

DOI:10.16136/j.joel.2022.09.0172

基于熊猫光纤的高灵敏度温度和应力传感器

任 杰, 孙四梅*, 宋 娇, 陈海林, 陈 宁, 鲁志琪

(湖北师范大学 物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002)

摘要: 本实验基于模间干涉原理制作了由熊猫型保偏光纤(Panda polarization maintaining fiber, PMF)构成的马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)传感器。该传感器由于大孔径多模光纤(large aperture multimode fiber, MMF)的耦合作用,对温度表现出很高的灵敏度。当外界物理量温度变化时,传感器透射谱发生漂移,通过观察特征峰的漂移与温度变化的关系,得到传感器温度响应特性。实验数据显示,该单模-多模-熊猫-单模光纤干涉仪结构的两个特征峰波长对温度线性响应,且灵敏度为 $-123.80\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-195.20\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。该传感器温度实验的重复性和稳定性效果均很好,能实现对温度的有效测量。

关键词: 马赫-曾德尔干涉仪(MZI); 温度传感; 熊猫型保偏光纤(PMF); 大孔径多模光纤(MMF)

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)09-0920-05

High - sensitivity temperature and strain sensor based on Panda polarization maintaining fiber

REN Jie, SUN Simei*, SONG Jiao, CHEN Hailin, CHEN Ning, LU Zhiqi

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

Abstract: Based on the principle of inter-mode interference, a Mach-Zehnder interferometer (MZI) sensor composed of Panda polarization maintaining fiber (PMF) is fabricated in this experiment. Because of the coupling of the large aperture multimode fiber (MMF), the sensor shows high sensitivity to temperature. When the external temperature changing, the transmission spectrum of the sensor shifts. By observing the wavelength shift of characteristic peaks, the temperature response characteristics of the sensor is obtained. From the experimental data, the wavelength of two characteristic peaks of the SMF-MMF-PMF-SMF interferometer structure linearly responses to temperature. The sensitivity of temperature is $-123.80\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ and $-195.20\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, respectively. The repeatability and stability of this sensor for temperature measuring are very good, and this sensor can effectively measure the ambient temperature.

Key words: Mach-Zehnder interferometer (MZI); temperature sensing; Panda polarization maintaining fiber (PMF); the large aperture multimode fiber (MMF)

1 引 言

自 20 世纪 70 年代末光纤传感器诞生以来,由于其具有防火、防爆、精度高、损耗低、体积小、质量轻、寿命长、性价比高、复用性好、响应速度快、抗电磁干扰、频带范围宽、动态范围大、易与光纤传输系统组成遥测网络等优点,而被广泛地应用于各行各业。随着对其研究的不断深入,光纤传感器势必会对科学研究、国民生产、日常生活等

诸多领域产生深远影响,光纤传感器的制作将越来越方便与简单^[1]。

马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)传感器是光纤传感器中较为精密的一类光纤传感器,其基本原理是利用干涉的测量技术把光纤内部传送的光变化转化为光强的变化,进而感应出外界因素的变化。MZI 传感器具有制作简单,灵敏度高、分辨率好和结构紧凑等优点^[2],在温度^[3]、应变、湿度^[4]、折射率、曲率等传

* E-mail: simeisun@hbnu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-16 修订日期: 2022-04-23

基金项目: 2020 年度湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2020136)资助项目

感领域得到了广泛的研究。近些年来,研究者们开始在单光纤内制备结构紧凑的全光纤 MZI,实现了温度、折射率和曲率等多参数测量^[5]。

熊猫型保偏光纤(Panda polarization maintaining fiber, PMF)具有偏振保持和吸收还原能力,是一种双折射型保偏光纤,对线偏振光的偏振态具有较强的保持能力,并且与普通的单模光纤(single mode fiber, SMF)具有良好的兼容性。其结构中有两个特殊的“应力区”,使得其在光纤传感实验中得到很好的应用^[6],广泛用于航空、航海、工业制造技术及通信等各个领域。

本实验采用错位熔接的技术手段,利用大孔径多模光纤(multimode fiber, MMF)和 PMF 进行耦合,制作了基于 PMF 的 MZI 光纤传感器,并研究了它的温度特性,发现该传感器比类似结构具有更高的灵敏度。

2 实验原理与装置

本实验仪器主要包括低偏振超宽带光源(北京康冠世纪 QS15091601)、微型开启式高温管式电炉(合肥科晶材料 S20180450)、光谱分析仪(日本横河 AQ6370)和特种光纤熔接机(日本横河 Fujikura FSM-100+)。

本实验装置、传感头三维结构原理图如图 1(a)所示,实验结构为单模-多模-熊猫光纤-单模(SMF+MMF+PMF+SMF)的 MZI 传感器。MMF 的纤芯直径 105 μm ,包层的外径 125 μm ;SMF 的纤芯直径 9 μm ,包层的外径 125 μm ;PMF 的无掺杂纤芯直径为 6.5 μm ,两个掺杂应力区直径为 33 μm ,包层外径为 125 μm ,具体结构如图 1(b)所示。在 SMF 与 PMF 之间熔接 $L_1=1\text{ mm}$ 的 MMF,利用 MMF 的大芯径特点^[7],将光耦合进 PMF 的两个应力区和包层中,两束光在长度为 L_2 的 PMF 中传播一段距离后,形成光程差从而产生相位差。使用特种光纤熔接机对 PMF 和 MMF 进行错位熔接,两束传播光束在 SMF 中发生干涉^[8],得到了基于 PMF 的 MZI 传感头。

该传感头的传输光强可表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},j}^{\text{eff}})L_2}{\lambda}\right], \quad (1)$$

式中: I_1 和 I_2 分别表示 PMF 纤芯模和包层模的光强; λ 表示入射波长; L_2 表示 PMF 的长度; $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 、 $n_{\text{cl},j}^{\text{eff}}$ 分别表示纤芯模和第 j 阶包层模的有效折射率:

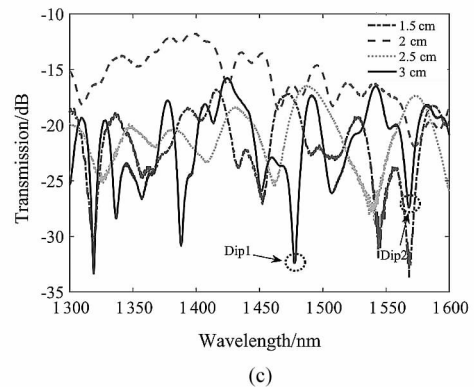
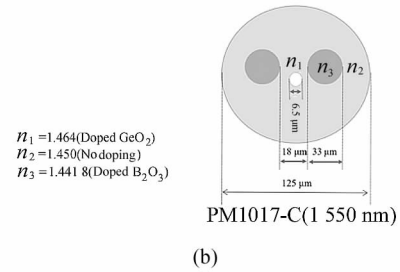
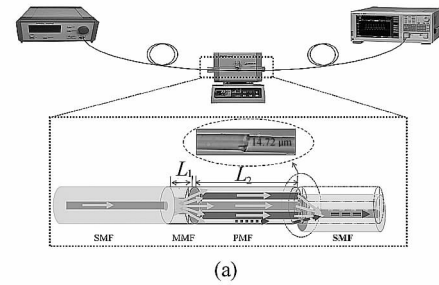
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},j}^{\text{eff}})L_2}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L_2}{\lambda}, \quad (2)$$

式中, Δn_{eff} 表示纤芯模和第 j 阶包层模之间的有效折

射率差。当相位差满足 $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$ 且 m 为整数时,干涉光强达到最小值^[9],此时透射光谱干涉峰对应的波长为:

$$\lambda_{\text{Dip}} = \frac{2}{2m+1} \Delta n_{\text{eff}} L_2. \quad (3)$$

在本实验“SMF+MMF+PMF+SMF”传感头的设计中,MMF 起到光耦合作用,根据前人两篇基于细芯光纤(thin core fiber, TCF)的“SMF+MMF+TCF+MMF+SMF”传感器研究,MMF 的长度变化未明显改变温度灵敏度^[10,11],因此,实验选择合适的长度便于熔接操作即可。本实验在进行前改变了 PMF 的长度,测量了相应结构在室温下的干涉光谱,如图 1(c)所示。结果显示,当 PMF 为 3 cm 时,光谱具有较多干涉峰、较好消光比和信噪比,所以本文选择 PMF 为 3 cm 对应的传感结构进行温度实验。该 MZI 结构错位量为 14.72 μm ,错位程度的选择是基于前人参考文献和实验操作的经验。前人报道的各类 MZI 微结构的错位量在 0—10 μm 范围内,随着错位量的增加而得到更优质量的干涉光谱^[12,13],



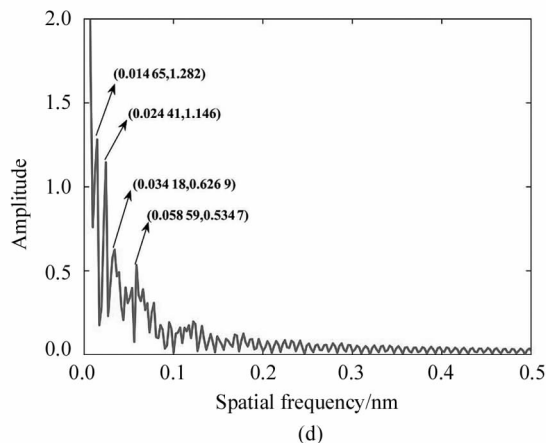


图1 实验装置和传输光谱以及空间频谱:

(a) 温度实验装置和传感头三维原理图;

(b) PMF 垂轴剖面结构图;

(c) 常温下干涉仪透射谱; (d) 空间频谱

Fig. 1 Experimental setup, transmission spectrum, and spatial spectrum: (a) Temperature experimental setup and 3-D schematic diagram of sensor head; (b) Section structure of PMF; (c) Transmission spectra of interferometer at room temperature; (d) Spatial spectrum

因此,在进行实验时选择 $10\ \mu\text{m}$ 左右的错位量,但实验操作会带来少许偏差。另外,实验操作过程中发现错位量继续增大,会造成结构比较脆弱,容易损坏。

将图1(c)中PMF为3 cm对应的干涉谱进行傅里叶变换,得到空间频谱(图1(d)),结果显示,在空间频谱中零频基模与两个空间频率分别为 $0.01465\ \text{nm}^{-1}$ 和 $0.02441\ \text{nm}^{-1}$ 的低阶模提供了绝大部分功率,对干涉起主要作用^[14]。实验使用大芯径MMF进行耦合,光进入PMF包层中主要激发出空间频率分别为 $0.03418\ \text{nm}^{-1}$ 和 $0.05859\ \text{nm}^{-1}$ 的高阶包层模,它们互相干涉,从而对该结构的干涉光谱产生了一定的影响,使得透射谱并不是规则的正弦波谱,但是却保持稳定的干涉。

3 实验结果与分析

选择图1(c)中波谷Dip1与Dip2来研究MZI的温度特性,其中,Dip1的中心波长为 $1470\ \text{nm}$, Dip2的中心波长为 $1555\ \text{nm}$ 。在温度范围 $39\text{--}54\ ^\circ\text{C}$ 之间每隔 $3\ ^\circ\text{C}$ 进行光谱记录,发现波谷Dip1和波谷Dip2的位置随温度的升高均向短波方向漂移。图2(a)显示了Dip1在升温过程中对应温度的光谱,箭头表示

Dip1移动方向,利用MATLAB软件对实验数据进行线性拟合,波长和温度呈现线性响应。从图2(b)可知,波谷Dip1在升温 and 降温过程的灵敏度均为 $-123.80\ \text{pm}/^\circ\text{C}$,线性度为 99.22% 。

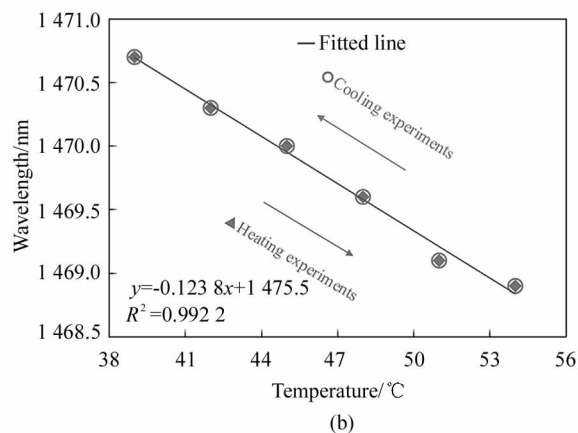
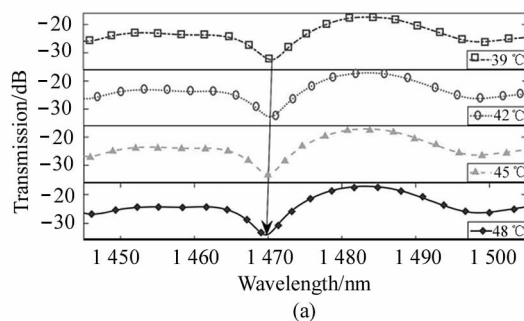


图2 Dip1温度响应特性:(a) 升温响应光谱图;

(b) 温度线性拟合图

Fig. 2 Temperature response of Dip1:

(a) Temperature rising response spectra;

(b) Temperature linear fitting diagram

图3(a)为Dip2波长在降温过程中对应温度的光谱,其中箭头表示Dip2移动方向。结果表明,当温度降低时,Dip2向长波方向漂移,Dip2中心波长与温度变化有很好的线性关系,拟合度 R^2 为 0.9967 ,并且具有很高的温度灵敏度 $-195.20\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 。

该MZI传感器温度灵敏度是通过拉锥和熔球耦合PMF MZI传感器的温度灵敏度的 $4\text{--}5$ 倍^[3],是小孔径MMF耦合PMF MZI传感器的温度灵敏度的 $2\text{--}3$ 倍^[15]。另外,MMF分别和TCF、SMF和PMF构成的MZI传感器,温度灵敏度列于表1中^[8,10,15,16],数据表明大孔径MMF耦合PMF结构大幅提高了温度传感灵敏度,这可能得益于大孔径MMF耦合PMF,激发出多阶包层模参与到干涉过

程中,对温度响应均有贡献^[8]。该实验 MZI 传感器使用长飞光纤光缆股份有限公司生产的 PM1017-C 型号的 PMF 光纤,根据其垂轴剖面结构图 1(b)可知,使用大于 84 μm 的大芯径 MMF 进行耦合,有利于光强分布于“无掺杂纤芯区”、“掺杂应力区”和包层区,从而促进多阶光模式之间的干涉,提升传感器灵敏度。

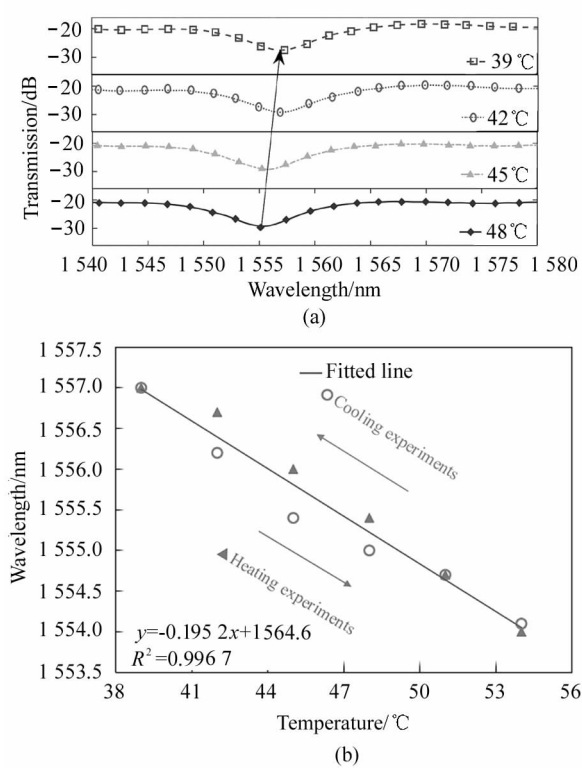


图 3 Dip2 温度响应特性:(a) 降温响应光谱图;
(b) 温度线性拟合图

Fig. 3 Temperature response of Dip2:
(a) Temperature falling response spectra;
(b) Temperature linear fitting diagram

表 1 不同孔径 MMF 和特种光纤构成
MZI 传感器的温度灵敏度

Tab. 1 Temperature sensitivity of MZI sensor composed of MMF with different apertures and special fiber			
MMF aperture /μm	Sensitivity /pm · °C ⁻¹	Structure type	Literature
50.0	42.6	MMF+TCF+MMF	[16]
50.0	88.0	MMF+SMF+MMF	[10]
62.5	65.5/65.1	MMF+PMF+MMF	[15]
105.0	80.0	MMF+MMF+MMF	[8]
105.0	128.8/195.2	MMF+PMF+MMF	Experimet test

对该结构在相同温度范围内不同时间段重复实验两次,得出重复性实验结果如图 4(a)所示,选择 1 470 nm 处特征峰 Dip1 观察透射谱的漂移情况,得到与升温、降温实验相同的灵敏度和线性拟合度。为了测定该结构是否能长时间在该温度范围内保持良好的测试效果,本实验对该结构的稳定性做出了测试,在 45 °C 条件下,保持其他物理量不变,每 10 min 记录一次数据,共记录 12 组数据,得到该结构的稳定性实验如图 4(b)所示。结果显示该 PMF MZI 位于 1 470 nm 处的特征峰在 45 °C 条件下不发生漂移,稳定性良好。

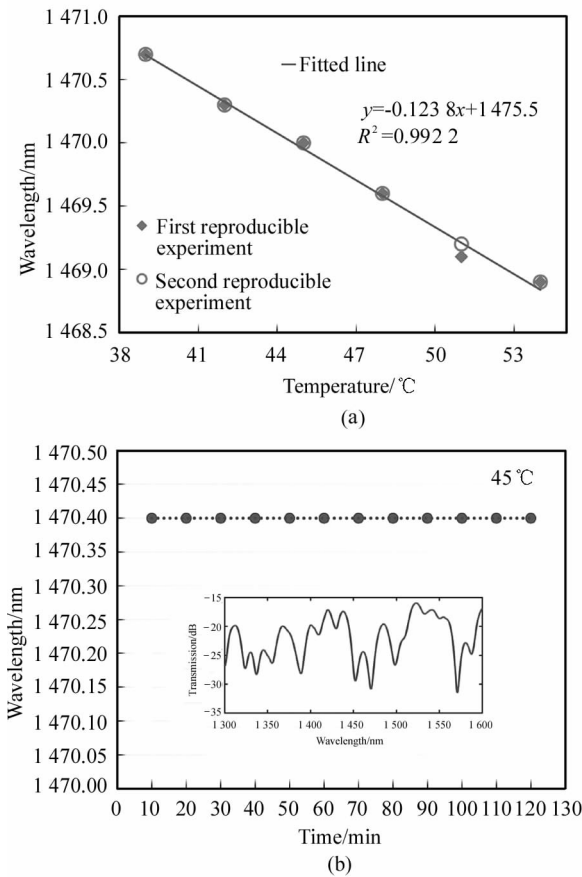


图 4 温度重复性和稳定性:(a) 温度重复性实验;
(b) 温度稳定性实验

Fig. 4 Repeatability and stability of temperature:
(a) Temperature repeatability experiment;
(b) Temperature stability experiment

4 结 论

本实验设计了可测量温度的高灵敏度传感器,该结构的透射谱具备稳定的干涉谱,其特征峰对温度有极佳线性响应特性和高灵敏度特性,Dip1 和 Dip 2 的温度灵敏度分别为 -1 23.80 pm / °C 和

-195.20 pm / °C, 线性度分别为 99.22 % 和 99.67 %。另外, 实验发现, MZI 结构透射谱随熊猫光纤长度的增大而渐佳, 当增大到 3 cm 时, 出现稳定且消光比信噪比很好的干涉谱。本实验设计的 MZI 传感器结构简单体积小, 灵敏度高, 在温度测量传感中具有很大的应用前景。

参考文献:

- [1] LEVINA T M, BILALOVA D N. Methods of diagnostics of electrical equipment by fiber-optic sensors on the Faraday effect[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1155(1): 012053.
- [2] ZHENG H, LV R, ZHAO Y, et al. Multifunctional optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and salinity[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6631-6634.
- [3] BIAN J C, LANG T T, DONG X Y, et al. Study of polarization maintaining fiber temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(7): 687-691.
卞继城, 郎婷婷, 董新永, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的保偏光纤温度传感器研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(7): 687-691.
- [4] WANG Y N, SHEN C Y. Optical fiber humidity sensors based on Mach-Zehnder interference[J]. Journal of China University of Metrology, 2019, 30(4): 463-467.
王勇能, 沈常宇. 基于马赫-曾德尔干涉的光纤湿度传感器[J]. 中国计量大学学报, 2019, 30(4): 463-467.
- [5] SUN M M, WANG J F, JIN Y X, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometer based on lateral-offset and peanut shape structure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1560-1564.
孙明明, 王剑锋, 金永兴, 等. 基于错位和花生形结构的全光纤马赫-曾德尔干涉仪的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1560-1564.
- [6] LEI C X. Research on Mach-Zehnder interferometer sensor based on all single mode and all Panda fibers[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
雷成秀. 基于全单模和全熊猫光纤马赫-曾德尔干涉仪传感器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [7] JIAO W Y, XIAO Y Y, SUN Y X. All-fiber temperature sensor based on multimode optical fiber-to-core fusion splicing[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 185-190.
皎文毓, 肖玉阳, 孙雨欣. 基于多模光纤对芯熔接的全光纤温度传感器[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 185-190.
- [8] ZHANG Y S, QIAO X G, SHAO M, et al. A fiber Mach-Zehnder interferometer based on waist-enlarged fiber taper and graded-index multimode fiber[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(9): 1662-1667.
张芸山, 乔学光, 邵敏, 等. 基于光纤锥和多模渐变光纤的马赫-曾德尔干涉仪的传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(9): 1662-1667.
- [9] LI X W, TAN J C, FENG G Y. All-fiber dual-parameter sensor based on Mach-Zehnder interference[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(11): 111010.
李筱薇, 谭建昌, 冯国英. 基于马赫-曾德尔干涉的全光纤双参量传感器[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 111010.
- [10] NGUYEN L V, HWANG D, MOON S, et al. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch[J]. Optics Express, 2008, 16(15): 11369-11375.
- [11] TONG Z G, HAN W, GUO C. Fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode fiber core-offset[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0104006.
童峥嵘, 韩伟, 曹晔. 基于多模光纤偏芯熔接实现温度和折射率同时测量的光纤传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0104006.
- [12] YIN G, LOU S, ZHOU H. Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 45: 294-300.
- [13] TIAN Z, YAM S S H, LOOK H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(16): 1387-1389.
- [14] HU Y H, GUO X S, JIANG C, et al. Optical fiber sensor for simultaneous temperature and stress measurement by femtosecond laser micromachining[J]. Journal of Hubei Normal University (Natural Science), 2017, 37(1): 83-87.
胡义慧, 郭小珊, 江超, 等. 用于温度与应力同时测量的光纤传感器[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 83-87.
- [15] SHEN W M, LIU C N, JIANG C, et al. Temperature and strain characteristics based on coupling of multimode and panda fiber[J]. Piezoelectric & Acoustooptic, 2021, 43(4): 474-478.
申万梅, 刘昌宁, 江超, 等. 基于多模与熊猫光纤耦合的温度与应变特性研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(4): 474-478.
- [16] LI H D, FU H W, SHAO M, et al. Experimental study on in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on MMF-TCF-MMF for temperature sensing[J]. Physical Experiment of College, 2017, 30(4): 1-6.
李辉栋, 傅海威, 邵敏, 等. 基于多模-细芯-多模光纤结构的 Mach-Zehnder 干涉仪的温度传感实验研究[J]. 大学物理实验, 2017, 30(4): 1-6.

作者简介:

孙四梅 (1985—), 女, 博士, 主要从事超快光谱和光纤传感研究。