

DOI:10.16136/j.joel.2023.08.0321

# 一种基于马赫-曾德尔干涉仪的折射率和温度同时测量传感器

刘 婷<sup>1,2,3</sup>, 张 静<sup>1,2,3</sup>, 李永倩<sup>1,2,3\*</sup>, 武佳琪<sup>1,2,3</sup>, 张雨微<sup>1,2,3</sup>, 赵 旭<sup>1,2,3</sup>

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003; 3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:**设计制作了一种基于马赫-曾德尔干涉结构的传感器用于折射率和温度的同时测量,传感器的结构为单模-多模-细芯-多模-单模。利用 RSoft 光学仿真软件的 BeamPROP 模块对传感结构内部光场进行模拟分析,确定了多模光纤(multi-mode fiber, MMF)及细芯光纤(thin core fiber, TCF)的最优长度,制作了传感结构并搭建实验系统观测其折射率和温度响应情况,结合敏感矩阵,实现了双参量的同时测量。实验结果表明,该传感器在 1.333—1.380 的折射率范围内灵敏度为  $-44.944 \text{ nm/RIU}$ ,在 30—65 °C 的温度范围内灵敏度为  $0.0829 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$ 。本文提出的传感器结构简单、体积小、灵敏度高,可以为折射率和温度双参量传感设计提供参考。

**关键词:** 光纤传感器; 马赫-曾德尔干涉仪(MZI); 折射率; 温度

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)08-0785-07

## A sensor for measuring refractive index and temperature simultaneously based on Mach-Zehnder interferometer

LIU Ting<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2,3</sup>, LI Yongqian<sup>1,2,3\*</sup>, WU Jiaqi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yuwei<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Xu<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** A sensor based on Mach-Zehnder interference structure is designed to measure refractive index and temperature simultaneously. The sensor structure is single mode-multi-mode-thin core-multi-mode-single mode. BeamPROP module of RSoft optical simulation software was used to simulate and analyze the optical field inside the sensor structure. The optimal length of the multi-mode fiber (MMF) and the thin core fiber (TCF) was determined. The sensor structure was made and the experimental system was set up to observe the refractive index and temperature response. Dual-parameter measuring simultaneously was realized combined with sensitivity matrix. The experimental results show that the sensitivity of the sensor is  $-44.944 \text{ nm/RIU}$  in the refractive index range of 1.333—1.380 and  $0.0829 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$  in the temperature range of 30—65 °C. The proposed sensor has the advantages of simple structure, small volume and high sensitivity, which can provide reference for the design of dual-parameter sensor of refractive index and temperature.

**Key words:** optical fiber sensor; Mach-Zehnder interferometer (MZI); refractive index; temperature

\* E-mail: liutinggy@163.com

收稿日期: 2022-05-03 修订日期: 2022-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61775057, 62171185, 52177141)、河北省自然科学基金(F2019502112)和中央高校基本科研业务费专项基金(2019MS086, 2021MS071)资助项目

## 0 引 言

折射率的测量在食品安全、海洋监测、化学工业等领域起着重要的作用。在实际应用中,因为光纤传感器灵敏度高,其光学特性往往受到多个物理参量共同影响,这就是光纤传感器的交叉敏感问题,在解调时也无法判断具体是哪个物理参量发生了改变。利用光纤传感器进行折射率测量时,受到热光效应和热膨胀效应的影响,温度的变化给折射率的测量带来不容忽视的干扰,因此双参量同时测量传感器越来越受到关注<sup>[1-3]</sup>。2017年,YAO等<sup>[4]</sup>将两个光纤布拉格光栅级联,其中一个利用氢氟酸腐蚀形成锥形,实现了折射率和温度的同时测量,灵敏度分别为 13.76 nm/RIU 和 0.046 nm/°C。2018年,胡义慧等<sup>[5]</sup>制作了一种在单模光纤(single mode fiber, SMF)中熔接一段硬塑料包层光纤的马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI),实现了折射率和温度的同时测量,折射率与温度灵敏度分别达到了 -152.56 nm/RIU 和 0.0133 nm/°C。2020年,WANG等<sup>[6]</sup>通过无芯光纤上制作一个 S 形锥形区级联的结构,实现了折射率和温度的同时测量,折射率和温度灵敏度分别为 460.66 nm/RIU 和 -0.0429 nm/°C。2021年,陶武强等<sup>[7]</sup>通过将无芯光纤和长周期光纤光栅级联制成了一种新型传感器,其中无芯光纤和长周期光纤光栅分别对折射率和温度的变化敏感,从而实现折射率和温度的同时测量,灵敏度分别为 102.80 nm/RIU 和 0.0198 nm/°C。

上述文献中的传感器都对折射率和温度的同时测量进行了深入研究,但利用氢氟酸腐蚀光纤光栅危险系数较高,使用特种光纤价格昂贵,使用锥形结构保存困难,光栅级联使系统复杂,成本较高。本文设计制作了一种基于单模-多模-细芯-多模-单模结构的 MZI,利用光束传播法模拟仿真确定各光纤段的最佳长度,制作传感器并进行了折射率与温度的测量。该传感器结构简单稳固、成本低廉、灵敏度高,可以满足折射率和温度的同时测量需求。

## 1 传感器原理与数值模拟

### 1.1 传感器工作原理

在 MZI 中,光束在经过第一个耦合器后分成两束光,分别进入参考臂和传感臂中传输。当外界参量变化时,传感臂受到干扰,光的相位发生变化,而参考臂不受影响,因此在传感臂和参考臂中传输的两路光产生相位差,最后于第二个耦合器中发生干

涉<sup>[8,9]</sup>。图 1 为传感器结构示意图,传感器由入射光纤 SMF1、凸锥结构 Up-taper、直径为 105/125  $\mu\text{m}$  的多模光纤(multi-mode fiber, MMF) MMF1、直径为 6/80  $\mu\text{m}$  的细芯光纤(thin core fiber, TCF)、直径为 50/125  $\mu\text{m}$  的 MMF2 和出射光纤 SMF2 构成。其中凸锥结构是在入射光纤末端通过多次放电形成的,测量得直径为 176  $\mu\text{m}$ 。凸锥结构为传感器的第一个耦合器,激发出包层模;MMF1 采用大芯径 MMF,增大与凸锥末端纤芯直径的差值,使纤芯失配严重,可以更加有效地激发出更多的包层模,提高传感器的灵敏度;TCF 作为传感光纤,因其具有较小的纤芯直径,对光的束缚能力弱,所以 TCF 对外界环境参量的变化更加敏感;MMF2 作为结构最后的耦合器,采用较大芯径的 MMF 可以将更多的 TCF 中的包层模耦合到纤芯中,且避免最后传输到 SMF2 时损失大量的光能量。光束传播过程中,纤芯模为参考臂,包层模为传感臂。实验中采用的光纤切割刀型号为 KL-21,光纤熔接机型号为 KL-260,实验中光纤熔接均为对轴熔接。

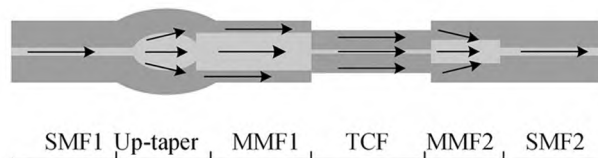


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

入射光从宽谱光源输出后,经光纤 SMF1 到凸锥处,由于光纤纤芯直径突然增大,光波的传输模式发生了变化,包层模式被激发并进入到光纤包层中传输,此时光在 MMF1 的纤芯和包层中传输。当光到达 MMF1 和 TCF 分界面时,部分光耦合进入 TCF 的包层中,更多的包层模式被激发,部分光进入到 TCF 纤芯中传输,剩余的光则泄漏到外界环境中。最后,光在 MMF2 处耦合干涉,经出射光纤传输至光谱分析仪。光在传输过程中,存在纤芯模和包层模两种有效折射率不同的模式,两种模式之间存在相位差,本文设计的传感器由两个 MZI 级联构成,分别是凸锥-MMF1 和 TCF-MMF2。

#### 1.1.1 折射率传感原理

本文中传感器发生的干涉主要是纤芯模和被激发的包层模之间形成的,在一定波长下,其干涉强度可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$I = I_{\text{co}} + \sum_m I_{\text{cl},m} + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{co}} I_{\text{cl},m}} \cos\varphi, \quad (1)$$

式中,  $I$  是干涉波的总强度,  $I_{\text{co}}$  与  $I_{\text{cl},m}$  分别是纤芯模

与  $m$  阶包层模的光强度,  $\varphi$  是纤芯模和包层模之间的相位差, 相位差  $\varphi$  可以表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中,  $L$  是传感区域长度,  $\Delta n_{\text{eff}}$  是纤芯模与包层模的有效折射率差,  $\lambda$  是自由空间的波长。

当  $\varphi = (2m+1)\pi$  ( $m$  为正整数) 时, 干涉光强达到最小值, 出现干涉波谷。根据式(2)可以得到波谷的波长为:

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

当外界环境折射率增大时, 包层模的有效折射率变大, 而纤芯模几乎不变, 所以二者的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  减小, 由式(3)可知, 干涉波谷将向短波长方向偏移。

当光纤外界环境的折射率发生变化时, 特征波长的折射率灵敏度  $S_{\text{RI}}$  可以表示为:

$$S_{\text{RI}} = \frac{\partial \lambda_{\text{Dip}}}{\partial n_{\text{ext}}} = \frac{-\frac{2L}{2m+1} \frac{\partial n_{\text{cl},m,\text{eff}}}{\partial n_{\text{ext}}}}{1 - \frac{2L}{2m+1} \left( \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} \right)}, \quad (4)$$

式中,  $n_{\text{ext}}$  表示外界环境的折射率,  $n_{\text{cl},m,\text{eff}}$  表示第  $m$  阶包层模的有效折射率。

### 1.1.2 温度传感原理

当外界环境温度变化时, 受到热光效应和热膨胀效应的影响, 传感长度  $L$  和有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  也将变化。若外界环境变化量为  $\Delta T$ , 则光纤长度和模式折射率的变化可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$L(T) \approx L(T_0)(1 + \alpha_s \Delta T), \quad (5)$$

$$\Delta n_{\text{eff}}(T) \approx \Delta n_{\text{eff}}(T_0) + \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Delta T, \quad (6)$$

式中,  $\alpha_s = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  是光纤的热膨胀系数,  $L(T_0)$  和  $L(T)$  分别是外界环境温度为  $T_0$  和  $T$  时光

纤的长度,  $\Delta n_{\text{eff}}(T_0)$  和  $\Delta n_{\text{eff}}(T)$  分别是外界温度为  $T_0$  和  $T$  时纤芯模和包层模的有效折射率差。根据式(5)和式(6)可知, 当外界环境温度升高时,  $L$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  都会增大, 由式(3)可得, 干涉波谷将向长波长方向偏移, 特征波长的温度灵敏度  $S_T$  可以表示为:

$$S_T = \frac{\partial \lambda_{\text{Dip}}}{\partial T} = \frac{2L}{2m+1} (\Delta n_{\text{eff}} \alpha_s + \zeta_{\text{co,eff}} n_{\text{co,eff}} - \zeta_{\text{cl,eff}} n_{\text{cl,eff}}), \quad (7)$$

式中,  $\zeta_{\text{co,eff}}$  和  $\zeta_{\text{cl,eff}}$  分别表示纤芯和包层的有效热光系数,  $n_{\text{co,eff}}$  表示纤芯模的有效折射率。

从式(4)和式(7)可以看出特征波长值与折射率、温度的变化成不同的比例, 对两个参量的响应灵敏度不同。所以, 可以通过监测干涉波谷的波长偏移量来计算折射率和温度的变化值。

### 1.2 数值模拟

当光从 SMF 传输到 MMF 时, 多个高阶模式被激发。由于多模干涉效应, 沿着光的传输方向, MMF 内的光场发生周期性的变化。入射光沿传输方向传输一定距离后, 在某一位置的光场与入射光场几乎完全一样, 这种现象就是自映像效应, 这段传输距离称为自映像周期<sup>[12]</sup>。自映像周期可表示为:

$$l = p \frac{\pi a^2}{\lambda}, \quad (8)$$

式中,  $l$  为自映像周期,  $p$  为自映像周期数,  $n$  为传输光波导的折射率,  $a$  为光波导的直径大小,  $\lambda$  为光源中心波长。可以看出, 当光波导的折射率、直径大小改变时, 光纤内光场会发生变化, 自映像周期也发生变化。

利用 RSoft 软件的 BeamPROP 模块, 对直径为 50/125  $\mu\text{m}$ 、105/125  $\mu\text{m}$  的阶跃型 MMF 以及直径为 6/80  $\mu\text{m}$  的 TCF 进行模拟计算。模拟的基本参数如表 1 所示。

表 1 光纤参数

Tab. 1 Parameters of optical fibers

Types of optical fiber	SMF	MMF1	MMF2	TCF
Refractive index of core	1.468 2	1.466 7	1.466 7	1.465 0
Diameter of core/ $\mu\text{m}$	8.2	105	50	6
Refractive index of cladding	1.462 8	1.406 0	1.406 0	1.445 0
Diameter of cladding/ $\mu\text{m}$	125	125	125	80

将 SMF 分别与 1 cm 长的直径为 50/125  $\mu\text{m}$  的 MMF、4.3 cm 长的直径为 105/125  $\mu\text{m}$  的 MMF 和 5 cm 长的直径为 6/80  $\mu\text{m}$  的 TCF 相连进行模拟计算, 得到 3 种光纤的光场幅度分布图和光纤中心功

率分布图如图 2 所示。由光纤幅度分布图可知, 光场能量在 SMF 中主要集中在纤芯内部。光传输到 MMF 时, 由于纤芯失配, 高阶模式被激发, 不同的模式在纤芯内发生干涉, 光波叠加引起光强度的重新

分布。从图 2(a)和图 2(b)中可以看出两种 MMF 中都出现了周期性传导的现象,直径为  $50/125\ \mu\text{m}$ 、 $105/125\ \mu\text{m}$  的 MMF 的自映像周期分别为 2.466 mm、10.654 mm。由于 TCF 的纤芯直径较接近输入 SMF,其自映像周期很小且光功率变化很小,在模拟图 2(c)中无法观察到其周期性传导现象,故将 TCF 具体参数代入式(8),得到直径为  $6/80\ \mu\text{m}$  的 TCF 的自映像周期为 0.034 mm。为了耦合更多的光参与干涉并输出,一般选取传感结构中各段光纤长度

分别为其自映像周期的整数倍,但考虑到实验条件,实验精度仅为 mm 级别,所以最终确定该传感器结构中 MMF 1、TCF 和 MMF 2 的长度分别为 11 mm、15 mm 和 7 mm。

确定各光纤段的长度之后完成传感器的制作,得到的传感器透射谱如图 3 所示,透射谱中干涉条纹清晰,条纹对比度最大达到 0.302,可以满足本文实验的测量需求,选取 1595 nm 和 1615 nm 左右的两个波谷作为特征波谷,分别记为 Dip1 和 Dip2。

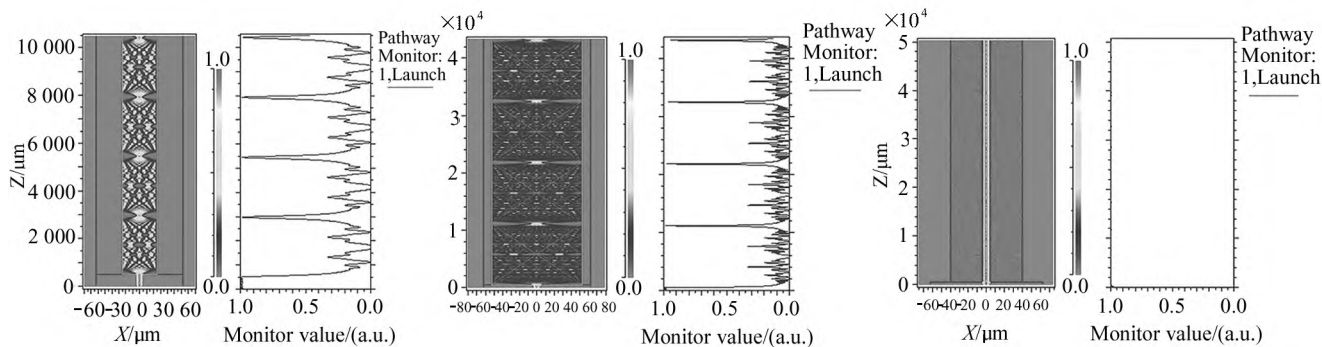


图 2 光场幅度分布图和光纤中心功率分布图

Fig. 2 Diagram of optical field amplitude distribution and optical fiber center power distribution

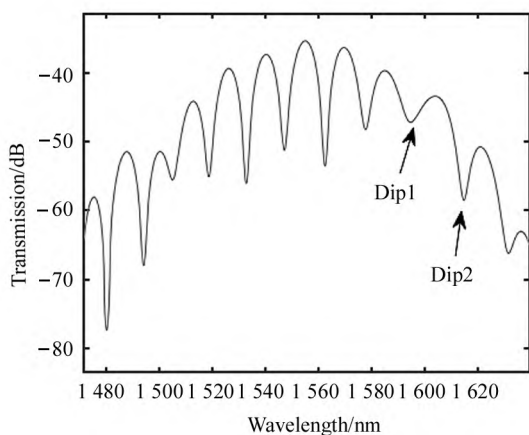


图 3 传感器透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of the sensor

## 2 实验结果与分析

### 2.1 折射率传感实验

图 4 为折射率测量系统,电源为稳压电源(regulated power supply, RPS),光源使用 SLED 宽谱光源,宽谱光源连接隔离器(isolater, ISO)后连接传感器结构的入射光纤,传感器的出射光纤连接光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA),OSA 的分辨率为 0.02 nm。实验中将传感头固定在 U 型槽内,这样可以把传感头充分浸入氯化钠溶液中,同时避

免其受压力、弯曲等外界因素的影响。

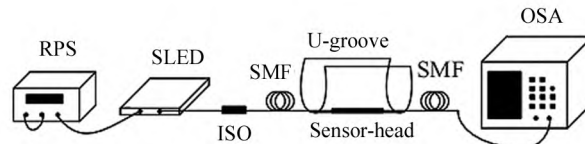


图 4 折射率测量实验装置图

Fig. 4 Experimental device diagram of refractive index measurement

将温度控制在  $25\ ^\circ\text{C}$  不变,配置不同浓度的氯化钠溶液,利用经验公式计算其折射率并进行标定,得到折射率不同的溶液,表 2 为不同浓度氯化钠溶液与折射率的一一对应关系。

表 2 氯化钠溶液浓度与折射率对应表

Tab. 2 Corresponding relation between concentration of sodium chloride solution and refractive index

Concentration of sodium chloride solution/%	Refractive index /RIU
0	1.333
5.0	1.342
9.1	1.350
16.7	1.360
20.0	1.370
25.0	1.380

首先将蒸馏水滴在传感头上,使传感头完全浸没,等透射谱稳定之后记录数据,然后将蒸馏水吸出,用配置好的氯化钠溶液完全覆盖传感头,等待 10 min,透射谱稳定之后记录数据。之后使用注射器吸出氯化钠溶液,用蒸馏水清洗 U 型槽和传感头,晾干之后依次加入不同折射率的溶液直至完成表 2 中所有折射率的测量实验,每次更换溶液之前均先进行清洗。

图 5 为不同折射率下的传感器透射谱,从图中可以看出,随着外界环境折射率的增加,Dip1 和 Dip2 向短波长方向偏移,与理论研究相符。当折射率从 1.333 升高到 1.380 时,Dip1 和 Dip2 的偏移量分别为  $-1.932 \text{ nm}$  和  $-1.688 \text{ nm}$ 。

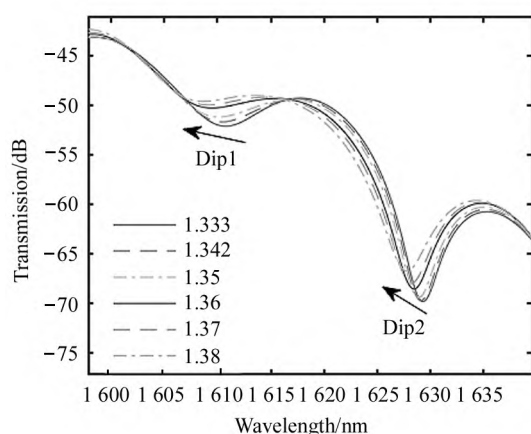


图 5 不同折射率下的传感器透射谱  
Fig. 5 Transmission spectrum of sensor at different refractive indices

处理实验数据,得到两个特征波谷随着折射率增大的波长偏移情况,如图 6 所示,Dip1 与 Dip2 波

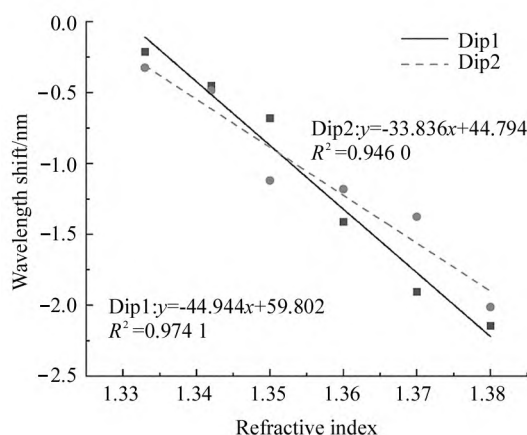


图 6 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量—折射率关系图  
Fig. 6 Wavelength shift—refractive index diagram of Dip1 and Dip2

长的折射率灵敏度分别为  $-44.944 \text{ nm/RIU}$  和  $-33.836 \text{ nm/RIU}$ ,对应的线性拟合度分别为 0.9741 和 0.9460。由于光谱仪的分辨率为  $0.02 \text{ nm}$ ,计算得 Dip1 和 Dip2 波长的折射率分辨率分别为  $4.45 \times 10^{-4}$  和  $5.91 \times 10^{-4}$ 。

## 2.2 温度传感实验

温度传感系统如图 7 所示,使用的温度保持装置为装有蒸馏水的水浴加热槽(water-bath heater),传感器在加热槽中保持水平,保证其不受压力、弯曲等因素影响。进行实验时,从  $30^\circ\text{C}$  开始,控制加热槽的温度均匀加热到  $65^\circ\text{C}$ ,以  $5^\circ\text{C}$  为步进记录传感器透射光谱,当温度达到记录点之后,等待 10 min 使透射光谱稳定。

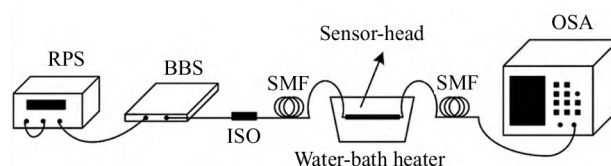


图 7 温度传感实验装置示意图  
Fig. 7 Experimental device diagram of temperature measurement

图 8 为不同温度下的传感器透射谱,从图中可以看出,随着温度的升高,Dip1 和 Dip2 向长波长方向偏移,与理论分析一致。当温度从  $30^\circ\text{C}$  升高到  $65^\circ\text{C}$  时,Dip1 和 Dip2 的波长偏移量分别为  $2.520 \text{ nm}$  和  $3.032 \text{ nm}$ 。

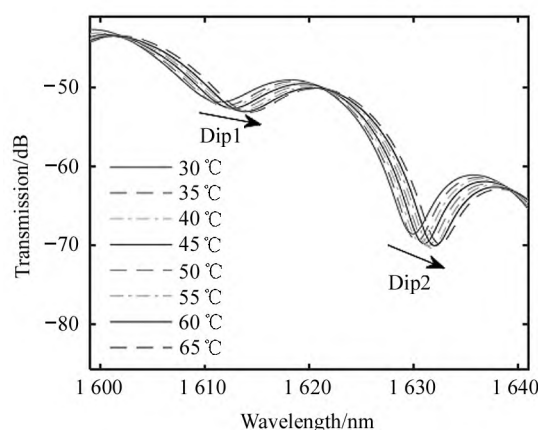


图 8 不同温度下的传感器透射谱  
Fig. 8 Sensor transmission spectrum at different temperatures

处理实验数据,得到两个特征波谷的波长偏移量与温度对应关系,如图 9 所示,Dip1 和 Dip2 波长的温度灵敏度分别为  $0.074 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  和  $0.083 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ,

线性拟合度分别为 0.9837 和 0.9841, 两个波谷的温度分辨率分别为 0.27 °C 和 0.24 °C。

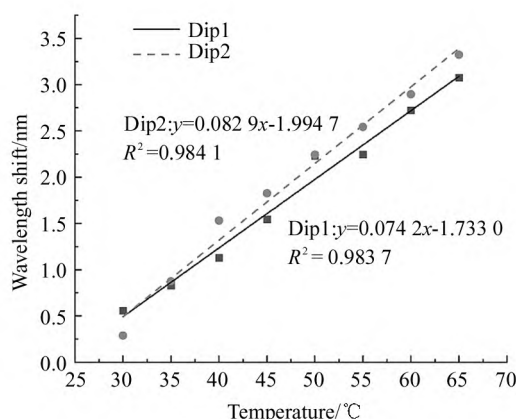


图 9 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量-温度关系图

Fig. 9 Wavelength shift-temperature diagrams of Dip1 and Dip2

### 2.3 结果分析

本文中传感器的 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量与折射率和温度的变化对应关系不同, 因此可以建立灵敏度矩阵, 实现双参量的同时测量。当外界环境的折射率和温度同时发生变化时, 波谷的波长偏移量可以表示为<sup>[13-15]</sup>:

$$\Delta\lambda = K_{RI}\Delta n + K_T\Delta T, \quad (9)$$

式中,  $K_{RI}$  表示该波谷的折射率灵敏度,  $K_T$  表示该波谷的温度灵敏度, 则 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量与外界环境中折射率、温度变化量的关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1,RI} & K_{1,T} \\ K_{2,RI} & K_{2,T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (10)$$

求式(10)的逆矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{\begin{vmatrix} K_{1,RI} & K_{1,T} \\ K_{2,RI} & K_{2,T} \end{vmatrix}} \begin{bmatrix} K_{2,T} & -K_{1,T} \\ -K_{2,RI} & K_{1,RI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

将实验得到的灵敏度代入式(11), 得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{1.2152} \begin{bmatrix} 0.0829 & -0.0742 \\ 33.836 & -44.944 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

因此, 只需要测量该传感器透射谱中 Dip1 和 Dip2 的波长偏移量, 代入式(12)计算即可得到折射率和温度的变化量, 从而实现双参量的同时测量。

## 3 结 论

本文提出了一种基于 MZI 干涉结构的折射率和

温度同时测量传感器, 传感器结构为单模-多模-细芯-多模-单模。当折射率和温度发生变化时, 两个特征波谷的波长偏移量不同, 通过监测透射谱中两个特征波谷的波长偏移情况, 构建灵敏度矩阵, 实现双参量的同时测量。实验结果表明, 两个特征波谷的波长在 1.333—1.380 的折射率范围内灵敏度分别为 -44.944 nm/RIU 和 -33.836 nm/RIU; 当温度在 30—65 °C 范围内变化时, 两个波谷的波长灵敏度分别为 0.0742 nm/°C 和 0.083 nm/°C。该传感器结构简单、线性度高、体积小, 在食品安全、海洋监测、生物医学等领域有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] ZONG S Y, WEN X Y, ZHANG D S. Fiber Mach-Zehnder temperature index dual-parameter sensor based on fiber core mismatch and dislocation fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170607.  
宗书尧, 文晓艳, 张东生. 基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170607.
- [2] JIAO T, MENG H Y, DENG S Y, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a Mach-Zehnder interferometer with forward core-cladding-core recoupling[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 111: 612-615.
- [3] WU B C, BAO H Y, ZHOU Y F, et al. Temperature dependence of a refractive index sensor based on a bent core-offset in-line fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 67: 102748.
- [4] YAO Q Q, MENG H Y, WANG W, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber bragg grating[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 209: 73-77.
- [5] HU Y H, DONG H Y, JIANG C, et al. Multi-functional optical fiber sensor composed of hard plastic cladding optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070605.  
胡义慧, 董航宇, 江超, 等. 硬塑料包层光纤构成的多功能光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070605.
- [6] WANG F, PANG K, MA T, et al. S-shaped refractometer based on dual tapered no-core fiber for low-range refractive index measurement [J]. Optics Communications, 2020, 463: 125419.
- [7] TAO W Q, JIANG C, GUO X S. LPFG and core-less fiber cascade sensor for simultaneous measurement of refrac-

- tive index and temperature[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(8): 812-817.
- 陶武强, 江超, 郭小珊. LPFG 与无芯光纤级联的折射率与温度同时测量传感器[J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(8): 812-817.
- [8] MUMTAZ F, CHENG P, LI C, et al. A design of taper-like etched multicore fiber refractive index-insensitive a temperature highly sensitive Mach-Zehnder interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13): 7074-7081.
- [9] ZHU X J, LI S, SUN D, et al. High sensitivity temperature and curvature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with tapered two peanut-shaped structures[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 4135-4143.
- [10] LI D Q, CAO Y, GONG S S, et al. Interferometric optical fiber sensor based on fine core optical fiber and double sphere structure[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(6): 857-860.
- 李德强, 曹晔, 宫顺顺, 等. 基于细芯光纤与双球结构的干涉型光纤传感器[J]. 传感技术学报, 2018, 31(6): 857-860.
- [11] GIANLUCA C, VITTORIA F, JOEL V, et al. Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000 °C [J]. Optics Express, 2017, 17(24): 21551-21559.
- [12] YANG H Y, LIU M Y, LI Y K, et al. High sensitivity multi-mode interferency-heterogeneous coreless fiber refractive index sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 652-657.
- 杨宏艳, 刘孟银, 李叶柯, 等. 高灵敏度多模干涉—异质无芯光纤折射率传感器[J]. 半导体光电, 2020, 41(5): 652-657.
- [13] LI X G, LINH V N, MARTIN B, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index using an exposed core micro structured optical fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(4): 1-7.
- [14] ZHAO Y, ZHAO J, Peng Y, et al. Simultaneous measurement of seawater salinity and temperature with composite fiber-optic interferometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-8.
- [15] WU Y F, LIU B, NAN T, et al. Fiber optic hybrid structure based on an air bubble and thin taper for measurement of refractive index, temperature, and transverse load [J]. Optik, 2021, 241: 166962.

#### 作者简介:

李永倩 (1958—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事光通信与光传感技术方面的研究。