

# 基于 MMF-GIF-MMF 结构的 MZI 高灵敏度液体温度传感器

李辉栋<sup>1</sup>, 雍振<sup>1</sup>, 张旋<sup>1</sup>, 任涛<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学 理学院, 西安 710065; 2. 西安市地下铁道有限责任公司 运营分公司, 西安 710000)

**摘要:** 为了便于检测液体温度, 设计了一种基于光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)原理, 结构为 3 段多模光纤级联的液体温度传感器。传感器由 2 段短阶跃多模光纤(MMF)和夹在中间的渐变多模光纤(GIF)组成, 2 段短 MMF 充当模式耦合器, GIF 充当传感臂。从理论上分析了该传感器输出干涉光谱波谷的中心波长随外界溶液温度变化的规律并进行了相应的实验研究。实验结果表明: 液体温度变化范围为 20 °C~90 °C 时, 中心波长的变化与液体温度变化有单调递增的线性关系, 对应的灵敏度为 64.14 pm/°C; 为了进一步提高传感器灵敏度, 对传感器的传感臂进行腐蚀, 灵敏度增至 98.14 pm/°C。

**关键词:** 多模光纤; 光纤马赫-曾德尔干涉仪; 液温传感; 腐蚀

**中图分类号:** TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)07-0005-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## MZI high sensitivity liquid temperature sensor based on MMF-GIF-MMF structure

LI Huidong<sup>1</sup>, YONG Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Xuan<sup>1</sup>, REN Tao<sup>2</sup>

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Underground Railway Co., Ltd., Operating Branch, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to convenient for detecting the temperature of liquids, this paper proposes a novel liquid temperature sensor based on fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) by three segment multimode fiber (MMF) cascade. The sensor consists of sandwiching graded index-multimode fiber (GIF) between two short sections of step index-MMF, two short MMFs act as mode couplers and GIFs act as sensing arms. The change of wavelength of the interference spectrum valley of the sensor with respect to liquid temperature has been analyzed theoretically and the corresponding experiments are carried out. The result shows that the central wavelength of dips/peaks shift has a good linearity with liquid temperature. The liquid temperature sensitivity of the sensor is 66.14 pm/°C over the temperature range of 20 °C~90 °C. In order to improve the sensitivity of sensor, the temperature sensitivity increase to 98.14 pm/°C after etching the GIF of the sensor.

**Key words:** multi-mode fiber; in-fiber MZI; liquid temperature sensing; etched

### 0 引言

在生物医药、纺织造纸工业等领域中, 液体温度的监测是其工业制造环境中的关键要素之一。大多数

收稿日期: 2019-03-13。

**基金项目:** 国家自然科学基金(批准号: 61505160)资助; 2017 年省级大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 1454)资助; 西安石油大学校级大学生创新创业训练计划项目资助。

**作者简介:** 李辉栋(1988-), 男, 硕士, 西安石油大学理学院实验师, 主要研究方向为光纤传感技术。参与国家级项目 2 项, 陕西省科技厅、教育厅和重点实验室项目多项, 主持校级科研项目 2 项, 曾获陕西省首届研究生创新成果展二等奖 1 项。



温度传感器是基于光纤布喇格光栅(FBG)和长周期光栅(LPG)的原理<sup>[1-3]</sup>制作的, 但这些基于光栅的传感器对光纤光栅的刻录精确度和光刻工艺要求高, 且相位掩模版价格昂贵。而光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[4-6]</sup>因其成本低、制造方便和光纤的内在特性等优势, 近年来在温度传感上受到越来越多的关注。Su J 等人<sup>[6]</sup>提出了一种基于多模-多模-多模光纤结构的双参数传感器, 并进行了实验验证, 但该设计中没有消除交叉灵敏度, 忽略了折射率对温度测量的影响。Ahmed F 等人<sup>[7]</sup>提出将光纤光栅嵌入在超细光纤 MZI 传感器中测量温度和折射率, 该传感器在 25 °C~95 °C 范围内可以达到 51.10 pm/°C 的温度灵敏度, 且对液体折射率

不敏感。然而, 制作该传感器的技术复杂, 还存在光纤锥度平坦区域的长度不易控制和光纤的机械强度受到严重影响的问题。

基于此, 本文将不同折射率性质的多模光纤 (MMF) 熔接制作成一种用于液体温度测量的光纤 MZI 传感器。

## 1 传感器结构及理论分析

本文设计的传感器光纤结构如图 1 所示。传感头由 3 段去掉涂覆层的 MMF 组成: 一段长为 20 mm 的渐变多模光纤 (GIF) 夹在两段长为 2 mm 阶跃 MMF 之间。然后接入单模光纤 (SMF), 形成 SMF-MMF-GIF-MMF-SMF 的传感结构。其中, SMF 纤芯直径为 9  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ; MMF 纤芯直径为 105  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ; GIF 纤芯直径为 62.5  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 125  $\mu\text{m}$ 。

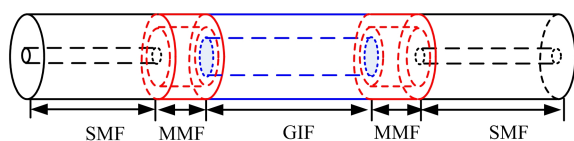


图 1 传感器结构图

当光从 SMF 纤芯传输进入 MMF 纤芯后, 会继续传输至 MMF 与 GIF 的第一个熔接节点处。由于芯径不匹配等原因, 大部分光进入 MMF 的纤芯传输, 同时会激发出部分光进入 GIF 的包层传输激发出包层模。在第二个熔接节点, 即 GIF 与第二段 MMF 的连接处, 包层模与纤芯基模相遇并耦合。由于 GIF 的纤芯直径小, 可以增加包层倏逝波的能量, 而且在 GIF 中传输的包层模可以更有效地耦合进 MMF 的纤芯基模, 使得纤芯基模和包层模发生干涉。因此, 2 段 MMF 作为耦合器, GIF 作为传感臂, 从而形成 MZI。

由于掺杂元素的影响使光纤纤芯与包层的热光系数不同, 掺杂后光纤的热光效应更加明显。因为热光效应的作用, 在相同温度变化下, 光纤纤芯模有效折射率的变化量大于包层模有效折射率的变化量。同时, 因为用于制作传感器的光纤是去掉涂覆层的, 光纤包层直接与外界接触, 不仅影响了包层模有效折射率的变化规律, 还会使其变化更加明显。这导致了有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  与传感臂长度  $L$  的变化, 可以表示为:  $\Delta n_{\text{eff}}(T) \approx \Delta n_{\text{eff}} + \Delta n_{\text{eff}} T \Delta T$ ,  $L(T) \approx L(1 + \alpha_s \Delta T)$ 。其中,  $\alpha_s$  为硅的热膨胀系数,  $\alpha_s \approx 5.5 \times 10^{-7} (\text{℃})$ ;  $T$  为外界环境温度;  $\Delta T$  为外界环境温度变化量。

传感器的传输光强  $I$  可以表示为<sup>[8,9]</sup>:

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{cladding}}^m + 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m} \cos\left(\frac{2\pi\lambda}{v} + \Delta\varphi\right) \quad (1)$$

其中,  $I_{\text{core}}$ 、 $I_{\text{cladding}}^m$  为 2 种干涉模式的光强, 光在纤芯与第  $m$  阶包层传输, 初始相位  $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)L(\partial\Delta n_{\text{eff}}/\partial T) \times \Delta T$ ,  $v$  为干涉图样周期。由此可知, 初始相位余弦函数与温度变化有直接关系, 温度变化会导致余弦函数初始干涉图样变化, 根据初始相位可以给出中心波长变化:

$$\Delta\lambda = -\frac{v}{2\pi} \Delta\varphi = -\frac{v}{\lambda} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} L \Delta T \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 温度变化引起中心波长漂移, 则传感器的灵敏度(波长变化量与温度变化量的比值)为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = -\frac{v}{\lambda} \frac{\partial\Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} L \quad (3)$$

本文假设基模与某高阶模有效折射率差为  $\Delta n_{\text{eff}}$ , 则这 2 种模式的相位差  $\phi$  表示为:

$$\phi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},m})L}{\lambda} = -\frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (4)$$

其中,  $\lambda$  为真空中的输入波长。由式(4)可知, 中心波长的变化  $\Delta\lambda$  可以进一步写成:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}L} \quad (5)$$

第  $m$  阶中心波长可表示为:

$$\lambda_m \approx \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,  $L$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  的变化都会引起透射谱的变化。外界环境液体温度的变化与热光效应的影响都可以导致基模与包层模之间有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  发生变化。干涉条纹中第  $m$  阶峰值波长会向长波方向漂移, 变化量可表示为:

$$\delta\lambda_{m,T} \approx 2L\delta\Delta n_{\text{eff},T} \quad (7)$$

其中,  $\delta\lambda_{m,T}$  为第  $m$  阶峰值波长随温度的变化量,  $\delta\Delta n_{\text{eff},T}$  为有效折射率差随温度的变化量。

## 2 实验及结果分析

在测量液体温度实验时, 我们使用商用熔接机 Furukawa(S177B)来熔接光纤。实验中所用的 GIF 和 MMF 均已去掉涂覆层, 切割光纤的切刀为 Furukawa(S325)。在熔接 GIF 和 MMF 时, 使用手动熔接模式, 对相应放电时间、推进距离进行了调整, 使用电弧放电熔接。实验装置的示意图如图 2 所示。

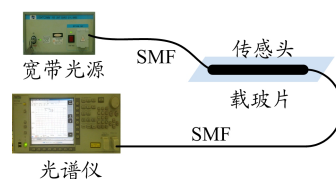


图 2 实验装置示意图

将宽带光源 (Lightcomm, ASE-C+L) 的宽带光传入 SMF 中, 由光学频谱分析仪 (OSA, Anritsu MS9740A) 记录传输频谱。宽带光源的最大光强度在 -30 dBm 左右, OSA 的波长分辨率为 30 pm。图 3 为传感器在空气中的透射谱图, 图中干涉图样清晰, 对比度高, 最大对比度大于 12 dB。

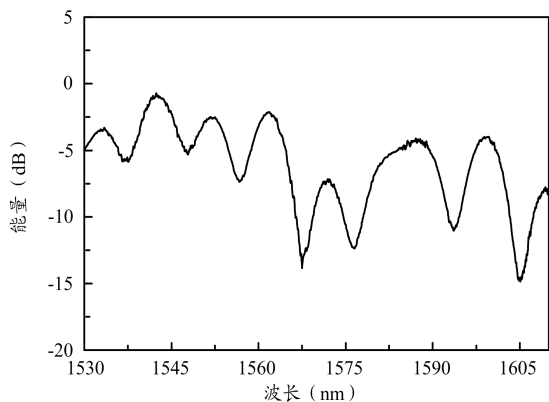


图 3 传感器在空气中的透射谱

为了获得本文设计的传感器对液体温度的响应灵敏度, 我们对该传感器进行了液体温度传感测量实验。实验在室温为 19.8 °C 的实验室进行。传感头固定在载玻片上, 将固定后的装置放入恒温器中, 依次调节液体温度为 20 °C、30 °C、40 °C、50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 和 90 °C。

传感器透射谱随液体温度变化的响应情况如图 4 所示。可以看出, 随着液体温度的升高, 在 1553.06 nm 处波谷的中心波长发生红移, 总波长漂移达 3.28 nm。这是因为较高的液体温度会导致  $\Delta n_{eff}$  与传感臂长度  $L$  发生变化, 同时根据热光效应中  $L(T) \approx L(1 + \alpha_s \Delta T)$  的关系式可知在该实验中, 当  $\Delta T = 70$  °C 时, 经计算  $L$  的变化量仅在  $10^{-5}$  量级, 温度对  $L$  的影响可以忽略不

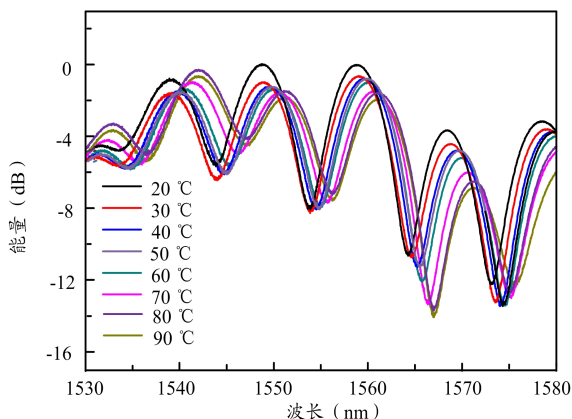


图 4 不同液体温度下传感器的响应光谱

计, 因此主要影响传感器灵敏度的是折射率差  $\Delta n_{eff}$ , 则中心波长会移动到较长的波长, 这与式 (7) 一致。

传感器的温度响应如图 5 所示。可以看出, 随着液体温度的变化, 中心波长发生变化; 温度在 20 °C ~ 90 °C 的变化范围内, 传感器灵敏度为 64.14 pm/°C; 所监测的波谷中心波长漂移量与液体温度变化呈良好的线性关系, 线性度  $R^2$  为 0.995。

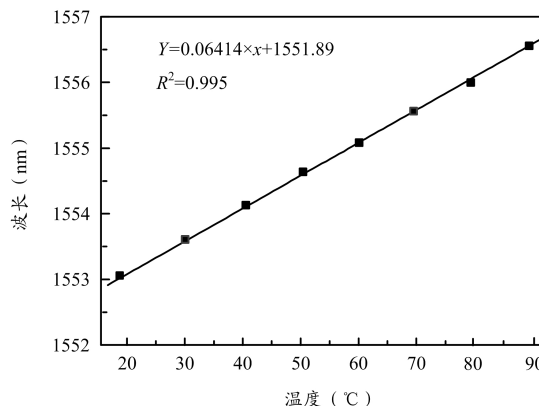


图 5 传感器的温度响应

由于对传感器灵敏度影响起主要作用的是折射率差的变化, 因此我们继续增大折射率差来提高响应灵敏度。实验中进一步采用 40% 的氢氟酸 (HF) 对传感臂 GIF 部分进行了 15 min 的腐蚀, 腐蚀后其直径缩减至 60.5  $\mu\text{m}$ , 也就是将包层腐蚀掉, GIF 的纤芯直接与外界液体接触, 从而使传感臂与外界液体之间的折射率差变化更加明显。实验测量腐蚀后传感器的温度响应, 得到腐蚀后传感器在空气中的透射谱如图 6 所示, 图中干涉图样清晰, 利于实验监测。

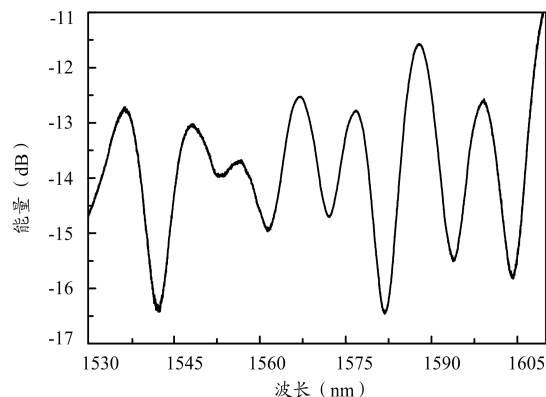


图 6 腐蚀后传感器在空气中的透射谱

我们同样对腐蚀后的传感器进行了液体温度响应实验, 其温度响应光谱如图 7 所示。可以看出, 随着液体温度升高, 在 1593.64 nm 处波谷的中心波长发生红移, 总波长漂移达到 4.8 nm, 高于未刻蚀传感器。这



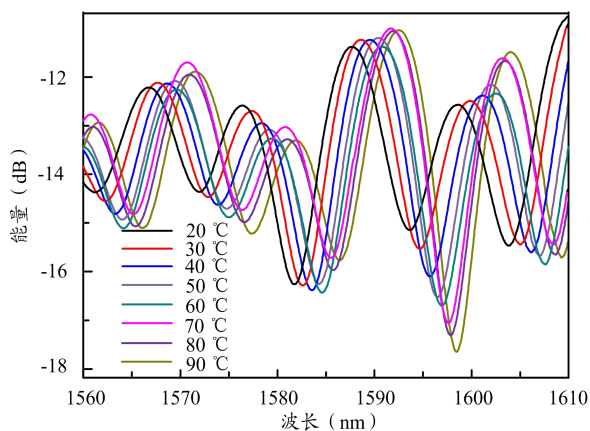


图7 腐蚀后传感器的温度响应光谱

是因为光纤的包层被蚀刻了, 一些新的包层模式被激发, 同时引起  $\Delta n_{eff}$  变化更明显, 腐蚀后传感器的灵敏度明显高于腐蚀前。因此, 波谷中心波长会比之前的漂移更加明显, 这与式(7)相符。腐蚀后传感器的温度响应如图8所示, 结合图7能看出, 腐蚀 GIF 后, 所监测的中心波长随液体温度的变化幅度更明显, 在相同的温度变化范围内, 温度响应灵敏度增至  $98.14 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 同样所监测的波谷中心波长漂移量与液体温度变化呈良好的线性关系, 线性度  $R^2$  为 0.993。

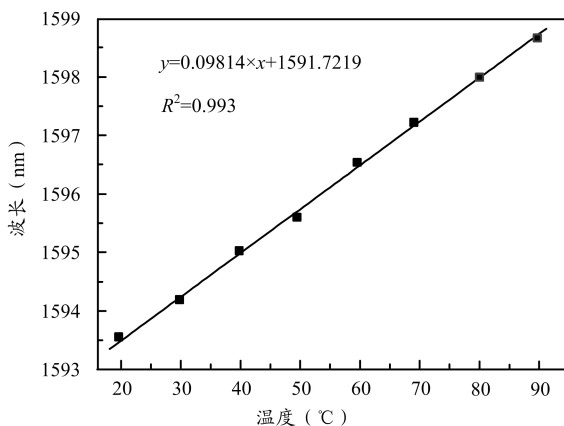


图8 腐蚀后传感器的温度响应

### 3 结束语

本文介绍了一种基于 MMF-GIF-MMF 结构的光纤 MZI 传感器, 其中作为传感臂 GIF 长度为 20 mm。环境液体温度的改变, 使干涉条纹中心波长漂移。实验测得了腐蚀前后传感器的温度响应: 液体温度变化范围在  $20\text{ }^\circ\text{C}\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$  时, 腐蚀前传感器的温度响应灵敏度为  $64.14 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 线性度良好, 为 0.995; 腐蚀后, 灵敏度增至  $98.14 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 线性度良好, 为 0.993。本传感器在生物、医学领域有较好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] ZHAO C L, DEMOKAN M S, JIN W, et al. A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber [J]. Optics communications, 2007, 276(2): 242–245.
- [2] ZHANG B, KAHRIZI M. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication [J]. Sensors Journal, IEEE, 2007, 7(4): 586–591.
- [3] ZHANG A P, SHAO L Y, DING J F, et al. Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2005, 17(11): 2397–2399.
- [4] LIAO C R, WANG Y, WANG D N, et al. Fiber in-line Mach - Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2010, 22(22): 1686–1688.
- [5] JIANG L, YANG J, WANG S, et al. Fiber Mach - Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity[J]. Optics letters, 2011, 36(19): 3753–3755.
- [6] SU J, TONG Z, CAO Y, et al. High sensitivity multimode-multimode-multimode structure fiber sensor based on modal interference [J]. Optics Communications, 2014, 315: 112–115.
- [7] AHMED F, AHSANI V, SAAD A, et al. Bragg Grating Embedded in Mach-Zehnder Interferometer for Refractive Index and Temperature Sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(18): 1968–1971.
- [8] RONG Q, QIAO X, WANG R, et al. High-Sensitive Fiber-Optic Refractometer Based on a Core-Diameter-Mismatch Mach-Zehnder Interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 28(18): 2501–2505.
- [9] SHAO M, QIAO X, FU H, et al. High sensitivity refractive index sensing of Mach-Zehnder interferometer based on multimode fiber core sandwiched between two waist-enlarged fiber tapers [J]. Optics Communications, 2013, 311: 359–363.
- [10] BAO W, HU N, QIAO X, et al. High-Temperature Properties of a Thin-Core Fiber MZI With an Induced Refractive Index Modification [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2245–2248.
- [11] CAO Y, LIU H, TONG Z, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a Mach - Zehnder interferometer cascaded with a fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2015, 342: 180–183.
- [12] AHMED F, AHSANI V, SAAD A, et al. Bragg Grating Embedded in Mach-Zehnder Interferometer for Refractive Index and Temperature Sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(18): 1968–1971.
- [13] GONG H, XIONG M, QIAN Z, et al. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on Mach-Zehnder interferometer comprising core-offset and spherical-shape structures [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–9.
- [14] 杨勋恩, 黄勇林, 任珂, 等. 基于光子晶体光纤的 MZI 温度传感特性研究[J]. 光通信研究, 2017(3): 24–28.
- [15] 俞夏雨奇, 赵春柳, 王家辉, 等. 基于游标效应的双 MZI 温度传感理论研究[J]. 光通信技术, 2018, 42(1): 24–27.