

激光与光电子学进展

基于多模-细芯-多模光纤结构的双参数测量传感器

胡凯¹, 葛益娴^{1,2*}, 孙萌萌¹, 贾磊¹¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 江苏 210044;²江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 江苏 210044

摘要 设计并制作了一种基于多模-细芯-多模光纤(MMF-TCF-MMF)结构的双参数测量传感器,在此结构中同时产生马赫-曾德尔干涉(MZI)与表面等离子体共振(SPR),来实现对折射率和温度的同时测量。该传感器中的两段多模光纤(MMF)作为输入输出耦合器,细芯光纤(TCF)镀上一层金属银膜作为传感臂。实验结果表明,MZI和SPR在1.333~1.412 RIU范围内折射率灵敏度分别为-70.373 nm/RIU和4888.77 nm/RIU,在20~80 °C范围内温度灵敏度分别为73.48 pm/°C和-0.3215 nm/°C。采用灵敏度矩阵实现了双参数测量,可解决折射率传感器温度的交叉敏感。该传感器成本低、灵敏度高、制作简单,在生物化学医疗检测领域有良好的应用前景。

关键词 光纤传感; 纤芯失配; 折射率和温度; 马赫-曾德尔干涉; 表面等离子体共振

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221719

Dual-Parameter Measurement Sensor Based on Multi-Mode-Thin-Core-Multi-Mode Fiber Structure

Hu Kai¹, Ge Yixian^{1,2*}, Sun Mengmeng¹, Jia Lei¹¹College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;²Jiangsu Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract This study designs and fabricates a dual-parameter measurement sensor based on a multi-mode thin-core multi-mode fiber structure. Mach-Zehnder interference (MZI) and surface plasmon resonance (SPR) are simultaneously generated in this structure to measure the refractive index and temperature. Two multi-mode fibers (MMFs) are used as the input and output couplers, and the thin-core fiber (TCF) is coated with a metallic silver film as the sensing arm. The refractive index sensitivity of MZI and SPR is -70.373 nm/RIU and 4888.77 nm/RIU in the range of 1.333-1.412 RIU, and the temperature sensitivity is 73.48 pm/°C and -0.3215 nm/°C in the range of 20-80 °C, respectively. The sensitivity matrix is used to realize the two-parameter measurement, resolving the cross-sensitivity of the temperature of the refractive index sensor. The sensor is characterized by low cost, high sensitivity, and simple fabrication. Moreover, it has good application prospects in biochemical medical detection.

Key words optical fiber sensing; fiber core mismatch; refractive index and temperature; Mach-Zehnder interference; surface plasmon resonance

1 引言

光纤传感器因其耐高温、耐腐蚀、结构紧凑、灵敏度高等优势得到更多的深入研究。传统的光纤传感器主要是针对折射率^[1-2]、温度^[3]、应变^[4-5]、位移^[6]、湿度^[7]等单一参数进行测量。随着光纤传感技术的不断发

展,光纤传感器已经得到广泛应用。然而在实际的参数测量中,光纤传感器性能易受环境温度等因素的干扰。为解决干扰因素的影响,具有双参数乃至多参数测量功能的光纤传感器近年来得到业界的广泛关注和重视。实现多参数测量的方法一种是在传感器中另外再构建一个测量结构,消除多参数之间的交叉敏感,有

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-06-10; 录用日期: 2022-06-14; 网络首发日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61307061)

通信作者: *geyixian820925@163.com

效地对实验结果进行校准^[8-10]。Hu 等^[11]在两段多模光纤中间熔接一段光纤光栅,并在光纤光栅上涂覆上一层金膜,利用光纤光栅结构和表面等离子体共振 (SPR) 现象构成双通道实现对折射率和温度的双参数测量,其灵敏度分别为 2556.8 nm/RIU 和 0.172 nm/°C,但该传感器增加了光纤布拉格光栅 (FBG) 测量通道,制作复杂、灵敏度较低。孙家程等^[12]基于纤芯失配的原理,制作出两段无芯光纤中间熔接一段单模光纤的结构,选取马赫-曾德尔干涉 (MZI) 谱中两个波谷作为研究对象,以此对折射率和温度进行测量,该结构的折射率和温度的灵敏度分别为 -202.74 nm/RIU 和 0.183 nm/°C,相较于构建双结构的折射率和温度双参数测量传感器,该传感器灵敏度较低。

本文在上述研究基础上,提出利用 MZI 与 SPR 在同一结构上实现高灵敏度的折射率和温度测量。利用光纤熔接的方式构成多模-细芯-多模光纤 (MMF-TCF-MMF) 结构,通过理论和仿真确定传感臂的最优长度。搭建了实验测试系统,同时对 MZI 和 SPR 现象下的折射率和温度进行测量,并利用灵敏度矩阵实现了双参数测量,消除了参数之间的交叉敏感。

2 传感器的原理分析

如图 1 所示,利用光纤熔接的方式在两段多模光纤 (MMF) 之间连接一段细纤芯 (TCF),并在 TCF 上淀积一层金属银膜。光从 MMF 传输至 TCF 时,由于芯径不匹配等原因,一部分光耦合进 TCF 纤芯传输,另一部分光耦合进 TCF 的包层传输,激发出包层模。光从 TCF 传输至第二段 MMF 处,包层模与纤芯模相遇并发生干涉,两段 MMF 作为耦合器,TCF 作为传感臂,从而形成 MZI。同时,表面等离子体波 (SPW) 在银膜^[13]表面被激发。当倏逝波^[14]和 SPW 的波矢相匹配时,产生 SPR 效应。因此在该传感器结构中,SPR 和 MZI 同时发生。

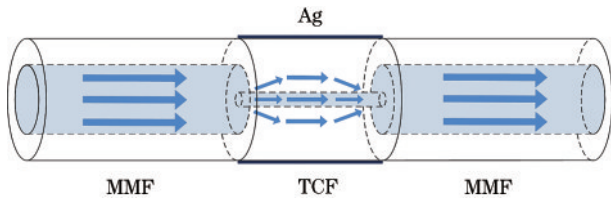


图 1 传感器结构和光传输原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure and light transmission principle

对于 MZI,光经耦合器 MMF 传输至传感臂 TCF,在 TCF 处传输时产生的包层模式和纤芯模式会产生光程差,存在光程差的不同模式再经 MMF 耦合干涉。根据多光束干涉理论^[15],传感器透射光强可表示为

$$I = I_{\text{core}} + \sum I_{\text{cladding}}^m + \sum 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m} \times \cos(2\pi\Delta nL/\lambda), \quad (1)$$

式中: I 表示输出的光强; I_{core} 和 I_{cladding}^m 分别表示 TCF 的纤芯模和第 m 阶包层模的光强; L 表示传感臂 TCF 的长度; Δn 为 TCF 纤芯模和包层模之间的有效折射率之差; λ 表示光在空气中的波长。光在纤芯和包层传输时产生的相位差可表示为

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

式中: $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 表示 TCF 的纤芯模有效折射率; $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 表示 TCF 第 m 阶包层模的有效折射率。纤芯模与包层模相位差为 π 的奇数倍,即满足 $\Delta\varphi = (2j+1)\pi$ 时,干涉光强达到最小值,所对应的波长为

$$\lambda_j = \frac{2(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m})L}{(2j+1)}, \quad (3)$$

折射率发生变化时, $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 与 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 也会随之变化,但二者变化不同,从而使得干涉谷发生漂移。外界温度发生变化时,热膨胀效应会使 L 发生变化,热光效应会使 Δn 发生变化,因此干涉谷随温度变化发生漂移^[16]。

对于 SPR,MMF 的光进入到 TCF 的包层,激发的包层模式到达 TCF 的表面激发倏逝波。当倏逝波与银膜界面的 SPW 满足相位匹配条件并且传播方向一致时,产生 SPR 共振。SPW 波矢 \mathbf{K}_{sp} ^[17]可表示为

$$\mathbf{K}_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

全反射倏逝波的波矢沿界面水平方向的分量 \mathbf{K}_x 为

$$\mathbf{K}_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_n} \sin \theta, \quad (5)$$

式中: ϵ_m 、 ϵ_n 、 ϵ_s 分别为银膜、纤芯、待测样品的介电常数; ω 为入射光的角频率; c 为真空中的光速 3×10^8 m/s; θ 为入射光的角度。当 $\mathbf{K}_{\text{sp}} = \mathbf{K}_x$ 时,激发 SPR 现象。从式(4)和式(5)可以看出,当 ϵ_m 、 ϵ_n 、 ϵ_s 发生变化时,SPR 现象也会发生变化,而 ϵ_m 、 ϵ_n 、 ϵ_s 的变化取决于温度和折射率的变化。

TCF 作为 MZI 和 SPR 两种测量方式的传感臂,传感臂的长度变化会对干涉谱和共振谱产生影响。本文分别使用理论分析和时域有限差分算法 (FDTD) 对 TCF 的长度进行仿真,得到最优的传感臂长度。根据式(1),分别选取不同长度的传感臂,干涉光谱图如图 2(a) 所示。随着传感臂长度的增加,峰峰值数量增加,对应的自由光谱范围变小,便于利用峰值解调法求解峰值。当传感臂长度比较大时,峰峰值数量较多,若干干涉谷波长漂移较大,容易引起串扰,不利于数据读取。利用 FDTD 分析 SPR 现象,分别设置 TCF 的长度为 300、400、500、600 μm ,金属银膜的厚度为 40 nm,长度与 TCF 长度相同,得到在 1.33 环境折射率下不同光纤长度的 SPR 透射谱,如图 2(b) 所示。从图中可以看出,随着 TCF 长度的增加,共振峰波长基本保持不变,但共振峰的深度在逐渐加深,即传感器自身的灵

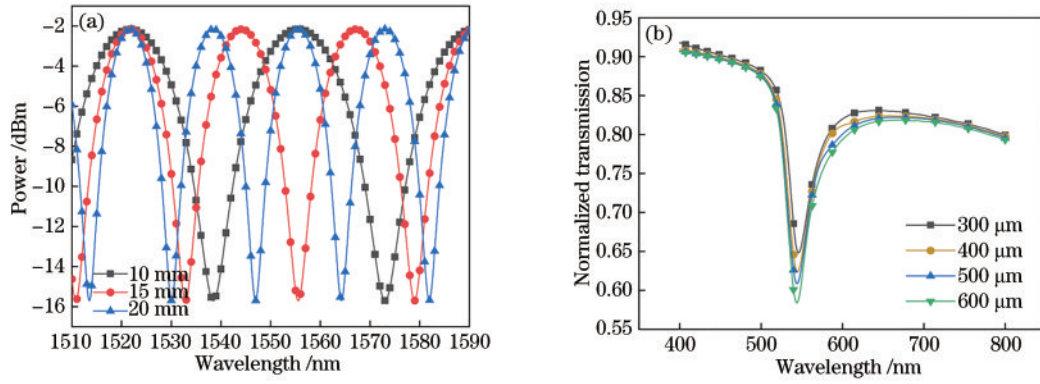


图2 不同传感臂长度的透射光谱图。(a) MZI图;(b) SPR图

Fig. 2 Transmission spectra of different sensing arm lengths. (a) MZI figure; (b) SPR figure

灵敏度基本不会发生变化。综上所述,本文选择长度为 15 mm 的传感臂。

考虑到 MZI 和 SPR 都对折射率和温度敏感,但灵敏度不同,双参数可以通过结合波长偏移来进行分析,它们的变化关系^[18]表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{SPR}} \\ \Delta\lambda_{\text{MZI}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{n,\text{SPR}} & S_{T,\text{SPR}} \\ S_{n,\text{MZI}} & S_{T,\text{MZI}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将式(6)进行转置得到如下矩阵公式:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} S_{T,\text{MZI}} & -S_{T,\text{SPR}} \\ -S_{n,\text{MZI}} & S_{n,\text{SPR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{SPR}} \\ \Delta\lambda_{\text{MZI}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, $D = |S_{n,\text{SPR}}S_{T,\text{MZI}} - S_{T,\text{SPR}}S_{n,\text{MZI}}|$, 将灵敏度代入式(7)中,可得到最终的测量矩阵。

而在实际测量过程中有两处误差影响:一是灵敏度矩阵中各项的误差,主要来源于波长对折射率和温度的响应系数;二是 $\Delta\lambda$ 的误差,即传感器对波长的测量误差。在实验过程中,可以通过数据处理的方法尽量地减小灵敏度矩阵的误差。而对于第二种情况的误差,通常使用其来方便地估计传感器的测量分辨率,分辨率可用来表示所测参数的最大误差,用 $\delta\lambda$ 表示光谱仪的测量分辨率,那么双参数测量的传感器分辨率^[19]可表示为

$$\begin{bmatrix} \delta n \\ \delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} |S_{T,\text{MZI}}| & -S_{T,\text{SPR}} \\ -S_{n,\text{MZI}} & |S_{n,\text{SPR}}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\lambda_{\text{SPR}} \\ \delta\lambda_{\text{MZI}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

从式(8)可以看出,传感器的传感分辨率不仅取决于单个通道,还与他们的组合有关,行列式 D 越大,两个分辨率 δn 与 δT 越小,即测量误差越小,传感器的性能也相对更好。

3 实验测试与结果分析

3.1 实验测试系统

用于折射率和温度双参数测量的实验系统如图 3 所示,包括光源、传感区域和光谱仪。其中 MZI 采用自带光源的 SM125 光纤光栅解调仪接收干涉光谱信号,波长范围在 1510~1590 nm, SPR 共振采用 HL2000 卤钨灯光源,其光源波长范围为 360~

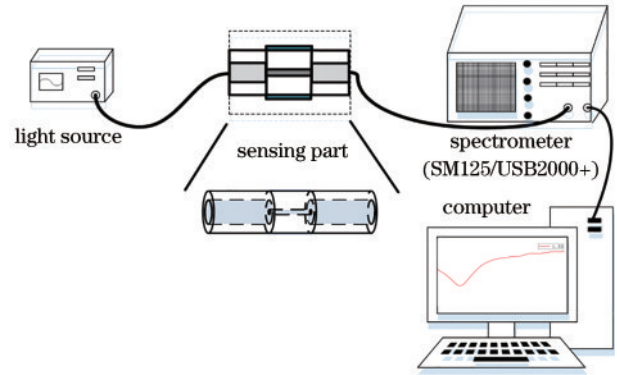


图3 实验测量装置图

Fig. 3 Diagram of experimental measurement device

2400 nm, 光谱仪利用微光谱仪 USB2000+。

其中,传感区域将一段 15 mm 长的 TCF 与两段 MMF 轴向对称熔接,两段 MMF 分别作为导入导出光纤,构成 MMF-TCF-MMF 结构,在 TCF 表面溅射上一层约为 40 nm 的银膜。TCF 的包层和纤芯直径分别为 125 μm 和 3.8 μm , 折射率分别为 1.458 和 1.444。MMF 包层和纤芯直径分别为 125 μm 和 62.5 μm 。由于 TCF 的纤芯直径远小于 MMF 的纤芯直径,因此二者熔接时,为防止 TCF 出现融塌现象,实验中采用手动熔接,在 x 和 y 方向上将两段光纤对齐,使其轴向对齐。熔接完成后,再进行一次放电,可降低损耗和加固熔接点。

3.2 基于 MZI 的折射率和温度测量

为了研究传感器在基于 MZI 原理下折射率和温度的传感性能,选择 SM125 光纤光栅解调仪,搭建如图 3 所设计的测试系统。使用不同浓度的甘油溶液作为不同折射率样品,将传感器置于折射率样品中。当折射率在 1.333~1.412 RIU 范围内变化时, MZI 如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,当折射率增加时, MZI 的干涉谷发生蓝移。利用寻峰解调法,选择图中所示的波谷(dip)进行分析, dip 从 1577.255 nm 漂移到 1571.580 nm, 波长漂移量为 5.675 nm。灵敏度拟合曲线如图 4(b)所示,得到基于 MZI 原理的折射率灵敏度为 -70.373 nm/RIU。

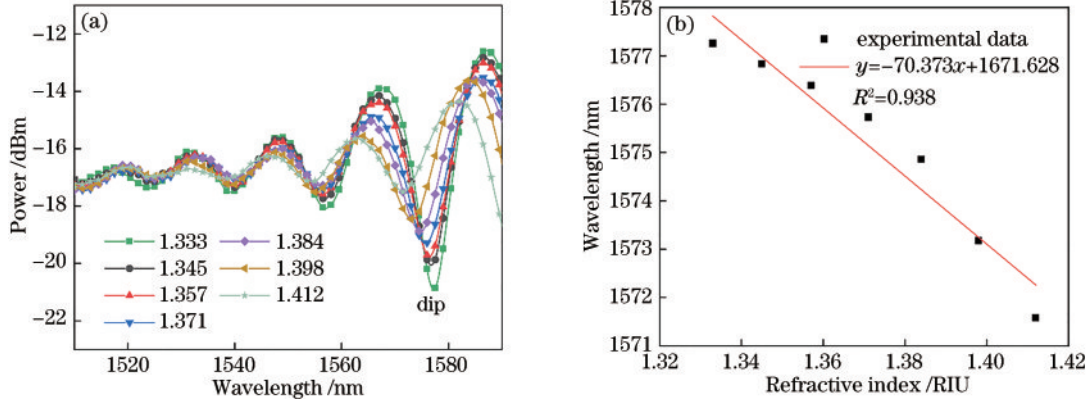


图 4 基于 MZI 原理的折射率实验图。(a) 透射光谱图;(b) 灵敏度拟合图

Fig. 4 Experimental diagram of refractive index based on MZI principle. (a) Transmission spectrogram; (b) sensitivity fitting diagram

将所设计的传感器放置在恒温箱(C180-40),温度变化范围为 20~80 °C,随着温度的变化,MZI 如图 5 所示。从图 5(a)中看出,当温度增加时,MZI 的干涉谷发生红移。观察图中 dip 从 1559.005 nm 漂移到

1563.620 nm,波长漂移量为 4.615 nm。灵敏度拟合曲线如图 5(b)所示,得到基于 MZI 原理的温度灵敏度为 73.48 pm/°C。

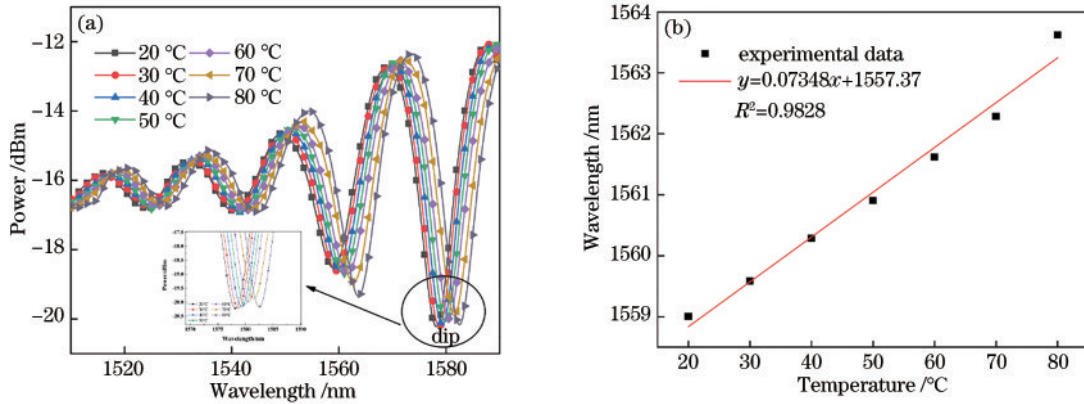


图 5 基于 MZI 原理的温度实验图。(a) 透射光谱图;(b) 灵敏度拟合图

Fig. 5 Experimental diagram of temperature based on MZI principle. (a) Transmission spectrogram; (b) sensitivity fitting diagram

3.3 基于 SPR 原理的折射率和温度测量

为了研究传感器在基于 SPR 原理下折射率和温度的传感性能,按照如图 3 所示选择卤钨灯光源和光谱仪 USB2000+ 搭建测试系统。将传感器置于不同浓度的甘油溶液中,当折射率在 1.333~1.412 RIU 范围内变化时,SPR 如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,

当折射率在 1.333~1.412 RIU 范围内变化时,SPR 如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,

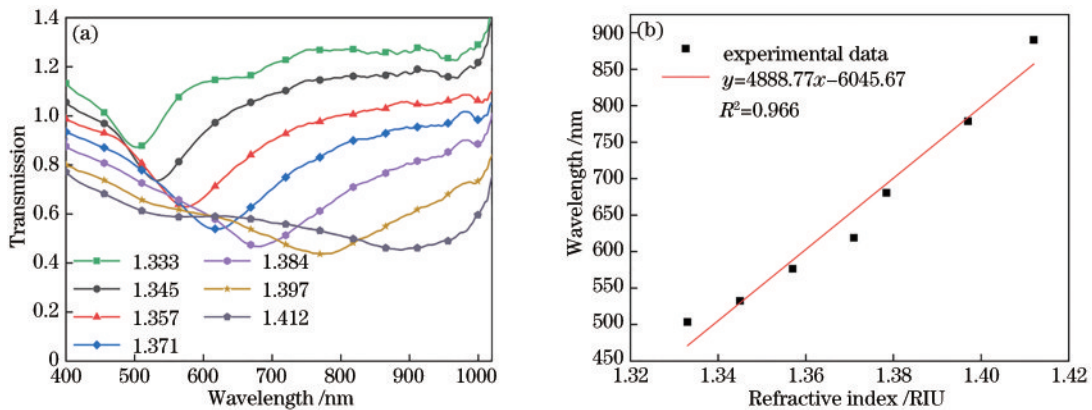


图 6 基于 SPR 原理的折射率实验图。(a) 透射光谱图;(b) 灵敏度拟合图

Fig. 6 Experimental diagram of refractive index based on SPR principle. (a) Transmission spectrogram; (b) sensitivity fitting diagram

当折射率增加时,SPR的共振谷发生红移。选择图中的共振谷进行分析,共振波长从 503.40 nm 漂移到 890.36 nm,波长漂移量为 386.96 nm。灵敏度拟合曲线如图 6(b)所示,得到基于 SPR 原理的折射率灵敏度为 4888.77 nm/RIU。

将设计的传感器放入去离子水中,使用水浴加热的方式改变传感器所处环境的温度,通过温度计将温

度控制在 20~80 °C,随着温度的变化,SPR 如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,当温度增加时,SPR 的共振谷发生蓝移。对共振谷进行分析,共振波长从 499.77 nm 漂移到 479.00 nm,波长漂移量为 20.77 nm。灵敏度拟合曲线如图 7(b)所示,得到基于 SPR 原理的温度灵敏度为 0.3215 nm/°C。

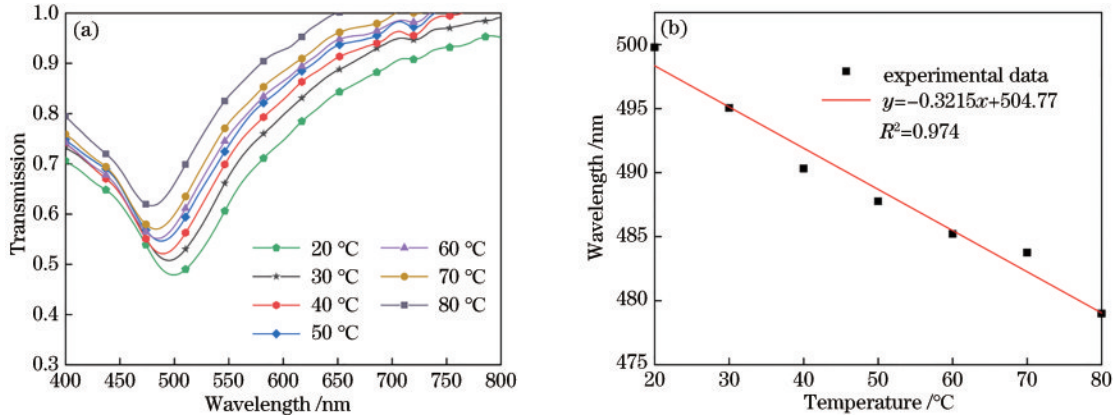


图 7 基于 SPR 原理的温度实验图。(a) 透光光谱图;(b) 灵敏度拟合图

Fig. 7 Experimental diagram of temperature based on SPR principle. (a) Transmission spectrogram; (b) sensitivity fitting diagram

3.4 双参数测量

根据上述 MZI 和 SPR 实验的灵敏度拟合图,得到四个灵敏度。将灵敏度代入式(7),通过测量波长漂移量即可实现折射率和温度的同时测量,并且消除了交叉敏感,得到测量矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{336.603} \begin{bmatrix} 0.07348 & 0.3215 \\ 70.373 & 4888.77 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{SPR} \\ \Delta \lambda_{MZI} \end{bmatrix} \quad (9)$$

本文利用 MZI 原理和 SPR 原理,设计并制作出双参数测量传感器。在对折射率和温度进行测量的过程中,基于 SPR 原理的灵敏度远高于基于 MZI 原理的灵敏度。将灵敏度代入矩阵,由于两个通道灵敏度相差

较大,所以在灵敏度系数矩阵转置时,得到的行列式 D 就越大,则测量分辨率越高,误差也会越小,保证了传感器的性能。

表 1 中展示了与本文结构相似的传感器性能,并对折射率和温度灵敏度、测量范围以及行列式 D 进行比较。从表中可以看出,仅使用 MZI 结构的传感器,其灵敏度和行列式 D 均小于使用 SPR 结构的传感器。本文传感器的折射率灵敏度最高,温度灵敏度与 SPR-FP^[22] 的温度灵敏度相近,但其行列式 D 较低,测量误差会较大。

表 1 与本文结构相似的传感器性能比较

Table 1 Performance comparison of sensors with similar structures of this work

Sensor type	$S_{RI} / (\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	Range /RIU	$S_T / (\text{nm} \cdot \text{°C}^{-1})$	Range /°C	D
MZI ^[12]	-202.74	1.3330-1.3970	0.1830	30-70	5.49297
SPR-TCF ^[20]	1117.21	1.3400-1.4161	—	—	—
SPR-PDMS ^[21]	2260.10	1.3330-1.3900	-2.4100	20-60	-5446.84100
SPR-MZI ^[17]	1899.00	1.3311-1.3736	-1.4000	27-43	2061.60000
SPR-FBG ^[11]	2556.80	1.3330-1.3800	0.1720	30-65	—
SPR-FP ^[22]	1648.23	1.3276-1.4203	-0.3220	20-65	-227.92800
This work	4888.77	1.3330-1.4120	-0.3215	20-80	336.60300

4 结 论

提出并制作了一种基于 MMF-TCF-MMF 结构的双参数测量传感器,并对该传感器结构参数进行了详细的理论分析。针对不同的传感原理,分别对传感器进行了基于 MZI 原理和 SPR 原理的折射率和温度传

感研究。实验现象与理论分析一致,解决了折射率和温度的交叉敏感,实现了折射率和温度的同步测量。MZI 和 SPR 在 1.333~1.412 RIU 范围内折射率灵敏度分别为 -70.373 nm/RIU 和 4888.77 nm/RIU,在 20~80 °C 范围内温度灵敏度分别为 73.48 pm/°C 和 -0.3215 nm/°C。该传感器使用 TCF 作为传感臂,激

发更多的倏逝波,有效地提高了测量灵敏度,减小了测量误差,并且结构简单、制作简易,有较好的机械强度,在生物化学医疗检测领域有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 陈强华,刘景海,罗会甫,等.一种基于表面等离子共振的液体折射率测量系统[J].光学学报,2015,35(5):0512002.
Chen Q H, Liu J H, Luo H F, et al. Refractive index measurement system of liquid based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512002.
- [2] 刘磊,陈辉,张彦军.基于表面等离子体共振的4杆悬浮芯光纤折射率传感仿真分析[J].光学学报,2022,42(8):0806003.
Liu L, Chen H, Zhang Y J. Refractive index sensing simulation analysis of four-pole suspended core fiber based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0806003.
- [3] 徐廷廷,杨玉强,杨文龙,等.基于PDMS膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器[J].光学学报,2022,42(8):0806004.
Xu T T, Yang Y Q, Yang W L, et al. Cascaded double-cavity temperature sensor based on hollow fibers encapsulated by PDMS membrane[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0806004.
- [4] 冯德全,罗小东,樊伟,等.材料封装型光纤布拉格光栅宽温域应变传感性能研究[J].光学学报,2021,41(21):2106004.
Feng D Q, Luo X D, Fan W, et al. Strain sensing performance of material packaged fiber Bragg grating in wide temperature range[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2106004.
- [5] 宋娇,江超,申万梅,等.多芯光纤构成的马赫-曾德尔干涉仪的应变特性[J].激光与光电子学进展,2021,58(23):2314002.
Song J, Jiang C, Shen W M, et al. Strain characteristic of Mach-Zehnder interferometer made of multi-core fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2314002.
- [6] 陈振威,陈焕权,史雯慧,等.具有温度补偿的高精度FBG微位移传感器的设计、制作及性能研究[J].光子学报,2021,50(9):0906006.
Chen Z W, Chen H Q, Shi W H, et al. Design, fabrication and performance research of a high precision FBG micro-displacement sensor with temperature compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 0906006.
- [7] 孙萌萌,葛益娴,沈令闻,等.基于电弧放电优化的光纤法珀湿度传感器[J].光学学报,2022,42(10):1006002.
Sun M M, Ge Y X, Shen L W, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor based on arc discharge optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1006002.
- [8] 刘统玉,李振,孟祥军,等.光纤多参数传感器研究[J].通信学报,2020,41(2):66-73.
Liu T Y, Li Z, Meng X J, et al. Study on optical fiber multi-parameter sensor[J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 66-73.
- [9] 卞继城,郎婷婷,孔文,等.腰椎放大细芯光纤传感器实现折射率/温度同时测量的研究[J].光电子·激光,2016,27(4):353-358.
Bian J C, Lang T T, Kong W, et al. Thin-core single-mode fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on waist-enlarged tapers[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016, 27(4): 353-358.
- [10] Velázquez-González J S, Monzón-Hernández D, Moreno-Hernández D, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 242: 912-920.
- [11] Hu T, Zhao Y, Song A N. Fiber optic SPR sensor for refractive index and temperature measurement based on MMF-FBG-MMF structure[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 237: 521-525.
- [12] 孙家程,王婷婷,戴洋,等.基于无芯光纤的多参数测量传感器[J].物理学报,2021,70(6):064202.
Sun J C, Wang T T, Dai Y, et al. Multi-parameter measurement sensor based on no-core fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(6): 064202.
- [13] 刘纯纯,葛益娴,李玲,等.基于表面等离子共振的光纤探针折射率传感器[J].光学技术,2019,45(5):579-585.
Liu C C, Ge Y X, Li L, et al. Fiber probe refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. Optical Technique, 2019, 45(5): 579-585.
- [14] Cao W Q, Duan Y X. Optical fiber-based evanescent ammonia sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005, 110(2): 252-259.
- [15] 刘敏,冯德玖,冯文林.基于无芯-多模-无芯光纤结构的硫化氢气体传感性质研究[J].光学学报,2019,39(10):1006007.
Liu M, Feng D J, Feng W L. Properties of hydrogen sulfide gas sensor based on no-core-multimode-no-core fiber structure[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006007.
- [16] 张平,刘彬,刘正达,等.基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J].光学学报,2021,41(3):0306003.
Zhang P, Liu B, Liu Z D, et al. Temperature and humidity sensor based on a graphene oxide-coated side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306003.
- [17] Gong P Q, Wang Y M, Zhou X, et al. *In situ* temperature-compensated DNA hybridization detection using a dual-channel optical fiber sensor[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(30): 10561-10567.
- [18] Sun L L, Qin J, Tong Z R, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on down-taper and thin-core fiber[J]. Optics Communications, 2018, 426: 506-510.
- [19] Dong X R, Du H F, Sun X Y, et al. Simultaneous strain

- and temperature sensor based on a fiber Mach-Zehnder interferometer coated with Pt by iron sputtering technology[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1535.
- [20] 王雨, 韩飞, 郎婷婷, 等. 基于细芯光纤结构的表面等离子体共振折射率传感器[J]. *光通信技术*, 2019, 43(8): 32-34.
- Wang Y, Han F, Lang T T, et al. Surface plasmon resonance refractive index sensor based on thin-core optical fiber structure[J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(8): 32-34.
- [21] Liu L, Liu Z H, Zhang Y, et al. Side-polished D-type fiber SPR sensor for RI sensing with temperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16621-16628.
- [22] Chen S M, Liu Y, Liu Q, et al. Temperature-compensating fiber-optic surface plasmon resonance biosensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(2): 213-216.