

## 全光纤粗锥 MZ 级联 PCF-FP 结构双参数特性研究

周康鹏<sup>1,2</sup>, 何巍<sup>1,2</sup>, 张雯<sup>1,2</sup>, 刘锋<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 先进光电子器件与系统创新引智基地, 北京 100192;
2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016)

**摘要:** 为了在测量 NaCl 溶液浓度的同时实现对温度的监测, 提出了一种基于马赫-曾德干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 级联法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI) 的干涉型传感器。在单模光纤上通过熔融放电制作出一对腰锥直径 155  $\mu\text{m}$ 、间隔 1.5 cm 的 MZI, 其对比度为 10 dB、周期 29.85 nm; 在 MZI 尾纤的一端与光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 相对熔接并在距熔接点 176  $\mu\text{m}$  处将 PCF 切平, 形成对比度为 8 dB、周期为 5.71 nm 的 FPI。实验选取 1 535~1 555 nm 波段 MZI 和 FPI 的干涉波谷特征波长, 在 0~150  $^{\circ}\text{C}$  的温度和 0%~24% 的 NaCl 溶液浓度变化范围内测得 MZI 的温度和折射率灵敏度分别为 50 pm/ $^{\circ}\text{C}$  和 9.97 nm/RIU, 线性度均大于 0.97; 而 FPI 的波谷特征波长对折射率不敏感, 温度灵敏度约为 8.3 pm/ $^{\circ}\text{C}$ , 线性度为 0.98。最后, 通过构建温度-浓度函数关系矩阵得出了对温度和 NaCl 溶液浓度的灵敏度矩阵。该干涉型传感器对温度和 NaCl 溶液浓度表现出良好的灵敏度和线性度, 可实现上述双参数的同时测量。

**关键词:** 光纤干涉型传感器; 马赫-曾德干涉仪; 法布里-珀罗干涉仪; 温度-NaCl 溶液浓度; 光子晶体光纤

中图分类号: TN253; O436.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0717004

## Dual-parameter characterization based on all-fiber waist-enlarged-bitapers MZ cascaded PCF-FP

Zhou Kangpeng<sup>1,2</sup>, He Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Wen<sup>1,2</sup>, Liu Feng<sup>1,2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. Overseas Expertise Introduction Center for Discipline Innovation ("111 Center"), Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement of monitoring temperature change during the NaCl solution concentration measurement, an interferometric sensor based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) cascaded Fabry-Perot interferometer (FPI) was proposed. The MZI was prepared by melting and splicing a single mode fiber to form a pair of tapers structure with diameter of 155  $\mu\text{m}$  at the waist an interval of 1.5 cm and the contrast and period of the MZI was 10 dB and 29.85 nm, respectively; Then a photonic

收稿日期: 2019-02-01; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51775051, 61801030); 高等学校学科创新引智计划(先进光电子器件与系统学科创新引智基地, D17021); 载人航天预研项目(20184112043)

作者简介: 周康鹏(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感及飞秒激光加工方面的研究。Email: fishmore0228@sina.com

导师简介: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感与激光器、生物医学检测技术及仪器、精密测量与系统方面的研究。Email: zhulianqing@sina.com

crystal fiber (PCF) was spliced to one end of the MZI, cleaving the PCF at a distance of a 176  $\mu\text{m}$  from the splicing position, which a FPI was formed with contrast and period of 8 dB and 5.71 nm, respectively. By selecting the characteristic wavelength shifts of MZI and FPI interference dips in the range of 1 535–1 555 nm, in the temperature range of 30–150  $^{\circ}\text{C}$  and NaCl solution concentration range of 0%–24%, the temperature and refractive index sensitivities were 50  $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$  and 9.97 nm/RIU, respectively. The linearities were both greater than 0.97; While the interference dip of FPI was insensitive to the refractive index, and its sensitivity of temperature and linearity was 8.3  $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$  and 0.98, respectively. Finally, the sensitivity matrix for temperature and NaCl concentration was calculated by constructing the temperature–NaCl concentration function matrix. The interferometric sensor has good sensitivity and linearity to temperature and concentration of NaCl solution, which can realize the simultaneous measurement of the mentioned parameters.

**Key words:** optical fiber interferometric sensor; Mach–Zehnder interferometer; Fabry–Perot interferometer; temperature–NaCl solution concentration; photonic crystal fiber

## 0 引言

在生物制药、化学品检测等工业生产中需实时测量液体的浓度,但检测过程中往往伴随温度的变化,直接影响测量精确度<sup>[1]</sup>,因此实现温度和液体浓度的同时测量具有重要的应用价值。光纤传感器体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高<sup>[2–4]</sup>可实现应变、温度、压力、折射率、湿度等参数的测量<sup>[5–9]</sup>,其中,干涉型光纤传感器具有更高的稳定性、更好的测量重复性可在复杂环境下进行多参数的同时测量<sup>[10–11]</sup>。

目前,利用光纤传感器测量温度和浓度时国内外研究的热点。2015年,Dash J N<sup>[12]</sup>等利用光子晶体光纤(PCF)熔接时的气体塌陷将其与单模光纤熔接制备了双 Fabry–Perot 干涉仪(FPI)进行折射率和温度的测量;2016年,Li X G<sup>[13]</sup>等将单模光纤(SMF)、多模光纤(MMF)和光子晶体光纤(PCF)相对熔接构成了 FPI 与 MZI 复合型传感器,实现对折射率和温度的双参数测量;2017年,李达<sup>[14]</sup>等利用飞秒激光在单模光纤纤芯上刻写 FBG 级联粗锥结构的 MZI 实现温度与酒精溶液浓度的同时测量;2018年,Sun L L<sup>[15]</sup>等报道了将单模光纤拉锥级联细芯光纤制作的 Mach–Zehnder 干涉结构传感器,选取干涉光谱的两个特征波谷进行温度和折射率标定实现了双参数测量。目前的研究虽有一定进展,但传感器结构加工难

度大,导致重复性较低;传感器需分别测量透射光谱和反射光谱,无法在同一光谱下实现双参数同时测量,不利于后续的解调处理;传感器虽具有良好的线性和灵敏度,但需用到飞秒激光和光纤拉锥等精密加工技术,制作成本较高。

综上所述,文中提出了一种光纤 MZI 级联端面 FPI 的干涉型光纤传感器。该传感器的制备只需熔接机和切割刀完成,MZI 由在单模光纤上熔接一对粗锥结构构成,FPI 由 MZI 一端的单模光纤熔接 PCF 后切平形成。根据测量过程中 MZI 与 FPI 对温度和折射率的灵敏度差异,可实现对温度和折射率的同时测量,在生物、化学和制药等领域中具有一定的应用价值。

## 1 传感器工作原理

设计的传感器原理如图 1 所示。该传感器是由一个在 SMF 上经锥腰扩大成粗锥技术制作的 MZI 级联单模光纤末端熔接 PCF 后切平形成 FPI 构成。当光  $I_1$  经过 MZI 第一个粗锥熔接点后,一部分光  $I_2$  在 SMF 的纤芯中传输,一部分光  $I_3$  被激发到 SMF 的包层中传输;包层中传输的光在第二个粗锥熔接点处耦合到 SMF 的纤芯中,两束光因纤芯模和包层模的相位差产生干涉<sup>[16]</sup>;当光  $I_4$  继续沿单模光纤传输至熔接面  $R_1$  时,一部分光  $I_5$  由于菲涅耳反射效应<sup>[17]</sup>反射回到原 SMF 中,另一部分光  $I_6$  透射进入由 PCF

形成的 FP 腔内并传输至反射面  $R_2$ ; 同样地, 光在 PCF 与外界接触的端面也会发生菲涅耳反射和透射, 该反射光  $I_7$  透过  $R_1$  后与  $I_5$  产生光程差, 进而发生 FP 干涉, PCF 为 FP 的腔; 最终, 两束干涉光叠加形成包络状的反射光谱。

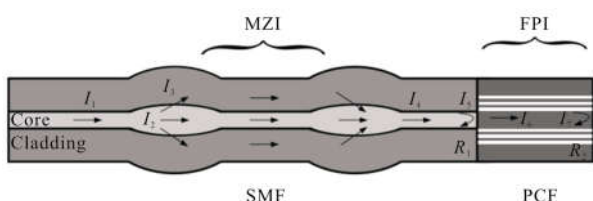


图 1 设计的传感器原理图

Fig.1 Schematic of proposed sensor

对于 MZI, 形成的干涉光谱强度可以表示为:

$$I_{MZI} = I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_2 I_3} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}} L_{MZI}}{\lambda} + \varphi_0\right) \quad (1)$$

式中:  $I_{MZI}$  为干涉谱光强;  $\Delta n_{\text{eff}}$  为包层模和纤芯模的相对折射率差;  $\lambda$  为传输光的波长;  $L_{MZI}$  为两锥形结构之间 SMF 的长度。

当相位差  $\varphi_{23}$  满足  $\varphi_{23} = (2m+1)\pi$  ( $m$  是正整数) 时, 干涉波谷对应的波长  $\lambda_{mMZI}$  可表示为:

$$\lambda_{mMZI} = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L_{MZI}}{2m+1} \quad (2)$$

当外界环境发生变化时, 光纤的热光效应和热膨胀效应会导致 SMF 的  $n_{\text{eff}}$  和  $L_{MZI}$  发生变化, 有<sup>[18]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_{MZI}}{\lambda_{MZI}} = \left( \frac{1}{L_{MZI}} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}} \right) \Delta T + \left( -\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{\partial n_{\text{ex}}} \frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}} \right) \Delta n_{\text{ex}} \quad (3)$$

式中:  $\xi_{\text{co}}$  和  $\xi_{\text{cl}}$  分别为纤芯和包层的热光系数;  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$  分别为纤芯和包层的有效折射率;  $\Delta T$  和  $\Delta n_{\text{ex}}$  分别为外界温度和折射率的变化。因此, MZI 干涉波谷与外界温度和折射率的变化呈线性关系。

对于 FPI, 形成的干涉光谱强度可以表示为:

$$I_{FPI} = I_5 + I_7 + 2\sqrt{I_5 I_7} \cos\left(\frac{4\pi n L_{FPI}}{\lambda} + \varphi_0\right) \quad (4)$$

式中:  $I_{FPI}$  为干涉谱光强;  $L_{FPI}$  为腔长;  $n$  为腔体的折射率。

FPI 的反射光的光程差  $l$  可表示为:

$$l = 2nL_{FPI} \quad (5)$$

由公式(4)可知, 干涉光谱第  $m$  级波谷处的波长

$\lambda_{FPI}$  满足:

$$\frac{4\pi n L_{FPI}}{\lambda_{FPI}} + \varphi_0 = 2m\pi \quad (6)$$

联立公式(5)、(6), 可得:

$$l = \left(m - \frac{\varphi_0}{2\pi}\right) \lambda_{FPI} \quad (7)$$

由上式可知, 光程差与该级次波谷处的波长成正比。

当外界温度发生变化时, 热光效应和热膨胀效应会相应变化, 导致 FPI 的腔长和 PCF 纤芯的有效折射率发生改变, 最终引起光程差的变化, 公式(5)可转化为:

$$\Delta l = 2\Delta n L_{FPI} + 2n \Delta L_{FPI} = 2n \xi \Delta T L_{FPI} + 2n L_{FPI} \alpha \Delta T = 2n L_{FPI} (\xi + \alpha) \Delta T \quad (8)$$

式中:  $\xi$  和  $\alpha$  分别为 PCF 纤芯的热光系数与热膨胀系数。一般地, 光纤纤芯的热膨胀系数与热光系数均视为常数。由上式可知 FPI 腔的光程差变化量与温度的变化呈正比。

联立公式(7)、(8), 可得:

$$\Delta T = \frac{\Delta l}{l(\xi + \alpha)} = \frac{\Delta \lambda_{mFPI}}{\lambda_m(\xi + \alpha)} = \frac{\Delta \lambda_{mFPI}}{(\xi + \alpha)} \cdot \frac{2m\pi - \varphi_0}{4\pi n L_{FPI}} \quad (9)$$

由上式可知, 通过测量干涉光谱的波谷波长漂移量即可实现对温度的测量。

同时, 进行折射率测量时, 由菲涅耳反射, 反射率  $R_i$  ( $i=1, 2$ ) 可以表示为:

$$R_i = \left| \frac{n - n_i}{n + n_i} \right|^2 \quad (i=1, 2) \quad (10)$$

式中:  $n=1.458$  为 PCF 光纤的有效折射率;  $n_i$  ( $i=1, 2$ ) 为单模光纤 ( $i=1$ ) 和外界环境 ( $i=2$ ) 的折射率。当传感器置于不同外界环境时,  $n_i$  不变, 即  $R_1$  的反射率不变, 但  $R_2$  的反射率会随之变化。

由多光束干涉可知,

$$I_R = \frac{(R_1 + R_2) \left[ 1 - \cos\left(\frac{4\pi n L_{FPI}}{\lambda}\right) \right]}{1 + R_1 R_2 - (R_1 + R_2) \cos\left(\frac{4\pi n L_{FPI}}{\lambda}\right)} I_0 \quad (11)$$

由上式可知, 当外界折射率发生改变时, FPI 的变化量只体现在反射光强上, 干涉光谱的波长不随折射率的变化而变化, 即该 FPI 结构的反射光谱波长对折射率不敏感。

当外界温度  $T$  和 NaCl 溶液浓度  $C$  发生变化时, MZI 和 FPI 的反射谱波长变化系数  $\Delta\lambda_{MZI}$  和  $\Delta\lambda_{FPI}$  与温度变化  $\Delta T$  和折射率变化  $\Delta C$  的相关关系可表示为:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{MZI}=K_{T1}\Delta T+K_{C1}\Delta C \\ \Delta\lambda_{FPI}=K_{T2}\Delta T+K_{C2}\Delta C \end{cases} \quad (12)$$

式中： $K_{T1}$  和  $K_{C1}$  分别为 MZI 的温度灵敏系数和折射率灵敏系数； $K_{T2}$  和  $K_{C2}$  分别为 FPI 的温度灵敏系数和折射率灵敏系数。

由公式(12)，构造函数关系矩阵有：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{C1} \\ K_{T2} & K_{C2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{MZI} \\ \Delta\lambda_{FPI} \end{bmatrix} \quad (13)$$

将测得的灵敏度值代入公式(13)中即可进行温度和 NaCl 溶液浓度的监测。

综上所述，通过 MZI 和 FPI 在不同温度和 NaCl 溶液浓度的波长漂移变化量结合灵敏度系数矩阵可实现双参数同时测量。

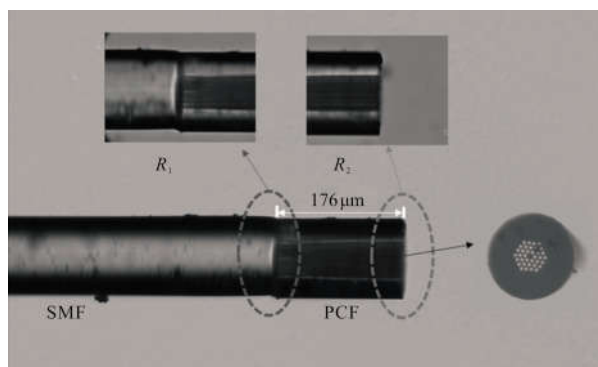
## 2 传感器制备

该传感器在放大倍数为 50 倍、数值孔径 NA=0.55 物镜下的显微影像图如图 2 所示。该传感器以 SMF(SMF-28, Corning)为输入端，一对光纤粗锥结构及其之间的 SMF 构成 MZI，末端 SMF 与 PCF(SM-10, Perfos)构成 FPI。



(a) MZI 结构显微图

(a) Microscopic image of proposed MZI



(b) FPI 结构显微图

(b) Microscopic image of proposed FPI

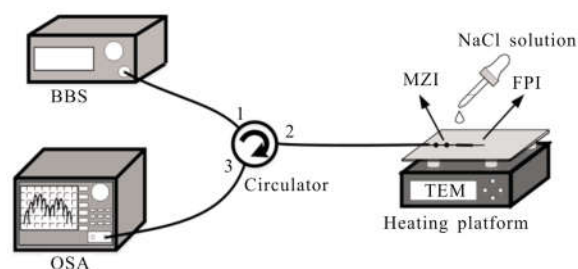
图 2 MZI-FPI 结构显微图

Fig.2 Microscopic images of proposed MZI-FPI

传感器的制备只需熔接机(80S, Fujikura)和切割刀(CT-30, Fujikura)完成。首先，进行光纤 MZI 的制备：去除两段 SMF 端面的涂覆层，经酒精擦拭干净用切割刀切平，放入熔接机中进行锥形结构的制备，锥形结构的直径为 155  $\mu\text{m}$ ，两锥形结构间隔 1.9 cm。为保证包层模的光  $I_3$  能够经第一个粗锥从纤芯射出并经第二个粗锥返回纤芯中，在熔接过程中需通过推进光纤使其重叠，设置熔接机的光纤预熔功率为“标准”，光纤预熔时间为“180 ms”，重叠为“150  $\mu\text{m}$ ”，放电功率为“+50 bit”，光纤对准采用“手动”模式。

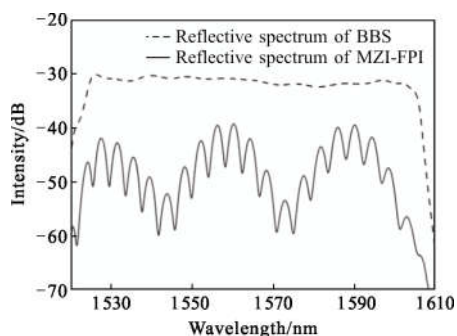
然后进行 FPI 的制作：分别将 MZI 光纤的一端和 PCF 端面去除涂覆层、擦拭和切平等步骤，放入熔接机中。为避免 PCF 在熔接过程中的气体塌陷，需手动设置熔接机熔接放电参数，设置光纤预熔功率为“标-100 bit”，光纤预熔时间为“180 ms”，重叠为“15  $\mu\text{m}$ ”，放电功率为“标-50 bit”，光纤对准采用“手动”模式。熔接放电结束后打开熔接机防风罩，取出光纤。为保证 PCF 长度严格可控，需先将 PCF 切至 1 cm 后再放入 CT-30 切割刀中，使 PCF 端面与 CT-30 进行切平。将 PCF 端面切平至 176  $\mu\text{m}$ 。从图 2(b)中可以看出，在 SMF 与 PCF 的熔接面  $R_1$  处 PCF 无明显的空气孔塌陷且平整。

搭建实验测试系统，如图 3(a)所示。该系统包括宽带光源(BBS, 1 520~1 610 nm)、环形器、光谱分析仪(OSA, AQ 6375, Yokogawa)和传感器单元。传感器连接至环形器的端口 2，BBS 连接至环形器(1 550 nm, Shconnect)的端口 1 为传感器提供光源，光谱仪连接至环形器端口 3 接收传感器反射光谱。光源及传感器反射光谱如图 3(b)所示，传感器反射光谱平滑，无明显损耗。



(a) 实验测试系统

(a) Experimental sensing system



(b) 光源和 MZI-FPI 反射光谱图

(b) Spectrums of BBS and MZI-FPI

图 3 实验测试系统及光源-反射光谱图

Fig.3 Experimental sensing system and its spectrums of BBS and MZI-FPI

恒温恒湿下(温度 25 °C、湿度 30%)传感器反射光谱如图 4 所示,从上至下依次为单独接入 FPI、单独接入 MZI、MZ-FP 级联和 MZ-FP 包络的反射光谱图。从图中可以看出,级联前后 MZI 与 FPI 的反射光谱无明显变化,因此,针对 MZI 可将反射光谱作下包络处理进行温度与 NaCl 浓度测量;针对 FPI 可直接在光谱上选取其特征峰进行上述双参数的测量。

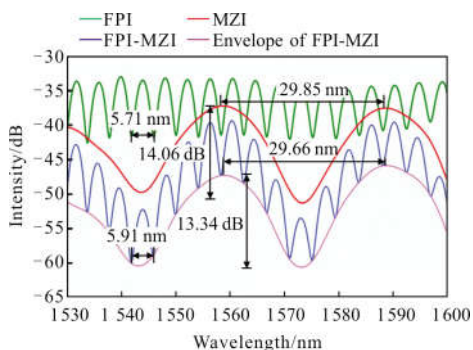


图 4 FPI、MZI、FPI-MZI 和 FPI-MZI 下包络反射光谱图

Fig.4 Reflective spectrums of FPI, MZI, FPI-MZI and its lower envelop

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 传感器温度特性

将传感器固定于精密温控平台上,设置温度变化范围为 30~200 °C,每间隔 20 °C 记录光谱仪中的数据,计算传感器的波长漂移量。1 535~1 555 nm 波段 MZI 的和 1 548~1 550 nm 波段 FPI 的特征光谱较为稳定,无明显的功率漂移现象,因此可选取上述波段

的波谷进行解调。MZI 和 FPI 的反射光谱漂移图如图 5 和图 6 所示。

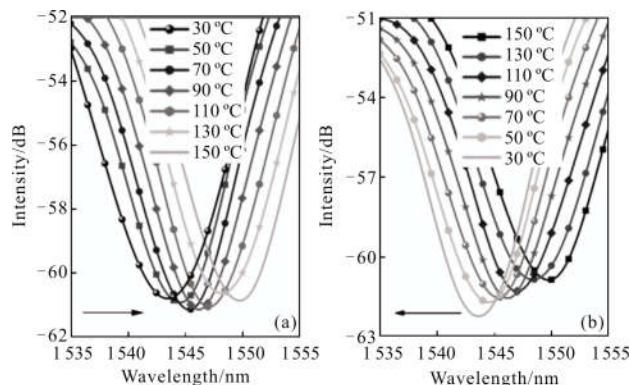


图 5 1 535~1 555 nm 波段升、降温 MZI 波长漂移图

Fig.5 Wavelength shifts of MZI at different temperatures in 1 535-1 555 nm

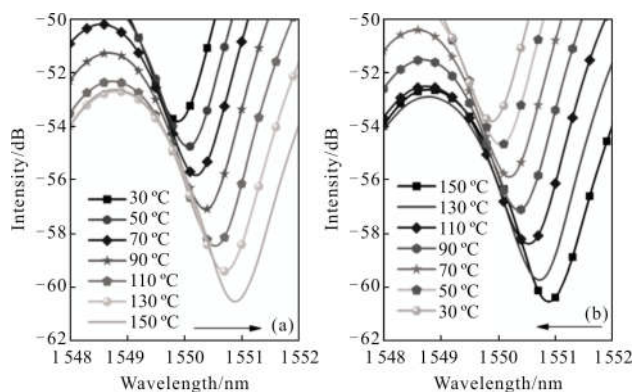


图 6 1 548~1 550 nm 波段升、降温下 FPI 光谱漂移图

Fig.6 Spectrum shifts of FPI at different temperatures in 1 548-1 550 nm

由图 5 和图 6 可知,该光纤传感器的两个波谷随温度变化均有漂移且变化趋势相同,即当温度由 30 °C 升至 150 °C,保持 150 °C 40 min 后降回 30 °C 时,波谷先红移再蓝移,其中 MZI 波长变化约为 6.45 nm, FPI 波长变化约 0.99 nm。

对 MZI 和 FPI 温度响应进行了表征, MZI 与 FPI 温度响应曲线如图 7 所示,其中 MZI 的温度灵敏度约为 50 pm/°C,线性度约为 0.982; FPI 的温度灵敏度约为 8.2 pm/°C,线性度为 0.998;验证了该传感器在 150 °C 时的光谱稳定性,间隔 10 min 记录一次光谱数据。实验结果表明,该传感器光谱稳定性较好,对温度变化具有良好的灵敏度和线性度。



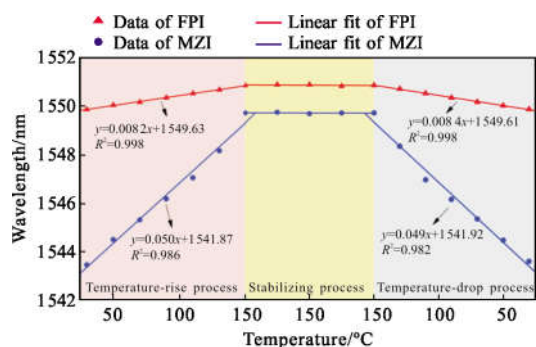


图 7 MZI 与 FPI 温度响应曲线

Fig.7 Temperature response curves of MZI and FPI

### 3.2 传感器浓度特性研究

利用蒸馏水和无水 NaCl(浓度 99.99%, Aladdin) 分别配置了 0%、6%、12%、18%、24% 的 NaCl 溶液, 根据 NaCl 溶液浓度与折射率的关系计算出理论折射率值, 并将配置好的溶液样品滴入阿贝折射仪中得到 NaCl 溶液对应浓度的折射率值, 具体参数如表 1 所示。由表 1 数据可知, NaCl 浓度与折射率成正比。通过计算折射率与反射光谱波长间接求得溶液浓度与波长漂移的关系。设置精密温控平台温度保持 25 °C, 待温度恒定时再进行 NaCl 浓度测量。

表 1 不同浓度 NaCl 溶液的理论值和测量值

Tab.1 Theoretical values and measured values of different NaCl solution concentrations

NaCl concentration	Theoretical values	Measured values
0%	1.333 1	1.332 9
6%	1.344 2	1.342 7
12%	1.355 3	1.352 2
18%	1.366 4	1.362 8
24%	1.377 5	1.372 4

使用滴管将不同浓度的 NaCl 溶液分别滴到传感器上, 实时记录光谱仪采集的光谱数据。1530~1550 nm 波段的 MZI 和 FPI 的反射光谱漂移图如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知, 当 NaCl 溶液折射率从 1.3329 增至 1.3724 时, 波谷向左漂移, 波长的变化量约为 0.39 nm, 灵敏度约为 9.97 nm/RIU, 线性度为 0.97。

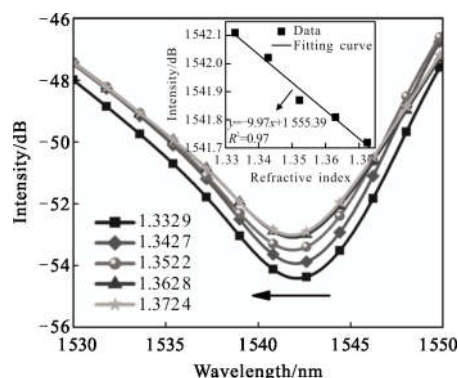


图 8 1530~1550 nm 波段不同浓度下 MZI 波长漂移图和折射率响应曲线

Fig.8 Wavelength shifts and refractive index response curve of MZI at different concentrations in 1530–1550 nm

如图 9 所示, 选取了 1535~1545 nm 波段 1541.9 nm 附近的波谷, 记录不同折射率下的波谷波长值。该特征波谷的波长最大漂移量为 0.06 nm, 折射率与波长非线性关系, 只引起波谷的峰值功率的变化。实验结果表明, FPI 特征波谷波长对折射率不敏感。

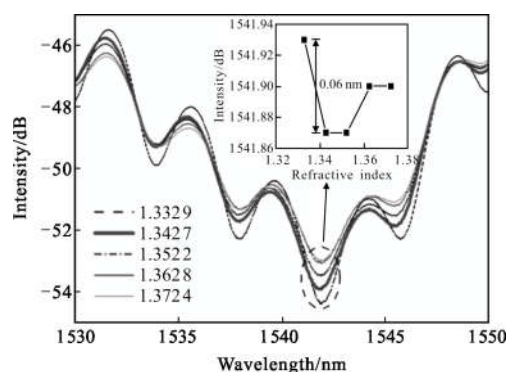


图 9 1530~1550 nm 波段不同浓度下的 FPI 波长漂移图

Fig.9 Wavelength shifts of FPI at different concentrations in 1530–1550 nm

结合实验数据, 将 MZI 和 FPI 温度测试所得升、降温灵敏度分别取平均, MZI 和 FPI 折射率所得灵敏度作为相应的灵敏度系数, 代入公式(13)可得该光纤传感器的温度-折射率传感矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.049 & -9.97 \\ 0.0083 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{MZI} \\ \Delta \lambda_{FPI} \end{bmatrix} \quad (14)$$

实验对该温度-折射率灵敏度系数矩阵进行了验证。分别在 3% NaCl 溶液-40 °C 和 6% NaCl-50 °C 下采集传感器反射光谱, 所得参数如表 2 所示。所得温度-折射率灵敏度系数矩阵准确, 该传感器具有较

高的测量重复性,引起系统测量误差的来源主要为外界温度引起的反射谱波长漂移、光源光功率漂移、NaCl 溶液配置等。

表 2 不同温度和 NaCl 溶液浓度下的波长值

Tab.2 Wavelength values at different temperature and NaCl solution concentration

NaCl concentration	Refractive index	Temperature/°C	Wavelength/nm	
			MZI	FPI
3%	1.338 0	40	1 542.35	1 542.80
6%	1.341 8	50	1 549.85	1 549.93

在实际测量中,分别通过解调该系统 MZI 及 FPI 特征波谷的波长变化值,代入温度-折射率传感矩阵即可实现对温度-浓度双参数的动态测量。

## 4 结 论

研究了一种光纤 MZI 级联端面 FPI 的干涉型光纤传感器,对该传感器的温度、稳定性、折射率特性进行研究,确定了传感灵敏度矩阵,可实现双参数的同时测量。在 30~150 °C 温度变化范围内,MZI 和 FPI 的灵敏度分别为 0.049 nm/°C 和 0.008 3 nm/°C,线性度大于 0.98;在 NaCl 溶液 0%~24% 浓度变化范围内,MZI 的灵敏度为 9.97 nm/RIU,线性度为 0.97,而 FPI 的波长对折射率不敏感。建立了该传感器温度-浓度与光谱特征波谷的波长变化之间的数学模型,结合实验数据,得出了温度-浓度灵敏度矩阵。实验结果表明,提出的传感器结构可在生物、化学和制药等领域的某些特性环境下对液体浓度进行检测,有效避免了温度变化引起的液体浓度测量误差,具有较好的研究意义与应用价值。

## 参考文献:

- [1] Song Zheyi, Feng Guoying, Zhang Tao. Accurate measurement of the refractive index D-Glucose solution at various concentrations at different temperatures [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 207-211. (in Chinese)
- [2] He Wei, Fang Yitao, Zhu Lianqing, et al. Optical fiber interference sensor based on fiber ending micro-groove fabricated by femtosecond laser [J]. *Optik*, 2018, 158: 1295-1301.
- [3] Costa G K, Gouvêa P M, Soares L M, et al. In-fiber Fabry-Perot interferometer for strain and magnetic field sensing [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14690-14696.
- [4] Fu Guangwei, Li Yunpu, Li Qifeng, et al. Temperature insensitive vector bending sensor based on asymmetrical cascading SMF-PCF-SMF structure [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 7103114.
- [5] Zhang Wen, Hao Jiaqi, Dong Mingli, et al. A dual-parameter sensor for strain and temperature measurement featuring cascaded LPFG-FP structure [J]. *Optik*, 2018, 171: 632-641.
- [6] Gao Xiaodan, Peng Jiankun, Lv Dajuan. Optical fiber temperature sensor based on Fabry-Perot coating interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0122002. (in Chinese)
- [7] Liu Chang, Wang Shuang, Liang Yingjian, et al. Design and preliminary experiment of optical fiber F-P pressure sensing system working in wind tunnel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0722002. (in Chinese)
- [8] Liu Yi, Qu Shiliang. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown for refractive index sensing [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 469-474.
- [9] Kai Baoxi, Yang Chao, Bian Heming, et al. Humidity influence on embedded fiber Bragg grating strain sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(S1): S122007. (in Chinese)
- [10] Bian Jicheng, Lang Tingting, Yu Wenjie, et al. Study of fiber sensor for the simultaneous measurement of temperature and strain based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(11): 2169-2174. (in Chinese)
- [11] Zhang Guilin, Yang Minghong, Dai Yutang. Fabry-Perot fiber tip sensor based on an inner air-cavity for refractive index sensing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(A01): 77-79.
- [12] Dash J N, Jha R. Fabry-Perot based strain insensitive photonic crystal fiber modal interferometer for inline sensing of refractive index and temperature [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(35): 10479-10486.
- [13] Li Xuegang, Zhao Yong, Cai Lu, et al. Simultaneous measurement of RI and temperature based on a composite interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(17): 1839-1842.
- [14] Li Da, He Wei, Lou Xiaoping, et al. Simultaneous measurement of temperature and alcohol solution

- concentration based on the cascade of FBG and MZI [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38 (12): 3020–3027.
- [15] Sun Lili, Qin Juan, Tong Zhengrong, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on down-taper and thin-core fiber [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 506–510.
- [16] Zhao Na, Fu Haiwei, Shao Min, et al. Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach –Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1722–1726. (in Chinese)
- [17] Wen Xiaodong, Ning Tigang, Bai Yan, et al. Ultrasensitive temperature fiber sensor based on Fabry–Pérot interferometer assisted with iron V–groove [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (9): 11526–11536.
- [18] Fu Xinghu, Xie Haiyang, Liu Tao, et al. Intrinsic Fabry – Perot interferometer temperature based on solid core photonic crystal fiber sensor [J]. *Journal of Yanshan University*, 2015, 39(2): 114–119.