

DOI:10.16136/j.joel.2023.11.0690

大偏移量错芯 MZI 实现较低温度灵敏度的曲率传感

李丽*, 姜捷, 梁丽丽, 杨康, 李国玉

(邯郸学院 信息技术研究所 河北省光纤生物传感与通信器件重点实验室, 河北 邯郸 056005)

摘要: 基于光纤大偏移量错芯 (large core-offset structure, LCOS) 熔接形成的马赫-曾德尔干涉结构 (Mach-Zehnder interferometer, MZI), 设计了一种具有较低温度灵敏度的曲率传感器。该结构采用 GF3 光纤作为核心灵敏单元, 与两段单模光纤 (single mode fiber, SMF) 进行 LCOS 熔接, 通过实验对比偏移量和传感光纤长度对温度和曲率灵敏度的影响, 得到最佳参数组合实现较低温度灵敏度的曲率传感。实验结果表明, 偏移量为 $20\ \mu\text{m}$ 、传感光纤长度为 $10\ \text{mm}$ 时的 LCOS MZI, 曲率灵敏度可以达到 $10.9\ \text{nm}/\text{m}^{-1}$, 且温度灵敏度仅为 $0.9\ \text{pm}/\text{C}$ 。该传感器具有结构简单、成本低、曲率灵敏度较高和温度灵敏度低的特点, 在工程结构、健康监测与人体可穿戴设备等方面具有潜在的应用价值。

关键词: 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI); 曲率传感; 低温度灵敏度; GF3 光纤

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)11-1121-08

The curvature sensor based on large core-offset MZI with low temperature sensitivity

LI Li*, JIANG Jie, LIANG Lili, YANG Kang, LI Guoyu

(Hebei Key Laboratory of Optical Fiber Biosensing and Communication Devices, Institute of Information Technology, Handan University, Handan, Hebei 056005, China)

Abstract: We propose a curvature sensing structure with low temperature sensitivity based on Mach-Zehnder interferometers (MZI), which is formed by large core-offset welding. As a core sensitive unit, GF3 fiber is welding with two sections of single mode fiber (SMF). The influence of core-offset and sensor length on temperature and curvature sensitivity is compared by experiments, respectively. Through these experiments, the optimal parameter combination to realize low temperature sensitivity curvature sensing is found. The experimental results show that when the sensor length is $10\ \text{mm}$ and the core-offset is $20\ \mu\text{m}$, the temperature sensitivity of large core-offset MZI is only $0.9\ \text{pm}/\text{C}$, and the curvature sensitivity can reach $10.9\ \text{nm}/\text{m}^{-1}$ simultaneously. The sensor has the advantages of simple structure, low cost, high curvature sensitivity and low temperature sensitivity. It has potential application value in engineering structure, health monitoring and wearable device.

Key words: Mach-Zehnder interferometers (MZI); curvature sensor; low temperature sensitivity; GF3 fiber

0 引言

光纤传感器具有质量轻、抗电磁干扰等独特优势, 光纤马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder in-

terferometers, MZI) 通过激发出包层模与纤芯模干涉而不需要有两个实际的光纤分支, 被广泛用于测量应变^[1]、曲率^[2]、折射率^[3]等。利用光纤 MZI 进行曲率传感的结构有很多, 综合来看, 主要有两

* E-mail: leely1213@126.com

收稿日期: 2022-10-11 修订日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (62175055)、河北省教育厅高等学校科学技术研究项目 (QN2020533) 和邯郸学院重点项目 (2018105, XZ2021108) 资助项目

种。一种常见结构是将一段光纤作为传感光纤，两端分别与单模光纤(single mode fiber, SMF)错芯熔接，从而形成 SMF-传感光纤-SMF 的 MZI 结构。该结构尺寸紧凑、制造简单，利用光纤熔接机即可实现。中间的传感光纤，最早为普通 SMF，随着曲率传感灵敏度的提升，逐渐演变为偏芯光纤(eccentric core fiber, ECF)^[4]、多芯光纤(例如三芯光纤(three-core fiber, TCF))^[5]、光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)^[6,7]等特殊类型的光纤。另一种是改变光纤结构，在熔接处制造特殊形状并形成 MZI 结构，如锥形^[8,9]、S 形^[10]等。该结构制作过程比较复杂，一般需要精确的位移控制装置和复杂的熔接步骤。

进行曲率传感时，温度的交叉影响往往不可忽略。2018 年，TIAN 等^[11]采用双边孔光纤(dual side-hole fiber, DSHF)错芯熔接形成 MZI 并在上面刻写布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)进行曲率和温度特性传感，曲率灵敏度为 -1.8 nm/m^{-1} ，温度灵敏度为 $41 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ；2020 年，ZHAO 等^[12]采用无芯光纤错芯熔接形成 MZI 进行曲率传感，曲率灵敏度可以达到 14.91 nm/m^{-1} ，同时该结构温度灵敏度为 $41 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。上述两种光纤 MZI 结构均为传感光纤进行错芯熔接而成，制作简单，但是温度的交叉影响较大。2022 年，HE 等^[13]通过对光纤进行连续放电和旋转制作的 MZI，曲率灵敏度为 9.87 nm/m^{-1} ，温度灵敏度为 $59.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。该曲率传感器结构新颖，但是制作过程十分复杂，且也存在着严重的温度交叉影响。当然，现有的研究成果中也有温度交叉影响较小的光纤 MZI 结构。2010 年，SHIN 等通过在 PCF 上制作两个长周期光纤光栅形成 MZI 实现了曲率传感：在 $0.9\text{--}1.2 \text{ m}^{-1}$ 的测量范围内，曲率灵敏度最高可以达到 36.16 nm/m^{-1} ，且温度灵敏度为 $4.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[14]；2017 年，FU 等^[15]将 PCF 熔接成 S 型结构形成 MZI 进行曲率传感，曲率灵敏度最高为 9.87 nm/m^{-1} ，温度灵敏度为 $1.7341 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。这两种光纤 MZI 结构的温度灵敏度相对于其他结构均处于较低水平，但是制作过程复杂。因此，总体来说，光纤 MZI 进行曲率传感，复杂的制作过程、温度的交叉影响依然是面临的主要问题。

基于上述分析，本文提出了一种具有低温度灵敏度的大偏移量错芯(large core-offset structure, LCOS)MZI 曲率传感器。该传感器采用 GF3 光纤，利用普通商用光纤熔接机进行 LCOS 熔接即可制备。通过理论和实验的方法分析偏移量、传感光纤长度对干涉谱的影响，并进行温度和曲率传感实验。

1 实验原理与装置

LCOS-MZI 的结构如图 1(b)所示。两端为 SMF，中间的传感光纤采用光敏光纤 GF3(Nufern 公司生产，纤芯直径为 $7 \mu\text{m}$ ，包层直径为 $125 \mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.16)，该光纤的优点是熔接损耗低、易于与其他光纤模式匹配等^[16]。光在经过第一段错芯结构时，由于径向距离不匹配，部分光进入包层激发起包层模，一部分光仍然沿着纤芯进行传输。 LP_{mm} 模式的功率可以表示为^[17]：

$$k_m^n = \frac{\left| \int \Psi_{LP_{mm}}^* \Psi dx dy \right|^2}{\int |\Psi_{LP_{mm}}|^2 dx dy \int |\Psi|^2 dx dy} \quad (1)$$

式中， Ψ 是 LP_{01} 模经过错芯处后的场分布， k_m^n 和 $\Psi_{LP_{mm}}$ 是 LP_{mm} 模的功率和电场分布。

经过第二段错芯结构，部分激发的包层模耦合回纤芯，与纤芯模发生干涉，从而形成稳定的干涉谱。单一模式的包层模与纤芯模发生干涉，产生的干涉谱较为稳定且均匀，但是实际上，经过错芯 MZI 的干涉谱往往是由 2 个甚至多个包层模共同作用的结果。

错芯 MZI 干涉谱的自由空间谱宽(free space spectrum, FSR)与传感光纤长度相关，满足关系^[18]：

$$FSR = \frac{\lambda_m^2}{\Delta n_{\text{eff}} L} \quad (2)$$

式中， λ_m 为第 m 阶干涉波长， L 是传感光纤长度， Δn_{eff} 为纤芯模与包层模之间的有效折射率差。可以看出， L 越长，FSR 越窄，即干涉谱越密； L 越短，FSR 越宽，即干涉谱越稀疏。

偏移量和传感光纤长度改变都会对 LCOS-MZI 的特性产生影响。因此，制备过程中偏移量和传感光纤长度的确定比较重要。将 SMF 和 GF3 光纤分别切割出平整的端面，放置到光纤熔接机(Fitel S178A)上采用半自动模式进行熔接。半自动模式下，两段光纤自动对齐后进入手动操作，调节一侧马达向上或者向下移动，两段光纤即可形成错芯结构，如图 1(a)所示。调节马达的移动量决定了两段光纤的偏移量，而通过光纤熔接机不能直接显示偏移量的值，因此，需要采用图像处理的方法，分割出偏移量与包层的比值，以包层直径 $125 \mu\text{m}$ 作为参照，从而得到偏移量的大小。传感光纤长度即 GF3 光纤的长度。要注意的是，两次错芯熔接要保持在同一平面上，形成 SMF-GF3-SMF 的结构。通过显微镜可以看到错芯熔接后光纤芯径不匹配的痕迹，如图 1(c)所示。

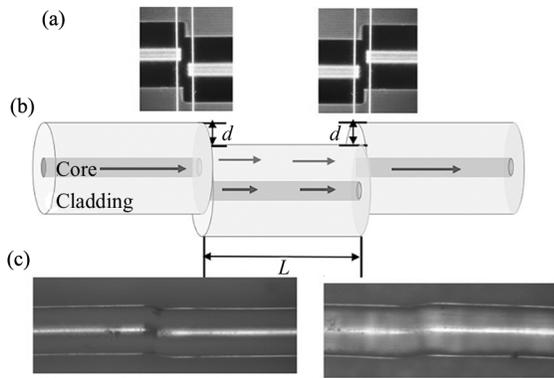


图 1 (a) 光纤熔接机调节偏移量界面; (b) LCOS-MZI 结构示意图; (c) 大芯径偏移 MZI 微观结构
 Fig. 1 (a) Interface for adjusting the core-offset of the fiber splicer; (b) Structure of the LCOS-MZI; (c) Microphotograph of LCOS-MZI

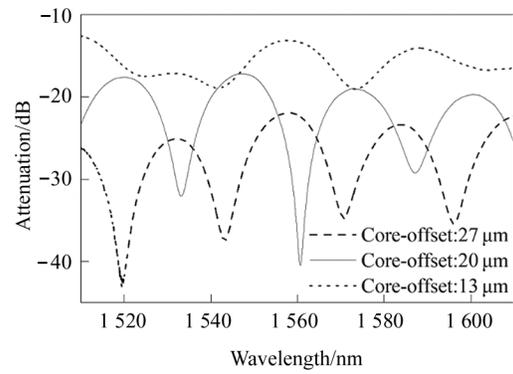


图 2 传感光纤长度为 10 mm, 纤芯偏移量为 13 μm、20 μm、27 μm 的 LCOS-MZI 光谱图
 Fig. 2 Transmission spectrum of LCOS-MZI with sensor length of 10 mm and core-offset of 13 μm, 20 μm and 27 μm

2 实验分析

2.1 偏移量和传感光纤长度影响实验

固定传感光纤长度为 10 mm, 偏移量分别为 13 μm、20 μm、27 μm 时, 得到干涉谱如图 2 所示。随着偏移量的增大, 干涉谱的 FSR 比较稳定。固定偏移量 d 为 20 μm, 传感光纤长度 L 分别为 10 mm、15 mm、20 mm, 得到光谱图如图 3 所示。随着传感光纤长度的增大, 干涉谱变得密集, FSR 减小。

对图 2 干涉谱进行快速傅里叶变换, 得到不同偏移量 LCOS-MZI 的空间频谱图如图 4 所示。偏移量为 13 μm 时, 如图 4(a) 所示, 在频率 0.02499 处出现一处主导峰, 但是比较微弱; 偏移量为 20 μm 时, 如图 4(b) 所示, 在频率 0.033 32 和 0.074 98 处产生

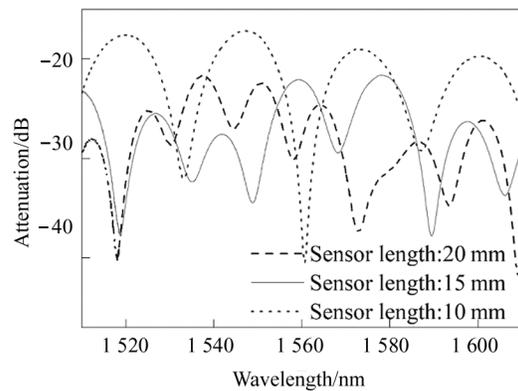


图 3 偏移量为 20 μm, 传感光纤长度为 10 μm、15 μm、20 mm 的 LCOS-MZI 光谱图
 Fig. 3 Transmission spectrum of LCOS-MZI with core-offset of 20 μm and sensor length of 10 mm, 15 mm, 20 mm

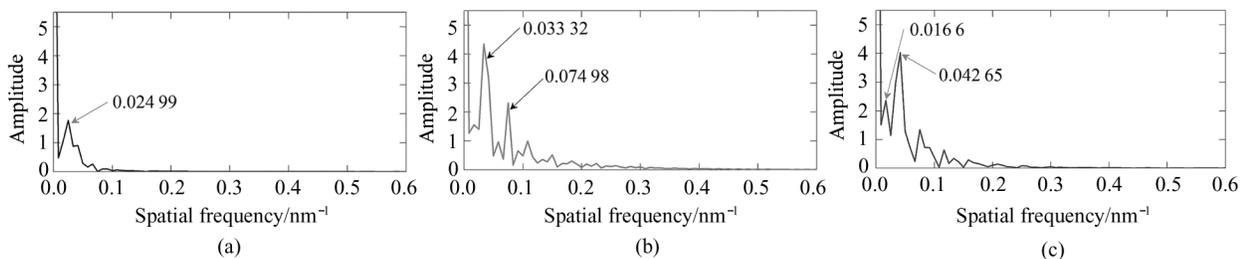


图 4 传感光纤长度为 10 mm 的 LCOS-MZI 空间频谱图: (a) 偏移量 13 μm; (b) 偏移量 20 μm; (c) 偏移量 27 μm
 Fig. 4 Spatial spectrum of LCOS-MZI with sensor length of 10 mm: (a) Core-offset: 13 μm; (b) Core-offset: 20 μm; (c) Core-offset: 27 μm

了主导峰; 图 4(c) 中偏移量为 27 μm 时, 频率 0.016 6 和 0.042 65 处产生了主导峰。该频率分别对应着不同的包层模式, 可以看出, 偏移量改变时, 起主要干涉作用的包层模式不同。

对图 3 作快速傅里叶变换, 得到不同传感光纤长度下 LCOS-MZI 的空间频谱图如图 5 所示。传感光纤长度为 10 mm 时, 如图 5(a) 所示, 频率 0.033 32、0.074 98 处出现了主导峰; 传感光纤长度

为 15 mm 时,如图 5(b)所示,在频率 0.016 6、0.058 31 处出现了主导峰;传感光纤长度为 20 mm 时,如图 5(c)所示,分别在频率 0.008 33、0.074 98 处出现了主导峰。主导峰频率不同,说明不同的传感光纤长度下,起最主要干涉作用的包层模式也不同。

因此,LCOS-MZI 的透射谱是多个包层模式相

互作用的结果,而且偏移量不同、传感光纤长度不同,起主要干涉作用的包层模式也可能不同,从而导致 LCOS-MZI 的曲率和温度灵敏度随着偏移量和传感光纤长度的改变而产生变化^[19]。因此,对不同偏移量和传感光纤长度的 LCOS-MZI 进行温度和曲率传感,寻找更优的参数组合是十分必要的。

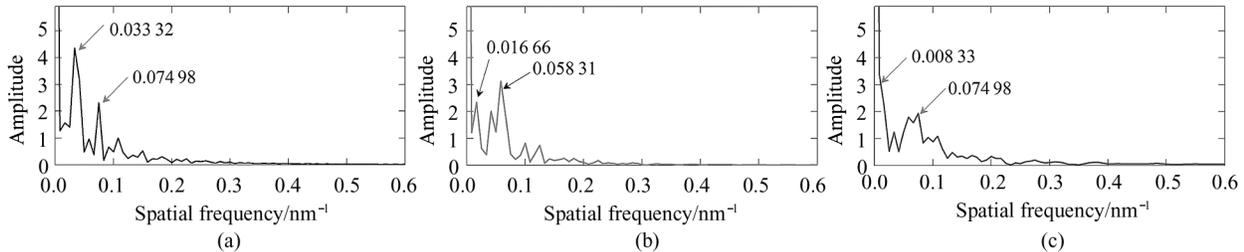
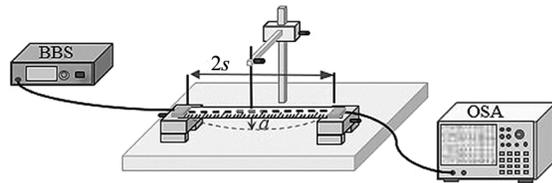


图 5 偏移量为 20 μm 的 LCOS-MZI 空间频谱图:(a) 光纤长度 10 mm; (b) 光纤长度 15 mm; (c) 光纤长度 20 mm
 Fig. 5 Spatial spectrum of LCOS-MZI with core-offset of 20 μm: (a) Sensor length: 10 mm; (b) Sensor length: 15 mm; (c) Sensor length: 20 mm

2.2 曲率传感实验

曲率传感装置如图 6 所示。宽带光源为传感系统提供 1 510—1 620 nm 的光源,光谱分析仪记录透射谱的变化。LCOS-MZI 横向固定在钢尺下方,两固定点间距离为 10 cm。竖直调节支架可以在上下方向进行调节,实验过程中保证调节支架的前端触头始终作用在钢尺上,以提供均匀的曲率变化。实验中将支架向下调节,保证传感光纤紧贴钢尺,并随着钢尺的弯曲均匀感受曲率变化。



BBS:broadband source;
 OSA:optical spectrum analyzer

图 6 曲率传感装置

Fig. 6 Curvature sensing device

曲率变化满足:

$$C = 2a / (a^2 + s^2), \quad (3)$$

式中, a 为竖直支架的调节距离,实验中调节步长为 0.2 mm; s 为传感光纤两固定点间距离的一半,实验中 s 为 5 cm。

固定传感光纤长度为 15 mm,研究不同偏移量对曲率传感灵敏度的影响,LCOS-MZI 随曲率变化的光谱演变图如图 7 所示。偏移量为 13 μm 时,如图 7(a)所示,随着曲率增大,可以看出光谱整体向短波长方向漂移,但是波长漂移较小。偏移量为 20 μm 时,如图 7(b)所示,随着曲率增大,光谱整体向短波长方向漂移。偏移量为 27 μm 时,如图 7(c)所示,随着曲率增大,光谱向短波长方向漂移,整体强度变化和波长漂移都更为明显。为对比分析不同偏移量 LCOS-MZI 的曲率灵敏度,在 1 510—1 610 nm 的窗口内分别选取漂移最大的峰进行数据分析,得到曲率传感拟合图如图 8 所示。偏移量为 13 μm、20 μm、27 μm 时,在 0—2.4 m⁻¹ 的曲率变化范围内,曲率灵敏度分别为 -1.3 nm / m⁻¹、-8.1 nm / m⁻¹ 和 -3.4 nm / m⁻¹。

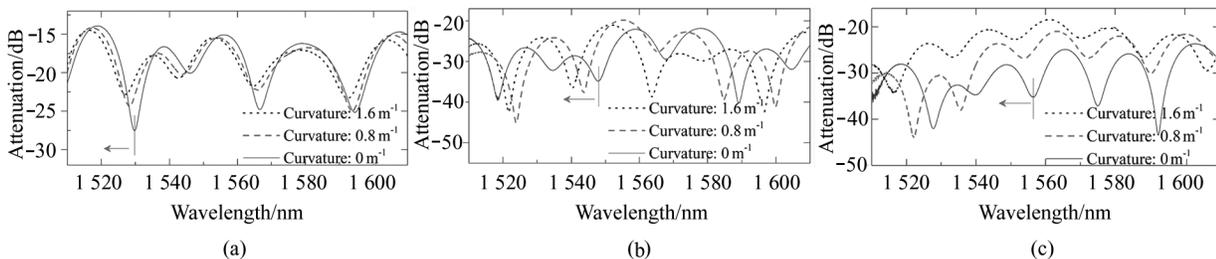


图 7 LCOS-MZI 随曲率变化的光谱演变图:(a) 偏移量 13 μm; (b) 偏移量 20 μm; (c) 偏移量 27 μm

Fig. 7 Spectral evolution of LCOS-MZI with curvature:

(a) Core-offset: 13 μm; (b) Core-offset: 20 μm; (c) Core-offset: 27 μm

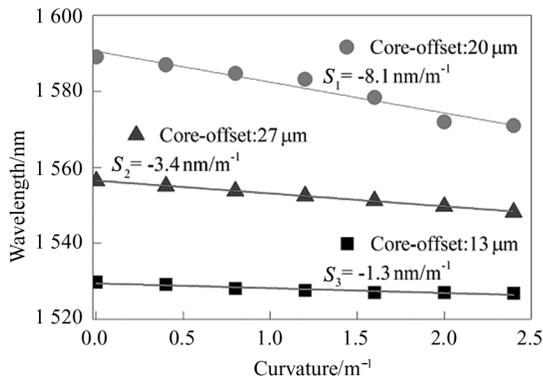


图 8 传感光纤长度为 15 mm, 纤芯偏移量为 13 μm、20 μm、27 μm 的 LCOS-MZI 曲率传感拟合图

Fig. 8 Linear fitting diagram of LCOM-MZI curvature sensing under the sensor length of 15 mm

and the core-offset of 13 μm, 20 μm and 27 μm, respectively

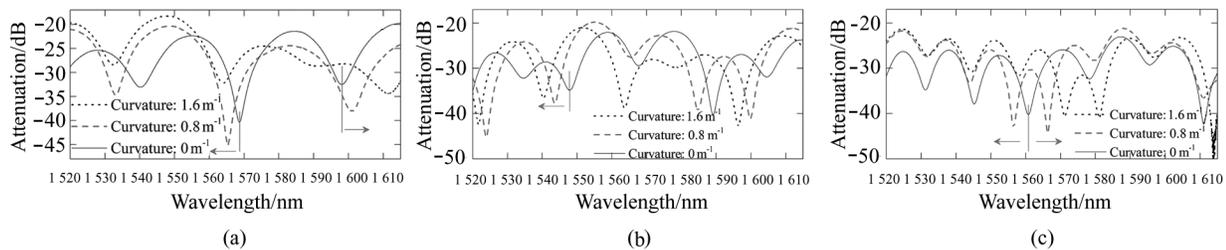


图 9 LCOS-MZI 随曲率变化光谱演变图: (a) 光纤长度 10 mm; (b) 光纤长度 15 mm; (c) 光纤长度 20 mm

Fig. 9 Spectral evolution of LCOS-MZI with curvature variation: (a) Sensor length: 10 mm; (b) Sensor length: 15 mm; (c) Sensor length: 20 mm

的曲率变化范围内, 曲率灵敏度分别为 10.9 nm/m⁻¹、8.1 nm/m⁻¹ 和 6.5 nm/m⁻¹。

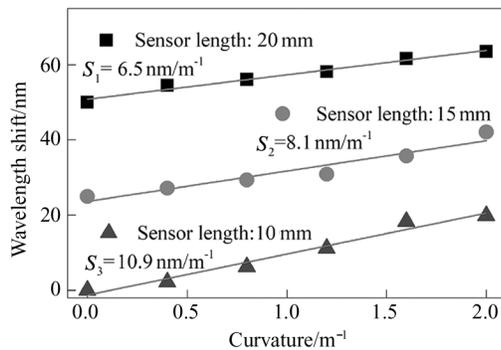


图 10 偏移量为 20 μm, 传感光纤长度为 10 mm、15 mm、20 mm 的 LCOS-MZI 曲率传感拟合图

Fig. 10 Linear fitting diagram of LCOM-MZI curvature sensing under the core-offset of 20 μm

and sensor length of 10 mm, 15 mm and 20 mm respectively

2.3 温度传感实验

温度传感装置如图 11 所示。LCOS-MZI 放置在温控箱内, 从 20 °C 开始加热, 以 10 °C 为调节步

固定偏移量, 研究传感光纤长度对曲率灵敏度的影响。实验中采用偏移量为 20 μm, 传感光纤长度分别为 10 mm、15 mm、20 mm 的 LCOS-MZI 进行曲率传感实验, 实验结果如图 9 所示。传感光纤长度为 10 mm 时, 如图 9(a) 所示, 随着曲率增加, 1569 nm 和 1598 nm 两处波谷随曲率增加分别向短波长和长波长方向漂移; 传感光纤长度为 15 mm 时, 如图 9(b) 所示, 透射谱向短波长方向漂移; 传感光纤长度为 20 mm 时, 如图 9(c) 所示, 1561 nm 处的波谷随曲率增加分裂为两个峰, 并分别向长波长和短波长方向漂移。

在 1520—1620 nm 的窗口内选取漂移最大的峰进行分析, 得到曲率传感拟合图如图 10 所示。传感光纤长度为 10 mm、15 mm、20 mm 时, 在 0—2 m⁻¹

长, 每升高 10 °C 记录一次数据, 温度测量范围为 20—100 °C。

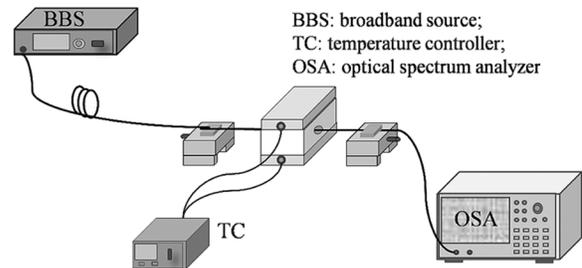


图 11 温度传感装置

Fig. 11 Temperature sensing device

传感光纤长度为 15 mm, 偏移量分别为 13 μm、20 μm、27 μm 时, 温度传感实验结果如图 12 所示。偏移量为 13 μm 时, 如图 12(a) 所示, 在 20—100 °C 的温度变化范围内, 透射谱的波形保持得较好, 波动较小。偏移量为 20 μm 时, 如图 12(b) 所示, 随着温度变化, 透射谱强度出现较大起伏, 且波长随温度变化漂移明显。当偏移量增大为 27 μm 时, 如图 12(c) 所示, 波长随温度升高向短波长方向发生大幅度漂

移,温度特性劣化严重。

偏移量为 20 μm,传感光纤长度分别为 10 mm、15 mm、20 mm 时,温度传感实验结果如图 13 所示。传感光纤长度为 10 mm 时,如图 13(a)所示,在 20—100 °C 的温度变化范围内,透射谱的波形也保持得较

好,波动较小。传感光纤长度为 15 mm 时,如图 13(b)所示,随着温度升高,透射谱出现波长漂移和强度变化。传感光纤长度为 27 μm 时,如图 13(c)所示,波长随温度升高向短波长漂移,且强度变化剧烈。可以看到,随着传感光纤长度增大,透射谱的温度特

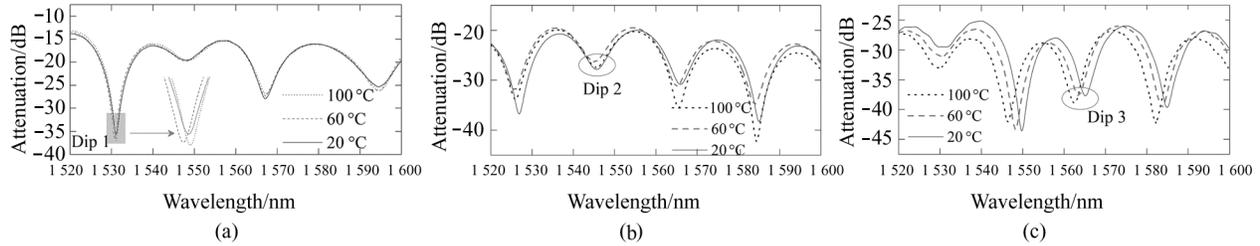


图 12 LCOS-MZI 温度传感光谱演变图:(a) 偏移量 13 μm; (b) 偏移量 20 μm; (c) 偏移量 27 μm

Fig. 12 Spectral evolution of LCOS-MZI with temperature variation: (a) Core-offset 13 μm; (b) Core-offset 20 μm; (c) Core-offset 27 μm

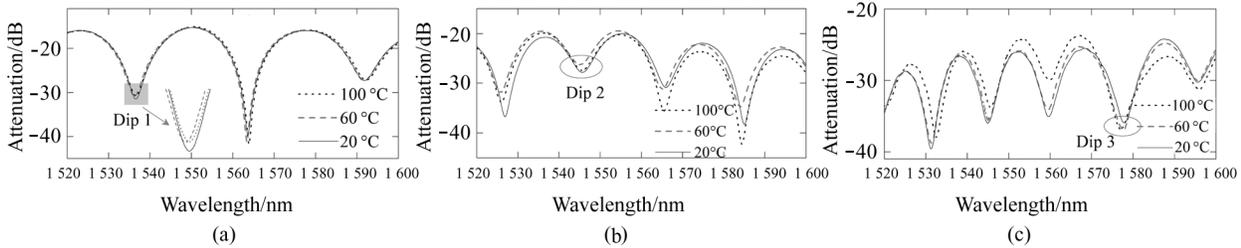


图 13 LCOS-MZI 温度传感光谱演变图:(a) 光纤长度 10 mm; (b) 光纤长度 15 mm; (c) 光纤长度 20 mm

Fig. 13 Spectral evolution of LCOS-MZI with temperature variation: (a) Sensor length 10 mm; (b) Sensor length 15 mm; (c) Sensor length 20 mm

性也逐渐劣化。

3 结果分析与讨论

对不同偏移量、不同传感光纤长度下 LCOS-MZI 的温度和曲率特性进行数据汇总,结果如表 1 所示。

表 1 实验结果汇总

Tab. 1 Summary of experimental results

Core-offset /μm	Sensor length /mm	Curvature sensitivity nm/m ⁻¹	Temperature maximum shift /nm
13	15	1.3	0.46
20	15	8.1	1
27	15	3.4	2.64
20	10	10.9	0.24
20	15	8.1	1
20	20	6.5	1

从表 1 可以看到,偏移量为 20 μm,传感光纤长度为 10 mm 的 LCOS-MZI,曲率灵敏度可以达到 10.9 nm/m⁻¹,且温度特性最为稳定。对该参数 LCOS-MZI 温度传感的数据进行分析和拟合,拟合

结果如图 14 所示:在 20—100 °C 的温度变化范围内,温度灵敏度仅为 0.9 pm/°C。该温度灵敏度较低,温度变化 1 °C 引起的曲率灵敏度相对误差小于万分之一。因此,利用该 LCOS-MZI 进行曲率传感时,工作环境温度变化对曲率传感的结果影响较小。

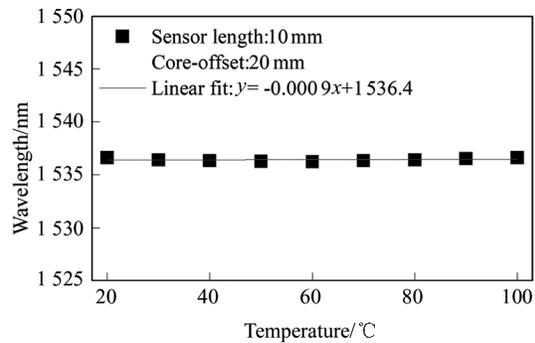


图 14 偏移量为 20 μm、传感光纤长度为 10 mm 时的 LCOS-MZI 温度传感拟合图

Fig. 14 The temperature characteristic fitting diagram of LCOS-MZI with core-offset of 20 μm and sensor length of 10 mm

为验证该结构温度特性的重复性,间隔 24 h 后重复进行温度实验。以 20 °C 时的中心波长为基准,画出中心波长随温度变化的漂移量,如图 15 所示。两次温度特性重复实验中,干涉谱中心波长均较为稳定,重复性较好。

总体来看,偏移量为 20 μm 、传感光纤长度为 10 mm 的 LCOS-MZI 曲率灵敏度可以达到 10.9 nm/m^{-1} ,温度灵敏度仅为 0.9 pm/C ,温度灵敏度较低,且重复性好,温度特性稳定。本文制备的 LCOS-MZI 结构并不复杂,之所以会有较为理想的温度特性,分析原因如下:一是与采用 Nufern 的光敏光纤 GF3 有关。从表 1 的温度特性来看,不同偏移量和传感光纤长度的 LCOS-MZI,温度特性虽然有差异,但是多组不同参数的 LCOS-MZI,中心波长漂移量都不大。此外,GF3 光纤易于熔接的特性极大地提高了熔接的成功率,使得制备难度大大降低。因此,可能是 GF3 光纤特殊的材质或者特殊的掺杂,使得该 LCOS-MZI 具有良好的温度特性。二是不同包层模式的影响。从前面的分析可知,偏移量和传感光纤长度不同,透射谱中发生干涉的主包层模式也不同,因此,对不同参数的 LCOS-MZI 进行实验和对比,可以挑选出温度灵敏度更低的参数组合,从而进一步降低温度灵敏度。总之,经过理论和实验分析,获得了温度特性良好的 LCOS-MZI,实现了较低温度灵敏度的曲率传感,且曲率灵敏度可以达到 10.9 nm/m^{-1} ,此时温度灵敏度仅 0.9 pm/C 。

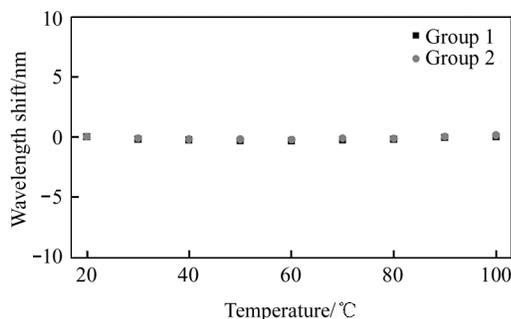


图 15 温度重复性实验结果图

Fig. 15 Temperature repetition characteristics

将现有的光纤 MZI 进行曲率传感时的灵敏度和温度特性与本文的结论进行对比,如表 2 所示。

从表 2 可以看到,前 3 组结构简单,采用特殊光纤作为传感光纤;第 4—6 组结构十分复杂,且制作方法各不相同。从曲率传感的灵敏度来看,第 1、2、4 组较高,但同时温度的特性变得较差,温度的交叉影响不可忽略。本文制作的 LCOS-MZI,结构简单、容

易制备,曲率灵敏度达到了 10.9 nm/m^{-1} ,且温度灵敏度低至 0.9 pm/C 。较低的温度灵敏度使得该结构应用于曲率传感时可以最大程度地减小温度波动带来的误差。同时,良好的温度特性使得该结构不仅可以用于曲率传感,下一步课题组将围绕该结构在其他参数传感下搭建系统并应用于人体生物特征检测等方面开展进一步研究。

表 2 同类型研究成果对比

Tab. 2 Comparison of research achievements in fiber MZI

Sensing structure	Range / m^{-1}	Curvature sensitivity / $(\text{nm}/\text{m}^{-1})$	Temperature sensitivity / (pm/C)	Ref.
SMF-ECF-SMF	0—1.11	-18.4	42.9	[4]
SMF-TCF-SMF	0—0.8	20.48	43	[5]
SMF-PCF-SMF	-7—7	1.232	20	[6]
FBG on DSHF	0—1	1.8	11	[11]
Helical structure	0—0.42	24.06	73.4	[13]
Taper	0.12—1	9.87	1.73	[15]
SMF-GF3-SMF	0—2	10.9	0.9	This paper

4 结 论

利用光敏光纤 GF3,通过 LCOS 熔接制成 LCOS-MZI,实现了具有较低温度灵敏度水平的曲率传感。该结构容易制备,步骤简单,且温度灵敏度低,温度特性稳定。经过对不同偏移量和不同传感光纤长度 LCOS-MZI 的特性进行实验、分析和对比,得到偏移量为 20 μm 、传感光纤长度为 10 mm 的 LCOS-MZI,温度灵敏度低至 0.9 pm/C ,应用于曲率传感时基本可以忽略温度带来的交叉影响。同时,曲率灵敏度可以达到 10.9 nm/m^{-1} ,测量范围为 0—2 m^{-1} 。基于 GF3 光纤的 LCOS-MZI,结构简单,尺寸小,曲率传感灵敏度较高,在进行曲率传感时几乎不受温度影响,避免温度交叉敏感引入额外的误差。除了在机械、桥梁等需要曲率传感的场合具有重要的应用价值外,该结构良好的温度特性,在未来应用于其他参数的传感时也具有非常好的延展性。

参考文献:

- [1] LIU Y, DENG H C, YUAN L B. Directional torsion and strain discrimination based on Mach-Zehnder interferometer with off-axis twisted deformations[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105754.
- [2] WANG Z F, ZHANG L, MA Z W, et al. High sensitivity bending sensor based on super-mode interference in coupled four-core sapphire derived fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3932-3940.

- [3] YANG F, CAO Y, LI M, et al. Refractive index and temperature optical fiber sensor based on thin core S-taper and spherical structure[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 18(6):321-325.
- [4] KONG J, OUYANG X W, ZHOU A, et al. Highly sensitive directional bending sensor based on eccentric core fiber Mach-Zehnder modal interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(18):6899-6902.
- [5] DING L, LI Y, ZHOU C, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on three-core fiber for measurement of directional bending[J]. *Sensors*, 2019, 19(1):205.
- [6] 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.
- [7] YU Y Q, ZHANG Y F, OU Z L, et al. Simultaneous measurement of one-dimensional bending and temperature based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4):376-384.
- [8] MA L, QI Y H, SUN J, et al. All-fiber modal interferometer based on an up-taper-core-offset structure for curvature sensing[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 25(4):044202.
- [9] 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.
- [10] ZHANG J H, ZHANG W G, ZHANG Y X, et al. Bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer using S type fibre taper and lateral-offset[J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(21):2146-2150.
- [11] 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.
- [12] ZHAO R, SHU X W, WANG P. High-performance bending sensor based on femtosecond laser-inscribed in-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22):6371-6378.
- [13] HE X L, ZHOU J, MA C, et al. Bend sensor based on Mach-Zehnder interferometer using single-mode fiber with helical structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(1):15-18.
- [14] SHIN W, LEE Y L, YU B A, et al. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(10):2097-2101.
- [15] FU G W, LI Y P, LI Q F, et al. Temperature insensitive vector bending sensor based on asymmetrical cascading SMF-PCF-SMF structure[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3):7103114.
- [16] AGHAIE K Z, DIGONNET M J F, FAN S H. Optimization of the splice loss between photonic-bandgap fibers and conventional single mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12):1938-1940.
- [17] YU F D, XUE P, ZHENG J. Study of a large lateral core-offset in-line fiber modal interferometer for refractive index sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47:107-112.
- [18] CHEN J L, ZHOU X F, HU M, et al. An optical fiber temperature sensor based on paralleled of FSI and MZI[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2022, 33(10):1024-1030.
陈健兰, 周雪芳, 胡淼, 等. 一种基于 FSI 和 MZI 并联组合的光纤温度传感器[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(10):1024-1030.
- [19] XIAO Y X, WANG J, HOU Y F, et al. Mode analysis of in-line Mach-Zehnder interferometer with offset splicing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62:102473.

作者简介:

李 丽 (1986—), 女, 硕士, 讲师, 工程师, 主要从事光纤通信器件、光纤传感方面的研究。