

基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究

张静 李永倩

Temperature sensing characteristics based on coreless- few mode-coreless optical fiber structure

ZHANG Jing, LI Yongqian

引用本文:

张静, 李永倩. 基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 167-170. DOI: 10.5768/JAO202243.0108003

ZHANG Jing, LI Yongqian. Temperature sensing characteristics based on coreless- few mode-coreless optical fiber structure[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(1): 167-170. DOI: 10.5768/JAO202243.0108003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器

Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity

应用光学. 2017, 38(2): 331-335 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208001>

毛细管内嵌微球谐振腔的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics of a microsphere resonator embedded in a capillary

应用光学. 2021, 42(5): 926-931 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508001>

一种耐静压分布反馈式光纤激光水听器探头设计

Design of resistant static pressure probe for DFB fiber laser hydrophone

应用光学. 2020, 41(2): 428-434 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0208002>

基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性

Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser

应用光学. 2018, 39(4): 585-589 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408001>

宽带空芯THz单模单偏振光纤

Broadband THz single-mode single-polarization hollow core fiber

应用光学. 2017, 38(5): 844-847 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508001>

基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统

Distributed fiber Raman temperature measurement system based on cumulative average

应用光学. 2018, 39(4): 590-594 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 01-0167-04

基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究

张 静, 李永倩

(华北电力大学 电力物联网技术河北重点实验室, 河北 保定 071003)

摘 要: 提出了一种基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感器, 对传感器进行了理论分析和实验研究。该传感器将无芯光纤 (coreless fiber, CLF) 与少模光纤 (few-mode fiber, FMF) 同轴熔接, 构建无芯-少模-无芯的光纤结构, 结构两端熔接单模 (single mode fiber, SMF) 光纤作为输入输出光纤, 第 1 段无芯光纤与单模光纤的模式失配起到激发高阶模的作用, 少模光纤中的 LP01 与 LP11 两种模式沿少模光纤纤芯传输, 在第 2 段无芯光纤的作用下 LP01 与 LP11 两种模式重新耦合回单模光纤, LP01 与 LP11 两种模式发生干涉, 形成干涉光谱。当外界温度变化时, 两种模式的光程差发生变化, 干涉光谱的干涉波谷发生漂移, 选取 2 个不同的干涉波谷作为特征波长, 进行实验分析。实验结果表明: 波长在 1 550 nm 和 1 534 nm 附近的干涉谷均发生红移, 相应的温度灵敏度分别为 68 pm/°C 和 44.5 pm/°C。该传感结构制作简单、灵敏度高, 有很好的应用前景。

关键词: 光纤光学; 无芯光纤; 少模光纤; 温度测量

中图分类号: TN253

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0108003

Temperature sensing characteristics based on coreless-few mode-coreless optical fiber structure

ZHANG Jing, LI Yongqian

(Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China
Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A temperature sensor based on coreless-few mode-coreless optical fiber structure was proposed for theoretical analysis and experimental study. The coreless fiber (CLF) and the few-mode fiber (FMF) were fused together to form a coreless-few mode-coreless optical fiber structure, and the single-mode fiber (SMF) was fused at both ends of the structure as input and output fiber. The mode mismatch between the first section of coreless fiber and single-mode fiber could excite higher-order modes. The two modes of LP01 and LP11 in the few-mode fiber were transmitted along the core of the few-mode fiber. Under the action of the second section coreless fiber, the two modes were recoupled back to the single-mode fiber, and the two modes interfered to form an interference spectrum. When the outside temperature changed, the optical path difference between the two modes also changed, and the interference troughs of the interference spectrum were shifted. Two different interference troughs were selected as the characteristic wavelengths for experimental analysis. The experimental results show that the interference troughs with wavelength around 1 550 nm and 1 534 nm both have red shift, and the corresponding temperature sensitivity is 68 pm/°C and 44.5 pm/°C respectively. The sensing structure has the advantages of simple fabrication, high sensitivity and good application prospects.

Key words: optical fiber optics; coreless fiber; few-mode fiber; temperature measurement

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61775057, 61377088); 河北省自然科学基金 (F2019502112); 中央高校基础研究基金 (2017MS108)

作者简介: 张静 (1981—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: 22456188@qq.com

引言

光纤传感器具有体积小、制作方便、实时性、耐腐蚀性、电磁抗扰性和长距离传输等优点,广泛应用于折射率、温度、气体浓度、应力、液位等环境参量的测量^[1]。光纤模式干涉仪是一种具有优良性能的全光纤干涉器件,广泛应用于光纤传感、光纤通信等领域。该类型干涉仪需要特殊结构实现模式的分束和合束,以实现纤芯模在纤芯中传输,包层模在包层传输。由于纤芯模和包层模的传输路径不同,导致了纤芯模和包层模产生相位差,从而形成干涉条纹。外界环境变化对纤芯模和包层模的影响不同,从而使两路光相位差发生改变,导致干涉条纹出现漂移。通过测量干涉条纹的漂移量,实现对外界环境参量变化的测量。研究人员提出了各种光纤干涉仪的多种结构,如基于锥形光纤的干涉仪^[2-3]、花生形结构^[4-5]、光纤纤芯直径不匹配^[6-7]和不对称结构^[8-11]的马赫-曾德尔干涉仪(Mach Zehnder interferometer, MZI)。

少模光纤传感器作为一种新型的光纤传感器,具有结构简单、模式个数有限、有效面积大、模式耦合可控等优点,近年来得到了研究人员的广泛关注。Wang等人利用FMF中LP01模式和LP02模式的干涉效应制作出MZI干涉仪,实现应变和温度的分别测量^[12]。张栅等设计了一种温度不敏感的应变传感器^[13]。Tong Z等人设计了FMF和球型结构级联的新式传感器,用于温度和折射率的同时测量^[14]。

本文提出了一种结构简单、易于制作的MZI,传感器结构是在无涂敷的少模光纤两端熔接2段无芯光纤,由于采用的是双模干涉,传感器的输出光谱比多模干涉光谱波形更简单稳定。选取MZI干涉谱中的2个特征波谷作为特征波长,利用特征波长的漂移测量液体的温度。

1 传感器的制作及工作原理

本文设计的传感器结构示意图如图1所示。2根作为输入输出的SMF与2段长度相同的CLF分别进行同轴熔接,CLF长度为3 mm,因光纤的模场分布不同,在SMF与CLF的熔接点1和4产生模式失配,起到激发和耦合高阶模式的作用;在2段CLF中熔接一段去掉涂覆层的FMF,组成CLF-FMF-CLF结构的MZI型全光纤器件。由模式失配激发的LP01与LP11两种模式在少模光纤

的纤芯中传输,其他高阶模在包层中传输。在第2段无芯光纤的作用下LP01与LP11两种模式重新耦合回单模光纤发生干涉,形成干涉光谱。当外界温度变化时,两种模式的光程差发生变化,干涉光谱的干涉波谷发生漂移,通过分析干涉光谱谐振波谷的位移,获得外界环境温度的变化。

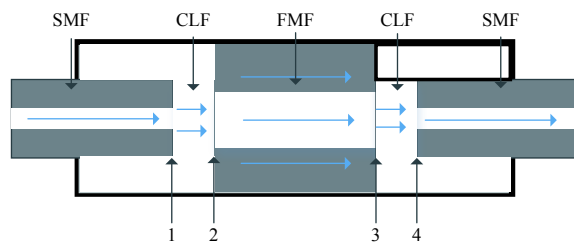


图1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

制作的传感器所用的SMF是康宁公司生产的SMF-28,纤芯与包层直径分别为8.2 μm和125 μm;所用FMF为长飞公司生产的两模光纤,纤芯与包层直径分别为14 μm和125 μm;CLF为长飞公司生产,直径为125 μm。实验过程中,为防止光纤弯曲,抖动对传感器温度测量性能产生影响,对制作的传感器进行了封装,将制作的传感器放置在开槽的石英管中,传感器两端采用UV紫外胶固定,封装的传感器如图2所示。

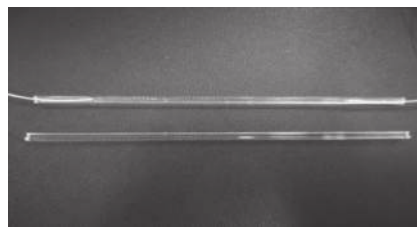


图2 封装传感器

Fig. 2 Packaged sensor

根据相关文献可知,MZI干涉传感器的透射强度可以表示为^[15]

$$I_{\text{out}}(\lambda) = I_{\text{core}}(\lambda) + I_{\text{h}}(\lambda) + 2\sqrt{I_{\text{core}}(\lambda) \cdot I_{\text{h}}(\lambda)} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (1)$$

式中: I_{core} 和 I_{h} 分别为基模和高阶模的强度; $\Delta\varphi$ 为基模与高阶模的相位差,可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{h}}) L \quad (2)$$

式中: λ_0 为中心波长; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{h}}$ 分别为基模和高阶模的有效折射率, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{h}}$ 为基模与高阶模之间的有效折射率差; L 是传感单元的长度。当

$\Delta\varphi$ 为 $(2m+1)\pi$ 时出现干涉现象极小,第 m 阶峰值波长为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L}{2m+1} \quad (3)$$

当外界温度发生变化时,由(3)式对温度求微分可知,温度的灵敏度为

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}} L} \left(\Delta n_{\text{eff}} \frac{\partial L}{\partial T} + L \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) \quad (4)$$

由热膨胀系数的定义 $\alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$,基模和高阶模有效折射率的热光系数定义 $\varepsilon = \frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$,代入(4)式,得:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m (\alpha + \varepsilon) \quad (5)$$

2 实验结果及分析

实验系统原理如图3所示。所设计的传感器两端分别连接放大自发辐射光源(ASE)和光谱分析仪。传感器放置在温度可调的恒温设备中,利用光谱仪对不同温度时的光谱响应进行测量。ASE光源波长范围为1510 nm~1590 nm,输出最大功率为40 mW。光谱分析仪采用Finisar公司的WaveAnalyzer 1500S,光谱分辨率高达1.25 pm。实物如图4所示。

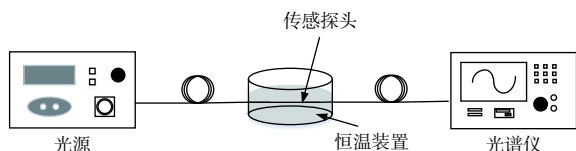


图3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system



图4 实验系统图

Fig. 4 Experimental system diagram

根据文献可知,所用光纤的热光系数比热膨胀系数大一个数量级,说明热光效应起主要作用,温度灵敏度可以简化为 $\frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m \varepsilon$ 。随着温度的升高,少模光纤中的LP01模式和LP11模式的有效折射率都会增加,但LP01模式增加较大。折射率差值随温度增加变大, ε 随温度也增加变大,因此,传感器的谐振波长随温度变化向长波方向移动。

实验测量了传感器在25℃~75℃温度范围

内传感器的透射光谱,不同温度时的测量结果如图5所示。随着温度的升高,透射谱线的形状基本保持不变,干涉模式没有变化,整体向长波方向漂移,与理论分析结果一致。经过计算,选取温度灵敏度较大的干涉谷波长1550 nm和1534 nm作为特征波长进行比较,作为传感器使用时,只选择其中灵敏度最高的波长值就可实现温度测量。将2个特征波长分别与温度值进行线性拟合,拟合结果如图6所示。由图6可知,特征波长与温度呈现很好的线性关系,在温度测量范围内,两波谷的温度测量灵敏度分别为68 pm/℃和44.5 pm/℃。灵敏度差别较大是由于不同波长处,不同模式的有效折射率差值不同。该传感结构简单、灵敏度高,有很好的应用前景。

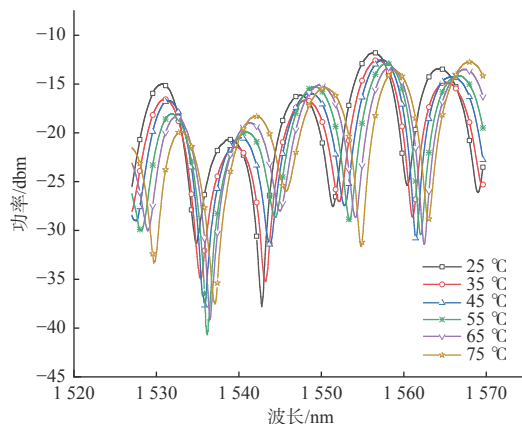


图5 不同温度透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum at different temperatures

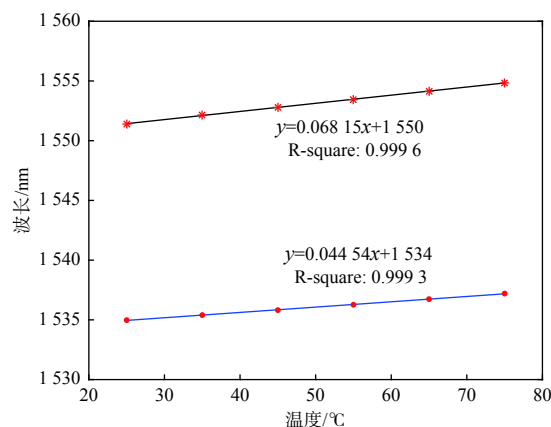


图6 特征波长拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of characteristic wavelength

传感器结构和温度灵敏度与所列参考文献相比如图1所示。由表1可知,本文设计的传感器灵敏度高于文献[5]、[7]、[8]中设计的传感器,低于

文献 [3] 中传感器的灵敏度, 但本文设计的传感器采用同轴熔接的方法, 比参考文献 [3] 中拉锥结构传感器制作方法简单, 结构稳健, 可重复性好。

表 1 不同结构灵敏度比较

Table 1 Comparison of sensitivity with different structures

参考文献	传感器结构	温度灵敏度/($\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
[3]	拉锥结构	995
[5]	花生结构	47
[7]	同轴熔接	10
[8]	非对称花生结构	59

3 结论

本文提出并制作了一种基于无芯-少模-无芯结构的温度传感器, 实现了温度的高精度测量。利用少模光纤和无芯光纤的模式失配激发高阶模, 基模和高阶模在少模光纤中受外界温度调制, 在输出端产生干涉谱。通过实验证明了此方法的可行性, 实验结果表明, 传感器的特征波长与温度呈很好的线性关系, 在测量温度范围内, 温度测量灵敏度分别为 $68 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $44.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 因此, 本文所设计的传感器制作简单, 灵敏度较高。受恒温实验装置所限, 未进行较大温度范围的实验测量, 但传感器仍有望应用于温度更高的测量场景。

参考文献:

- [1] 韩军, 高波, 张芳, 等. 变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 494-498.
HAN Jun, GAO Bo, ZHANG Fang, et al. Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 494-498.
- [2] LIU Tianqi, WANG Jing, LIAO Yipeng, et al. Splicing point tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of temperature and salinity in seawater[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23905.
- [3] TIAN Z B, YAM S S H. In-line single-mode optical fiber interferometric refractive index sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2296-2306.
- [4] HUANG Ran, NI Kai, WU Xueying, et al. Refractometer based on Mach-Zehnder interferometer with peanut-shape structure[J]. *Optics Communications*, 2015, 353: 27-29.
- [5] WU D, ZHU T, CHIANG K S, et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(5): 805-810.
- [6] LIN Ziting, LYU R Q, ZHAO Yong, et al. High-sensitivity salinity measurement sensor based on no-core fiber[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2020, 305: 111947.
- [7] DAI Bin, SHEN Xiang, HU Xiongwei, et al. Temperature-insensitive refractive index sensor with etched micro-structure fiber[J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3749.
- [8] WANG Huihao, MENG Hongyun, XIONG Rui, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference[J]. *Optics Communications*, 2016, 364: 191-194.
- [9] LI L, XIA L, XIE Z, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [10] DONG Xinran, DU Haifeng, LUO Zhi, et al. Highly sensitive strain sensor based on a novel Mach-Zehnder interferometer with TCF-PCF structure[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 278.
- [11] WAN Hongdan, ZHANG Jiahe, CHEN Qian, et al. An active fiber sensor based on modal interference in few-mode fibers for dual-parameter detection[J]. *Optics Communications*, 2021, 481: 126498.
- [12] WANG Biao, ZHANG Weigang, BAI Zhiyong, et al. Mach-Zehnder interferometer based on interference of selective high-order core modes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 71-74.
- [13] 张珊, 黄战华, 李桂芳, 等. 温度不敏感的少模光纤应变传感[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 319-325.
ZHANG Shan, HUANG Zhanhua, LI Guifang, et al. Temperature-insensitive strain sensing based on few mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 319-325.
- [14] TONG Zhengrong, WANG Xue, WANG Yan, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on few-mode fiber and spherical structure[J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 60-65.
- [15] YU Xiujuan, BU Dan, CHEN Xuefeng, et al. Lateral stress sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer and Fourier analysis[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1-10.