

1.55 μm 波段处高灵敏度光子晶体光纤设计

马依拉木·木斯得克¹, 阿布都克力木·阿布力孜¹, 任艳¹, 姚建铨²

(1.新疆财经大学 信息管理学院, 乌鲁木齐 830012; 2.天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了进一步提高光子晶体光纤(PCF)的灵敏度, 设计了一种由圆形与矩形空气孔复合构成的 PCF。该光纤由 4 层圆形空气孔包层和纤芯区 5 个矩形空气孔组成。基于全矢量有限元法设置完美匹配层边界条件, 系统模拟分析了水、乙醇、苯 3 种分析物填充时 PCF 的光学特性。研究结果表明, 在 1.55 μm 波长下, 该 PCF 对 3 种分析物的灵敏度分别达到 71.8%、74.5%、75.6%, 较现有 PCF 提升了 1.26~7.97 倍、1.24~6.2 倍、1.2~5.6 倍, 同时实现了 10^{-3} 量级的高双折射和低于 10^{-5} dB/cm 的低损耗特性。

关键词: 光子晶体光纤; 有限元法; 灵敏度; 双折射; 限制损耗

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)03-0047-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of high-sensitivity photonic crystal fiber at 1.55 μm wavelength

MAYILAMU·Musideke¹, ABUDUKELIMU·Abulizi¹, REN Yan¹, YAO Jianquan²

(1. School of Information Management, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China;

2. School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To further enhance the sensitivity of photonic crystal fiber(PCF), a novel PCF structure incorporating both circular and rectangular air holes is designed. The proposed configuration comprises a four-layer cladding with circular air holes and a core region embedded with five rectangular air holes. Utilizing the full-vector finite element method with perfectly matched layer (PML) boundary conditions, the optical properties of the PCF are systematically simulated and analyzed when infiltrated with three analytes: water, ethanol, and benzene. The results demonstrate that at the wavelength of 1.55 μm , the designed PCF achieves sensitivities of 71.8%, 74.5%, and 75.6% for the three analytes, representing improvements of 1.26~7.97 times, 1.24~6.2 times, and 1.2~5.6 times, respectively, compared to existing PCF. Furthermore, the structure exhibits high birefringence on the order of 10^{-3} and ultralow confinement loss below 10^{-5} dB/cm.

Key words: photonic crystal fiber, finite element method, sensitivity, birefringence, confinement loss

0 引言

光子晶体光纤(PCF)凭借其灵活的结构设计, 展现出传统光纤无法实现的独特性能, 如无限单模传输、高双折射、强非线性、低损耗及可控色散特性。通

过向 PCF 的纤芯或包层空气孔中填充气体、液体或金属等功能材料, 可进一步调控其传感性能, 这一技术已成为光纤传感器领域的重要研究方向。目前, 基于 PCF 的传感器已广泛应用于生物传感^[1-2]、化学传感^[3-4]、磁感应^[5]及温度与压力检测^[6-12]等领域, 为高精度传感应用提供了新的技术途径。

在化学传感方向, PCF 传感器因其工业应用潜力受到广泛关注。研究者针对水、乙醇、苯等化学物质的检测需求, 在 1.55 μm 波长下进行了灵敏度优化研究, 提出了多种创新的 PCF 结构。例如: ADEMGIL H 等人^[13]设计了一种六边形排列的多尺寸圆形空气孔 PCF, 纤芯填充液体后, 测得对上述 3 种分析物的灵敏度分别为 9%、12%、13.5%。SAYED A 等人^[14]采用纤芯嵌入 16 个相

收稿日期: 2024-07-03。

基金项目: 国家 973 计划项目(2010CB327801)资助; 高层次人才专项项目(2022XGC060)资助。

作者简介: 马依拉木·木斯得克(1983—), 女, 新疆伊犁人, 博士, 副教授。主持省部级科研项目 4 项、高层次人才专项项目 1 项, 参与省部级项目多项。主要研究方向为光子晶体光纤传输与传感技术、人工智能与光纤传感的融合应用技术。



同尺寸椭圆形空气孔的结构,测得对上述3种分析物的灵敏度均低于50%。SHADIDUL I 等人^[15]提出纤芯含9个不同尺寸圆形空气孔的 PCF, 测得对上述3种分析物的灵敏度分别提升至50%、55%、60%。MALAVI-KA R 等人^[16]提出纤芯嵌入8个椭圆空气孔的 PCF, 对水的灵敏度为56.8%。LEON M J B M 等人^[17]设计出纤芯嵌入9个不同尺寸圆形空气孔的 PCF, 对水的灵敏度为45%。赵丽娟等人^[18]提出对角对称 PCF 结构, 包层结合圆形与椭圆形空气孔, 测得对上述3种分析物的灵敏度分别为56.3%、59.9%和62.7%。

尽管上述研究为 PCF 传感器设计提供了多样化的解决方案,但仍存在以下局限性:部分结构灵敏度不足,而高灵敏度设计往往因纤芯复杂或多层包层排列面临制造误差与孔径控制难题。随着工业发展对环境污染、食品安全监测需求的提升,开发兼具高灵敏度、高双折射且结构简单的 PCF 传感器具有重要应用价值。为此,本文设计一种由圆形与矩形空气孔复合构成的 PCF 结构,旨在为高性能 PCF 化学传感器设计提供新思路。

1 PCF 结构设计

本文设计的 PCF 横截面结构如图1所示。该光纤的包层由4层直径均为 d 的圆形空气孔按四边形阵列排列构成,相邻空气孔中心间距固定为 $\Lambda=1.24 \mu\text{m}$ 。为提升传感灵敏度和性能稳定性,纤芯区域采用非对称设计:将传统四边形排列的9个圆形空气孔替换为5个矩形空气孔,矩形孔高度为 a ,宽度为 b ,相邻矩形孔中心间距 $p=0.62 \mu\text{m}$ 。光纤基底材料为石英玻璃(折

射率 $n=1.45$),纤芯空气孔可填充待测分析物(乙醇、水或苯),以研究其对光纤光学特性的调控作用。

2 理论与结果分析

光子晶体结构的精确建模与优化通常依赖于数值计算方法,如有限差分法(FDM)^[19]、有限元法(FEM)^[20-21]和平面波展开法(PWM)^[22]。其中,FEM 因其灵活的网格划分能力及高计算精度,在复杂结构仿真中具有显著优势。因此,本文采用 FEM 结合完美匹配层(PML)吸收边界条件,以确保计算结果的准确性和可靠性。

基于麦克斯韦方程组,电场 $\vec{E}$ 满足的波动方程^[23]可表示为

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E}) - \kappa_0^2 \epsilon_r \vec{E} = 0 \quad (1)$$

其中, κ_0 为真空的波数, ϵ_r 和 μ_r 分别为介质的相对介电常数和相对磁导率。

为精确模拟空气孔边界,本文采用三角形混合单元对光纤端面进行离散化,并基于式(1)求解单元本征值方程,即

$$[\kappa] \{ \vec{E} \} = \kappa_0^2 n_{\text{eff}}^2 [M] \{ \vec{E} \} \quad (2)$$

其中, κ 和 M 为有限元矩阵。根据 κ 和 M 的稀疏矩阵属性对本征值方程进行求解,从而得到 PCF 的基模有效折射率 n_{eff} 。

本文利用 COMSOL Multiphysics 5.6 软件对所设计的 PCF 结构进行仿真分析。固定参数 $p=0.62 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda=1.24 \mu\text{m}$, 优化结构参数至 $d/\Lambda=0.96$, $b=3.5 \mu\text{m}$, $a=0.6 \mu\text{m}$, 并分别将光纤纤芯填充水、乙醇、苯,研究其在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下的模场分布,如图2所示。可以看

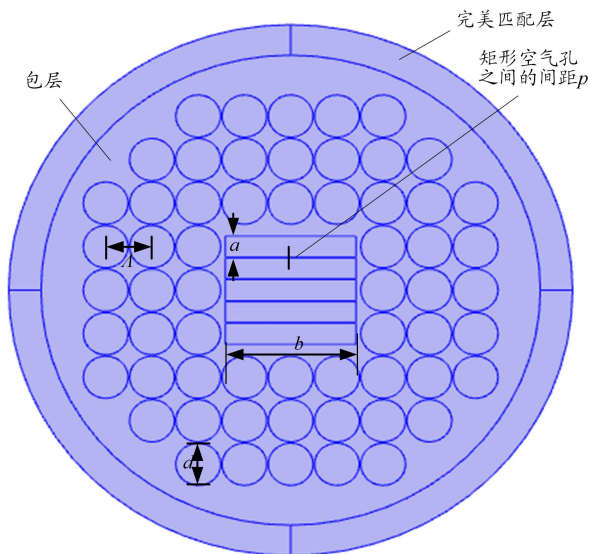
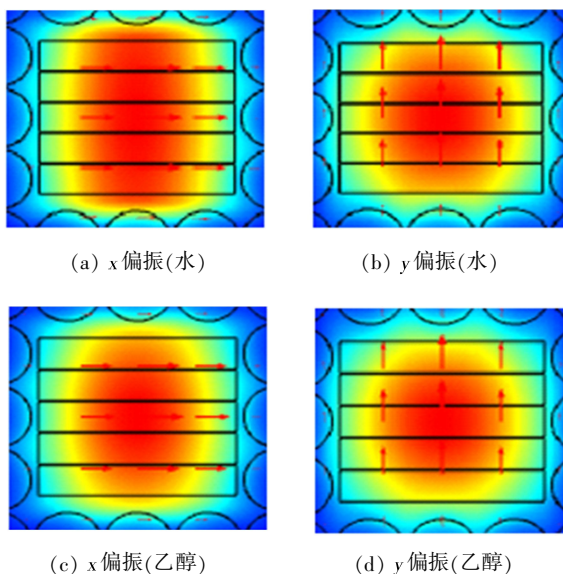
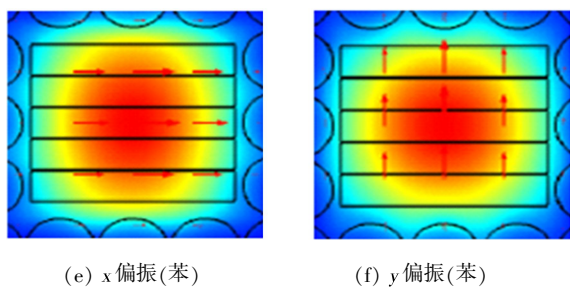


图1 PCF 的横截面图



图2 在 1.55 μm 波长下的模式分布

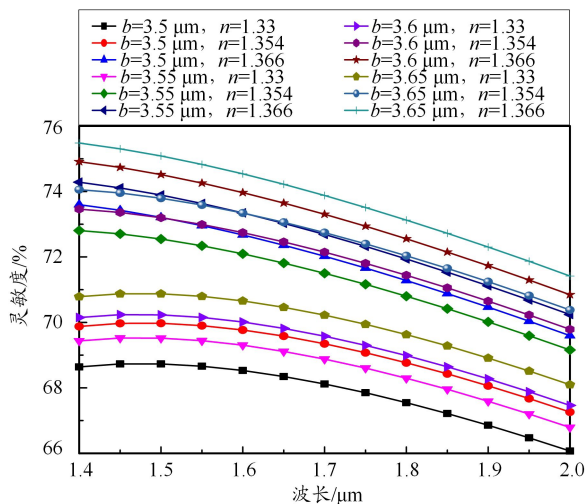
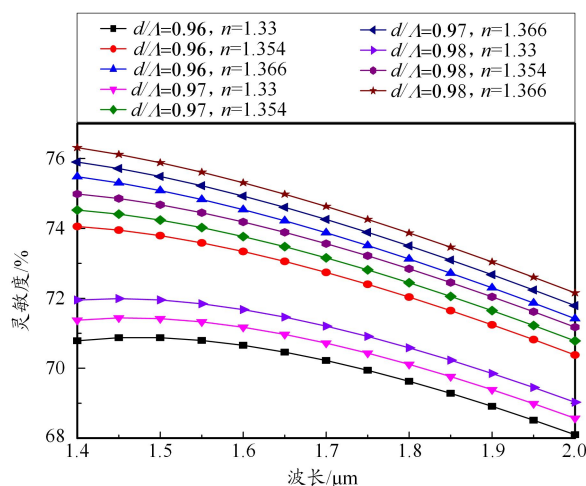
出,对于3种不同的分析物,光能量被有效地集中在光纤的纤芯区域,2个偏振模场分布的形状存在显著的差异,这一特性引发了光纤结构产生双折射现象。双折射现象不仅能够提高光纤结构的稳定性,还可能在特定应用中发挥其独特优势。

2.1 灵敏度分析

考虑到温度对分析物折射率的影响,本文采用 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的分析物折射率数据,并基于光纤传感的相对灵敏度计算方程^[8]进行灵敏度分析。在此温度下,水、乙醇和苯的折射率 n 分别为 1.33、1.354 和 1.366。由于孔间距对灵敏度系数及其引导特性具有显著影响,研究发现增大孔间距会降低灵敏度^[9]。因此,为同时实现高灵敏度和优良的双折射特性,本设计将圆形空气孔间距固定为 $\Lambda=1.24 \mu\text{m}$,矩形空气孔间距固定为 $p=0.62 \mu\text{m}$ 。

在固定 $d/\Lambda=0.96$ 、 $a=0.6 \mu\text{m}$ 的条件下,光纤在 1.4~2.0 μm 波段的灵敏度随波长的变化关系如图 3 所示。可以看出:随着波长增大,灵敏度呈下降趋势;而对于相同分析物,灵敏度随矩形宽度 b 的增加而提升。在 1.55 μm 特征波长处,水、乙醇、苯的灵敏度分别达到 70.8%、73.6%、74.8%。

当保持 $b=3.65 \mu\text{m}$ 和 $a=0.6 \mu\text{m}$ 不变时,改变包层空气填充比 d/Λ ,得到灵敏度随波长的变化关系如图 4

图3 矩形宽度 b 不同时,灵敏度随波长的变化关系图4 包层空气填充比 d/Λ 不同时,灵敏度随波长的变化关系

所示。可以看出,灵敏度随包层空气填充比 d/Λ 的增加而提高;在相同特征波长下,3种分析物的灵敏度分别提升至 71.8%、74.5%、75.6%。这种现象源于模态能量在纤芯区域的集中分布,这不仅增强了传感灵敏度,同时保障了光传输的稳定性。但是,结构参数的优化存在物理极限。过大的参数值可能导致空气孔重叠,进而影响光纤的制备工艺和使用性能。经综合考量,本文最终确定最佳结构参数组合为: $\Lambda=1.24 \mu\text{m}$ 、 $p=0.62 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda=0.98$ 、 $b=3.65 \mu\text{m}$ 和 $a=0.6 \mu\text{m}$ 。在此配置下,测得光纤在 1.4~2.0 μm 波段时对水、乙醇、苯的最低灵敏度分别为 69%、71.2%、72.2%。

2.2 双折射特性分析

具有高双折射特性的 PCF 通过消除偏振模态色散,能够保持输入光的偏振态,从而显著提升传感光学器件的稳定性^[24]。模式双折射定义为基模 x 偏振态和 y 偏振态的有效折射率实部之差的绝对值^[25]。

采用最佳结构参数为 $\Lambda=1.24 \mu\text{m}$ 、 $p=0.62 \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda=0.98$ 、 $b=3.65 \mu\text{m}$ 和 $a=0.6 \mu\text{m}$ 时,双折射随波长的变化关系如图 5 所示。可以看出,水、乙醇、苯的双折射率

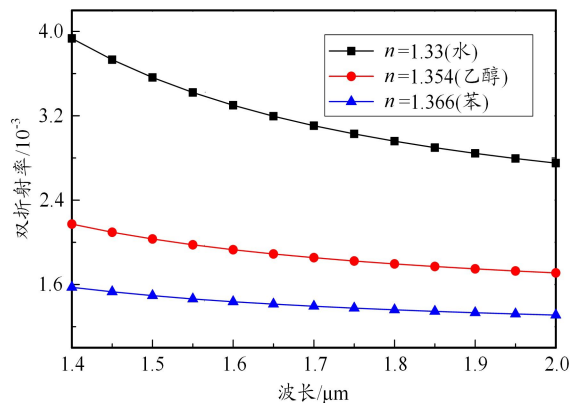


图5 在最佳结构参数下双折射率随波长的变化关系

马依拉木·木斯得克,阿布都克力木·阿不力孜,任艳,等:1.55 μm 波段处高灵敏度光子晶体光纤设计

在整个波长范围内随着波长的增加而逐渐降低。当工作波长为 1.55 μm 时,水、乙醇、苯的双折射率分别为 3.4×10^{-3} 、 1.97×10^{-3} 、 1.46×10^{-3} ; 水的双折射率高于乙醇和苯。这表明随着填充液体浓度的增加,模式不对称性较小,导致 x 偏振和 y 偏振的有效折射率差异减小,从而降低了双折射值。尽管如此,水、乙醇、苯的双折射值均达到了 10^{-3} 数量级的高双折射。这种光纤结构设计不仅满足了高灵敏度的要求,而且有效地提升了传感光学器件的稳定性。

2.3 限制损耗特性分析

限制损耗是 PCF 中一种特殊的损耗形式,它主要由纤芯中的光在传输过程中部分泄露到包层中所致,可以利用基模的有效折射率的虚部来计算。限制损耗 L_c [25] 的计算公式如下:

$$L_c = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (3)$$

在最佳结构参数条件下,3 种分析物的限制损耗随波长的变化关系如图 6 所示。可以看出,限制损耗呈现随波长增加而逐渐增大的趋势。当工作波长为 1.55 μm 时,水、乙醇、苯的限制损耗分别为 1.65×10^{-5} 、 3.71×10^{-6} 、 1.77×10^{-6} dB/cm; 水的限制损耗相对较高,这主要源于其较低的液体浓度使得更多光能量泄漏至包层;3 种分析物的限制损耗均保持在 10^{-5} dB/cm 以下,表明该光纤结构在 1.55 μm 波长下具有优异的光传输特性。

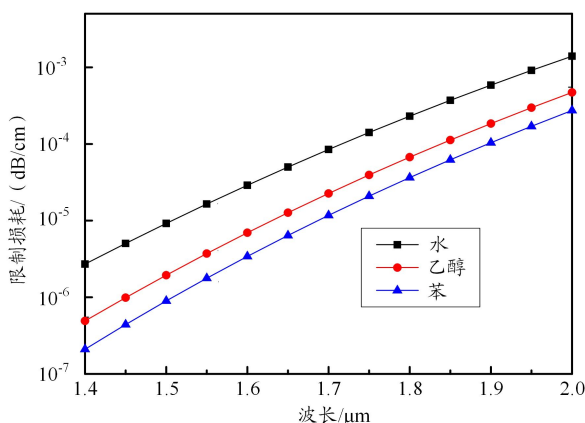


图6 在最佳结构参数下限制损耗随波长的变化关系

在 1.55 μm 波长处,所设计的 PCF 与现有 PCF 的灵敏度对比如表 1 所示。实验数据显示,本文设计的 PCF 对水、乙醇和苯的检测灵敏度分别达到 71.8%、74.5% 和 75.6%。相较于现有 PCF 结构,本文设计的 PCF 的灵敏度提升显著:乙醇检测灵敏度提高 1.24~6.2 倍,水检测灵敏度提升 1.26~7.97 倍,苯检测灵敏度提高 1.2~5.6 倍。这种兼具结构简洁性和高灵敏度

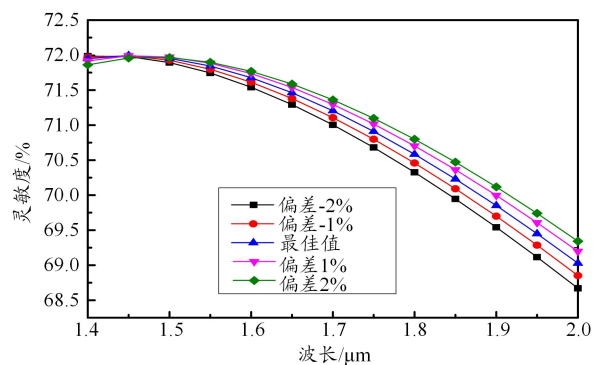
表 1 在 1.55 μm 波长处,所设计 PCF 与现有 PCF 的灵敏度比较

PCF	灵敏度/%		
	水	乙醇	苯
文献[13]	9	12	13.5
文献[14]	<50	<50	<50
文献[15]	<50	<55	<60
文献[16]	56.8	—	—
文献[17]	45	—	—
文献[18]	56.3	59.9	62.7
本文设计	71.8	74.5	75.6

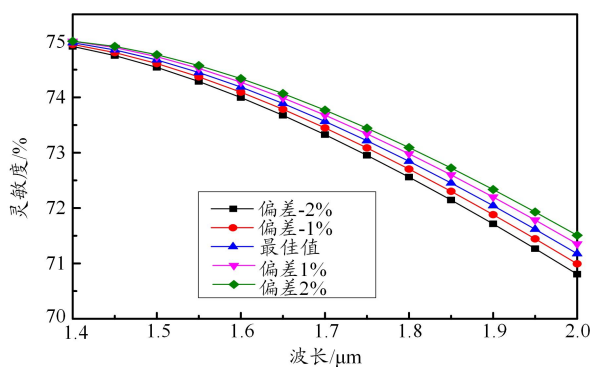
的 PCF 设计,为化学传感、生物传感及环境监测等领域的应用提供了新的技术方案。

2.4 光纤制造可行性分析

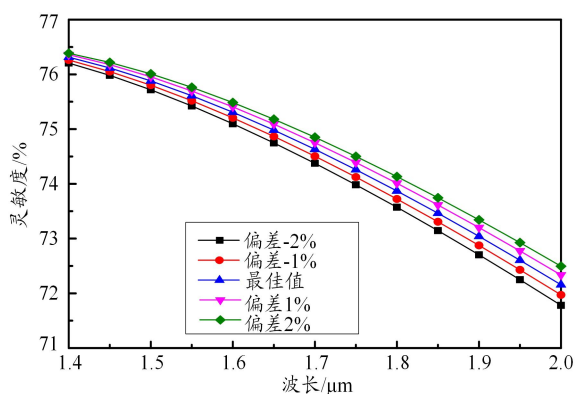
与传统光纤相比,PCF 的制备工艺更复杂。目前主要的制备方法包括堆叠-拉制法[26]、钻孔法[27]、挤压法[28]及溶胶-凝胶法[29]。在这些方法中,溶胶-凝胶法因其优异的工艺灵活性而具有显著优势。该方法特别适用于制备具有复杂包层结构的 PCF,能够精确调控气孔的几何参数(包括形状、尺寸和间距),从而有效避免传统方法易导致的结构坍塌问题。其工艺流程为:首先将熔融石英与预制模具结合制备纤维预制件,随后通过拉丝工艺制成光纤。这种技术理论上适用于任何可模具化的 PCF 结构设计,包括本文提出的光纤构型。然而,在拉制过程中,气孔直径通常会产生 1%~2% 的工艺偏差。为评估这种偏差对器件性能的影响,本文重点分析了制造误差对 PCF 灵敏度的影响特性,结果如图 7 所示。可以看出,当结构参数在最佳值附近 $\pm 1\%$ ~ $\pm 2\%$ 内波动时,3 种分析物的检测灵敏度仅出现微小变化。然而,灵敏度在特定波段的稳定性并不意味着制造误差对光学特性毫无影响,而是表明在给定工艺容差范围内,这种影响处于可控状态。这一特性显著提升了该 PCF 结构的实际制造可行性。



(a) 水



(b) 乙醇



(c) 苯

图7 存在制造误差时,灵敏度随波长的变化

3 结束语

本文设计了一种由圆形与矩形空气孔复合构成的 PCF。该结构由 4 层圆形空气孔包层和纤芯区 5 个矩形空气孔组成。光纤包层采用 4 层四边形排列的圆形空气孔阵列,而纤芯区域则创新性地采用 5 个矩形空气孔替代传统的 9 个圆形空气孔排列。这种结构设计不仅减少了包层圈数、简化了纤芯构型,同时具有良好的工艺可行性。

本文基于有限元方法系统研究了结构参数对 PCF 传感性能的影响规律,并通过参数优化获得了最佳性能配置。实验结果表明,在 1.55 μm 工作波长下,该结构对水、乙醇和苯的检测灵敏度分别达到 71.8%、74.5% 和 75.6%,较现有 PCF 结构提升显著:水检测灵敏度提高 1.26~7.97 倍,乙醇提高 1.24~6.2 倍,苯提高 1.2~5.6 倍。在双折射性能方面,3 种分析物对应的双折射值分别为 3.4×10^{-3} 、 1.97×10^{-3} 、 1.46×10^{-3} ,限制损耗则低至 1.65×10^{-5} 、 3.71×10^{-6} 、 1.77×10^{-6} dB/cm。

这种兼具高灵敏度、高双折射和低损耗特性的 PCF 结构,为化学传感、生物检测及环境监测等领域提供了新的器件解决方案,在生化传感应用方面展现出重要的实用价值。

参考文献:

- [1] GU R F, HONG T L, TIAN Q H, et al. Research on ultra-sensitive refractive index sensor based on a homogeneous polymer nine-liquid-core photonics crystal fiber[J]. Results in Optics, 2021, 5: 100194-1-100194-7.
- [2] VIJAY S C, DHARMENDRA K, GYAN P M, et al. Plasmonic biosensor with gold and titanium dioxide immobilized on photonic crystal fiber for blood composition detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22 (9): 8474-8481.
- [3] SUDHIR K, DILIP K. Lower index liquid chemical detection by using photonic crystal fiber[J]. Sensor, 2022, 64(1): 69-73.
- [4] IBADUL I, BIKASH K P, KAWSAR A, et al. Highly birefringent single mode spiral shape photonic crystal fiber based sensor for gas sensing applications[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2017, 14: 30-38.
- [5] MOUTUSI D, SINGH V K. Magnetic fluid infiltrated dual core photonic crystal fiber based highly sensitive magnetic field sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 61-68.
- [6] SHI Q, JIN H Y, XIAN Z, et al. Highly sensitive temperature sensing based on all-solid cladding dual-core photonic crystal fiber filled with the toluene and ethanol[J]. Optics Communications, 2020, 477(15): 126357-1-126357-9.
- [7] ZHANG Y P, ZHANG X Q, CHU S C, et al. A highly sensitive photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer with full liquid filling[J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(4): 371-382.
- [8] 王晴, 丁毅, 谭策, 等. 液体填充光子晶体光纤长周期光栅双谐振温度传感器的设计与优化[J]. 量子光学学报, 2018, 24(1): 84-92.
- [9] 熊明强, 黄勇林, 詹平, 等. 双侧抛 D 型光子晶体光纤表面等离子体温度传感器[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 23-27.
- [10] YU Z, WEN J S, YI F Q, et al. Fiber liquid-pressure sensor with high sensitivity and a wide measurement range using photopolymer[J]. Optics Letters, 2023, 48(14): 3641-3644.
- [11] 武彪, 刘云东, 陈海良, 等. 基于保偏光子晶体光纤的 Sagnac 干涉温度与应变传感特性[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 54-62.
- [12] ZHANG Y P, ZHANG X Q, CHU S C, et al. A highly sensitive photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer with full liquid filling[J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(4): 371-382.
- [13] ADEMGIL H, HAXHA S. Highly birefringent nonlinear PCF for optical sensing of analytes in aqueous solutions[J]. Optik, 2016, 127(16): 6653-6660.
- [14] SAYED A, KAWSAR A, TOUHID B, et al. Hybrid photonic crystal fiber in chemical sensing[J]. Springer Plus, 2016, 5: 748-759.
- [15] SHADIDUL I, BIKASH K P, KAWSAR A, et al. Liquid infiltrated photonic crystal fiber for sensing purpose: design and analysis[J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(3): 1459-1466.
- [16] MALAVIKA R, PRABU K. Design optimization of a highly sensitive spiral photonic crystal fiber for liquid and chemical sensing applications[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 51: 36-40.
- [17] LEON M J B M, ABEDIN S, KABIR M A. A photonic crystal fiber for liquid sensing application with high sensitivity, birefringence and low confinement loss[J]. Sensors International, 2021, 2: 100061-1-100061-7.
- [18] ZHAO L J, ZHAO H Y, XU Z N, et al. Design of a diagonally symmet-

马依拉木·木斯得克, 阿布都克力木·阿布力孜, 任艳, 等: 1.55 μm 波段处高灵敏度光子晶体光纤设计

rical photonic crystal fiber for chemical sensing[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 271–278.

[19] TIAN L, WEI L, GUO Y F. Numerical simulation for optimizing mode shaping and supercontinuum flatness of liquid filled seven-core photonic crystal fibers[J]. Optics Communications, 2015, 343: 91–96.

[20] GUENNEAU S, NICOLET A, ZOLLA F, et al. Modeling of photonic crystal optical fibers with finite elements [J]. IEEE Transactions on Magnet-ics, 2002, 38(2): 1261–1264.

[21] FUJISAWA T, KOSHIBA M. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers [J]. Optics Express, 2003, 11(13): 1481–1489.

[22] KOTYNSKI R, DEMS M, PANAJOTOV K. Waveguiding losses of micro-structured fibers-plane wave method revisited[J]. Optical and Quantum Electronics, 2007, 39: 469–479.

[23] SELLERI S, VINCETTI L, CUCINOTTA A, et al. Complex FEM modal solver of optical waveguides with PML boundary conditions[J]. Optical and Quantum Electronics, 2001, 33(4-5): 359–371.

[24] EMILIYANOV G, HIBY P E, PEDERSEN L H, et al. Selective serial multi-antibody biosensing with TOPAS microstructured polymer optical fibers[J]. Sensors, 2013, 13(3): 3242–3251.

[25] 谭芳, 许鹏飞, 周德春, 等. 高非线性 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 光子晶体光纤性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0306003-1–0306003-8.

[26] BRILLAND L, SMEKTALA F, RENVERSEZ G, et al. Fabrication of complex structures of holey fibers in chalcogenide glass [J]. Optics Express, 2006, 14(3): 1280–1285.

[27] LIU Y D, JING X L, LI S G, et al. Design of a single-polarization filter based on photonic crystal fiber with gold film on the inner wall of two ultra-large holes[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114: 114–121.

[28] HEIKE E H, TANYA M M. Extrusion of complex preforms for microstructured optical fibers[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15086–15092.

[29] HICHAM E H, YOUCEF O, LAURENT B, et al. Sol-gel derived ionic copper-doped microstructured optical fiber: a potential selective ultraviolet radiation dosimeter[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29751–29760.