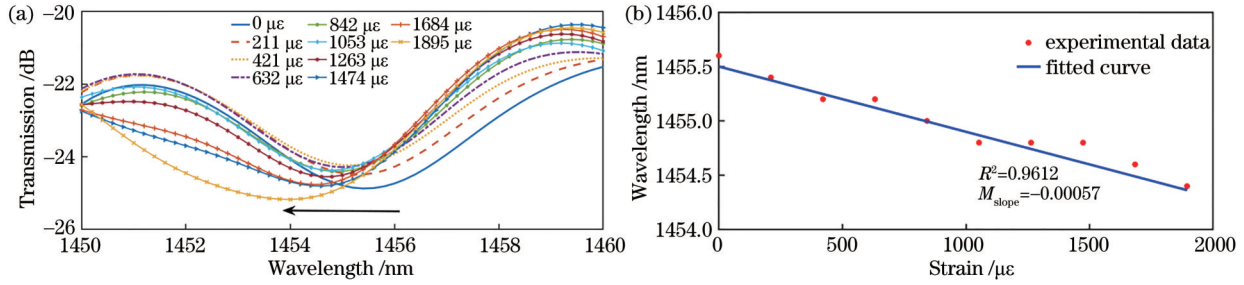


图 9 当 MZI 向 0° 方向弯曲时, Dip2 的位置和波长随轴向应变的变化。(a) Dip2 的位置随轴向应变的变化; (b) Dip2 的波长随轴向应变的变化

Fig. 9 Position and wavelength of Dip2 varying with axial strain when MZI bends to direction of 0°. (a) Position of Dip2 varying with axial strain; (b) wavelength of Dip2 varying with axial strain

短波长方向漂移, Dip2 中心波长与轴向应变间有较好的线性关系, 此时 R^2 为 0.9612, 应变灵敏度为 $-0.57 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。实验结果表明, 利用波长可以解调出轴向应变的变化, 并且利用这个变化关系可以实现轴向应变的测量。

3.3 MZI 的重复性与稳定性实验

为了验证 MZI 用于弯曲测量的稳定性与重复性, 对同一 MZI 结构进行了重复性实验研究。每间隔 5 天, 用 MZI 测量一次弯曲变化情况, 每次实验条件与实验参数均相同, 共进行了三次完全相同的实验 (Ex1, Ex2, EX3)。图 10 为三次实验测得的波长与曲率之间的关系, 拟合曲线的斜率分别为 $-13.57, -13.29, -13.56 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$, 即三次实验获得的曲率灵敏度基本相同, 表明 MZI 的稳定性和重复性较好。

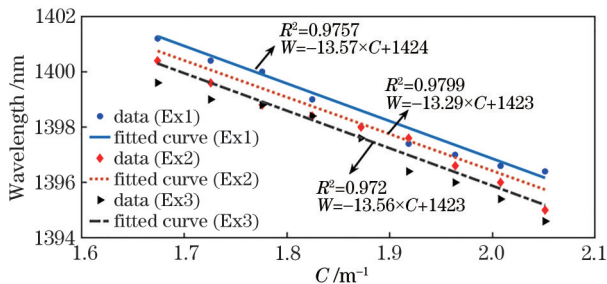


图 10 重复性与稳定性实验中波长与 C 的关系

Fig. 10 Relationship between wavelength and C in experiment of repeatability and stability

3.4 双参量测量的实验结果讨论

由上述实验结果可知, MZI 透射谱谐振峰波长对弯曲和应变都敏感。因此, 利用波长调制解调法和测量矩阵, 可以实现对弯曲和轴向应变的同时测量, 并且不存在交叉敏感。测量矩阵的表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为两个灵敏度较好的谐振峰波谷 Dip1 和 Dip2 的波长 λ_1 和 λ_2 的变化量; ΔC 和 $\Delta\epsilon$ 分别为 MZI 的曲率和应变的变化量; α_1 和 α_2 分别为波谷 Dip1 和 Dip2 对应的曲率灵敏度; β_1 和 β_2 分别为波谷 Dip1 和 Dip2 对应的应变灵敏度。实验测得, MZI 向 0° 方向弯曲时, 波谷 Dip1 的曲率灵敏度和应变灵敏度分别为 $-4.617 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 和 $-1.353 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。波谷 Dip2 的曲率灵敏度和应变灵敏度分别为 $-13.790 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 和 $-0.570 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。结合上述数据, (6) 式可变换为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.617 & -1.353 \\ -13.790 & -0.570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}, \quad (7)$$

(7) 式为传感器曲率与应变测量矩阵, 通过求解其逆矩阵, 能够得到测量的曲率值和应变值。

4 结 论

利用光纤错位熔接技术制作了一款结构简单的 MZI, 该干涉仪可用于物体的弯曲测量, 具有较高灵敏度和一定的方向判别功能。通过多次实验发现, 在 MZI 弯曲时, 透射谱谐振峰波长发生线性漂移, 根据这个线性关系可以测量弯曲的曲率大小。实验测得干涉仪的最大曲率灵敏度为 $-16.88 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$, 比参考文献 [23-27] 中的曲率灵敏度高。MZI 向 0° 或 180° 方向弯曲时, 波长漂移方向相反, 依据这个能够判断弯曲的方向。所提干涉仪对轴向应变也较为敏感, 利用弯曲曲率与轴向应变灵敏度构建测量矩阵, 可以实现曲率和轴向应变的同时测量。所提干涉仪具有结构简单、制作容易、灵敏度高的优点, 在工程建筑等方面的应变测量中有一定的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090603.
张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090603.
- [2] Yang Y, Zhu X T, Yan L J, et al. A highly accurate curvature sensor based on a rough side-polished single-mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1406004.
杨洋, 朱肖彤, 闫良俊, 等. 基于侧边粗抛磨单模光纤的高精度曲率传感技术研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1406004.
- [3] Villatoro J, Minkovich V P, Zubia J. Photonic crystal fiber interferometric vector bending sensor[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3113-3116.
- [4] Ou Z L, Yu Y Q, Yan P G, et al. Ambient refractive index-independent bending vector sensor based on seven-core photonic crystal fiber using lateral offset splicing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23812-23821.
- [5] Geng P C, Zhang W G, Gao S C, et al. Two-dimensional bending vector sensing based on spatial cascaded orthogonal long period fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28557-28562.
- [6] Wang S, Zhang W G, Chen L, et al. Two-dimensional microbend sensor based on long-period fiber gratings in an isosceles triangle arrangement three-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4938-4941.
- [7] Zhang Y X, Zhang W G, Zhang Y S, et al. Bending vector sensing based on arch-shaped long-period fiber grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(8): 3125-3130.
- [8] Chen P C, Shu X W, Sugden K. Compact assembly-free vector bend sensor based on all-in-fiber-core Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 531-534.
- [9] Deng M, Tang C P, Zhu T, et al. Highly sensitive bend sensor based on Mach-Zehnder interferometer using photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(12): 2849-2853.
- [10] Gong Y, Zhao T, Rao Y J, et al. All-fiber curvature sensor based on multimode interference[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 679-681.
- [11] Zhang L Y, Zhang W G, Chen L, et al. A fiber bending vector sensor based on M-Z interferometer exploiting two hump-shaped tapers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(11): 1240-1243.
- [12] Zhang S S, Zhang W G, Gao S C, et al. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4480-4482.
- [13] Mao L L, Lu P, Lao Z F, et al. Highly sensitive curvature sensor based on single-mode fiber using core-offset splicing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57: 39-43.
- [14] Gong H P, Yang X, Ni K, et al. An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 22-24.
- [15] Tian Y, Chai Q, Tan T, et al. Directional bending sensor based on a dual side-hole fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(4): 375-378.
- [16] Zhou S, Huang B, Shu X W. A multi-core fiber based interferometer for high temperature sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 045107.
- [17] Antonio-Lopez J E, Eznavneh Z S, LiKamWa P, et al. Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000 °C[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4309-4312.
- [18] van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, Salceda-Delgado G, et al. Multicore fiber sensors for simultaneous measurement of force and temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(14): 1523-1526.
- [19] Yoon M S, Lee S B, Han Y G. In-line interferometer based on intermodal coupling of a multicore fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18316-18322.
- [20] Hu Y H, Sun S M, Mao M, et al. A temperature and refractive index sensor based on multi-core fibers misaligned splicing[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2018, 29(3): 243-248.
胡义慧, 孙四梅, 毛敏, 等. 基于多芯光纤错位熔接结构的温度与折射率同时测量传感器[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(3): 243-248.
- [21] Dong H Y, Sun S M, Jiang C, et al. Refractive index sensor based on multicore fiber[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(10): 14-17.
董航宇, 孙四梅, 江超, 等. 多芯光纤构成的光纤折射率传感器[J]. *激光杂志*, 2018, 39(10): 14-17.
- [22] Zhang A Y, Huang H L, Jiang C, et al. Optical fiber sensor composed of multi-core fiber for simultaneous

- measurement of temperature and refractive index[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2019, 30(10): 1017-1025.
- 张傲岩, 黄会玲, 江超, 等. 多芯光纤构成的温度与折射率同时测量的光纤传感器[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(10): 1017-1025.
- [23] Salceda-Delgado G, van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, et al. Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1468-1471.
- [24] Saffari P, Allsop T, Adebayo A, et al. Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3508-3511.
- [25] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(2): 120-121.
- [26] Villatoro J, van Newkirk A, Antonio-Lopez E, et al. Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 832-835.
- [27] Wang S, Zhang W G, Chen L, et al. Bending vector sensor based on the multimode-2-core-multimode fiber structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(19): 2066-2069.