

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

张静 李永倩

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

ZHANG Jing, LI Yongqian

引用本文:

张静, 李永倩. 基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 462-468. DOI: 10.5768/JAO202344.0208002

ZHANG Jing, LI Yongqian. High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 462-468. DOI: 10.5768/JAO202344.0208002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高灵敏度光纤应变传感器

High sensitive fiber strain sensor

应用光学. 2017, 38(5): 848-851 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508002>

波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器

Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity

应用光学. 2017, 38(2): 331-335 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208001>

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511-516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>

基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性

Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser

应用光学. 2018, 39(4): 585-589 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408001>

高信噪比多波长2 μm 主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194-199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

基于倏逝波的锥形光纤马赫-曾德尔湿度传感器

Tapered optical fiber Mach-Zehnder interferometer humidity sensor based on evanescent wave

应用光学. 2017, 38(1): 140-146 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0108001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0462-07

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度 折射率传感器

张 静^{1,2}, 李永倩^{1,2}

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003; 2. 电力物联网技术河北重点实验室, 河北 保定 071003)

摘 要: 光纤折射率传感器广泛应用于各种复杂环境的监测。设计了一种基于少模光纤 (few-mode fiber, FMF) - 无芯光纤 (coreless fiber, CLF) - FMF 结构的高灵敏度折射率传感器。该传感器由 2 小段 FMF 之间熔接 1 段减薄的 CLF 组成马赫-增德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interference, MZI), 测量外界折射率, 利用光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 进行温度补偿。MZI 干涉光谱中的谐振波谷同时受折射率和温度影响, FBG 只受温度的影响。利用 MZI 和 FBG 的折射率和温度灵敏度系数构建灵敏度矩阵, 实现折射率和温度的同步测量。实验结果表明, MZI 折射率灵敏度为 345.66 nm/RIU, 温度灵敏度为 0.0134 nm/°C; FBG 的温度灵敏度为 0.0104 nm/°C。

关键词: 折射率测量; 无芯光纤; 温度测量; 少模光纤

中图分类号: TN253

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0208002

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

ZHANG Jing^{1,2}, LI Yongqian^{1,2}

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

Abstract: Optical fiber refractive index sensor is widely used for monitoring in various complex environments. A high-sensitivity refractive index sensor based on the structure of few-mode fiber (FMF)-coreless fiber (CLF)-FMF was designed, and the experimental verification was carried out. The sensor consisted of a thinned section of CLF fused between two small sections of FMF to form a Mach-Zehnder interferometer (MZI) for measuring external refractive index, and the fiber Bragg grating (FBG) was used for temperature compensation. The resonance trough of interference spectrum generated by MZI structure was affected by both refractive index and temperature, while FBG was only affected by temperature. The sensitivity matrix was constructed by using the refractive index and temperature sensitivity coefficients of MZI and FBG to realize the simultaneous measurement of refractive index and temperature. Experimental results show that the refractive index sensitivity of MZI is 345.66 nm/RIU, and the temperature sensitivity is 0.0134 nm/°C. Meanwhile, the temperature sensitivity of FBG is 0.0104 nm/°C.

Key words: refractive index measurement; coreless fiber; temperature measurement; few-mode fiber

引言

随着光纤技术的发展, 光纤传感器已被广泛应用于各种物理、化学甚至生物测量。光纤是一种抗电磁干扰, 耐腐蚀, 本征绝缘的材料, 并且材料

本身柔软, 直径小, 可以做成任意形状的传感器。同时, 光纤中的数据可以低损耗传输数十千米, 弥补了电学类传感器的不足。近年来, 许多不同结构的光纤传感器已经被证明能够用来进行多种参

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61775057, 61377088); 河北省科技计划 (SZX2020034); 中央高校基础研究基金 (2017MS108)

作者简介: 张静 (1981—), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: 22456188@qq.com

数的测量。在这些参数中, 折射率传感器由于在多种工业场合使用而受到了广泛的关注。由于外部环境折射率的测量受温度影响比较大, 因此研究人员对折射率和温度的同步测量进行了大量的研究。各种光纤折射率和温度同步测量传感器, 如光纤干涉仪传感器^[1-4]、表面等离子体共振光纤传感器^[5]、光纤光栅传感器^[6-9]已经被研发出来。在各种光纤折射率和温度同步测量传感器中, 基于不同耦合结构的光纤传感器, 如 SMF-多模光纤 (multimode fiber, MMF) 结构-SMF^[10-11]、SMF-锥形 FBG-SMF^[12-14]、特种光纤级联^[15]、光纤横向偏移拼接^[16]、混合结构^[17-24]等, 已在生物、化学等前沿领域引起越来越多的关注。为了消除折射率和温度的交叉影响, 研究者们提出多种同时测量 2 种参数的方法。TONG 等^[18]人开发了一种由 FMF 和 2 个球形结构组成的传感器。球形结构作为耦合器, 可以激发高阶模, 并将包层模耦合回光纤中。该传感器实现了折射率和温度的同步测量。在 1.335~1.398 折射率和 25 °C~80 °C 温度范围内, 折射率和温度的灵敏度分别为 27.77 nm/RIU 和 0.054 nm/°C。DONG 等^[19]设计了一种基于 d 型光纤的 FBG 结构, 用于折射率和温度的同步测量。在 1.333~1.428 折射率范围内, 灵敏度为 31.79 nm/RIU, 温度灵敏度为 28.7 pm/°C。SHI 等^[20]利用长周期光栅 (long-period grating, LPG) 和保偏光纤制作的 Sagnac 环实现了折射率和温度同步测量。LPG 的折射率和温度灵敏度分别为 8.36 nm/RIU 和 0.201 nm/°C, Sagnac 环的折射率和温度灵敏度分别为 23.068 nm/RIU 和 1.06 nm/°C。近年来, 为了提高传感器的灵敏度, 光纤拉锥和弯曲结构被广泛应用于光纤传感器中^[21-22]。然而, 拉锥型光纤传感器的结构脆弱, 弯曲结构传感器的制作可重复性较差, 因此, 很难在实际测量中进行应用。

本文提出了一种结构简单、易于制作的光纤传感器, 实现外部环境折射率和温度的同步测量。传感器是由一段无涂覆并减薄直径的 CLF 熔接在两段 FMF 之间, 形成 MZI 结构, 在 FMF 两端分别熔接 SMF 作为输入输出光纤。输入端 SMF 和 FMF 进行同轴熔接, 由于 SMF 和 FMF 的模式失配, 激发出高阶模式, 当光传输到 CLF 时, 基模和高阶模同时在 CLF 中传输时, 当光到达输出端 SMF 时, 高阶模式重新耦合回 SMF 与基模发生干涉, 产生干涉光谱, 当外部环境折射率和温度发生变化时, 高阶模式的有效折射率发生变化, 导致输

出端干涉光谱谐振波谷的漂移, 输出端 SMF 熔接 FBG 进行温度补偿。当光传输到 FBG 时, 满足布拉格条件的波长将被反射, 其他波长透射出去。FBG 波长只受外界温度的影响, 利用 FBG 测量的温度值对 MZI 折射率测量值进行补偿, 实现折射率和温度的同步测量。该传感器结构简单、成本低廉、易于制造, 适用于折射率和温度的同步测量。

1 传感器的制作及工作原理

传感器结构示意图如图 1 所示。一段长度为 44 mm 减薄的 CLF 被熔接在 2 段 5 mm 的 FMF 之间, FMF 的折射率分布示意图如图 2 所示。FMF 直径为 125 μm , CLF 直径为 50 μm 。输入端的 FMF 与 SMF 同轴熔接, 输出端 FMF 与 FBG 熔接。

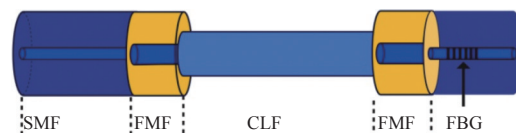


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of sensor

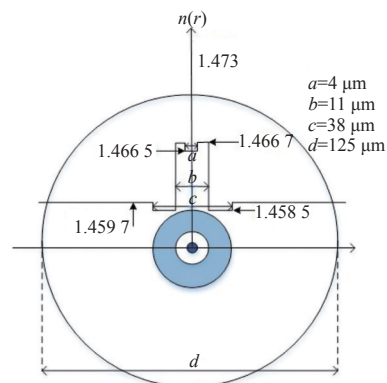


图 2 FMF 的横截面及折射率分布

Fig. 2 Cross section and refractive index distribution of FMF

传感器的制作过程中, 首先在 CLF 的两端分别熔接一段 FMF, 利用熔接机的手动熔接模式, 手动将 FMF 的纤芯与 CLF 的中心对齐, 操作熔接机放电完成熔接, 熔接点的插入损耗约为 0.7 dB。其次在 FMF 的输入端熔接 SMF, 采用标准 SMF 熔接模式实现自动熔接。熔接机可以自动将 SMF 纤芯与 FMF 纤芯对齐并完成熔接, 熔接点的插入损耗约为 0.3 dB。完成熔接后, 将一段 CLF 放置在 25% 的氢氟酸中 1 h, 去除 CLF 的部分纤芯, 可以通过改变刻蚀温度或刻蚀时间来控制剩余纤芯的直

径。当刻蚀到达规定时间后,在输出端 FMF 后端熔接 FBG, FBG 与 FMF 距离尽可能小,避免由于距离产生测量误差。完成熔接后,为防止光纤弯曲、抖动对传感器折射率和温度测量产生影响,对制作的传感器进行了简单封装,将制作的传感器放置在开槽的石英管中,传感器两端采用 UV 紫外胶固定,封装的传感器如图 3 所示。



图3 封装传感器

Fig. 3 Physical drawing of packaged sensor

为了分析传感器中光的传输过程,利用波导仿真软件 Rsoft 对光纤中模式的传输进行了数值模拟。设置仿真的中心波长为 1 550 nm, SMF 纤芯折射率为 1.468 1,直径为 8.2 μm ,包层折射率为 1.462 8,直径为 125 μm ,长度为 3 mm, FMF 的参数设置如图 2 所示,长度为 3 mm, CLF 的折射率为 1.444,长度为 44 mm,仿真结果如图 4 所示。

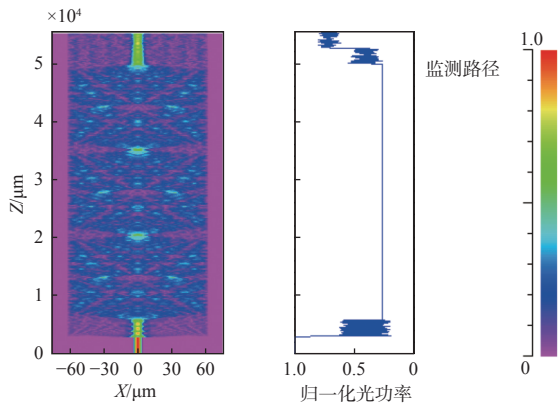


图4 光传输模式分析

Fig. 4 Analysis of optical transmission mode

由图 4 可知,当 SMF 和 FMF 同轴熔接后基模中能量减小,部分能量转移到高阶模式中,基模和高阶模式同时在 CLF 中传输,在输出端高阶模重新耦合回 SMF 中,高阶模与基模产生干涉,形成干涉光谱。当外界环境的折射率发生变化时,高阶模式的有效折射率发生变化,基模与高阶模式的有效折射率之差也发生变化,从而导致干涉光谱发生漂移。假设干涉光谱中,只有 2 个模式发生干涉,传感器的透射谱光强^[21]可以表示为

$$I_{\text{out}}(\lambda) = I_B(\lambda) + I_H(\lambda) + 2\sqrt{I_B(\lambda) \cdot I_H(\lambda)} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (1)$$

式中: I_B 和 I_H 分别为基模和高阶模的强度; $\Delta\varphi$ 为基模与高阶模的相位差,可以表示为

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta n_{\text{eff}}L/\lambda_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_{\text{eff}}^B - n_{\text{eff}}^H)L \quad (2)$$

式中: λ_0 为中心波长; n_{eff}^B 与 n_{eff}^H 分别为基模和高阶模的有效折射率; $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^B - n_{\text{eff}}^H$ 为基模与高阶模之间的有效折射率之差; L 是传感单元的长度。当 $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$ 时,出现干涉极小,第 m 阶峰值波长为

$$\lambda_m = 2\Delta n_{\text{eff}}L/(2m+1), m = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

当外界折射率和温度发生变化时, Δn_{eff} 和 L 发生变化,干涉波长发生漂移。

当光输入到 FBG 时,满足布拉格条件的波长将被反射,其他波长的光将经过 FBG 透射,满足布拉格条件的中心波长 λ_B 可以表示为^[19]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (4)$$

式中: Λ 为光栅周期; n_{eff} 为有效折射率。由温度变化引起的光栅中心波长位移可以表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (5)$$

式中: α 和 ξ 分别为热膨胀系数和热光学系数。

由外界环境折射率和温度的变化引起的波长偏移可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_m \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{R,MZI} & k_{T,MZI} \\ 0 & k_{T,FBG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $k_{R,MZI}$ 和 $k_{T,MZI}$ 分别为 MZI 的折射率和温度灵敏度系数; $k_{T,FBG}$ 为 FBG 的温度灵敏度系数; $\Delta\lambda_m$ 和 $\Delta\lambda_B$ 分别为 MZI 和 FBG 的波长变化量; ΔR 和 ΔT 分别为折射率和温度的变化量。

2 实验结果及分析

实验系统示意图如图 5 所示。传感器两端分别连接波长范围为 1 510 nm~1 590 nm 的放大自发辐射光源 (amplified spontaneous emission source, ASE) 和一个波形分析仪 (Finisar 公司 1500 S), 波形分析仪光谱分辨率为 0.01 nm, 波长范围为 1 530 nm~1 570 nm, 波形分析仪采集的光谱数据通过 USB 传输至计算机, 利用计算机对数据进行分析 and 处理。

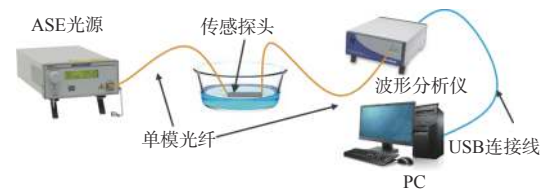


图5 实验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

2.1 温度实验与分析

为了测试传感器的温度响应特性,将传感器置于温度可调的恒温水槽中,该装置的精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验系统实物如图 6 所示。温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,每 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 记录一次数据。为了确保测量的准确性,在温度达到设定值 5 min 后记录数据。不同温度下的透射光谱如图 7 所示。随着温度的升高,透射光谱的光谱形状和干涉模式保持不变。MZI 的谐振波谷与 FBG 的布拉格波长同时向长波长方向移动。



图 6 实验系统实物图

Fig. 6 Physical drawing of experimental system

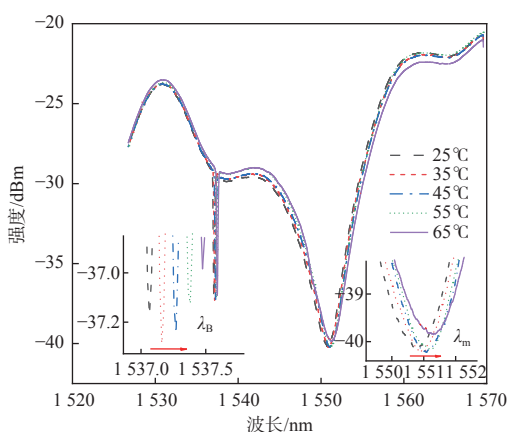


图 7 不同温度时传输光谱

Fig. 7 Transmission spectra at different temperatures

将 MZI 谐振波谷和 FBG 布拉格波长分别与温度进行线性拟合,拟合结果如图 8 所示。在 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内, MZI 和 FBG 的波长位移分别为 0.52 nm 和 0.41 nm , MZI 的温度灵敏度 $k_{T,MZI}$ 为 $0.0134\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性相关系数 R^2 为 0.994 。FBG 的温度灵敏度 $k_{T,FBG}$ 为 $0.0104\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性相关系数 R^2 的值为 0.999 。

温度测量实验重复进行 6 次。将 6 次测量结果平均,每次的测量值减去平均值,计算重复性误差,结果如图 9 所示。图 9 中显示了 MZI 和 FBG 的重复性误差, MZI 的最大重复性误差为 1.109 pm , FBG 的最大重复性误差为 0.688 pm 。FBG 的重复性误差较小,是由于 FBG 透射谱精细度更高,受噪

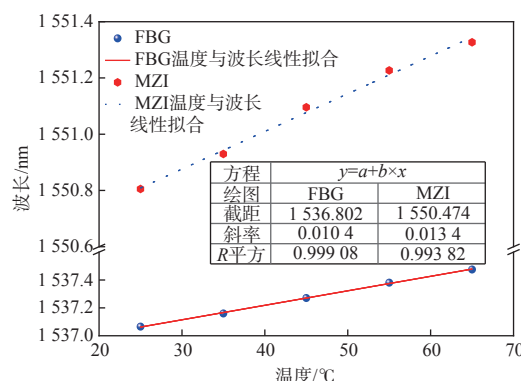


图 8 温度与波长线性拟合

Fig. 8 Linear fitting of temperature and wavelength

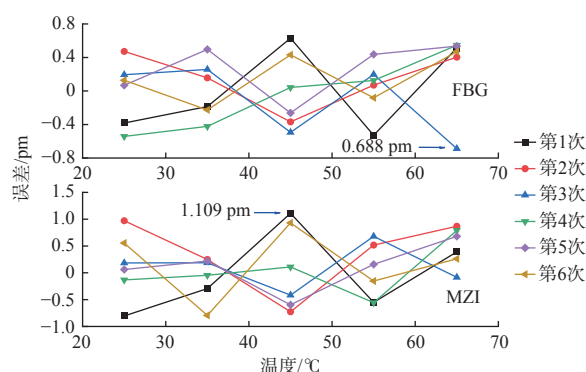


图 9 温度测量的重复性误差

Fig. 9 Repeatability error of temperature measurement

声影响较小。虽然对传感器进行了简单的封装,但传感器在恒温槽加热过程中,水循环波动仍会对透射光谱产生干扰。

2.2 折射率实验与分析

将传感器浸泡在 5 种不同浓度的 NaCl 溶液中,测量传感器折射率特性,折射率范围为 $1.3361 \sim 1.3491$ 。根据 NaCl 溶液^[25]经验公式,在室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下制备质量分数分别为 1%、3%、5%、7%、9% 的 NaCl 溶液,利用阿贝折射仪测量 NaCl 溶液的折射率,其折射率分别为 1.3361 、 1.3391 、 1.3425 、 1.3459 、 1.3491 。在更换每一种 NaCl 溶液之前,将传感单元浸泡在蒸馏水中,并擦拭干净,使透射光谱恢复到原始状态。利用波形分析仪测量传感器在不同质量分数 NaCl 溶液下的透射光谱,所得光谱如图 10 所示。随着 NaCl 溶液折射率的增加,透射光谱的形状保持不变, MZI 谐振波长向长波方向移动,而 FBG 波长不受折射率的影响。

对不同折射率条件下的 MZI 的谐振波谷进行线性拟合,结果如图 11 所示。在 $1.3361 \sim 1.3491$ 范围内, MZI 谐振波谷与折射率呈良好的线性关

系。MZI的折射率灵敏度 $k_{R,MZI}$ 为345.66 nm/RIU, 线性相关系数 R^2 为0.991。

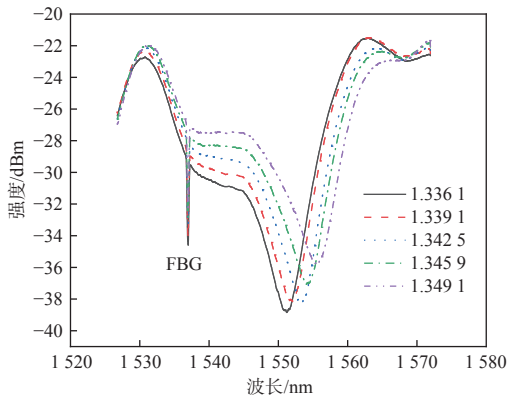


图10 不同折射率时的透射光谱

Fig. 10 Transmission spectra with different refractive indices

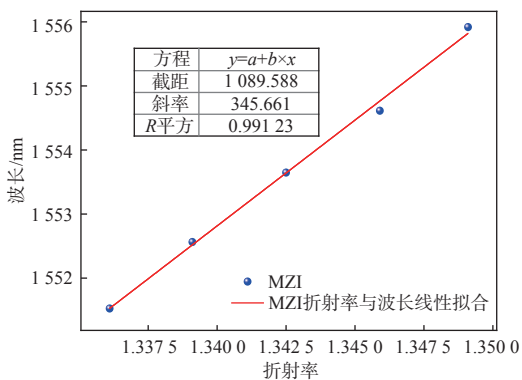


图11 外界折射率与MZI谐振波长线性拟合

Fig. 11 Linear fitting of external refractive index and MZI resonance wavelength

同样,折射率测量实验重复进行6次。将6次测量结果平均,每次的测量值减去平均值,计算重复性误差,结果如图12所示。由于FBG对折射率不敏感,图12中只显示了MZI测量折射率重复性误差,MZI的最大重复性误差为-5.01 pm,重复性误差稍大的原因可能是由于实验过程中室温发生变化引起的。

在实际测量过程中,可以根据FBG波长,计算

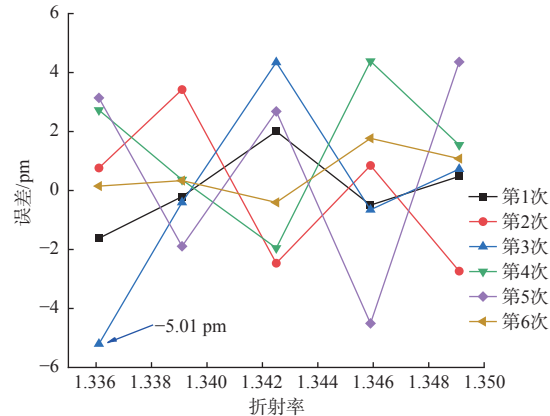


图12 折射率测量的重复性误差

Fig. 12 Repeatability error of refractive index measurement

出温度测量值,再利用测量的温度值补偿MZI的测量值,计算出外界环境的折射率。为了验证传感器在实际测量过程中,温度和折射率同时变化时的性能,选择温度为30℃、50℃时NaCl溶液质量分数为2%、8%的外界环境进行测试,质量分数为2%、8%的NaCl溶液折射率分别为1.3380、1.3472。由于NaCl溶液具有腐蚀性,为了避免溶液腐蚀恒温设备,将含有NaCl溶液的容器放入到恒温水槽中,再将传感器放入到容器中,测量结果如图13所示。将测量的实际波长值减去理论波长值作为测量误差,结果如表1所示。由表1可知,

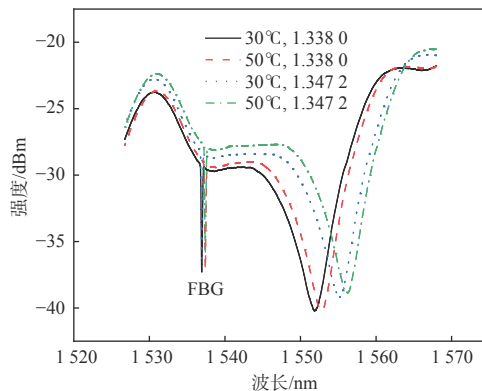


图13 传感器实际测量光谱图

Fig. 13 Actual measurement spectrum of sensor

表1 传感器实际测量结果及误差

Table 1 Actual measurement results and errors of sensor

温度和折射率	FBG理论 波长值/nm	FBG实测 波长值/nm	FBG波长误差/nm	MZI理论 波长值/nm	MZI实测 波长值/nm	MZI波长误差/nm
30℃, 1.338 0	1 537.114	1 537.109	-0.005	1 552.149	1 552.160	0.011
50℃, 1.338 0	1 537.322	1 537.330	0.008	1 552.417	1 552.423	0.006
30℃, 1.347 2	1 537.114	1 537.107	-0.007	1 555.329	1 555.315	-0.014
50℃, 1.347 2	1 537.322	1 537.323	0.001	1 555.597	1 555.606	0.009

传感器的测量误差稍大于折射率恒定或温度恒定时的测量误差, 分析原因可能是由于实验过程中将含有 NaCl 溶液的容器放入恒温槽中, 导致容器中的液体温度与恒温槽的实际温度存在一定的误差。

传感器器和折射率灵敏度与参考文献相比如表 2 所示。由表 2 可知, 本文设计的传感器折射率灵敏度高于文献 [18-21] 中设计的传感器, 但温度灵敏度低于文献 [18-21], 主要是由于 FBG 传感器未进行结构增敏, 在以后的传感器研究过程中需进一步提高。

表 2 不同结构灵敏度比较

Table 2 Comparison of sensitivity of different structures

参考文献	传感器结构	折射率灵敏度/ (nm/RIU)	温度灵敏度/ (nm/°C)
本文	MZI+FBG	345.66	0.013 4
[18]	FMF+球形耦合结构	27.77	0.054
[19]	d形FBG	31.79	0.029
[20]	Sagnac环	23.07	1.060
[21]	LPFG+MZI	165.04	-0.256

3 结论

本文研制了一种基于 MZI 的光纤折射率传感器, 利用 FBG 进行温度补偿, 对其传感特性进行了理论分析和实验验证。MZI 谐振波谷同时受温度和折射率的影响, FBG 只受温度影响, 利用 FBG 测得的温度值对 MZI 进行温度补偿, 实现温度和折射率的同步测量。实验结果表明, MZI 的折射率灵敏度为 345.66 nm/RIU, 温度灵敏度为 0.013 4 nm/°C。FBG 的温度灵敏度为 0.010 4 nm/°C。该传感器线性度较好, 价格低廉, 制作方便。因此, 所提出的传感器适用于物理、生物和化学传感应用。

参考文献:

[1] 韩军, 高波, 张芳, 等. 变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 494-498.
HAN Jun, GAO Bo, ZHANG Fang, et al. Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(3): 494-498.

[2] LIU Tianqi, WANG Jing, LIAO Yipeng, et al. Splicing point tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of temperature and salinity in sea-

water[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 23905-23918.

[3] LIN Ziting, LYU Riqing, ZHAO Yong, et al. High-sensitivity salinity measurement sensor based on no-core fiber[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2020, 305(2): 111947.

[4] WAN Hongdan, ZHANG Jiahe, CHEN Qian, et al. An active fiber sensor based on modal interference in few-mode fibers for dual-parameter detection[J]. Optics Communications, 2021, 481(15): 126498.

[5] LIU Chao, YANG Lin, LU Xili, et al. Mid-infrared surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14227-14237.

[6] ZHANG Weihua, GAO Wenlin, TONG Zhengrong, et al. Mach-Zehnder interferometer cascaded with FBG for simultaneous measurement of RI and temperature[J]. Optics Communications, 2020, 466(13): 125624.

[7] ZHANG Ming, HU Zhangjun, WANG Xiao, et al. Power-type liquid-level sensor for high refractive index liquid based on long-period fiber grating[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2021, 324: 112652.

[8] FIORIN R, DE OLIVEIRA V, KALINOWSKI H J, et al. FBG-assisted micro-channel for refractive index measurements[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(1): 35-38.

[9] REN Feifei, ZHANG Weifang, LI Yingwu, et al. The temperature compensation of FBG sensor for monitoring the stress on hole-edge[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1-9.

[10] DEL VILLAR I, SOCORRO A B, CORRES J M, et al. Optimization of sensors based on multimode interference in single-mode-multimode-single-mode structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(22): 3460-3468.

[11] CHEN Yaofei, HAN Qun, LIU Tiegeng, et al. Self-temperature-compensative refractometer based on singlemode-multimode-singlemode fiber structure[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2015, 212: 107-111.

[12] RIZA M A, GO Y I, HARUN S W, et al. FBG sensors for environmental and biochemical applications-a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7614-7627.

[13] STAWSKA H I, POPENDA M A. Refractive index sensors based on long-period grating in a negative curvature hollow-core fiber[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1803.

[14] MARTINS T J M, MARQUES M B, ROY P, et al. Tem-

- perature-independent multi-parameter measurement based on a tapered Bragg fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1565-1568.
- [15] WANG Fang, WANG Ruifang, WANG Xu, et al. Three-core fiber cascade asymmetric dual-taper robust structure for the simultaneous measurement of a mass concentration of a glucose solution and temperature[J]. *Optics Communications*, 2020, 461: 125227.
- [16] GAO Shuai, JI Chongke, NING Qiuyi, et al. High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 56: 102202.
- [17] YANG Biyao, NIU Yanxiong, YANG Bowen, et al. High sensitivity balloon-like refractometric sensor based on singlemode-tapered multimode-singlemode fiber[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2018, 281: 42-47.
- [18] TONG Zhengrong, ZHONG Yimei, WANG Xue, et al. Research on simultaneous measurement of refractive index and temperature comprising few mode fiber and spherical structure[J]. *Optics Communications*, 2018, 421: 1-6.
- [19] DONG Yue, XIAO Shiyang, WU Beilei, et al. Refractive index and temperature sensor based on D-shaped fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(4): 1362-1367.
- [20] SHI Jia, SU Genghua, XU Degang, et al. A dual-parameter sensor using a long-period grating concatenated with polarization maintaining fiber in Sagnac loop[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4326-4330.
- [21] ZHU Yongjie, ZHENG Jie, DENG Hongchang, et al. Refractive index and temperature measurement by cascading macrobending fiber and a sealed alternated SMF-MMF structure[J]. *Optics Communications*, 2021, 485: 126738.
- [22] WANG Fang, PANG Kaibo, MA Tao, et al. Folded-tapered multimode-no-core fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106333.
- [23] DAI Bin, SHEN Xiang, HU Xiongwei, et al. Temperature-insensitive refractive index sensor with etched microstructure fiber[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(17): 3749.
- [24] DUAN Li, ZHANG Peng, TANG Ming, et al. Heterogeneous all-solid multicore fiber based multipath Michelson interferometer for high temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20210-20218.
- [25] QUAN Xiaohong, FRY E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18): 3477-3480.