

新型高双折射率高灵敏度光子晶体光纤设计

马依拉木·木斯得克¹, 薛煜阳¹, 哈里旦木·阿布都克里木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: 针对现有光子晶体光纤(PCF)结构复杂、不易制造且灵敏度低的问题, 设计了一种用于液体传感的新型高双折射率高灵敏度 PCF。这种光纤的纤芯中引入了 2 种尺寸不同的椭圆形空气孔, 而包层则是由相同尺寸的圆形空气孔按四边形排列组成的。利用有限元法结合完美匹配层边界条件, 借助 COMSOL Multiphysics 模拟软件对该 PCF 进行了数值模拟。将水作为传感液体注入纤芯, 在 1.3~1.8 μm 的波段范围内对光纤的双折射、限制损耗以及灵敏度进行了详细的分析。研究结果表明: 随着波长的增加, 新型 PCF 的双折射率达到了 10^{-2} 数量级; 在波长为 1.3 μm 时, 其灵敏度高达 54.4%, 相较于已有 PCF, 提升幅度高达 1.1~2.5 倍。

关键词: 光子晶体光纤; 有限元法; 双折射; 灵敏度

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0067-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of a novel high birefringence and high sensitivity photonic crystal fiber

MAYILAMU Musideke¹, XUE Yuyang¹, ABUDUKELIMU Halidanmu¹, YAO Jianquan²

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

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

Abstract: A novel high birefringence sensitivity photonic crystal fiber(PCF) for liquid sensing is designed to address the issues of complex structure, difficulty in manufacturing, and low sensitivity of existing PCF. The core of this optical fiber introduces two different sizes of elliptical air holes, and the cladding is composed of circular air holes of the same size arranged in a square-lattice. By combining finite element method with perfectly matched layer boundary conditions, the PCF is numerically simulated using COMSOL Multiphysics simulation software. Water is injected into the fiber core as a sensing liquid, and the birefringence, confinement loss, and sensitivity of the fiber are analyzed within the working wavelength range of 1.3~1.8 μm . The research results indicate that as the wavelength increases, the birefringence of the new PCF reaches the order of 10^{-2} . At a wavelength of 1.3 μm , its sensitivity is as high as 54.4%, which is 1.1~2.5 times higher than the existing PCF.

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

0 引言

由于光子晶体光纤(PCF)具有结构设计灵活、高双折射率、低限制损耗、高灵敏度、超平坦色散和非线

收稿日期: 2024-02-29。

基金项目: 国家“973”计划(批准号: 2010CB327801)资助; 高层次人才专项项目(批准号: 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。主持了 3 项省部级项目和 1 项高层次人才专项项目, 并参与了多项省部级项目。主要研究方向为光子晶体光纤传输与传感技术, 以及人工智能与光纤传感相结合的相关领域。



性效应等特性, 因而在传感领域中得到了广泛应用。目前, 在 PCF 空气孔中填充气体、液体或金属材料的技术已广泛应用到多个领域, 包括温度传感^[1-4]、化学传感^[5-6]、生物传感^[7]以及光通信^[8-9]等, 充分展现了其多样化的实用价值和广阔的应用前景。双折射是一种独特的光学特性, 它通过增大光与被分析物的相互作用来提高 PCF 的灵敏度^[10]。高双折射率 PCF 在非线性光学和光纤传感等领域展现出卓越的性能, 尤其是在抵抗温度变化和震动干扰方面, 其提升了传感器的稳定性和可靠性。因此, 设计和开发具备高双折射率性能的光纤传感器不仅具有重要的科研价值, 在实际应用

马依拉木·木斯得克,薛煜阳,哈里旦木·阿布都克里木,等:新型高双折射率高灵敏度光子晶体光纤设计

中也显示出巨大的发展潜力。近年来,学者们通过向光纤的纤芯或包层中注入不同的分析物,以提高其双折射特性和灵敏度,并成功提出了多种结构的 PCF。

2015 年, HUSEYIN A 等人^[11]设计了一种在纤芯引入六边形排列的椭圆形空气孔的光纤结构,在纤芯中填充水、苯和乙醇,对光纤的双折射和灵敏度进行了分析。当传感液体为水时,在 0.7~1.7 μm 波段内光纤的双折射率达到了 10^{-3} 数量级,但在波长为 1.3 μm 时光纤的灵敏度仅为 22%。2017 年, ARIF M F 等人^[12]设计了一种在纤芯引入 11 个椭圆形空气孔的 PCF。当传感液体为水时,在 0.9~1.8 μm 波段内光纤的双折射率达到了 10^{-3} 数量级,在波长为 1.3 μm 时光纤的灵敏度为 38%,但其结构较为复杂。2018 年, ISLAM M S 等人^[13]设计了一种在纤芯中加入 2 种尺寸的 9 个圆形空气孔的 PCF,这些孔分别填充了水、乙醇和苯,并对光纤的灵敏度进行了分析。当波长为 1.3 μm 且传感液体为水时,光纤的灵敏度达到了 48.19%,不过该结构较为复杂。2019 年, FAIZUL H A 等人^[14]设计了一种在纤芯引入一个椭圆形空气孔并在其中填充水的 PCF 结构,在 0.6~1.6 μm 波段内光纤的双折射率达到了 10^{-3} 数量级,但在波长为 1.3 μm 时光纤的灵敏度仅能达到 41.36%。2020 年, LEON M J B M 等人^[15]设计了一种在纤芯引入大小不同的 4 个圆形空气孔并在其中填充水的 PCF 结构,在 1.3~2.0 μm 波段内光纤的双折射率达到了 10^{-3} 数量级,在波长为 1.3 μm 时光纤的灵敏度达到了 49.13%,但在整个研究波段内光纤性能不稳定。2022 年, 赵丽娟等人^[16]设计了一种对角对称 PCF 结构,包层由大小不同的圆形空气孔和椭圆形空气孔组成,并分别填充水、苯和乙醇等液体进行研究。在波长 1.3 μm 处,光纤的灵敏度仅为 46.5%,且这种光纤结构很复杂,不易制造。

以上设计的光纤在波长 1.3 μm 处的灵敏度都相对较低,要实现具有高灵敏度和高双折射率的光纤,则需要研究新型的 PCF 结构。因此,本文设计一种在纤芯引入 5 个椭圆形空气孔而包层空气孔数量较少的新型高双折射率高灵敏度 PCF。

1 新型高双折射率高灵敏度 PCF 结构设计

设计一种结构简单、易于制造的光纤结构,关键在于精确控制包层环的数量以及纤芯中引入的空气孔的形状和数量。通常情况下,包层环数量越多,制造难度会相应增大。因此,本文设计了一种较为简单的液体传感 PCF 结构,光纤结构横截面以及纤芯部分的

放大图如图 1 所示。包层由 4 层大小相同的圆形空气孔按照四边形排列组成,圆形空气孔的直径为 d 。纤芯引入 2 种尺寸的椭圆形空气孔,椭圆率分别为 $\eta_1=b_1/\alpha_1$ (长轴为 α_1 ,短轴为 b_1) 和 $\eta_2=b_2/\alpha_2$ (长轴为 α_2 ,短轴为 b_2),目的是增大结构的不对称性以改善光纤性能。2 个相邻圆形孔之间的距离 Λ 为 1.24 μm ,相邻大椭圆形空气孔的间距 p_1 为 0.413 μm ,2 个小椭圆形空气孔的间距 p_2 为 3.12 μm 。石英玻璃作为背景材料(折射率为 1.45)。在仿真模拟中,为了同时提升计算精度、效率以及结果的可靠性,本文采用了细化网格。其中,所采用的最大网格单元尺寸为 0.802 μm ,这一尺寸为波长 (1.3~1.8 μm) 的 802/1 800~802/1 300。

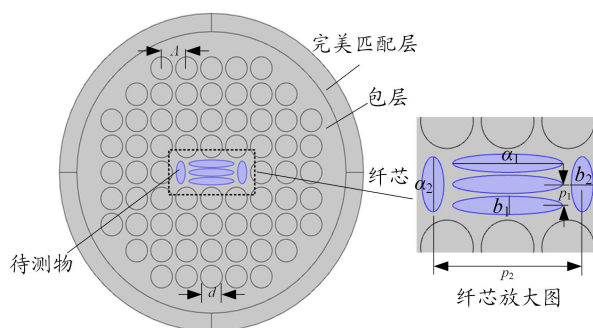


图 1 PCF 结构横截面以及纤芯放大图

2 基本理论

由麦克斯韦方程可得电场 $\vec{E}$ 满足的波动方程^[17]如下:

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

其中, κ_0 为真空的波数, $\kappa_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; ϵ_r 和 μ_r 分别为介质的相对介电常数和相对磁导率, ∇ 是向量微分算子(梯度、散度、旋度)。为了精确模拟空气孔边界,常选取线混合边界或节点为模拟元胞,将光纤端面分成许多元胞,利用式(1)对这些元胞进行求解,可以得到元胞的本征值方程,即

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

其中, n_{eff} 为 PCF 的基模有效折射率, 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 n_{eff} 。

模式双折射定义为 x 和 y 偏振模式的有效折射率实部之差的绝对值,计算公式^[18]如下:

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{\kappa_0} = \frac{2\pi |\beta_x - \beta_y|}{\lambda} = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^y)| \quad (3)$$

其中, B 为 PCF 的双折射率, n_{eff}^x 、 n_{eff}^y 分别为 x 偏振和 y

偏振的有效折射率, β_x 、 β_y 分别为 x 偏振和 y 偏振的传播常数。

限制损耗是光子晶体光纤实用化的重要参数之一。限制损耗可以利用基模的有效折射率的虚部来计算,其表达式^[9]为

$$L_c = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (4)$$

其中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部。

相对灵敏度 r 的计算公式^[10]如下:

$$r = \frac{n_r}{n_{\text{eff}}} f \quad (5)$$

其中, n_r 为待测材料的折射率; f 为总功率分数,其表达式^[16]为

$$f = \frac{\int_S \text{Re}(E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\int_T \text{Re}(E_x H_y - E_y H_x) dx dy} \quad (6)$$

其中, E_x 、 E_y 为电场模式, H_x 、 H_y 为磁场模式, S 为纤芯椭圆空气孔区域, T 为光纤结构的整体区域。

3 模拟结果与分析

本文将水(折射率为 1.33)作为分析物注入纤芯的 PCF, 采用有限元法与完美匹配层吸收边界条件相结合, 使用 COMSOL Multiphysics 模拟软件对该 PCF 进行了数值模拟。为了实现高双折射率与高灵敏度, 通过调整光纤的结构参数 $\eta_1=0.16$ 、 $\eta_2=0.4$ 、 $d=1.2 \mu\text{m}$ 、同时保持 Λ 、 p_1 和 p_2 不变, 对双折射、限制损耗、相对灵敏度等关键性能进行了分析和优化。在波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时, x 偏振和 y 偏振的模场分布如图 2 所示。可以看出, 当纤芯填充液体时, 基模的模场分布被有效地限制在光纤的纤芯区域内, 这充分证明了该结构对光波有很好的限制作用。此外, 在 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段内, 相对应的 x 偏振和 y 偏振的有效折射率的变化情况如图 3 所示。可以看出, 随着波长的增大, 基模的有效折射率逐渐降低。

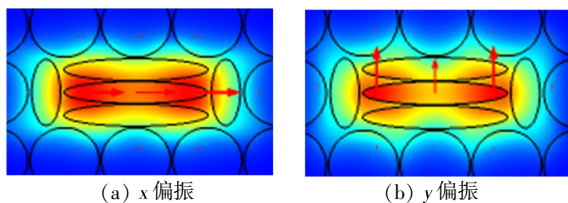


图2 模场分布

由于纤芯孔的形状和分析物的折射率增强了光纤结构的不对称性, 光在纤芯内的传播受到了纤芯孔

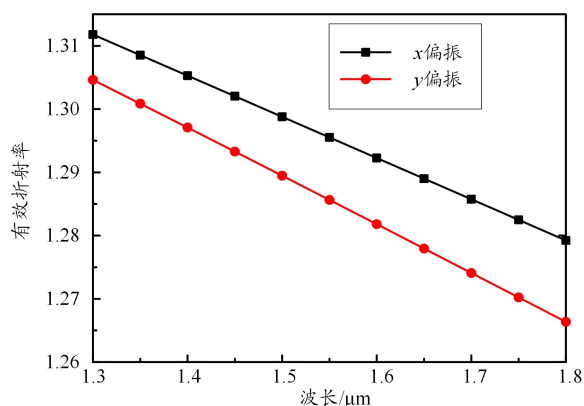


图3 有效折射率随工作波长的变化

形状、背景材料以及测试分析物折射率的影响。根据式(3)可知, 光在不同偏振方向上的传播差异决定了所设计的光纤结构的双折射率。在 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段内, 相对应的双折射率随波长的变化关系如图 4 所示。可以看出, 随着波长的增大, 双折射率逐渐增大, 并且达到了 10^{-2} 数量级, 在工作波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时, 双折射率为 7.17×10^{-3} 。这说明在纤芯中引入的椭圆空气孔设计增强了纤芯的非对称性, 从而促进了该光纤结构双折射率的显著提升。

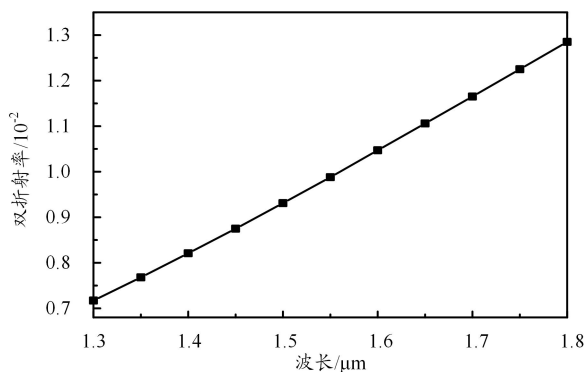


图4 分析物水的双折射随波长的变化

为了分析限制损耗随结构参数的变化规律, 本文根据式(4)对基模的限制损耗进行了计算。在 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段内, 得到相对应的限制损耗随波长的变化如图 5 所示。可以看出, 限制损耗随着波长的增大逐渐增大, 表明限制损耗与波长之间存在正相关关系; 在结构参数保持不变时, x 偏振限制损耗低于 y 偏振, 这说明光纤结构在 x 方向上的不对称相较于 y 方向更为显著; 在波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时, x 偏振限制损耗为 $2.96 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 。

灵敏度是反映传感器快速感知能力的重要参数, 由式(5)、式(6)计算可得。在 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段内, 相对应的灵敏度曲线如图 6 所示。可以看出, 灵敏度随着波长的增大而逐渐减小, 在波长 $1.3 \mu\text{m}$ 处, 光纤的灵敏

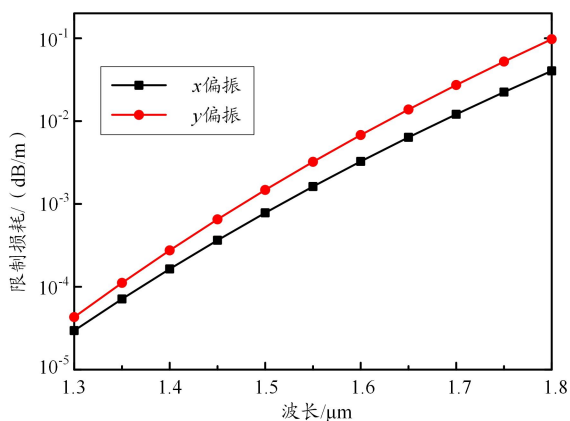


图5 限制损耗随工作波长的变化

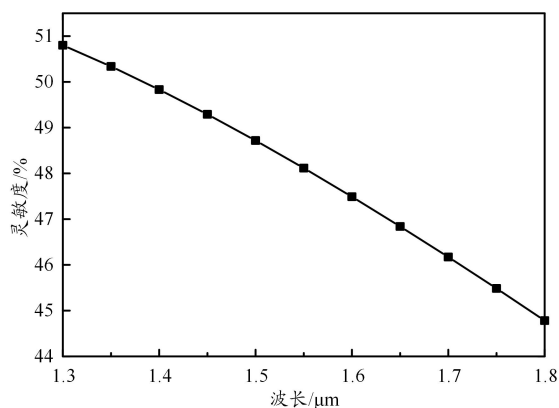


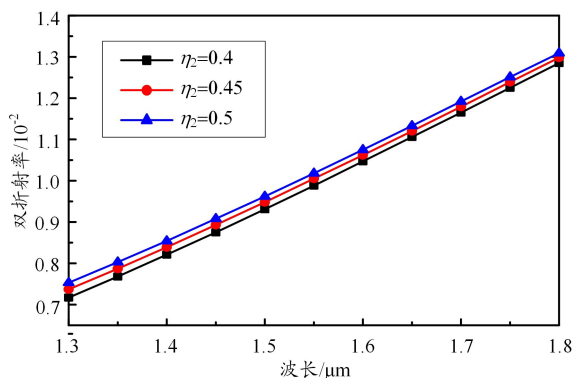
图6 灵敏度随工作波长的变化

度为50.8%。这表明该光纤结构在较长波长范围内对水的感知能力相对较弱，但在短波长处对水的感知能力较为出色。

由于基于PCF的传感器性能会受到孔距离(称为间距)、孔直径以及芯和包层中的孔数和环数等多个参数的影响，孔的形状对传感器的性能也会产生巨大影响。因此，通过设计纤芯孔的尺寸和形状可以进一步改善光纤的双折射、灵敏度和限制损耗等特性^[20]。在设计过程中，确保包层或纤芯区域的空气孔不相互重叠至关重要，这有助于维持光纤结构的完整性和稳定性，进而确保其优良的性能。因此，本文在上述PCF结构的基础上，通过调整纤芯和包层参数，进一步分析了椭圆率、圆形空气孔直径对双折射、灵敏度和限制损耗等特性的影响。

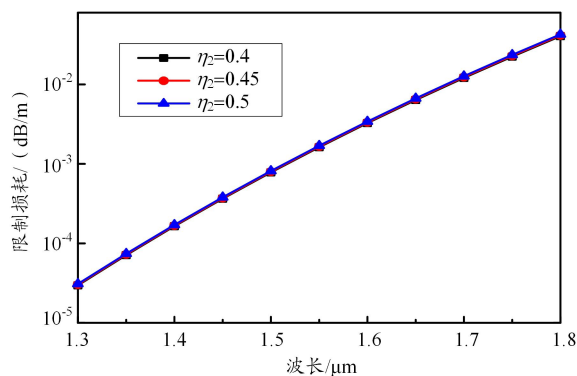
3.1 椭圆率的影响

在结构参数 $\eta_1=0.16$ 、 $d=1.2\ \mu\text{m}$ 时，保持 Λ 、 p_1 和 p_2 不变，椭圆率 η_2 可变(椭圆率的变化将影响光纤纤芯的不对称性)，得到双折射率随波长的变化关系如图7所示。可以看出，双折射率在 $1.3\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波段内随着波长的增大而增大；当波长相同时，双折射率随椭圆率的增大而减小。这表明椭圆率的增大，使光纤结构的纤芯对模式的挤压效应逐渐增强。这种挤压不仅加剧了纤芯的不对称性，还导致了包层的不对称性。此时， x 、 y 偏振模式的有效折射率差异增大，从而将双折射效应提升到了 10^{-2} 数量级。这相较于文献 [11–12, 14–15] 的PCF结构中的双折射率有了明显的改进。例如，当 $\eta_2=0.5$ 时，在波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 时，双折射率达到 7.53×10^{-3} 。

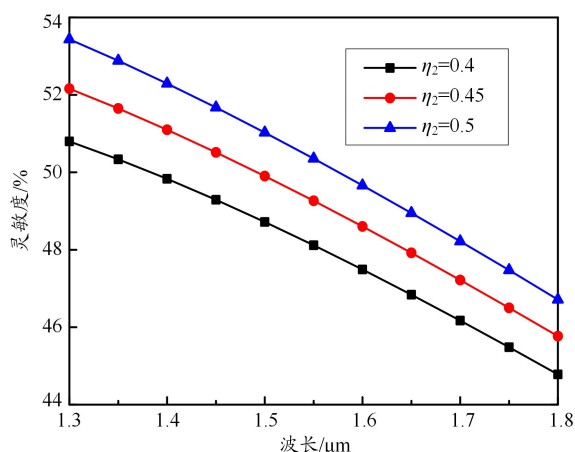
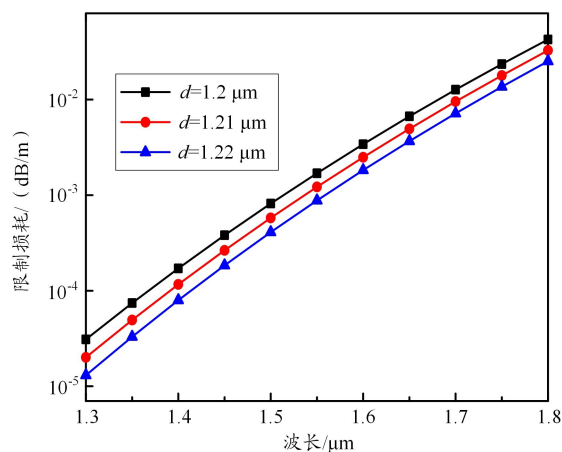
图7 双折射与椭圆率 η_2 和波长的关系

限制损耗与椭圆率 η_2 和工作波长的关系如图8所示。可以看出，在 $1.3\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波段内，随着波长的增大，限制损耗呈现出逐步上升的趋势。这一现象表明，随着波长的增大，包层泄露的光的能量逐渐增多，导致光纤结构对光的约束能力减弱。然而，椭圆率 η_2 的变化对限制损耗的影响并不显著，在不同的椭圆率下，同一波长处的限制损耗相差甚微。在波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 时，限制损耗均在 $10^{-5}\ \text{dB/m}$ 数量级。例如，当 $\eta_2=0.5$ 时的限制损耗为 $3.09\times 10^{-5}\ \text{dB/m}$ 。

限制损耗与椭圆率 η_2 和工作波长的关系如图8所示。可以看出，在 $1.3\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波段内，随着波长的增大，限制损耗呈现出逐步上升的趋势。这一现象表明，随着波长的增大，包层泄露的光的能量逐渐增多，导致光纤结构对光的约束能力减弱。然而，椭圆率 η_2 的变化对限制损耗的影响并不显著，在不同的椭圆率下，同一波长处的限制损耗相差甚微。在波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 时，限制损耗均在 $10^{-5}\ \text{dB/m}$ 数量级。例如，当 $\eta_2=0.5$ 时的限制损耗为 $3.09\times 10^{-5}\ \text{dB/m}$ 。

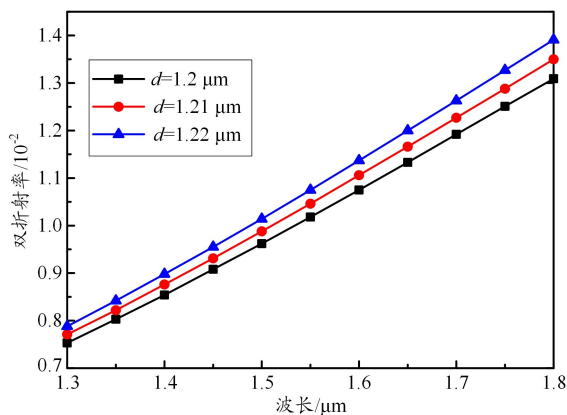
图8 限制损耗与椭圆率 η_2 和波长的关系

当椭圆率 η_2 改变时，灵敏度随着波长的变化如图9所示。可以看出，在 $1.3\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波段内，灵敏度随着波长的增大而逐渐降低；当波长相同时，椭圆率越大，灵敏度越高。这表明纤芯引入的空气孔大小直接

图9 灵敏度与椭圆率 η_2 和波长的关系图11 限制损耗与圆形空气孔直径 d 和波长的关系

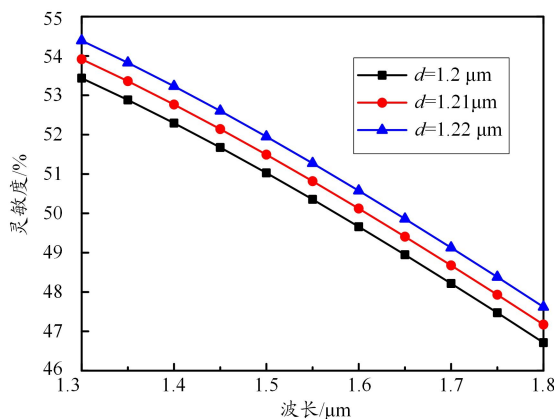
3.2 圆形空气孔直径的影响

在结构参数 $\eta_1=0.16$ 、 $\eta_2=0.5$ 时,保持 Λ 、 p_1 和 p_2 不变,圆形空气孔直径 d 取不同值,得到双折射率随波长的变化关系如图 10 所示。可以看出,在 1.3~1.8 μm 波段内,双折射率随着波长的增大逐渐增大;当波长相同时,圆形空气孔直径 d 越大,双折射率也越大。这表明光纤结构中圆形空气孔的直径 d 越大,其结构的不对称性就越显著,进而导致双折射性能增强。当 $d=1.22 \mu\text{m}$ 时,在波长为 1.3 μm 时,双折射率为 7.9×10^{-3} 。因此,调节包层空气孔和纤芯椭圆率的大小,可以优化光纤的双折射率性能。

图10 双折射率与圆形空气孔直径 d 和波长的关系

限制损耗与圆形空气孔直径 d 和波长的关系如图 11 所示。可以看出,在 1.3~1.8 μm 波段内,限制损耗随着波长的增长而逐渐增大;当波长相同时,直径越大,限制损耗越小。这表明当包层空气孔的直径增大时,能够更好地约束光波在光纤内的传播,减少光能量的泄露,从而降低限制损耗。因此,通过优化包层孔直径,不仅可以增大灵敏度和双折射,还能有效地降低限制损耗。当 $d=1.22 \mu\text{m}$ 时,在波长为 1.3 μm 时,限制损耗最低为 $1.3 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 。

灵敏度与圆形空气孔直径 d 和波长的关系如图 12 所示。可以看出,在 1.3~1.8 μm 波段内,灵敏度随着波长的增大逐渐减少;当波长相同时,灵敏度随着直径的增大而逐渐增大。这表明较大的空气孔直径能优化光纤的灵敏度性能。例如,当 $d=1.22 \mu\text{m}$ 时,在波长为 1.3 μm 时,灵敏度值为 54.4%,与以往的 PCF^[11-16] 相比,灵敏度提高了 1.1~2.5 倍。

图12 灵敏度与圆形空气孔直径 d 和波长的关系

4 结束语

本文提出了一种结构简单的新型四边形 PCF,在其纤芯椭圆形空气孔中注入水作为分析物,旨在实现短波长范围内的液体传感应用。本文利用有限元法结合完美匹配层,借助 COMSOL Multiphysics 软件进行了详尽的数值模拟。在 1.3~1.8 μm 波段内,通过优化结构参数,探讨了光纤结构对双折射、灵敏度以及限制损耗等关键特性的影响。研究结果表明:该光纤结构在 1.3~1.8 μm 波段内,双折射率提升到 10^{-2} 数量级;在波长为 1.3 μm 时,得到了 7.9×10^{-3} 的高双折射率、54.4% 的高灵敏度和 $1.3 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 的较低限制损耗。该光纤明显优于目前已有的 PCF 性能。因此,本文

马依拉木·木斯得克,薛煜阳,哈里旦木·阿布都克里木,等: 新型高双折射率高灵敏度光子晶体光纤设计

影响灵敏度。所设计的光纤结构不仅在短波长范围内适用于化学、生物传感应用,而且在温度传感、光通信等多个领域具有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] LIU X Y, BIN Y, Li H S, et al. Highly sensitive sensor for simultaneous underwater measurement of salinity and temperature based on highly birefringent asymmetric photonic crystal fiber[J]. Results in Optics, 2023, 11: 100406-1-100406-12.
- [2] 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.
- [3] 赵丽娟, 吴雨静, 徐志钮, 等. 一种基于光子晶体光纤的高灵敏度 Sagnac 型温度传感器建模研究[J]. 光子学报, 2023, 52(2): 111-123.
- [4] HOSSAIN M S, MOHAMMAD F. Theoretical Investigation of mid infrared temperature sensor based on sagnac interferometer using chloroform filled photonic crystal fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(21): 24157-24165.
- [5] SUDHIR K, DILIP K. Lower index liquid chemical detection by using photonic crystal fiber sensor[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 64(1): 69-73.
- [6] ISLAM I, PAUL B K, AHMED K, 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.
- [7] FARHAN M. Detection of critical cancer cells in human organs using dual demodulation photonic crystal fiber: numerical study [J]. Results in Optics, 2023, 12: 100493-1-100493-9.
- [8] LV L L, LIU Q, XUE P S. The sensing characteristics of microstructure-core photonic crystal fiber filled with liquid based on sagnac interferometer [J]. Results in Physics, 2020, 18: 103198-1-103198-6.
- [9] VAN B C, HAI T T, THAO N T, et al. Experimental study of supercontinuum generation in water-filled-cladding photonic crystal fiber in visible and near-infrared region[J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 3(55): 1-14.
- [10] ARIF M F H, AHMED K, ASADUZZAMAN S, et al. Design and optimization of photonic crystal fiber for liquid sensing applications[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(3): 279-288.
- [11] HUSEYIN A, SHYQYRI H. PCF based sensor with high sensitivity, high birefringence and low confinement losses for liquid analyte sensing applications [J]. Sensors, 2015, 15(12): 31833-31842.
- [12] ARIF M F H, BIDDUT M J H. Enhancement of relative sensitivity of photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss [J]. Optik, 2017, 131: 697-704.
- [13] ISLAM M S, PAUL B K, AHMED K, et al. Liquid-infiltrated photonic crystal fiber for sensing purpose: design and analysis [J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(3): 1459-1466.
- [14] FAIZUL H A, MOHAMMAD M H, NAZRUL I, et al. A nonlinear photonic crystal fiber for liquid sensing application with high birefringence and low confinement loss [J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2019, 22: 1-7.
- [15] LEON M J B M, KABRR M A. Design of a liquid sensing photonic crystal fiber with high sensitivity, birefringence & low confinement loss[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2020, 28: 100335-1-100335-7.
- [16] 赵丽娟,赵海英,徐志钮,等. 一种可用于化学传感的对角对称光子晶体光纤设计[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 269-278.
- [17] 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.
- [18] 师东方,惠战强,韩冬冬,等. 类摩天轮型多孔纤芯超高双折射率太赫兹光子晶体光[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1006002-1-1006002-9.
- [19] BING P B, SUI J L, WU G F, et al. Analysis of dual-channel simultaneous detection of photonic crystal fiber sensors[J]. Plasmonics, 2020, 15(4): 1071-1076.
- [20] ADEMGIL H, HAXHA S. Highly birefringent nonlinear PCF for optical sensing of analytes in aqueous solutions[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(16): 6653-6660.