

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005246

空芯光纤多模干涉型温度传感器*

王冰 王伟 冯嘉双 赵琼
(西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

摘要:提出了一种基于空芯光纤中多模干涉效应的光纤温度传感器,传感器由一小段内径为 $5\ \mu\text{m}$ 、长度为 $20\ \text{mm}$ 空芯光纤两端与单模光纤熔接构成单模-空芯-单模(SMF-HCF-SMF)三段式结构。使用宽带光源照射该传感结构,通过监测传感器的透射光谱,利用传感器的多模干涉特征峰值波长对温度的敏感性实现温度监测。在 $30\ ^\circ\text{C}\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 范围内进行了升温实验,得到了线性良好、灵敏度为 $24.3\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 的温度传感特性。该传感器结构紧凑、制作简便、可靠性高。

关键词:多模干涉;空芯光纤;温度传感器

中图分类号:TN253 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:140.30

Multi-mode interferometric temperature sensor based on hollow core fiber

Wang Bing Wang Wei Feng Jiashuang Zhao Qiong

(School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: A fiber optic temperature sensor based on the multimode interference effect in the hollow core fiber(HCF) is proposed, which is a three section structure of single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber (SMF-HCF-SMF), A section of the HCF with an inner diameter of $5\ \mu\text{m}$ and a length of $20\ \text{mm}$. A broadband light source is used to illuminate the sensor structure, monitor the transmission spectrum of the sensor, and use the sensitivity of the sensor's multimode interference characteristic peak wavelength to temperature to realize temperature monitoring. The temperature rise experiment was conducted in the range of $30\ ^\circ\text{C}\sim 80\ ^\circ\text{C}$, and the temperature sensing characteristic with good linearity and sensitivity of $24.3\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ was obtained. The proposed sensor has advantages of compact structure, simple manufacture, high reliability.

Keywords: multimode interference; hollow core fiber; temperature sensor

0 引言

光纤传感是从20世纪70年代发展起来的新型传感技术,光纤传感器以其体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、环境适应性强的特性^[1-2],被广泛在煤矿开采、石油传输等传统电子传感器等难以适用的地方,能够实现复杂环境下的温度、压力、应变等物理参数测量。传感器可以持续稳定工作数十年,具有极高的稳定性,展现出良好的实用前景^[3-4]。光纤温度传感是光纤传感领域的重要研究方向之一。常见的光纤温度传感器有光纤FBG(fiber Bragg grating)温度传感器^[5-6]、光纤法布里-珀罗(F-P)温度传感器^[7-8]和光纤马赫曾德尔(M-Z)温度传感器^[9-13]。陈家乐等^[14]在传统的单模-多模-单模(SMS)传感器的基础上,在多模光纤的两端进行拉锥制作出双锥结构,温度灵敏度达到 $0.051\ \text{nm}/^\circ\text{C}$,制作传感器时的拉锥操作虽然提高了传

感器的温度灵敏度,但引入的双锥结构改变了干涉波谷的性质,使得前两个干涉波谷波长随温度漂移方向出现反转。Dong等^[15]在腐蚀过包层的保偏光纤的两端熔接两段多模光纤作为分束器和耦合器,再在多模光纤外面熔接单模光纤做成的温度传感器,实验测得传感器在 $20\ ^\circ\text{C}\sim 40\ ^\circ\text{C}$ 的灵敏度为 $0.188\ \text{nm}/^\circ\text{C}$;该传感器在制作过程中对光纤的腐蚀不易控制,且温度实验只在 $40\ ^\circ\text{C}$ 以内进行,传感器的实用性不强。

针对光纤多模干涉型温度传感器的结构复杂、制作材料的成本偏高、制作过程中对设备性能和工艺的要求高的特性。本文提出了一种在空芯光纤(HCF)两侧熔接两段单模光纤的SMF-HCF-SMF三段式结构的多模干涉型温度传感器,该传感器制作时只采用光纤熔接机熔接,不需要进行拉准等复杂操作,制作出的传感器具有结构简单、可靠性高的特点。

收稿日期:2020-10-21

*基金项目:用于快速溶血检测的光纤式微流传感技术研究(20JS060)项目资助

1 传感器制备

本文使用的空芯光纤多模干涉温度传感器结构如图 1 所示,是利用纤芯直径为 $9\ \mu\text{m}$ 、包层直径为 $125\ \mu\text{m}$ 的单模光纤和内径为 $5\ \mu\text{m}$ 、外径为 $125\ \mu\text{m}$ 的空芯光纤制作得到的。所提出 SMF-HCF-SMF 的光纤温度传感器制作过程如下:先取一段单模光纤剥除掉涂覆层,用光纤切割刀切割,得到一个垂直于光纤轴线的平整端面;采用加热烧蚀的方法去除空芯光纤的聚酰亚胺涂覆层,将处理后的空芯光纤用无尘纸蘸取酒精擦干净,再切割得到一个平整的光纤端面;将切割好端面的单模光纤和空芯光纤放置在熔接机进行熔接,熔接机型号为藤仓 Fujikura FSM-100,熔接成功后用光纤切割刀保留 $20\ \text{mm}$ 长度的空芯光纤切割,此时再取另外一段单模光纤剥除掉涂覆层后切割出平整端面,再与切割好端面的空芯光纤熔接,熔接完成后得到一个 SMF-HCF-SMF 三段式结构的传感器。制作传感器时需要将熔接机的放电功率设置一个合理的参数,当放电功率设置过大时,会造成靠近熔接点处的空芯光纤塌陷,如图 2(a) 所示,将导致光功率损耗加大、传感器的灵敏度降低,图 2(b) 所示为熔接机放电功率为 $200\ \text{bit}$ 时熔接点良好的图片。

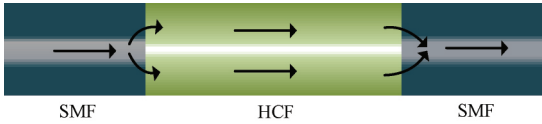
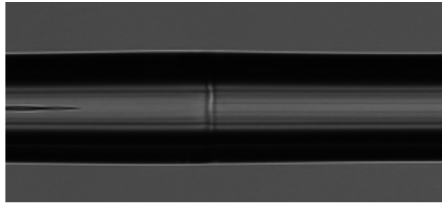


图 1 空芯光纤多模干涉温度传感器结构



(a) 放电功率为 $260\ \text{bit}$ 的熔接点



(b) 放电功率为 $200\ \text{bit}$ 的熔接点

图 2 放电功率为 260 和 $200\ \text{bit}$ 的熔接点

2 测温原理

所制备 SMF-HCF-SMF 多模干涉温度传感器,空芯光纤的内径只有 $5\ \mu\text{m}$,其内径小于单模光纤芯径,宽带光源的光从单模光纤传输到单模-空芯光纤的熔接点时,由于模式的不匹配,部分光将进入空芯光纤的熔石英介质中进行

传输,另外一部分光进入空芯光纤的中空结构中,在空芯光纤传输一段距离后,将存在只有在空芯光纤熔石英介质中能够传输的各阶导模,但由于不同阶次的模式的导模模场分布不同,因而导致它们在向单模光纤纤芯耦合时,不同模式能够耦合进纤芯的效率不同,将导致只有部分模式才会被耦合进单模光纤纤芯中,其他模式最终被损耗掉,所以,空芯光纤具有模式选择作用。

在传感器的结构和参数一定的情况下,当外界环境的温度变化时,空芯光纤的熔石英介质的有效折射率和长度都会发生变化,温度为 T 时的模式有效折射率和光纤长度 L 的变化可表示为:

$$n = n_0 + \frac{dn_0}{dT}(T - T_0) = [C_T(T - T_0) + 1]n_0 \quad (1)$$

$$L = L_{T_0} + \frac{dL_0}{dT}(T - T_0) = [\alpha_T(T - T_0) + 1]L_0 \quad (2)$$

式中: n_0 表示在温度为 T_0 时的某一模式有效折射率; L_{T_0} 为温度时 T_0 的光纤初始长度; $C_T = \frac{1}{n_0} \cdot \frac{dn_0}{dT}$ 为折射率温度系数; $\alpha_T = \frac{1}{L_{T_0}} \cdot \frac{dL_0}{dT}$ 为热膨胀系数,两个不同模式的有效折射率分别为 n_1 和 n_2 ,有效折射率差为 $\Delta n = n_1 - n_2$ 。

$$\Delta n(T) = [C_T(T - T_0) + 1]\Delta n_{T_0} \quad (3)$$

式中: n_{T_0} 表示初始温度的有效折射率差,两个模式之间的相位差 φ 可表示为:

$$\varphi = k\Delta nL \quad (4)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$, λ 为真空中的光波长。当温度 T 改变时,有效折射率差 Δn 和光纤长度 L 也随之改变。对式(4)两边进行微分,可得两模式之间相位差的变化为:

$$d\varphi = k\Delta n(T)dL + kL(T)d\Delta n = k[\Delta n(T)\alpha_T L_{T_0} + L(T)C_T \Delta n_{T_0}]dT \quad (5)$$

由于 $\Delta n(T) \approx \Delta n_{T_0}$, $L(T) \approx L_{T_0}$, 则式(5)可简化为:

$$d\varphi = k(\alpha_T + C_T)\Delta n_{T_0}L_{T_0}dT \quad (6)$$

令 $\beta = (\alpha_T + C_T)\Delta n_{T_0}L_{T_0}$, 则(6)可简化为:

$$d\varphi = k\beta dT \quad (7)$$

式中: k 和 β 均为常数,可采用差分形式表示为:

$$\Delta\varphi = k\beta\Delta T \quad (8)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为相对相位差; ΔT 为温度变化量。

本文提出的 SMF-HCF-SMF 结构的多模干涉温度传感器,其采用空芯光纤代替了普通多模干涉传感器中的无芯光纤两端熔接多模光纤作为分束器和耦合器的结构,具有结构简单,性能稳定的优势,将普通的无芯光纤多模干涉传感器的干涉理论推广到空芯光纤的熔石英介质中,通过追踪某两个特定级次模式的干涉光谱在不同温度下的变化,对应为干涉光谱图中的干涉波谷对应特征波长随温度的漂移量,通过

解调对应的特征波长漂移量可以得到温度的变化量。因此,当外界温度变化作用于传感器上时,光纤的热光效应和热膨胀效应将导致有效折射率 n 和长度 L 发生变化,造成在空芯光纤熔石英介质中发生干涉的各阶模式的相位差发生变化,通过解算因温度变化引起的干涉波谷对应特征波长的漂移量,可得到外界环境的对应温度变化量。

3 实验及结果分析

为测试所制作空芯光纤多模干涉型温度传感器的温度灵敏度,搭建了一套温度传感测试系统,如图 3 所示。该系统由 SLD 宽带光源、加热炉、点温计、光纤光谱分析仪构成。其中,SLD 光源中心波长为 1 550 nm、3 dB 带宽 90 nm,功率为 20 mW,其光谱为分布如图 4 所示,横坐标表示光源波长,单位为 nm,纵坐标为功率谱密度,单位为 dBm;光纤光谱分析仪为日本 Anritsu 生产的型号 MS9740A 高精度光纤光谱分析仪(OA),其波长测量范围为 600~1 800 nm,最高分辨率 0.03 nm;加热炉采用合肥科晶材料技术有限公司生产的 OTF-1200X-S 可编程管式加热炉(HTF),温度分辨率为 0.1 °C。将制作好的空芯光纤多模干涉型温度传感器和点温计的温度探头一块放置在管式炉中间加热区域,传感器两端分别与 SLD 宽带光源和光谱仪相连进行温度测量。

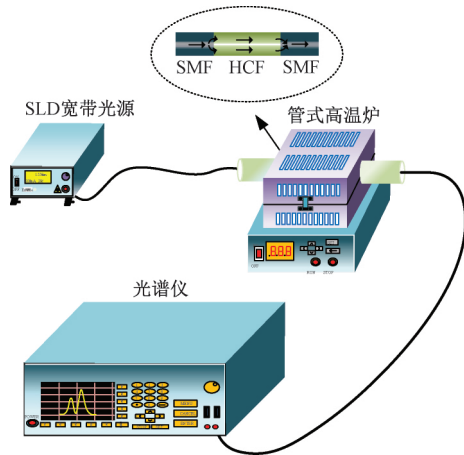


图 3 温度传感器实验装置

实验过程中的管式高温炉温度从 30 °C 加热到 80 °C,每隔 10 °C 进行一次透射光谱采集,升温过程中时在光谱采集处待高温炉的显示温度和点温计探测到的实际温度一致时保持 5 min,此时再进行传感器的透射光谱采集,其余时间设置为每分钟加热 1 °C。根据升温实验采集到的传感器在不同温度下的干涉光谱如图 5 所示,其横坐标为光谱波长,单位为 nm,纵坐标为光谱功率密度,单位为 dBm。

可以观察到,在 1 500~1 650 nm 的波长范围内,只有有限的几个干涉波峰和波谷。在升温条件下,透射光谱出现向长波方向移动的情况,通过追踪图 5 虚线框中的干涉

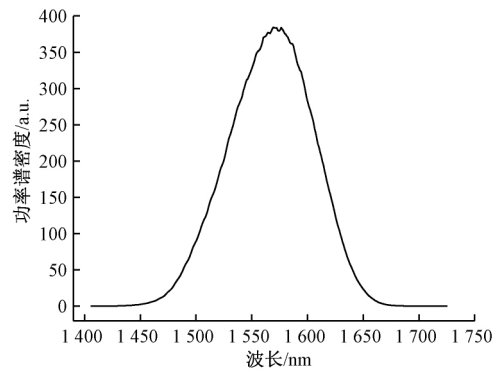


图 4 SLD 光源光谱

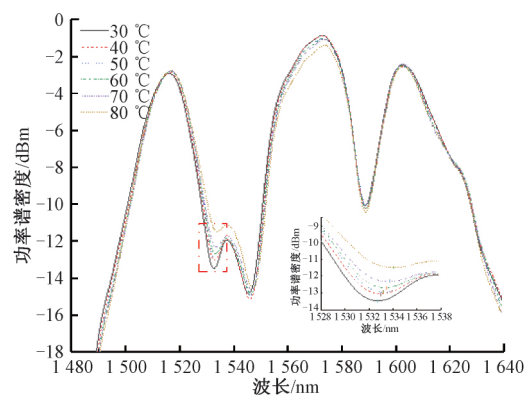


图 5 传感器透射光谱

谷对应特征波长在升温条件下的变化可得到波长-温度对应关系,图 5 右下角子图为虚线框中的局部放大图,通过寻峰处理得到的不同温度下的干涉波谷对应波长,根据寻峰处理得到干涉波谷对应特征波长从 30 °C 的 1 532.753 nm 变为 80 °C 的 1 534.044 nm,其波长-温度对应关系如图 6 所示,其横坐标表示温度,单位为 °C,纵坐标表示波长,单位为 nm。通过线性拟合,可以得到所制作的 SMF-HCF-SMF 三段式多模干涉温度传感器在 30 °C~80 °C 范围内温度灵敏度为 24.3 pm/°C,线性度为 0.962 1。

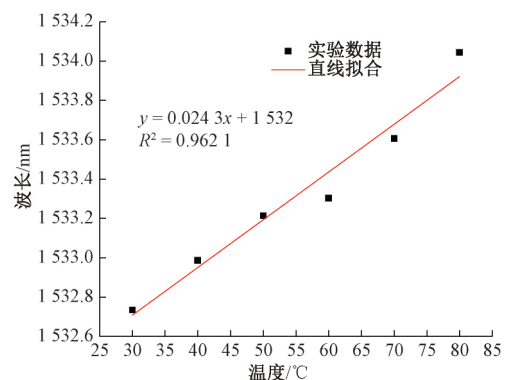


图 6 干涉波谷波长随温度变化的关系

4 结 论

本文采用单模光纤和内径为 $5\ \mu\text{m}$ 的空芯光纤熔接制作出一种 SMF-HCF-SMF 三段式结构多模干涉温度传感器,以无芯光纤的多模干涉理论以及光纤热敏感热性作为传感核心,对传感器在 $30\ ^\circ\text{C}\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 内进行升温实验,对采集到的透射干涉谱进行波谷寻峰处理,拟合得到传感器在 $30\ ^\circ\text{C}\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 范围内的波长-温度灵敏度为 $24.3\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 。本文提出的多模干涉传感器不需要繁琐的制作过程和特殊的工艺要求,具有结构简单、长期稳定性好的特点。目前该传感器只进行了有限范围内温度测量,可以通过进一步研究,扩大传感器的温度范围和测量领域。

参考文献

- [1] PANG D D, SUI Q M. A relocatable resonant FBG-acoustic emission sensor with strain-insensitive structure [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014 (10): 96-99.
- [2] SUN Y, LIU D, LU P, et al. Dual-parameters optical fiber sensor with enhanced resolution using twisted MMF based on SMS structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17: 3045-3051.
- [3] KUROSWA K. Development of fiber-optic current sensing technique and its applications in electric power systems [J]. *Photonic Sensors*, 2013(4): 12-20.
- [4] 曾含含,程静,张大伟,等.基于光纤光栅温度传感器的电缆接头温度监测系统的设计 [J]. *电子测量技术*, 2018, 41(6): 124-128.
- [5] 雷登明,陈娜,庞拂飞,等.基于 FBG 传感器的光伏电站箱变设备的温度监测 [J]. *电子测量技术*, 2017, 40(9): 234-237.
- [6] DONG Y, REN G, XIAO H, et al. Simultaneous temperature and strain sensing based on M-shaped single mode fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29: 1955-1958.
- [7] LI X, LIN S, LIANG J, et al. High-sensitivity fiber-optic Fabry-Perot interferometer temperature sensor [J]. *Japanese Journal of Applied Physics* 2012, DOI: 10.1143/JJAP.51.06FL10.
- [8] 刘颖刚,梁星,刘鑫,等.一种基于微孔 FP 腔结构的光纤温度传感器 [J]. *光电技术应用*, 2018, 33(1): 6-9.
- [9] SUN X, DU H, DONG X, et al. Simultaneous curvature and temperature sensing based on a novel Mach-Zehnder interferometer [J]. *Photonic Sensors*, 2019(10): 171-180.
- [10] LI M, WEI X, YANG C, et al. Highly sensitive Mach-Zehnder fibre temperature sensor fabricated by two-photon polymerization [J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 66: 293-298.
- [11] 杨凯,徐贲,李裔,等.高灵敏度液封光纤马赫-曾德干涉仪温度传感器 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25(7): 1259-1264.
- [12] 赵俊,许立国,须雷.基于保偏光纤温度传感器的全光纤电流互感器 [J]. *电力电子技术*, 2016, 50(10): 70-72.
- [13] 梁明玉,郎婷婷,金嘉俊,等.基于马赫-曾德尔干涉的球形结构光纤温度传感器 [J]. *光电子·激光*, 2016, 27(12): 1255-1259.
- [14] 陈家乐,陶玉敏,梅笑冰,等.双锥结构的 SMS 干涉型温度传感 [J]. *光通信技术*, 2018, 42(9): 55-58.
- [15] DONG C, JIANG Y, YE S, et al. Liquid refractive index and temperature sensor using multimode interference-based corroded polarization-maintaining fiber [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2019, 13(1): 280-286.

作者简介

王冰,硕士研究生,主要研究方向为光电传感。

E-mail: wangbxatu@163.com

王伟(通信作者),博士,教授,主要研究方向为光电传感。

E-mail: wangwei@xatu.edu.cn