

光纤开腔法布里 - 珀罗干涉仪的折射率传感特性研究

于卓冉^{1,2}, 刘海龙^{1,2}, 赵燕杰^{1*}

¹山东建筑大学理学院, 山东 济南

²山东省科学院激光研究所, 山东 济南

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

本文提出并设计了一种基于光纤开腔法布里 - 珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)的折射率传感器。该传感器采用全开腔结构与U型玻璃槽封装, 通过单模光纤端面与镀金玻璃圆柱构成干涉腔, 有效提升液体导入能力与结构稳定性。随着待测溶液折射率变化, FPI干涉光谱特征峰发生明显漂移, 通过对特征波长解调, 实现了溶液折射率的高精度测量。实验结果表明, 在折射率范围1.3329~1.3343内, 传感器折射率灵敏度达到1149.265 nm/RIU, 线性拟合系数为0.998。对不同腔长结构的对比实验表明, 该传感器具有良好的重复性与工艺一致性, 灵敏度偏差小于0.5%。此外, 稳定性测试结果显示, 在恒定环境下120 min内波长漂移小于0.091 nm, 对应折射率误差约为 7.9×10^{-5} RIU。该传感器具有结构简单、成本低、抗腐蚀性强及良好稳定性等优点, 在生化检测与工业过程监测等领域具有良好的应用前景。

关键词

法布里 - 珀罗干涉仪, 光纤传感, 折射率测量

Refractive Index Sensing Characteristics of an Open-Cavity Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer

Zhuoran Yu^{1,2}, Hailong Liu^{1,2}, Yanjie Zhao^{1*}

¹School of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

²Laser Institute, Shandong Academy of Sciences, Jinan Shandong

Received: April 13, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 12, 2026

*通讯作者。

文章引用: 于卓冉, 刘海龙, 赵燕杰. 光纤开腔法布里-珀罗干涉仪的折射率传感特性研究[J]. 现代物理, 2026, 16(3): 25-33. DOI: 10.12677/mp.2026.163003

Abstract

This paper proposed and designed a refractive index sensor based on a fiber-optic open-cavity Fabry-Perot interferometer (FPI). The sensor employs a fully open-cavity structure encapsulated in a U-shaped glass channel, in which the interference cavity is constructed by the end face of a single-mode fiber and a gold-plated glass cylinder. This design effectively improves liquid intake capacity and structural stability of the sensor. The characteristic peaks in the FPI interference spectrum exhibit a remarkable wavelength shift with the variation of the external refractive index, and high-precision measurement of the solution's refractive index is achieved by demodulating the characteristic wavelengths. Experimental results indicate that within the refractive index range of 1.3329 to 1.3343, the sensor achieves a refractive index sensitivity of 1149.265 nm/RIU, with a linearity coefficient of 0.998. Comparative experiments on structures with different cavity lengths demonstrate that the sensor exhibits excellent repeatability and process consistency, with a sensitivity deviation of less than 0.5%. Furthermore, stability test results show that under constant environmental conditions, the wavelength drift over 120 minutes is less than 0.091 nm, corresponding to a refractive index error of approximately 7.9×10^{-5} RIU. This sensor offers advantages such as a simple structure, low cost, strong corrosion resistance, and high stability, and holds promising application prospects in fields such as biochemical detection and industrial process monitoring.

Keywords

Fabry-Perot Interferometer, Fiber Optic Sensing, Refractive Index Measurement

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

折射率(Refractive Index, RI)是表征介质光学性质的重要参数,在生物化学检测[1]、海洋环境监测[2]、石油勘探[3]及食品安全[4]等领域具有广泛应用。实现高灵敏度、高稳定性和快速响应的折射率测量,对于复杂环境下的精确检测具有重要意义。传统测量方法如阿贝折射仪和椭圆偏振仪虽具备较高精度,但在小型化集成、环境适应性及远程在线监测方面仍存在不足,在高温、高压及强腐蚀等场景中的应用受到限制。

近年来,光纤结构折射率传感器因体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰及便于远程检测等特点受到关注。常见结构包括法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI) [5]、马赫-曾德尔干涉仪[6]、迈克尔逊干涉仪[7]及萨格纳克干涉仪[8]等。其中, FPI 结构简单、易于微型化,且具备较高灵敏度,因而成为研究热点。

围绕 FPI 结构的制备与性能提升,已有多种实现方式。例如,飞秒激光加工可构建高精度微腔,但设备成本高、工艺复杂[9];基于微结构光纤或中空光纤拼接的结构虽降低了成本,但对加工精度要求较高,且容易出现微孔坍塌或堵塞等问题[10]。为改善液体导入性能并简化制备工艺,开腔式 FPI 结构逐渐受到关注,相比之下,开腔式 FPI 通过直接暴露干涉腔体,有利于液体充分进入腔内,从而提升响应能力[11]。然而,如何在保证结构稳定性的同时实现高重复性制备,仍是该类传感器亟需解决的问题。

本文提出一种光纤开腔 FPI 折射率传感器。该结构采用 U 型玻璃槽进行封装,通过单模光纤端面与

镀金玻璃圆柱构成干涉腔，在保证液体充分接触的同时提高结构稳定性。通过跟踪反射光谱特征峰的变化，实现对溶液折射率的检测。实验结果表明，该传感器在所测范围内具有良好的线性响应，并表现出较好的重复性与稳定性，验证了所提出结构在实际应用中的可行性与可靠性。

2. 传感器结构与理论分析

2.1. 传感器结构设计

本文提出的折射率传感器基于光纤开腔 FPI 结构，其整体由单模光纤、石英毛细管、外层玻璃管、U 型玻璃凹槽及镀金玻璃圆柱等组成，结构示意图如图 1 所示。该结构通过在光纤端面与反射体之间构建开放式干涉腔，使待测溶液能够直接进入干涉腔内，从而实现对外界折射率变化的响应。

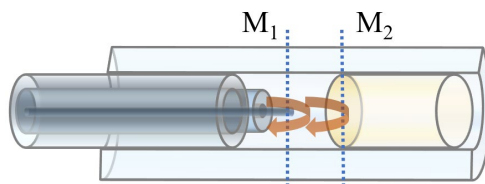


Figure 1. Sensor structure schematic
图 1. 传感器结构示意图

在该传感结构中，单模光纤端面与腔内介质形成第一反射面(M_1)，镀金玻璃圆柱端面作为第二反射面(M_2)。入射光在两个反射界面发生多次反射并产生干涉，构成典型的法布里 - 珀罗干涉腔。通过调控两反射面之间的间距，可形成稳定的开腔干涉结构。

2.2. 工作原理与仿真分析

在该结构中， R_1 和 R_2 分别表示反射界面 M_1 和 M_2 处的强度反射系数，在近似正入射条件下，两个反射面的强度反射率、可由菲涅尔公式[12]表示为：

$$R_1 = \frac{(n_1 - n)^2}{(n_1 + n)^2} \quad R_2 = \frac{(\tilde{n}_g - n)^2}{(\tilde{n}_g + n)^2} \quad (1)$$

其中， n_1 为单模光纤折射率($n_1 = 1.45$)， n 为腔内介质折射率， $\tilde{n}_g = n_g + ik_g$ 为镀金玻璃端面的复折射率， n_g 为折射率实部， k_g 为消光系数，在实验工作波段可以取 $\tilde{n}_g(1550 \text{ nm}) = 0.55 + i11.5$ 。

在弱反射条件下，FPI 可近似视为双光束干涉系统，其归一化反射光谱可表示为：

$$R(\varphi) = R_1 + a^2(1 - R_1)^2 R_2 + 2(1 - R_1)a\sqrt{R_1 R_2} \cos(2\varphi) \quad (2)$$

式中， φ 为干涉腔引起的光相位延迟， $\varphi = 2\pi nL/\lambda$ ， L 为 FPI 的腔长， n 为腔内介质的折射率， λ 为入射光波长， a 为 FPI 腔内光场的幅值衰减系数。当 $\varphi = m\pi (m = 0, 1, 2, \dots)$ 时，FPI 反射光谱出现极大值，此时光纤 FPI 反射光谱第 m 阶干涉条纹对应的波峰波长为：

$$\lambda_m = \frac{2nL}{m}, m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

对于 FPI 的折射率测量，在腔长 L 和干涉级次 m 保持不变的条件下，干涉波长 λ_m 与腔内介质折射率 n 呈线性关系。对其求导可得，FPI 的折射率灵敏度为：

$$S_{\text{RI}} = \frac{d\lambda_m}{dn} = \frac{\lambda_m}{n} \quad (4)$$

为验证所设计的 FP 腔结构，建立了如图 2 所示的有限元仿真模型，FP 腔空腔长度设定为 $300\ \mu\text{m}$ ，并对其谐振模式特性进行了仿真分析。在 $1540\ \text{nm}$ 波长(对应结构的一个主要谐振峰)激发条件下，计算得到腔内的电磁场分布情况，图 3 给出了腔内的面电荷密度分布。该分布直观反映了谐振状态下腔内光场的空间分布特征，表明光能量在 FP 腔结构中得到了有效的约束与增强。

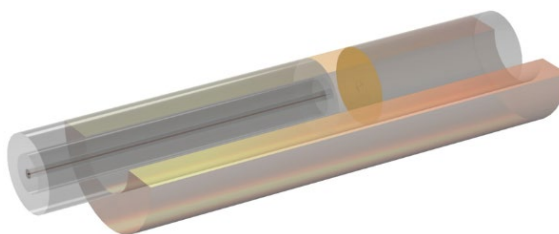


Figure 2. Finite element simulation model

图 2. 有限元仿真模型

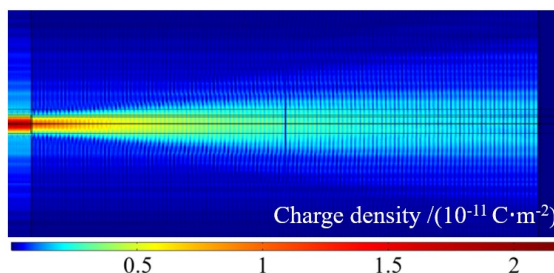


Figure 3. Surface charge density distribution in the cavity under excitation at a wavelength of $1540\ \text{nm}$

图 3. 在 $1540\ \text{nm}$ 波长激发下腔内的面电荷密度分布

进一步，对该结构的折射率传感特性进行了分析。仿真中，将腔内介质折射率在 1.3330 至 1.3350 范围内调整，对应的反射光谱如图 4 所示，其峰值波长随折射率增大发生规律性红移。图 5 对峰值波长与折射率进行线性拟合，得到该 FP 腔的折射率灵敏度 $S_{\text{sim}} = 1155.289\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。

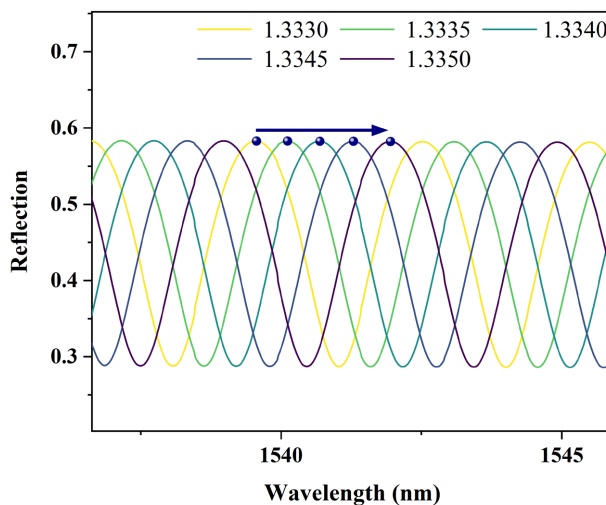


Figure 4. Simulated reflection spectra of the FP cavity at different refractive indices

图 4. 模拟不同折射率下 FP 腔的反射光谱

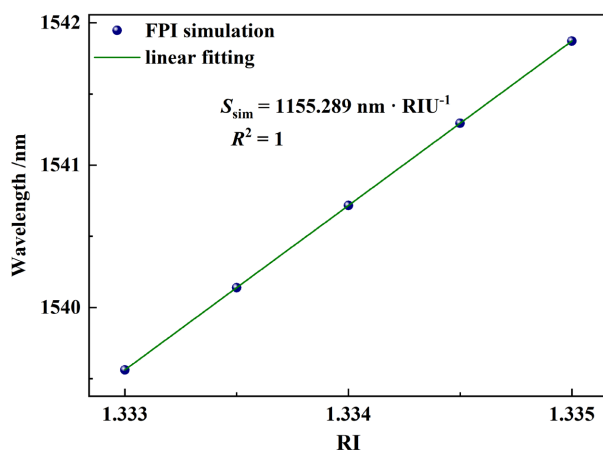


Figure 5. Simulated interference peak wavelength versus refractive index

图 5. 模拟干涉峰波长与折射率的关系

3. 传感器制备

传感器的制作工艺示意如图 6 所示。首先，对单模光纤(ITU-T G.652.D)进行预处理，去除端部约 0.5 cm 长度的涂覆层，并对端面进行切割，以获得平整的光纤端面。随后，将处理后的光纤插入内径 130 μm 、长度约 0.5 cm 的石英毛细管中，并通过玻璃熔融焊接方式进行固定。在此基础上，将该结构进一步置入外径 1 mm、长度 1.5 cm 的玻璃管中进行封装，以增强整体结构的稳定性。

完成封装后，将组件固定于内径 1 mm、长 1.5 cm 的 U 型玻璃凹槽中。随后，在凹槽中放置直径 1 mm、长度 2 mm 的镀金玻璃圆柱，并调节其与光纤端面的间距，以形成开腔结构。在调节过程中，通过监测反射光谱变化对腔长进行控制，当干涉光谱稳定后对结构进行熔融固定，完成传感器制备，其显微结构如图 7 所示。可以看出，光纤端面与反射面之间形成了稳定的开腔结构，腔长清晰可辨。

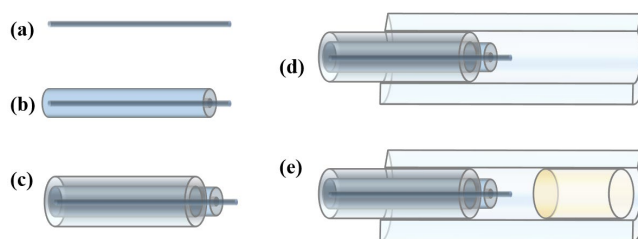


Figure 6. Schematic of the sensor fabrication process

图 6. 传感器的制作工艺示意图

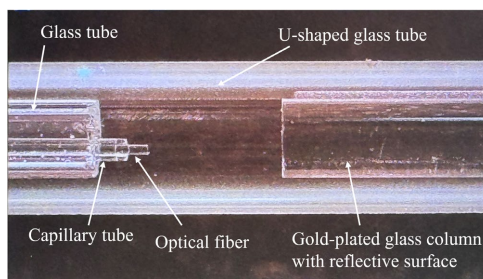


Figure 7. Microscopic image of the fabricated sensor

图 7. 所制备传感器的显微镜图像

按照上述方法制备了3种不同腔长的传感器,对应的3种传感器分别为A ($L_A = 318.838\mu\text{m}$)、B ($L_B = 440.809\mu\text{m}$)和C ($L_C = 214.127\mu\text{m}$)。图8给出了3种不同腔长传感器在空气环境下的反射光谱。由于腔长及微结构存在微小差异,各传感器在初始相位、自由光谱范围及反射强度上略有不同,但整体干涉特性一致,对折射率灵敏度测量无明显影响。

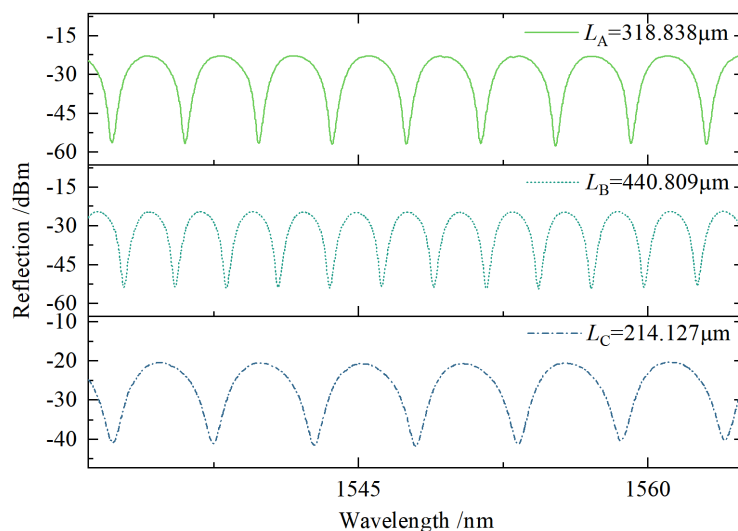


Figure 8. Reflectance spectrum of the sensor in an air environment
图 8. 传感器在空气环境下的反射光谱图

4. 实验与结果分析

为实现传感器折射率特性的测试,搭建了如图9所示的实验系统。系统主要由光纤光栅解调仪(FT16-20321)、计算机及待测传感器组成,传感器的反射光谱由解调仪直接采集并传输至计算机,通过光谱解调程序实现波长漂移的实时跟踪与记录。折射率测试采用不同浓度的甘油溶液作为标准介质,测试范围为1.3329~1.3343 RIU,各溶液的实际折射率值由阿贝折射仪(2WAJ)进行标定。实验过程中,将传感器依次浸入不同折射率溶液中,在室温20℃条件下进行测试,待光谱稳定后采集对应反射光谱数据。为避免残留溶液对测量结果的影响,每次更换待测溶液前均使用去离子水对传感器探头进行冲洗,待反射光谱恢复稳定后再进行后续测量。

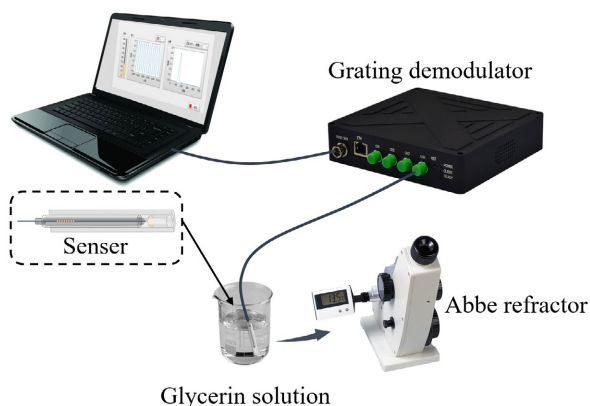


Figure 9. Experiment setup diagram
图 9. 实验装置图

对传感器 A 的折射率响应特性进行测试, 图 10 给出了不同折射率条件下的反射光谱, 可以看出, 随着外界折射率的增大, 干涉谱整体向长波方向发生漂移, 且各干涉峰变化趋势一致, 表明传感器对折射率变化具有良好的响应特性。选取 1540 nm 附近的干涉峰作为跟踪对象, 对其波长漂移进行提取与分析, 结果表明, 随着折射率由 1.3329 增加至 1.3343, 干涉峰呈现出良好的线性漂移关系。通过线性拟合得到传感器 A 的折射率灵敏度为 1149.265 nm/RIU, 拟合线性度 $R^2 = 0.998$, 说明该传感器在所测范围内具有较高的灵敏度和良好的线性响应特性。

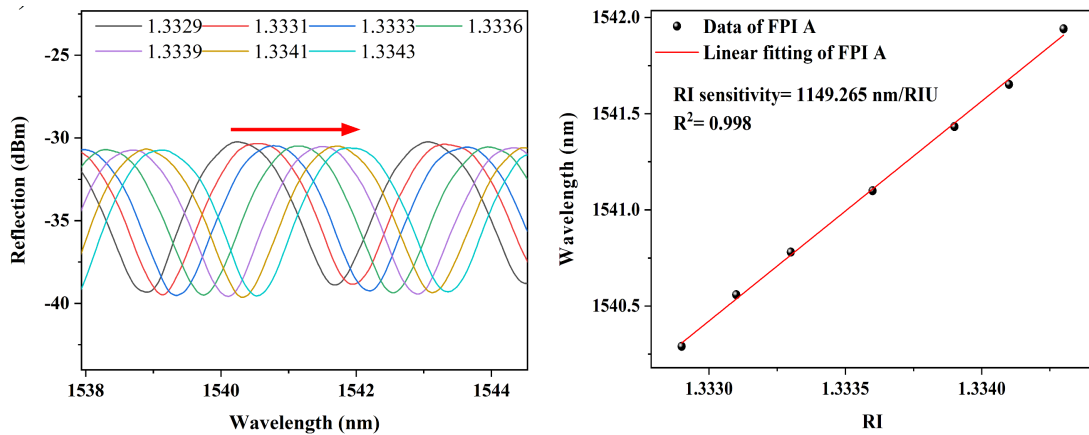


Figure 10. Refractive index sensing performance of Sensor A
图 10. 传感器 A 的折射率传感性能

对传感器 A 的稳定性进行实验测试。在室温 20°C 条件下, 将传感器 A 置于折射率为 1.3329 的甘油溶液中, 进行 120 min 连续监测, 实验结果如图 11 所示。以 1540 nm 附近的特征峰为分析对象, 结果表明, 在监测过程中峰值波长的最大波动范围为 0.091 nm。根据传感器折射率灵敏度(1149.265 nm/RIU)换算, 对应折射率误差约为 7.9×10^{-5} RIU, 表明该传感器具有良好的稳定性。

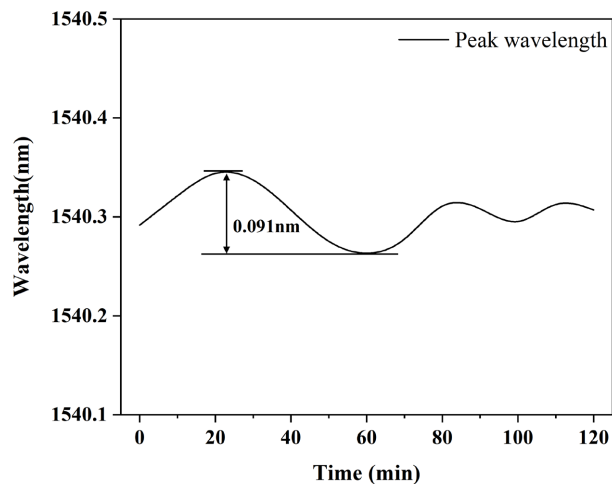


Figure 11. Refractive index stability test of Sensor A
图 11. 传感器 A 的折射率稳定性实验

为研究传感器的重复性, 对传感器 B、C 进行了折射率响应测试, 结果如图 12 和图 13 所示, 两传感器在折射率增大时同样呈现显著光谱红移, 折射率灵敏度分别为 1148.766 nm/RIU 和 1148.391 nm/RIU,

对应线性度分别为 $R^2=0.999$ 和 $R^2=0.997$, 表明 3 个不同腔长传感器的实测灵敏度与理论值高度吻合(相对误差 $<0.5\%$), 不仅验证了理论模型的正确性, 更证明了该传感结构具备优良的工艺复现性。

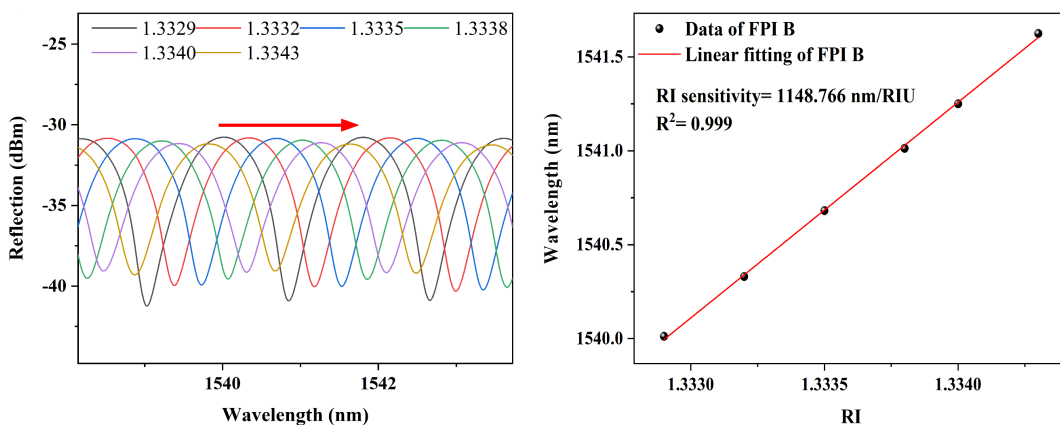


Figure 12. Refractive index sensing performance of Sensor B
图 12. 传感器 B 的折射率传感性能

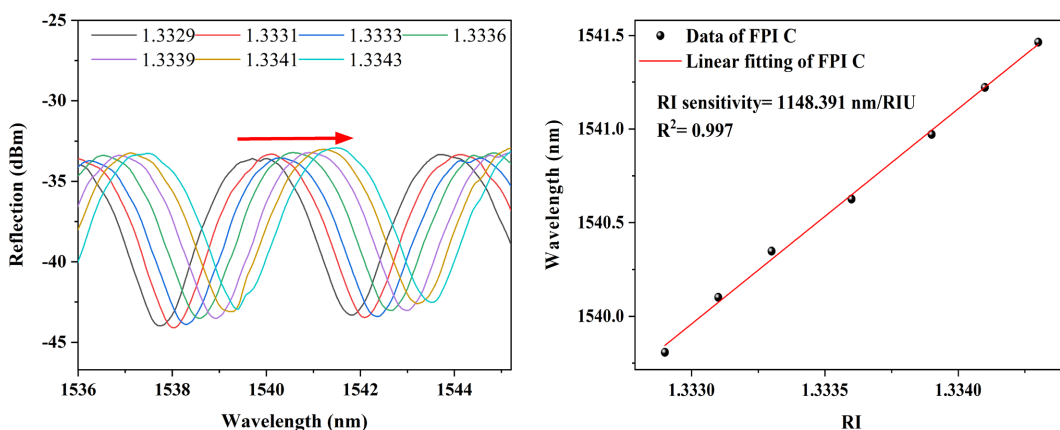


Figure 13. Refractive index sensing performance of Sensor C
图 13. 传感器 C 的折射率传感性能

5. 总结

本文设计并制备了一种开腔光纤 FPI 折射率传感器, 并对其性能进行了实验测试。采用 U 型玻璃槽进行封装, 形成开腔结构, 使其在液体环境中能够稳定实现干涉测量。实验结果表明, 在 1.3329~1.3343 RIU 范围内, 传感器表现出良好的线性响应特性, 最高折射率灵敏度为 1149.265 nm/RIU, 线性度达到 0.998。不同腔长传感器的测试结果表明, 其折射率响应具有较好的一致性, 灵敏度偏差小于 0.5%。稳定性实验结果显示, 在 120 min 监测过程中波长漂移小于 0.091 nm, 对应折射率误差约为 7.9×10^{-5} RIU。综上, 该传感器在保证结构简洁的同时, 实现了较高的测量精度与稳定性, 具备进一步应用于液体折射率检测的潜力。

致 谢

感谢项目的资助, 感谢相关资助者与支持单位的支持, 感谢在研究过程中给予指导和帮助的人员, 并对提供资料、图片、文献以及相关研究思想与设想并授权引用的所有者表示诚挚感谢。

基金项目

本文为山东省重点研发计划项目(公益类)(2019GSF111011)和泰山学者岗位资助项目(tsqn202306254)资助成果。

参考文献

- [1] 李乾坤, 丁美琪, 桂林, 等. 基于微波光子滤波器射频强度的叶绿素检测研究[J]. 中国激光, 2023, 50(21): 2107403.
- [2] Li, G., Yang, S. and Wu, C. (2024) Seeing More Clearly: Improving the Resolution of Ocean Salinity Measurements Using a Fabry-Perot Resonant Cavity. *Optics and Lasers in Engineering*, **181**, Article 108356. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108356>
- [3] Mahmoodi, Y. and Fathi, D. (2021) High-performance Refractive Index Sensor for Oil Derivatives Based on MWCNT Photonic Crystal Microcavity. *Optics & Laser Technology*, **138**, Article 106865. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106865>
- [4] Shin, H.J., Lim, J., Park, K. and Ok, G. (2024) State-of-the-Art Nondestructive High-Speed Raster Scanning Inspection for Food Safety and Quality Using Terahertz Refractive Index Mapping. *Food Chemistry Advances*, **4**, Article 100685. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100685>
- [5] Liu, Y. and Qu, S. (2014) Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer Cavity Fabricated by Femtosecond Laser-Induced Water Breakdown for Refractive Index Sensing. *Applied Optics*, **53**, 469-474. <https://doi.org/10.1364/ao.53.000469>
- [6] Geng, J. and Kishi, N. (2025) A Temperature-Insensitive Refractive Index Sensor Based on In-Line Mach-Zehnder Interferometer with Micro Spindle Structures and Photonic Crystal Fibers. *Optical Fiber Technology*, **89**, Article 104039. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.104039>
- [7] Bai, X., Wang, X., Zhang, M., Wang, M., Yang, B., Su, J., *et al.* (2025) An Optical Michelson Interferometric Spectrometer-Based Seawater Density Sensor with Improved Long-Term Stability in the Deep-Sea Trial. *Measurement*, **250**, Article 117230. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117230>
- [8] Fan, X., Zhang, H., Feng, W., Xu, Y. and Qi, Y. (2025) Drop-Shaped Single-Mode Microfiber with Sagnac Loop Based on Coupling Effect for Refractive Index Sensing. *Sensors and Actuators A: Physical*, **389**, Article 116535. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116535>
- [9] Liu, X., Wang, Q. and Wang, D.N. (2022) Ultra Compact and Sensitive Optical Fiber Interferometric Refractive Index Sensor. *Optik*, **254**, Article 168642. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168642>
- [10] Tian, J., Lu, Y., Zhang, Q. and Han, M. (2013) Microfluidic Refractive Index Sensor Based on an All-Silica In-Line Fabry-Perot Interferometer Fabricated with Microstructured Fibers. *Optics Express*, **21**, 6633-6639. <https://doi.org/10.1364/oe.21.006633>
- [11] Jiang, J., Zhao, Y., Yang, Y., Wang, Y., He, X., Yang, W., *et al.* (2019) All-Fiber Fabry-Perot Interferometer for Liquid Refractive Index Measurement. *Journal of Russian Laser Research*, **40**, 370-374. <https://doi.org/10.1007/s10946-019-09813-4>
- [12] Gutiérrez, C.E. (2013) Refraction Problems in Geometric Optics. In: Capogna, L., Guan, P., Gutiérrez, C.E., *et al.*, Eds., *Fully Nonlinear PDEs in Real and Complex Geometry and Optics*, Springer International Publishing, 95-150. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00942-1_3