DOI:10.16136/j.joel.2023.04.0240

基于七芯光纤的迈克尔逊干涉型光纤温度传感器

张 蓉1*,邵 敏1,高 宏1,乔学光2,富志鹏3,赵力国3

(1. 西安石油大学 理学院 光电油气测井与检测教育部重点实验室,陕西 西安 710065; 2. 西北大学 物理学院, 陕西 西安 710127; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710068)

摘要:为了实现对环境温度的精确测量,提出了一种基于七芯光纤(seven-core fiber,SCF)的迈克尔逊干涉型温度传感器。该传感器由单模光纤(single mode fiber,SMF)和 SCF 熔锥构成,当光由SMF 进入 SCF 时,由于光纤直径的急剧变小,在光纤细锥区域会激发出 SCF 中的高阶模,这些高阶模与纤芯基模经 SCF 端面反射后,再次回到细锥区域时发生干涉,并经由 SMF 输出。制作了不同长度 SCF 的传感器样品,并分别进行了温度传感实验研究。温度响应实验结果表明,在 20—160 ℃温度范围内,长度为 47 mm 的传感器的温度灵敏度为 0.127 4 nm/℃,拟合线性系数为 0.9983,温度测量分辨率为 0.0078 ℃,稳定性实验测得传感器的测量标准偏差为 0.2896 ℃。该温度传感器结构紧凑、易于制作、成本低廉、灵敏度高且测量范围大,在温度监测领域具有一定的应用潜力。

Optical fiber Michelson interferometric temperature sensor based on seven-core fiber

ZHANG $Rong^{1\,*}$, SHAO MIN^1 , GAO $Hong^1$, QIAO Xueguang^2 , FU Zhipeng^3 , ZHAO Liguo^3

(1. Key Laboratory of Photoelectric Logging and Detecting of Oil and Gas, Ministry of Education, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. School of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract: In order to achieve accurate measurement of ambient temperature, a temperature sensor based on Michelson interferometer with seven-core fiber (SCF) is proposed. The sensor is fabricated by fusion spliced a taper in between a section of SCF and a single mode fiber (SMF). When light enters the SCF from the SMF, high-order modes of SCF in thin cone area will be excited for suddenly fiber diameter decreasing. After propagation in SCF, the high-order modes and the fundamental mode of fiber core are reflected by the end face of the SCF and continue transmitting in the SCF until reach the taper, these modes meet and interfere with each other, and then the accumulate interference is coupled to the SMF. The sensor samples with different SCF lengths are fabricated and experimentally investigated. The experimental results show that the temperature sensitivity of the sensor with length of 47 mm is 0. 127 4 mm/°C within the temperature range of 20—160 °C, the fitting linear coefficient is 0. 9983, and the temperature resolution is 0.0078 °C. The measurement standard deviation of the sensor is 0. 289 6 °C in the stability experiment. The temperature sensor has the advantages of easy fabrication, low cost, high sensitivity and large measurement range, which shows certain application potential in temperature monitoring fields.

Key words: optical fiber sensing; temperature sensing; optical fiber temperature sensor; Michelson inter-

* E-mail:shaomin@xsyu.edu.cn
 收稿日期:2022-04-07 修订日期:2022-07-13

基金项目:国家自然科学基金(61805197)、陕西省科技成果转移与推广计划(2021CGBX-38)和西安石油大学研究生创新与实践能 力培养计划项目(YCS20111010)资助项目 ferometer; seven-core fiber (SCF)

0 引 言

温度作为描述物体冷热程度的一个重要参 数,被广泛应用于航空航天、交通运输、工农业生 产、大型基础设施的健康监测和安全预警等领域, 实现实时、多点、精确的温度测量愈显重要。随着 技术发展水平的提高和实际应用需求的逐渐增 加,温度的检测朝着复杂环境、极端参数和多维度 方向拓展。目前已有的温度测量技术包括可调谐 激光吸收光谱(tunable laser absorption spectrum, TDLAS)燃烧诊断技术^[1]、热电阻(resistance Temperature detector, RTD)^[2]、可穿戴柔性超级电容 器[3]、基于上转换发光材料的温度传感探测[4]和 数字温度传感器^[5]等。其中,TDLAS燃烧诊断技 术主要用于高温测量领域,检测原理复杂,工程应 用尚不广泛:RTD温度传感器与其他温度感应技 术相比,测量范围大,但生产成本较高;柔性超级 电容器的循环寿命高、安全性好,但无法工作在极 端气候条件下;数字温度传感器的测量精度虽然 可以调节,但需要与集成电路相结合。上述温度 测量技术由于无法实现瞬态、远距离、大范围和多 点温度测量,在实际应用中有诸多局限。而光纤 温度传感器质轻、无源、耐腐蚀、稳定性好、抗电磁 干扰、精度高、易于复用等,有望解决上述问题。 典型的光纤温度传感器包括光纤干涉仪型[6-10]、 表面等离子共振型[11]、光纤耦合器型[12]和光纤光 栅型[13-15]。其中,光纤干涉仪性能优异,除具有 光纤自身优点外,兼具灵敏度高、制作简便和分辨 率高的特点,因而基于光纤干涉仪的温度传感技 术得到了广泛的研究。目前已有的基于光纤干涉 仪的温度传感器主要有:法布里-珀罗干涉仪、马 赫-曾德尔干涉仪、迈克尔逊干涉仪和萨格奈克干 涉仪[16-19]。其中迈克尔逊干涉仪作为一种反射 式结构,制作相对简单,探头灵活多样,全光纤式 迈克尔逊干涉仪还可消除环境干扰,其紧凑的结 构可嵌入或埋覆进测量本体中,更适用于恶劣环 境的长期瞬态温度测量。

近年来,研究人员设计出了多种全光纤迈克 尔逊干涉仪型传感器,用于温度的测量,传感器在 结构设计和温度灵敏度方面也获得了很大的提 升。例如,MUSA等^[6]通过对芯熔接法制作出单 模-多模-双包层光纤结构的温度传感器,能够区分 测量温度和折射率。传感器在 30—70 ℃范围内 的最高温度灵敏度为 0.0474 nm/℃; ZHAO等^[7] 提出了一种基于侧孔光纤级联非对称双芯光纤的 迈克尔逊干涉仪,用于多参数传感。此传感器在 30—100 ℃范围内的温度灵敏度为 0.010 37 nm/℃;WANG等^[9]通过在光纤的悬浮芯中部分 填充聚合物-紫外胶来构成迈克尔逊干涉型传感器,此传感器在 25—60 ℃范围内的温度灵敏度达 到 0.164 nm/℃。上述迈克尔逊干涉型光纤温度 传感器虽然灵敏度高,但温度的测量范围还需进 一步拓宽,制作工艺也需简化以适应实际需求。 因此,设计一种集制作工艺简便、测量范围大和高 温度灵敏度于一体的光纤温度传感器具有重要的 现实和实用意义。

基于此,本文提出并制作了一种结构简单、无 需涂覆任何温敏材料的迈克尔逊干涉型光纤温度 传感器,传感器由单模光纤(single mode fiber, SMF)、七芯光纤(seven-core fiber, SCF)及拉锥熔 接形成的细锥区域构成。SMF和 SCF之间细锥 区域直径的急剧缩小会激发出 SCF 的高阶模。高 阶模与纤芯基模发生干涉,利用模间干涉对环境 温度的敏感性来实现测量目的。同时,对传感器 的重复性和稳定性进行了实验探究。该传感器结 构简单、温度灵敏度高、制作可重复性高、稳定性 良好,且有望实现更大范围温度的检测,更符合目 前对此类型传感器的测量要求。

1 基本原理

图 1 为本文提出的传感器结构示意图,传感器 主要由 SMF 和 SCF 构成,其工作原理如下:当光沿 SMF 传输到细锥结构时,由于光纤直径的急剧减小, 一部分光以纤芯模的形式进入 SCF 的中心纤芯和边 芯中传输,另一部分光耦合进 SCF 包层,激发出高阶 包层模,但光在七芯包层中传输时损耗较大^[20],可忽 略不计。这些高阶模和纤芯模在 SCF 中传输,被其 右端面反射后反向传输。中心纤芯模和边芯模有效 折射率的不同产生了光程差。当光第二次通过 SCF 与 SMF 之间的熔接点即细锥结构时,纤芯基模和边 芯模发生干涉。



该传感器中的光纤细锥相当于耦合器,既激发 出了 SCF 中的高阶模,又实现了纤芯模和边芯模之 间的耦合,将传统的耦合器合二为一,简化了传感器的结构。在 SCF 中,边芯相当于传统迈克尔逊干涉 仪的传感臂,中心纤芯相当于参考臂,光纤端面则充 当了反射镜,将中心纤芯模和边芯模反射回 SCF 中 反向传输。该传感器的干涉在光纤内完成,未使用 其他光耦合器件,是一个典型的全光纤迈克尔逊干 涉仪。

该传感器的光纤细锥结构在减小了 SMF 和 SCF 连接处的纤芯和包层直径的同时,还打破了 SCF 的对称几何结构,使超模呈不对称分布,导致中 心纤芯中的 LP₀₁基模和边芯中的 LP₁₁等高阶模相互 分离并发生干涉^[21]。由干涉理论可知,传感器的总 输出光强可以表示为^[6]:

$$I = (I_{\alpha, \text{core}} + I_{s, \text{core}} + \sum_{m} 2 \sqrt{I_{\alpha, \text{core}} \cdot I_{s, \text{core}}^{m} \cdot \cos \Delta \varphi}) \cdot R , \quad (1)$$

式中, $I_{\alpha,core}$ 为中心纤芯模的光强, $I_{s,core}^{m}$ 为第 m 阶线 性偏振模如 LP₁₁模的光强, $\Delta \varphi$ 表示传输一段距离后 中心纤芯基模与高阶模如 LP₁₁模之间的相位差,R为 SCF 右端面的反射率,表达式为:

$$R = \frac{(n_{\rm s} - n_{\rm core})^2}{(n_{\rm s} + n_{\rm core})^2},$$
(2)

式中, n_{core} 和 n_s 分别表示光纤纤芯和周围介质的折射率。中心纤芯模与高阶模之间的相位差 $\Delta \varphi$ 可以表示为:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi \Delta n_{\rm eff} L}{\lambda} , \qquad (3)$$

式中, Δn_{eff} 为中心纤芯和边芯之间的折射率差,即 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\alpha,\text{core}} - n_{s,\text{core}}$, L为SCF的长度, λ 表示入射 光波长。当相位差满足 $\Delta \varphi = (2m+1)\pi, (m=0, \pm 1, \pm 2, \cdots)$ 时,干涉光强达到最小值,此时透射光谱 中干涉谷对应的波长为:

$$\lambda = \frac{4\left(n_{\rm eff}^{\rm core} - n_{\rm eff}^{m, \rm clad}\right)L}{2m+1} = \frac{4\pi\Delta n_{\rm eff}L}{2m+1} \ . \tag{4}$$

当传感器周围的环境温度发生变化时,由于光 纤材料的热膨胀和热光效应,光纤长度 L、纤芯基模 和高阶模的折射率都会发生变化,即式(4)中的 Δn_{eff} 和 L 改变,导致波长发生漂移。因此,可以通过监测 干涉谱波谷处特征波长的漂移量来实现环境温度的 测量。温度灵敏度可表示为^[6]:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \lambda \left[\frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{core}}}{\partial T} - \frac{n_{\text{eff}}^{m,\text{clad}}}{\partial T} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right] \,. \tag{5}$$

2 实验与讨论

2.1 传感器的制作

实验中使用的 SMF(SMF-28, 康宁, 美国)的纤

芯和包层的直径分别为 9.1/125 µm,折射率分别为 1.468 2/1.462 8。SCF(MCF-7,长飞,中国)中的7 个掺锗纤芯都由3层具有不同折射率的 材料组成,内层、中间层和最外层的折射率分别为 1.448、1.442 和 1.442,直径分别为 8.2 μm、19 μm 和 30 µm,最外层的沟槽结构能够有效避免不同纤芯 之间的串扰,排列呈正六边形的7个纤芯之间的距 离为 41.5 μm; SCF 包层的折射率为 1.444, 包层直 径为 150 μm,大于 SMF 的包层直径。因而,采用细 锥结构作为耦合器将 SMF 中的光耦合进 SCF。SCF 的横截面和细锥区域剖视图如图 2(a)、(b)所示。实 验中首先利用光纤切割刀将 SMF 和 SCF 的端面切 除平整,然后使用光纤熔接机(S177,古河,日本)对 两种光纤进行手动熔接。为了制作出细锥结构,设 置熔接程序中的参数值如下:预熔时间为 300 ms,放 电强度为110 bit,推进距离和退回距离分别为 10 μm 和 320 μm。为了保证细锥两端光纤的中心重 合,端面间隔偏移以及轴偏移量均设置为 0 μm。熔 接结束后对 SCF 进行切割,从而获得不同长度的干 涉仪。图 2(b)是光纤细锥的显微照片,测量得细锥 部分纤芯和包层的腰径分别为60.57 μm 和83.20 μm,长度为588.33 μm。

本文共制作了3个不同长度(L=12 mm,35 mm, 47 mm)的传感器样品,其反射光谱的对比如图 3 所 示。图 3 中非严格的余弦型干涉谱形表明,该传感 器的干涉谱由多个干涉条纹叠加而成。可以看出, 传感器在 1510—1590 nm 光谱范围内,干涉光谱的 谱形清晰,干涉条纹对比度最大超过 8 dB,自由光谱 范围最大超过 10 nm,适合于进行大范围温度的测 量。随着 SCF 长度的增加,干涉光谱的周期数明显 增加,且自由光谱范围逐渐减小。

为了进一步分析干涉仪所激发的高阶模在干涉 过程中的贡献情况,对图 3 中的干涉谱进行了快速 傅里叶变换,结果如图 4 所示。空间频谱图中的多 个峰值说明有多个高阶模参与了干涉,这验证了 SCF中的模式干涉现象。随着 SCF 长度的增加,幅 度值较小的频率点逐渐增多,即能量各异的点增多, 这为图 3 中所示的光谱的变化提供了证据。例如, 长度为 12 mm,35 mm 和 47 mm 的传感器,分别在 空 间频率位于 0.565 989 nm⁻¹, 0.847 644 nm⁻¹ 和 1.694 683 nm⁻¹处都存在一个明显的主峰,它们所对 应的高阶模在整个干涉过程中起主要作用,而位于 它们旁边的较高空间频率处的一些低峰则意味着有 更多的高阶模被激发出来并参与干涉。











Fig. 3 Reflectance spectra of sensors with different lengths



Fig. 4 Spatial spectrum of sensors with different lengths

2.2 温度响应实验

本文中,传感器的温度测量实验装置示意图如 图 5 所示。静态光纤光栅解调仪(TV125, Micron Optics,美国)内置波长范围为1510—1590 nm 的激 光光源,其波长分辨率为0.1pm、强度分辨率为 0.1dB、扫描频率为1Hz。利用温度范围为50— 250 ℃、温度分辨率为1℃的电热鼓风干燥箱(Q1-2AB,中国)实现环境温度的调节。激光束沿SMF进 入传感器结构,再经由SCF的端面反射回解调仪,最 后由计算机采集并记录该传感器的反射光谱。设置 干燥箱的温度由 20 ℃升高到160℃,每间隔5℃记 录一次传感器的反射光谱,观察光谱的变化。为了 保证温度测量数据的准确性,每次温度设定值改变 之前,在上一个温度点保持至少10 min 的恒温时长 后再记录光谱。



图 6 为 L=47 mm 的传感器在 20—160 ℃之间 的温度响应实验图。图 6(a)和(b)表明,随着温度的 升高和降低,传感器的反射谱先后发生了明显的红 移和蓝移。对波长与外界温度进行线性拟合得到图 6(c),可以看出,在1544.538 nm波谷处,传感器升 温时的灵敏度为0.1147 nm/℃,线性拟合系数为 0.9868;降温时的温度灵敏度为0.1274 nm/℃,线性 拟合系数为0.9983。传感器的温度测量分辨率为 0.0078℃,波长漂移近似重合,这说明传感器的升降



温曲线具有良好的一致性。但由于干燥箱加热过程 的不均匀性,导致升降温过程的最大滞后偏差为 0.3437%,且两条拟合曲线在低温段的线性度不够 高,以后的研究中可以通过适当延长在各温度点的 稳定时间来弥补温箱的这一性能缺陷。

2.3 稳定性实验

传感器的工作稳定性对实际应用有非常重要的 意义,良好的稳定性在很大程度上能缩减制造成本 和延长工作寿命。为了研究传感器的稳定性,实验 测量了长度为47 mm的传感器在温度为160 ℃和时 间为1h的反射光谱响应,测量的时间间隔为3 min, 结果如图7(a)所示。图7(a)表明,传感器在1h内, 光谱几乎观察不到明显的漂移。由此得到1540 nm 处干涉谷的波长变化曲线,如图7(b)所示,得到最大 的波长漂移量为0.1606 nm,这主要是因为温箱在工 作时,温度保持不稳定所引起的。传感器的温度测 量标准偏差为0.2896 ℃,说明该传感器具有较好的 稳定性以及长期使用的潜力。



2.4 重复性实验

传感器的重复性在传感器研制中也具有重要的 研究意义。为了研究传感器的重复性,同时测量了 长度为 12 mm 和 35 mm 的传感器在 20—160 ℃范 围内的温度响应,结果如图 8(a)和(b)所示。实验结 果表明,随着温度的升高,两个传感器的反射光谱均 发生了明显的红移,对波长变化与温度进行线性拟 合后得到图 8(c)。可以看出,L=12 mm 的传感器在 1 542. 322 nm 波长处的温度灵敏度为 0.1006 nm/℃,线性拟合系数为 0.993 9;L=35 mm 的传感 器在 1 544.538 nm 波长处的温度灵敏度为 0.105 3 nm/℃,线性拟合系数为 0.996 2。与 L=47 mm 的 传感器相比,上述两个长度的温度灵敏度虽然不高, 但也证明了单模-细锥-SCF 结构对温度的敏感性,此 结构在 20—160 ℃范围内的温度灵敏度都在 0.1000 nm/℃以上。

表1对已有的光纤温度传感器进行了性能对 比。发现本文所提出的传感器相比大多数现有同类 型的传感器具有更高的温度灵敏度。其中,文献 [12]的灵敏度最高,但该传感器需要复杂的制作工 艺和特殊的折射率匹配液体材料,且温度测量范围







小。此外,相比于光纤光栅型温度传感器^[13-15],本文 提出的传感器具有结构简单、无需使用任何温度敏 感材料且灵敏度和测量范围都有所提高的优势。

表1 光纤温度传感器性能对比表

Tab. 1 Performance comparison table of

optical	fiber	temperature	sensor
---------	-------	-------------	--------

Sensor structure type	$\begin{array}{c} \text{Measuring} \\ \text{range} \\ T / \mathbb{C} \end{array}$	Temperature sensitivity $S/(nm/^{\circ}C)$	Refs.
SMF-MMF-DCF	30—70	-0.0474	[6]
SMF-TCF-SHF	30—100	0.01037	[7]
Three microspheres array-silica cavity	20—90	0.06454	[8]
SMF-SCF	25-60	-0.164	[9]
SMF-PMF-SMF	30-50	1.73	[10]
$silicon\hbox{-}on\hbox{-}insulator$	16 - 32	0.438	[11]
2×2 optical microfiber coupler	35—45	5.3	[12]
1° tilted FM-FBG	20.01-92.68	0.0105	[13]
FBG	35 - 135	0.0114	[14]
LPFG	20—80	0.2554	[15]
SMF-SCF	20—160	0.1274	This work

该光纤温度传感器结构紧凑,未涂覆或填充任 何温敏材料,有效避免了温度变化引起的材料特性 和传感器性能的变化,在节约成本的同时也拓宽了 温度测量范围、简化了传感器制作工艺、提高了温度 灵敏度。

3 结 论

本文提出了一种基于 SCF 的全光纤迈克尔逊干 涉仪,用于温度测量。制作了不同长度的传感器样 品,并开展了传感器的实验研究。实验结果表明,在 温度测量范围为 20—160 ℃时,传感器的温度灵敏 度最高为0.1274 nm/℃,温度分辨率为0.0078 ℃, 测量标准偏差为 0.2896 ℃。该温度传感器的制备 工艺简单、结构紧凑、成本低廉且重复性好,并表现 出较高的温度灵敏度和较大的检测范围,对恶劣环 境和极端条件下的温度测量领域具有一定的研究意 义。通过优化传感器的结构尺寸和进行外部封装, 有望进一步提升传感器的温度灵敏度,实现对更宽 温度范围的高精度测量。

参考文献:

- [1] LI F. Temperature measurement of high temperature flame in complex environment based on laser absorption spectrum [EB/OL]. (2021-07-20) [2022-07-13]. https:// www.koushare.com/video/videodetail/14253.
 李飞. 基于激光吸收光谱的复杂环境高温火焰温度测 量[EB/OL]. (2021-07-20) [2022-07-13]. https://www. koushare.com/video/videodetail/14253.

叶军红.MEMS 传感器在汽车行业的应用现状综述[J]. 汽车电器,2021(7):46-48+51.

- [3] LIN M Z, ZHENG Z J, YANG L, et al. A high-performance, sensitive, wearable multifunctional sensor based on rubber/CNT for human motion and skin temperature detection [J]. Advanced Materials, 2021, 34(1):2107309.
- [4] LI W C,HU L L,CHEN W, et al. The effect of temperature on green and red upconversion emissions of LiYF₄: 20Yb³⁺, 1Ho³⁺ and its application for temperature sensing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 866: 158813.
- [5] ZHANG J Q. Wireless temperature acquisition system based on single chip microcomputer [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(9):86-88.
 张建乾.基于单片机的无线温度采集系统[J].现代工业 经济和信息化, 2021, 11(9):86-88.
- [6] MUSA S M A, BAHARIN N F, ASRUL I A, et al. Doubleclad fiber Michelson interferometer for measurement of temperature and refractive index [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(4): 822-827.
- [7] ZHAO Y J, ZHOU A, GUO H Y, et al. An integrated fiber Michelson interferometer based on twin-core and sidehole fibers for multiparameter sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 993-997.
- [8] QI K Y,ZHANG Y D,SUN J F,et al. All-fiber high temperature and refractive index sensor based on three micro-

spheres array Michelson interferometer [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129:106300.

- [9] WANG S, YANG Y W, NIU P T, et al. Fiber tip Michelson interferometer for temperature sensing based on polymerfilled suspended core fiber [J]Optics & Laser Technology, 2021, 141:107147.
- [10] SHAO L P,HU J H,LU H L,et al. High-sensitivity temperature sensor based on polarization maintaining fiber Sagnac loop [J]. Photonic Sensors,2019,9(1):25-32.
- [11] ZHANG Y. Temperature sensor with enhanced sensitivity based on silicon Mach-Zehnder interferometer with waveguide group index engineering [J]. Optics Express, 2018,26(20):26057.
- [12] JIANG Y X. Highly sensitive temperature sensor using packaged optical microfiber coupler filled with liquids [J]. Optics Express, 2018, 26(1): 356-366.
- [13] ZHAO Y H, WANG C L, YIN G L, et al. Simultaneous directional curvature and temperature sensor based on a tilted few-mode fiber Bragg grating [J]. Applied Optics, 2018,57(7):1671-1678.
- [14] CHENG P, WANG L, PAN Y, et al. Fiber Bragg grating temperature sensor of cladding with SrTiO₃ thin film by pulsed laser deposition [J]. Laser Physics, 2019, 29(2): 025107.
- [15] WANG Q, DU C, ZHANG J M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating [J]. Optics Communications, 2016, 377; 89-93.
- [16] PENG J, FENG W L, YUE Z Z, et al. Fiber-optic Fabry-Perot temperature sensor based on the ultraviolet curable glue-filled cavity and two-beam interference principle [J]. Zeitschrift für Naturforschung A, 2021, 76 (2): 175-179.
- [17] YUE B, FENG J X, TAO J, et al. Ultra-compact temperature sensor based on anti-resonant Mach-Zehnder interference [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 67:102734.
- [18] ZHAO Y F, DAI M L, CHEN Z M, et al. Ultrasensitive temperature sensor with Vernier-effect improved fiber Michelson interferometer [J]. Optics Express, 2021, 29 (2): 1090-1101.
- [19] GONG Z H, ZHANG H, LIU T, et al. High-sensitive temperature sensor based on ethanol-filled elliptical-core sidehole fiber Sagnac interferometer [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(1): 32-38.
- [20] ZHOU R, QIAO X G, WANG R, et al. An optical fiber sensor based on lateral-offset spliced seven-core fiber for bending and stretching strain measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11):5915-5920.
- [21] OU Z L, YU Y Q, YAN P G, et al. Ambient refractive index-independent bending vector sensor based on sevencore photonic crystal fiber using lateral offset splicing [J] Optics Express, 2013, 21(20): 23812-23821.

作者简介:

张 蓉 (1997-),女,硕士,主要从事光纤传感器的原理及技术研究.