

基于ZIF-8材料调制的光纤CO₂与CH₄浓度传感器

毛霖, 刘书辉, 洪茜茜, 曹芮莹

武汉工程大学光电信息与能源工程学院、数理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月28日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

本文提出并验证了一种用于CO₂和CH₄浓度传感的ZIF-8涂覆液芯光纤干涉仪。传感部分由一段填充折射率为1.35溶液的石英毛细管两端熔接单模光纤构成, 毛细管外表面采用滴涂法涂覆ZIF-8。ZIF-8吸附气体后折射率变化引起包层模式有效折射率变化, 导致干涉光谱漂移。实验采用流量计配制0%~100%的CO₂/N₂和CH₄/N₂混合气, 在室温下持续通入进行测试。结果表明: CO₂浓度灵敏度约为18.6 pm/%, CH₄浓度灵敏度约为9.7 pm/%, 两种气体浓度增加时透射波谷均发生红移; 多次通入/排出气体循环测试表明传感器具有良好的重复性和稳定性。所提传感器结构简单、易于制备, 适用于环境和工业场景下的CO₂与CH₄浓度监测。

关键词

光纤传感器, ZIF-8, 液芯光纤干涉仪, 二氧化碳, 甲烷, 气体浓度传感

ZIF-8 Modified Optical Fiber Sensor for CO₂ and CH₄ Sensing

Lin Mao, Shuhui Liu, Xixi Hong, Ruiying Cao

School of Mathematics and Physics, School of Optical Information and Energy Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: March 28, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

This paper proposes and validates a ZIF-8-coated liquid-core fiber interferometer for CO₂ and CH₄ concentration sensing. The sensing section consists of a quartz capillary filled with a solution of

refractive index 1.35, fused between two single-mode fibers, with ZIF-8 deposited on the outer surface via the dip-coating method. Upon gas adsorption, the refractive index change of ZIF-8 alters the effective refractive index of the cladding mode, causing interference spectrum drift. Experiments employed a mass flow controller to prepare 0%~100% CO₂/N₂ and CH₄/N₂ mixed gases, which were continuously introduced for testing at room temperature. Results indicate: CO₂ concentration sensitivity of approximately 18.6 pm/%, CH₄ concentration sensitivity of approximately 9.7 pm/%, with transmission minima red-shifting as both gas concentrations increased; repeated gas introduction/exhaust cycles demonstrated excellent repeatability and stability of the sensor. The proposed sensor features a simple structure and facile fabrication, making it suitable for CO₂ and CH₄ concentration monitoring in environmental and industrial applications.

Keywords

Fiber Optic Sensor, ZIF-8, Liquid-Core Fiber Interferometer, Carbon Dioxide, Methane, Gas Concentration Sensing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光纤气体传感器凭借其结构紧凑、抗电磁干扰能力强以及可实现远程和分布式测量的特性，在环境监测、工业安全及化工过程控制等领域得到了广泛应用[1]-[9]。现有光纤气体传感技术通常依赖光纤布拉格光栅(FBG)、长周期光栅(LPG)、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、空心光纤及锥形光纤等结构，并辅以功能涂层实现气体检测[10]-[18]。然而，这些方法往往存在制备工艺复杂、灵敏度有限或结构易损等问题，限制了其在实际环境和工业场景中的应用。

金属有机框架材料(MOFs)，尤其是沸石咪唑酯骨架-8 (ZIF-8)，因其高比表面积、可调孔径及对特定气体的选择性吸附能力，成为光纤气体传感研究的新兴材料[19]-[25]。通过在光纤表面或空心光纤内涂覆 ZIF-8，可将气体吸附引起的折射率变化转化为光学信号，从而实现高灵敏度检测。然而，将 ZIF-8 与液芯光纤干涉仪结合用于 CO₂ 和 CH₄ 浓度测量的相关研究仍相对稀缺。

针对上述问题，本文设计了一种基于 ZIF-8 涂覆液芯光纤干涉仪的气体传感器，用于 CO₂ 和 CH₄ 浓度测量。所设计传感器利用液芯光纤的纤芯模式与包层模式产生干涉，实现波长漂移响应。同时，ZIF-8 涂层赋予传感器对目标气体的选择性吸附能力，从而提升检测灵敏度与稳定性。实验表明，该传感器具有结构简单、制备便捷，并可适应环境与工业应用的特点，为高灵敏光纤气体检测提供了新的实现途径。

2. 传感器制备与原理

传感器结构如图 1 所示。所设计的传感部分由两段单模光纤与中间一段石英毛细管熔接而成，毛细管内部填充折射率匹配液(折射率为 1.35)，形成液芯波导；毛细管外表面涂覆 ZIF-8 材料。石英毛细管外径为 125 μm，内径约 5 μm。制备时，先将毛细管两端切平，一端浸入 1.35 折射率溶液中，依靠毛细作用将溶液吸入管内，再将填充后的毛细管两端与单模光纤熔接。

熔接参数经优化以避免熔接处空心结构变形。熔接过程中部分液体会蒸发，熔接点附近出现短段未填充区域。填充完成后，采用滴涂法在毛细管外表面涂覆 ZIF-8，涂覆流程如图 2 所示：第一步，用药匙将 ZIF-8 固体试剂加入试管；第二步，用移液器加入甲醇溶液，将试管置于振荡器中进行混合反应，得到

ZIF-8 分散液；第三步，用移液器吸取分散液，滴涂在置于加热台上的液芯毛细管表面，加热促进溶剂挥发，形成 ZIF-8 涂层。第四步，用甲醇溶液清洗未成功长在传感部分的 ZIF-8 粉末，并用氮气进行干燥。

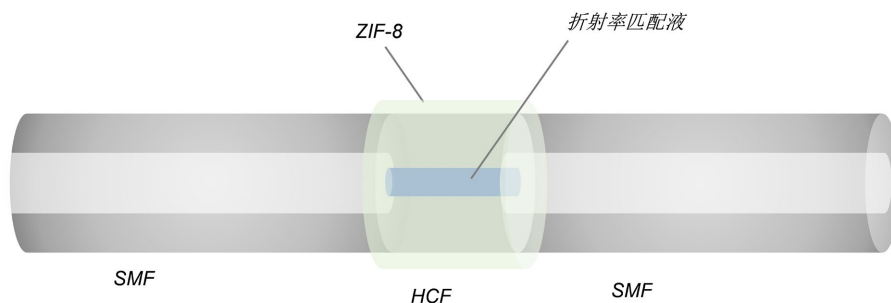


Figure 1. Schematic diagram of the sensor structure: single-mode fiber-quartz capillary (filled with refractive index matching liquid)-single-mode fiber, with ZIF-8 coated on the outer surface of the capillary

图 1. 传感器结构示意图。单模光纤 - 石英毛细管(内填折射率匹配液) - 单模光纤，毛细管外表面涂覆 ZIF-8



Figure 2. Fabrication process of ZIF-8 coating via drop-coating

图 2. ZIF-8 滴涂制备流程

宽带光源(BBS)发出的光经输入单模光纤进入传感结构。由于毛细管芯径小于单模光纤，存在模式场失配，会激发包层模式。部分光在包层中传播，部分在液芯中传播，二者在输出端重新耦合进单模光纤。输出光强可表示为

$$I = I_{co} + I_{cl} + 2\sqrt{I_{co}I_{cl}} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda} + \phi_0\right) \quad (1)$$

其中， I_{co} 和 I_{cl} 分别为纤芯模式和包层模式的光强， ϕ_0 为初始干涉相位， λ 为入射光波长， L 为填充长度， n_{neff} 为参与干涉的两模式有效折射率差。

输出光由光谱分析仪(OSA)采集。图 3 对比了涂覆 ZIF-8 前后的透射光谱。图 3(a)为未涂覆 ZIF-8 的液芯毛细管在空气中的透射谱，强度在 1100~1400 nm 范围内起伏，干涉条纹不明显。

图 3(b)为涂覆 ZIF-8 后的透射谱，在 1100~1140 nm 附近出现明显的宽带峰，整体包络与未涂覆时明显不同，说明 ZIF-8 涂层改变了包层模式的有效折射率，增强了模式干涉。ZIF-8 具有多孔结构和选择性气体吸附能力，可吸附 CO_2 和 CH_4 ，吸附后其折射率发生变化，进而改变包层模式的有效折射率，引起干涉波长漂移和强度变化。因此，通过监测透射谱中干涉波谷的波长漂移以及强度变化，可实现 CO_2 和

CH₄ 浓度的传感。

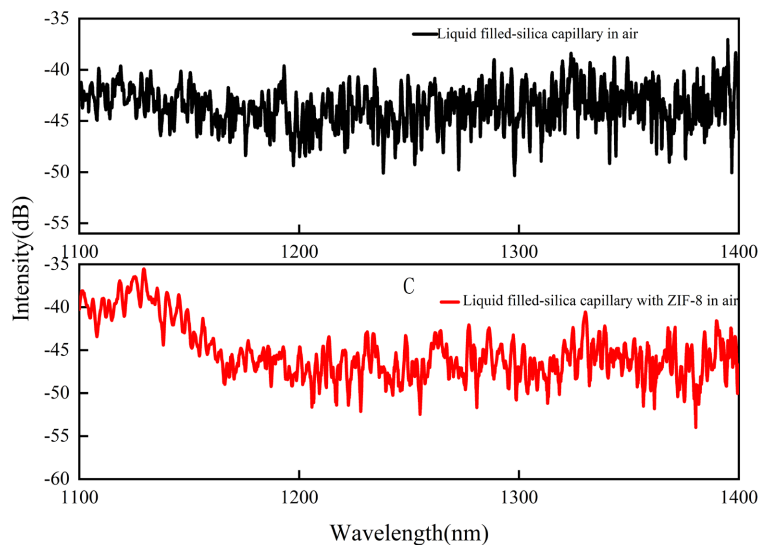


Figure 3. Comparison of transmission spectra: (a) Liquid-core capillary without ZIF-8 coating in air; (b) Liquid-core capillary coated with ZIF-8 in air

图 3. 透射光谱对比: (a) 未涂覆 ZIF-8 的液芯毛细管在空气中; (b) 涂覆 ZIF-8 的液芯毛细管在空气中

3. 实验过程和结果分析

实验装置如图 4 所示, 由光路系统和气路系统两部分组成。光路系统包括宽带光源(BBS)、传感头和光谱分析仪(OSA)。BBS 发出的光经单模光纤传入传感部分的 ZIF-8 涂覆液芯光纤干涉仪, 与气体相互作用后, 由输出光纤传至 OSA, 用于采集透射光谱。气室设有气体入口和气体出口, 保证气体在常温常压下持续流过传感区域。

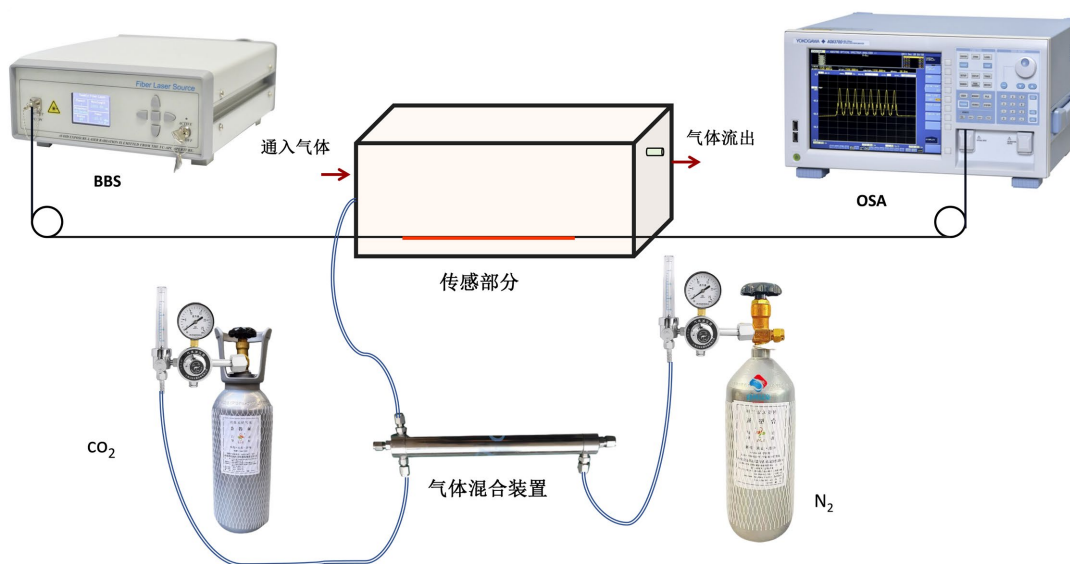


Figure 4. Schematic of instrument connection: The optical path consists of BBS-gas cell-OSA. Gas cylinders of CO₂, N₂ (or CH₄, N₂) are connected to a mass flow controller and gas mixer, and then introduced into the sensing head

图 4. 仪器连接图。BBS - 气室 - OSA 构成光路; CO₂、N₂ (或 CH₄、N₂) 气瓶经流量计和气体混合器后通入传感头

气路系统包括 CO₂、N₂ 和 CH₄ 气瓶、流量计及气体混合器。测量 CO₂ 浓度时，将 CO₂ 与 N₂ 按设定比例经流量计送入气体混合器，混合后通入气室；测量 CH₄ 浓度时，将 CH₄ 与 N₂ 按设定比例混合后通入气室。实验在室温下进行，气体持续通入以维持设定浓度。

通过将 ZIF-8 涂层液芯毛细管置于气室中并通入不同浓度的 CO₂/N₂ 混合气体，测试 CO₂ 浓度传感特性。气体通过流量计在设定流速下混合，浓度分别为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100%。每种浓度持续通入直至光谱稳定，此时记录透射光谱。在更换浓度前，用纯 N₂ 扫传感室，待光谱恢复至基线后再进行下一次浓度测试。图 5(a) 显示了传感器在不同 CO₂ 浓度下的透射光谱。随着 CO₂ 浓度的增加，干涉谷向长波长方向移动。

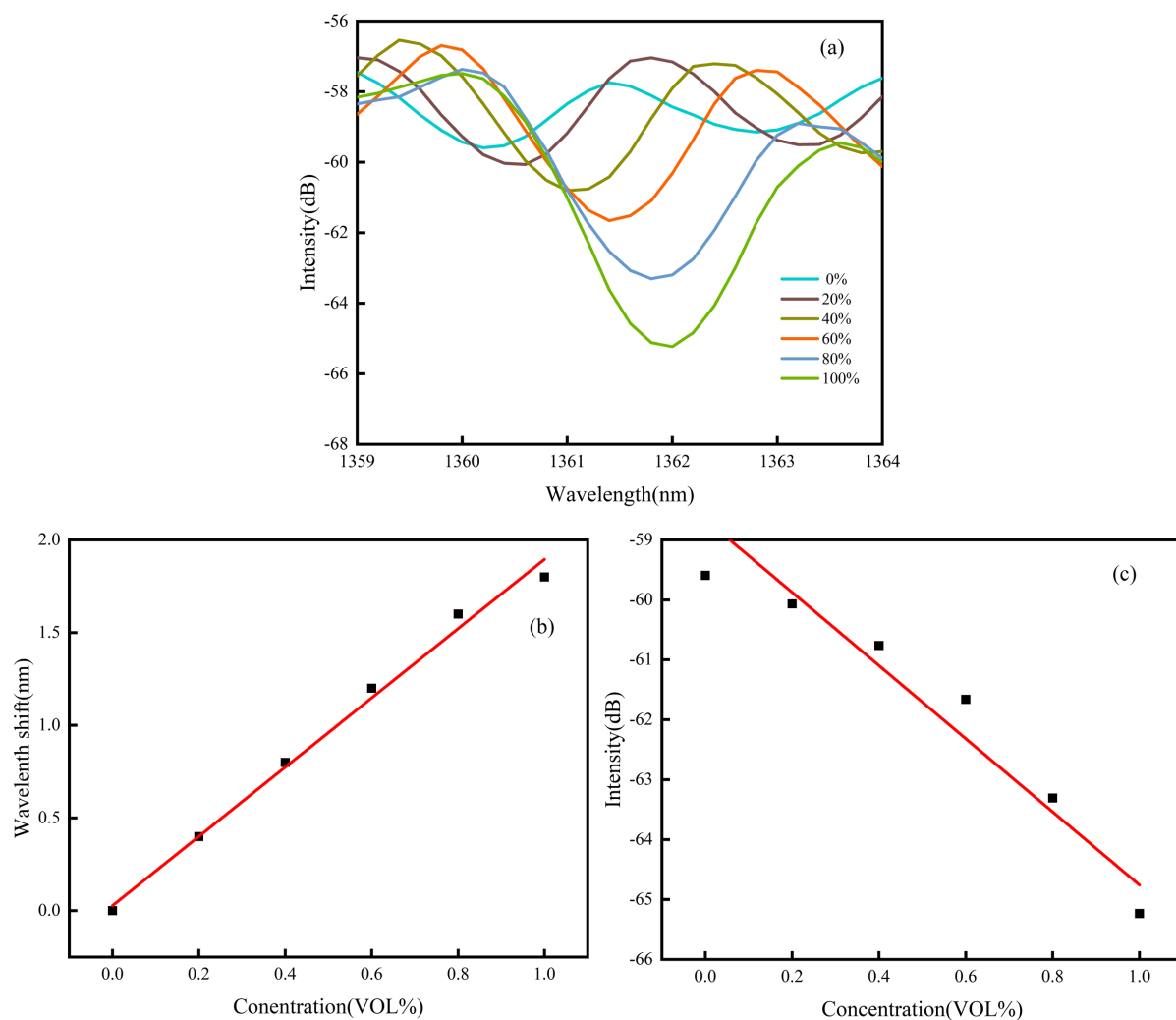


Figure 5. CO₂ concentration response characteristics: (a) Transmission spectra at different CO₂ concentrations; (b) Linear fitting of interference dip wavelength shift versus CO₂ concentration; (c) Linear fitting of transmitted light intensity variation versus CO₂ concentration

图 5. CO₂ 浓度响应特性: (a) 不同 CO₂ 浓度下的透射光谱; (b) 干涉谷波长偏移量随 CO₂ 浓度变化的线性拟合; (c) 透射光强变化随 CO₂ 浓度变化的线性拟合。

在 1360~1364 nm 的光谱窗口内，所选的干涉谷从 0% CO₂ 时的 1361.0 nm 移动到 100% CO₂ 时的 1363.3 nm。通过追踪该谷，获得了波长偏移随 CO₂ 浓度变化的关系(图 5(b))。线性拟合得到的浓度灵敏度为

1.86 nm/(100%), R^2 值为 0.9, 表明在所研究的范围内波长响应具有高度线性。此外, 图 5(c)显示了透射强度随 CO_2 浓度的变化, 其中透射强度随浓度增加而降低。相应的线性拟合得到的斜率为 $-0.0555\text{dB}/\%$, R^2 值为 0.94。

采用与 CO_2 相同的测试流程, 对 CH_4 传感特性进行测量。依次向气室中通入体积分数为 0%、20%、40%、60%、80%和 100%的 CH_4/N_2 混合气体。

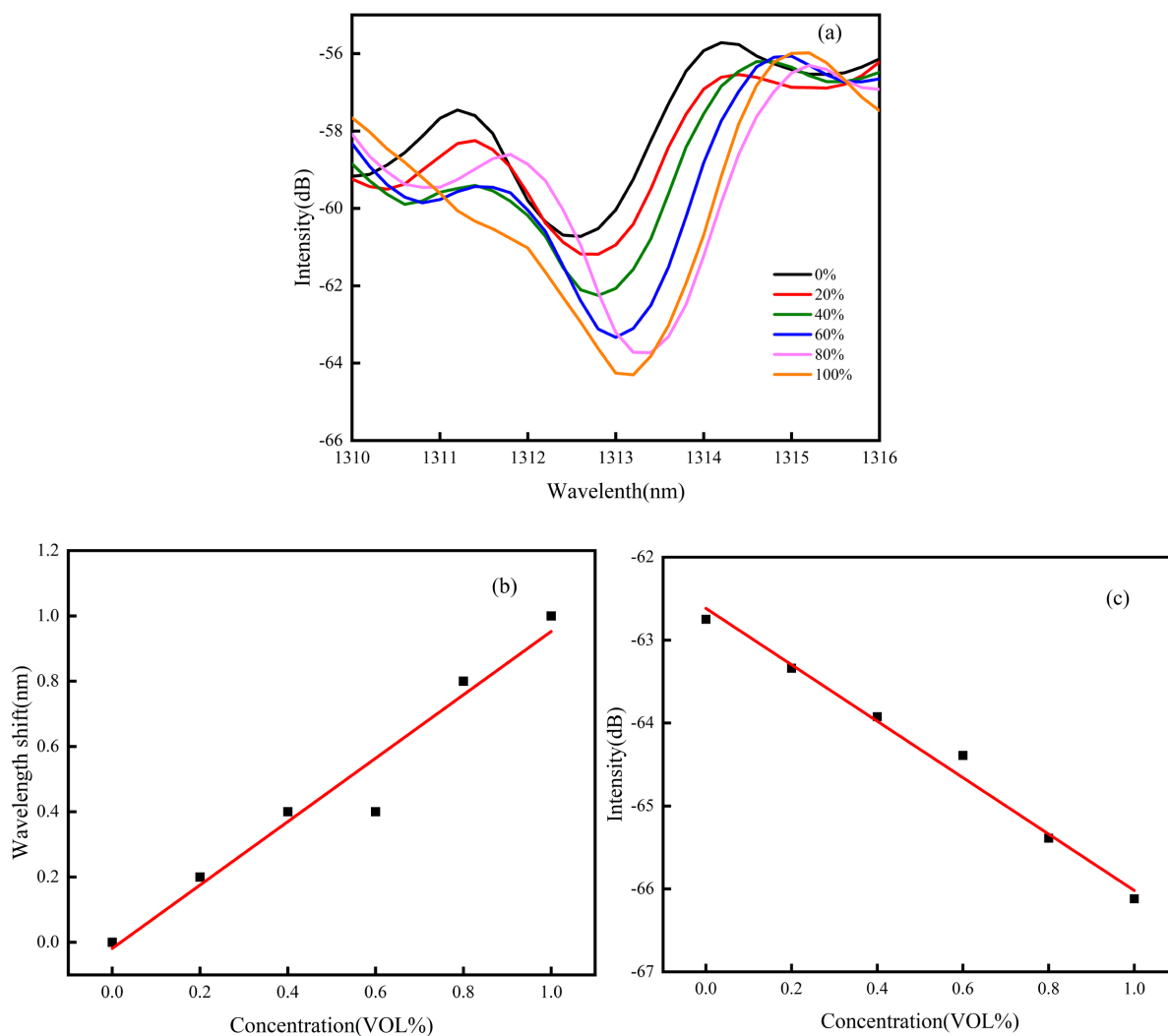


Figure 6. CH_4 concentration response characteristics: (a) Transmission spectra at different CH_4 concentrations; (b) Linear fitting of interference dip wavelength shift versus CH_4 concentration; (c) Linear fitting of transmitted light intensity variation versus CH_4 concentration

图 6. CH_4 浓度响应特性: (a) 不同 CH_4 浓度下的透射光谱; (b) 干涉谷波长偏移量随 CH_4 浓度变化的线性拟合; (c) 透射光强变化随 CH_4 浓度变化的线性拟合

图 6 为不同 CH_4 浓度下的透射光谱。随着 CH_4 浓度升高, 干涉谷值呈现红移(向长波长方向移动)。以 1310~1316 nm 波段内的特征谷值为例, 其波长从 0% CH_4 时为 1311.9 nm, 偏移至 100% CH_4 时为 1314.1 nm。对波长偏移与 CH_4 浓度进行线性拟合(图 6(b)), 得到灵敏度为 $9.7\text{ pm}/\%$, 拟合优度 $R^2 = 0.95$, 表明在所测浓度范围内具有良好的线性波长响应。同时, 图 6(c)给出透射光强随 CH_4 浓度的变化关系, 光强随浓度升高而降低。线性拟合结果 $R^2 \approx 0.99$, 说明光强响应同样具有较高线性度, 可作为浓度表征的辅

助判据。

干涉谷值波长随气体浓度的变化规律可由双模干涉的相位匹配条件描述:

$$\Delta\lambda_m = \frac{2\Delta n L}{2m+1} \quad (2)$$

其中 Δn 为 ZIF-8 吸附气体后包层模式有效折射率的变化量, m 为干涉阶数, L 为填充长度。由式(2)可知, 波长漂移与 Δn 成正比。ZIF-8 吸附 CO_2 或 CH_4 后折射率升高, $\Delta n > 0$, 故波谷向长波方向移动, 与实验结果一致。 CO_2 的波长灵敏度(约 18.6 pm/%)高于 CH_4 (约 9.7 pm/%)。

传感器重复性通过多次通入/排出气体循环进行测试。图 7(a)为 CO_2 响应曲线, 通入 CO_2/N_2 混合气 (Gas in) 时信号迅速下降, 切换回纯 N_2 (Gas out) 时信号逐渐恢复。

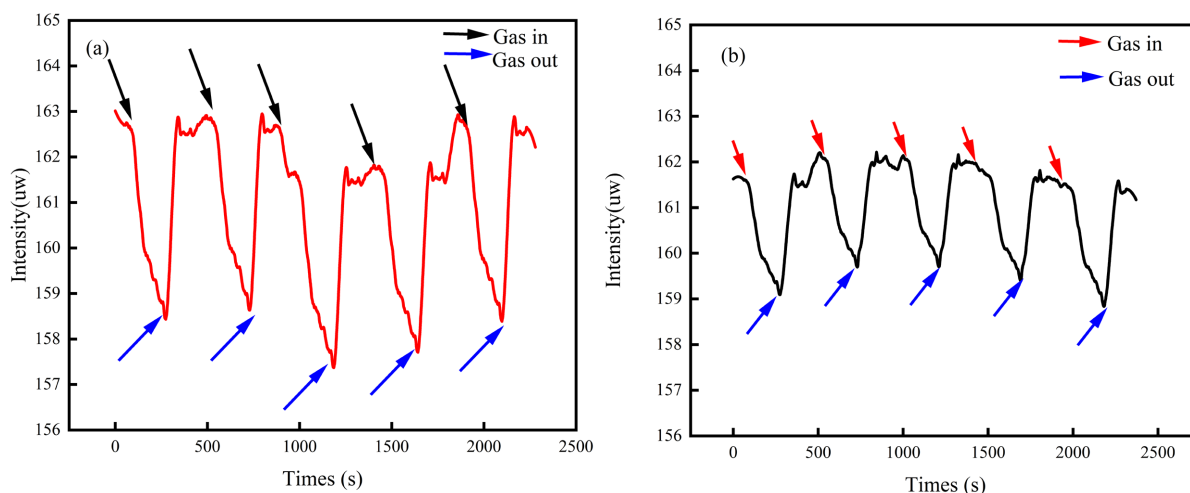


Figure 7. Dynamic response of the sensor: (a) CO_2 response curve; (b) CH_4 response curve

图 7. 传感器的动态响应: (a) CO_2 响应曲线; (b) CH_4 响应曲线

图 7(b)为 CH_4 响应曲线, 通入 CH_4/N_2 混合气时信号上升, 切换回纯 N_2 时信号下降。五次循环中, 响应与恢复过程具有良好可重复性, 表明传感器对 CO_2 和 CH_4 的响应稳定。

4. 结语

本文实验验证了一种用于 CO_2 和 CH_4 浓度传感的 ZIF-8 涂覆液芯光纤干涉仪。传感部分结构简单, 由一段填充折射率为 1.35 溶液的石英毛细管两端熔接单模光纤构成, 毛细管外表面采用滴涂法涂覆 ZIF-8。通过监测透射谱中干涉波谷的波长漂移, 可实现 CO_2 和 CH_4 浓度的测量。实验测得 CO_2 浓度灵敏度约为 18.6 pm/%, CH_4 浓度灵敏度约为 9.7 pm/%, 两种气体浓度增加时透射波谷均发生红移, 与理论分析一致。多次通入/排出气体循环测试表明, 传感器具有良好的重复性和稳定性。所提传感器结构简单、易于制备, 在环境和工业气体浓度监测中具有较好的应用前景。

基金项目

国家自然科学基金(12004290, 51909195)。

参考文献

- [1] Liu, S., Zhang, H., Li, L., Xiong, L. and Shum, P. (2019) Liquid Core Fiber Interferometer for Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, **31**, 189-192.

- <https://doi.org/10.1109/lpt.2018.2889753>
- [2] Zhao, W., Xiao, Z., Liu, X., He, Y. and Zhong, N. (2026) Optical Fiber Acetone Sensor Functionalized with a Zinc-Based Metal-Organic Framework. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **453**, Article ID: 139486. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2026.139486>
- [3] Qi, X., Pérez, L.A., Meng, L., Imaz, I., Alonso, M.I., Maspocho, D., *et al.* (2026) Symmetric Metal Organic Framework-Plasmonic Architectures for Reversible and High-Sensitivity Optical Sensing. *Small*, **22**, e09618. <https://doi.org/10.1002/sml.202509618>
- [4] Yang, F., Zong, S., Li, X., Hu, Y., Wang, Z., Qu, Y., *et al.* (2025) Optical Fiber Methane Sensor Based on Mach-Zehnder Interferometer Induced by Multimode Interference. *Micromachines*, **16**, Article No. 406. <https://doi.org/10.3390/mi16040406>
- [5] 沈韩阳, 樊利, 陈易, 等. 基于光纤传感器的溶液浓度原位测量的研究[J]. 光散射学报, 2025, 37(4): 599-608.
- [6] Chester, A.M., Castillo-Blas, C., Woodliffe, J.L., Islam, M.T., Molinar-Díaz, J., Arjuna, A., *et al.* (2026) Facile Synthesis of Zeolitic Imidazolate Framework Coated Glass Microspheres. *Journal of Materials Chemistry B*, **14**, 2003-2013. <https://doi.org/10.1039/d5tb02418h>
- [7] He, Q., Nie, S., Yin, S., Cheng, Y. and Zhao, D. (2026) New Anti-Particle-Interference Optical Model and Demodulation Method for TDLAS Methane Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **449**, Article ID: 139092. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.139092>
- [8] Tao, C., Li, X., Yang, J. and Shi, Y. (2011) Optical Fiber Sensing Element Based on Luminescence Quenching of Silica Nanowires Modified with Cryptophane-A for the Detection of Methane. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **156**, 553-558. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.01.067>
- [9] Wang, Z., Luo, Z., Chang, T., Cheng, L., Wu, C. and Cui, H. (2019) Methane Optical Sensing System with Polarization Rotation Gas Cell. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 7415-7424. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2916978>
- [10] Zhou, B., Liu, G., Guan, Z. and He, S. (2007) An Optical Sensing System for the Concentration of Methane Based on Fiber Bragg Gratings. *Optoelectronics Letters*, **3**, 410-412. <https://doi.org/10.1007/s11801-007-7065-4>
- [11] Zhang, J.Y., Ding, E.J., Xu, S.C., Li, Z.H., Wang, X.X. and Song, F. (2017) Sensitization of an Optical Fiber Methane Sensor with Graphene. *Optical Fiber Technology*, **37**, 26-29. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.06.011>
- [12] 施伟华, 穆蓉秋, 张凌. 基于光子晶体光纤的生物质量浓度与温度双参量传感[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 388-393.
- [13] Estany-Macià, A., Fort-Grandas, I., Joshi, N., Svendsen, W.E., Dimaki, M., Romano-Rodríguez, A., *et al.* (2024) ZIF-8 Films and Surface Plasmon Resonance for Chemical Vapor Detection. *Proceedings*, **97**, 126. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024097126>
- [14] Kapit, J.A., Youngs, S., Pardis, W.A., Padilla, A.M. and Michel, A.P.M. (2024) An Underwater Methane Sensor Based on Laser Spectroscopy in a Hollow Core Optical Fiber. *ACS Sensors*, **9**, 5896-5905. <https://doi.org/10.1021/acssensors.4c01563>
- [15] 麻艳佳, 杨黎, 郭胜惠, 等. 用于低浓度氢气检测的超灵敏 TiO₂ 传感材料高通量筛选方法研究[J]. 材料导报, 2024, 38(18): 32-38.
- [16] Wang, Y., Ma, G., Gao, D., Wang, Y., Xie, Y., Gao, X., *et al.* (2024) Transformer Oil-Dissolved Methane Detection Based on Non-Adiabatic Tapered Fiber Using Polyacrylate and Cryptophane-A Overlay Deposition. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **400**, Article ID: 134869. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134869>
- [17] 李正大, 李辉, 邓成钊, 等. 基于混合型光波导场增强的高灵敏折射率传感器[J]. 光子学报, 2025, 54(4): 108-120.
- [18] Zheng, S., Cai, H., Xu, L., *et al.* (2022) Silicon Substrate-Integrated Hollow Waveguide for Miniaturized Optical Gas Sensing. *Photonics Research*, **10**, 261-268. <https://doi.org/10.1364/PRJ.439434>
- [19] Qin, Z., Zhang, P., Chang, B., Bao, L., Wang, Q., Zhou, W., *et al.* (2025) Water-Induced Defect Engineering in Metal-Organic Frameworks toward Enhanced Gas-Sensing Performance. *Science China Chemistry*, **69**, 197-205. <https://doi.org/10.1007/s11426-025-2946-1>
- [20] Ahmad, W., Tahir, M., Bibi, B., Gong, F., He, L., Tang, H., *et al.* (2025) Advances in ZIF-8 Variants: Synthesis, Design, and Applications in Gas Sensing. *Coordination Chemistry Reviews*, **539**, Article ID: 216733. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216733>
- [21] El Hamzaoui, H., Boussekey, L., Bouzaoui, M., *et al.* (2020) Refractive Index Changes in ZIF-8 Thin Films for Optical Gas Sensing. *Optics Express*, **28**, 6316-6325.
- [22] Wang, H., Xie, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Ma, J. and Yang, J. (2025) Microstructural Engineering of ZIF-8/In₂O₃ Core-Shell Nanocomposites for Superior Ppb-Level NO₂ Gas Sensing Performance. *Ceramics International*, **51**, 36722-36730. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.382>

- [23] Duan, L., Liu, H., Xia, K., Guo, Z., Li, Y., Deng, S., *et al.* (2024) Gas Sensing Performance Regulating of ZIF-8 Encapsulated WO₃ Nanosheets. *Ceramics International*, **50**, 50989-51001. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.010>
- [24] Gupta, S., Ravikant, C. and Kaur, A. (2024) Novel Flexible Chemiresistive Ammonia Sensors Based on rGO/ZIF-8 Composites Deposited on Conductive Graphite Sheets. *Diamond and Related Materials*, **148**, Article ID: 111473. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111473>
- [25] Wang, Z., Zhu, L., Zhang, J., Wang, J., Cui, X., Chen, X., *et al.* (2024) ZIF-8 Loaded Ag/ZnO Electrospun Nanofibers Enabling High-Performance H₂ Gas Sensing for Battery Safety Early Warning. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **418**, Article ID: 136276. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136276>