

双圆环套管叠加双直板空芯反谐振光纤研究

邓宇翔,葛志辉,张振荣*

(广西大学 计算机与电子信息学院,南宁 530004)

摘要:为提升太赫兹频段光纤的传输性能并兼顾高双折射与低损耗,设计了一种双圆环套管叠加双直板的空芯反谐振光纤结构。该结构通过引入双直板实现几何非对称性,增强双折射特性,并采用有限元法对关键几何参数(如板间距、板厚度及包层直径等)进行系统优化。仿真结果表明:在1 THz频率下,所提光纤的双折射值达到 4.5×10^{-4} ,且在0.84~1.1 THz宽频带内双折射始终高于 10^{-4} ,总损耗维持在较低水平;同时,该结构在弯曲半径低至0.3 m时仍具备良好的抗弯性能。

关键词:特种光纤;保偏光纤;空心反谐振光纤;双折射;太赫兹

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0096-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.018

Research on a hollow-core anti-resonant fiber with dual circular rings and dual straight plates

DENG Yuxiang, GE Zhihui, ZHANG Zhenrong*

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To enhance the transmission performance of optical fibers in the terahertz band and achieve a balance between high birefringence and low loss, a hollow-core anti-resonant fiber structure featuring dual circular rings superimposed with dual straight plates is designed. This structure introduces geometric asymmetry through the dual straight plates to enhance the birefringence characteristics. Systematic optimization of key geometric parameters (such as plate spacing, plate thickness, and cladding diameter) is performed using the finite element method. Simulation results indicate that at 1 THz, the proposed fiber achieves a birefringence value of 4.5×10^{-4} . Furthermore, within the broad bandwidth of 0.84~1.1 THz, the birefringence remains consistently higher than 10^{-4} , while the total loss stays at a low level. Additionally, the structure exhibits good bending resistance even at a bending radius as low as 0.3 m.

Key words: specialty fiber, polarization-maintaining fiber, hollow-core anti-resonant fiber, birefringence, Terahertz

0 引言

空芯反谐振光纤凭借其独特的导光机制,能够使特定波长的光在空气芯中形成共振反射,同时抑制其它波长的传输,因而在低损耗^[1]、低非线性^[2]与高损伤

阈值^[3]等方面展现出显著优势,被广泛应用于高功率激光传输^[4]、长距离光学通信^[5]以及高光束质量的精密测量^[6]等领域。该类光纤通过结构不对称性有效抑制模式耦合并引入双折射,使其在光纤陀螺、量子密钥分发和光学相干断层成像等应用中具有重要价值^[7-8]。特别是在光纤传感与量子通信等领域,保偏光纤的设计具有至关重要的意义^[9-10]。

近年来,太赫兹频段(0.1~10 THz)因其在材料穿透性与分子指纹谱识别方面的独特优势,受到广泛关注。太赫兹波对应波长约为300 μm ,能够穿透部分非导电材料,且对多种生物及化学样品具有特征吸收,因此发展低损耗的太赫兹波导成为研究热点。目前,常用于太赫兹波导的低损耗聚合物材料包括Topas^[11]、

收稿日期:2024-10-30。

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科AB24010203)资助。

作者简介:邓宇翔(2001—),男,硕士研究生,现就读于广西大学计算机与电子信息学院计算机技术专业,主要从事太赫兹通信,光纤光缆等方面的研究。曾荣获校级奖学金和院级奖学金,具有软件设计师中级证书。

*通信作者:张振荣(1976—),男,博士,教授,主要研究方向为通信网络及光纤传感技术。



PMMA^[12]、Teflon^[13]、HDPE^[14]与 Zeonex^[15]等, 它们被广泛用于构建太赫兹成像与传感系统中的信号传输通道^[16]。

然而, 现有空芯反谐振光纤在结构设计、双折射性能与机械强度等方面仍存在明显不足。在制备工艺上, 传统堆积拉丝法^[17]通常局限于圆形、半圆形或直板等简单构型, 难以实现复杂截面设计; 而3D打印技术^[18]虽具备结构自由度高的优点, 但在微米尺度下加工精度不足, 材料选择受限, 且表面粗糙度较高。在光学性能方面, 仅依赖反谐振机制的空芯光纤难以实现高于 10^{-4} 量级的稳定双折射。此外, 部分研究尝试在纤芯区域引入微结构以增强双折射(如提升至 10^{-2}), 但往往以牺牲机械强度和弯曲性能为代价, 限制了其实际应用潜力。

针对上述问题, 本文设计一种双圆环套管叠加双直板的空芯反谐振光纤结构。

1 光纤结构设计

在空芯光纤设计中, 常见的结构元件包括圆环、半圆环和直板3种预制件^[19]。其中, 圆环结构需要精确控制半径和壁厚, 依赖复杂的气压调控以避免结构粘连或失稳; 而直板结构则因加工稳定性高、几何控制精确, 被广泛应用于空芯光纤和微结构光纤中, 并已被证明具有优异的可行性与稳定性^[20]。基于此, 本文在传统反谐振光纤的基础上引入双直板结构, 以实现加工简便、结构稳固且具有高双折射特性的光纤设计。本文设计的双圆环套管叠加双直板空芯反谐振光纤结构如图1所示。

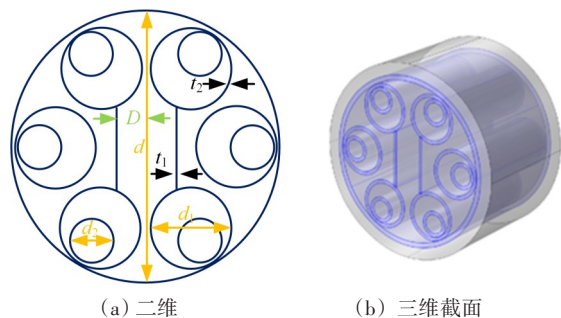


图1 所提光纤结构

该光纤由 Topas 材料与空气孔组成, 其结构参数包括核心直径 d 、内外圆环直径 d_1 与 d_2 、直板厚度 t_1 、圆环壁厚 t_2 以及直板与核心的间距 D 等。这些几何参数共同决定了光纤的模式分布、反谐振条件及损耗性能。双直板的引入在 x 、 y 方向上形成了几何非对称性, 从而有效增强了光纤的双折射性能, 有利于偏振

态的稳定传输。减小核心尺寸 D 可以进一步提升双折射特性, 但也会导致光场与包层的耦合增强, 增加散射损耗; 而壁厚 t_1 、 t_2 的调控则直接影响反谐振效应及材料损耗。为兼顾性能与加工可行性, 本文依据文献[7]提出的最佳外层与内层半径比值为0.5的设计准则, 采用统一的圆环壁厚, 从而简化制造过程并降低成本。由于太赫兹波段的光纤通常需要较大的结构尺寸, 传统拉丝法难以实现, 因此本文采用3D打印技术进行制造^[21]。该技术已被广泛应用于太赫兹空芯反谐振光纤的制备^[22-23], 本文所设计的双直板结构也非常适合通过这种叠加制造技术实现^[24-25]。此外, 利用 Topas 材料进行3D打印的实验已证实, 该方法具备良好的可制造性与结构一致性^[26]。

2 理论分析与仿真方法

2.1 理论分析

本文提出的双圆环套管叠加双直板空芯反谐振光纤, 其结构非对称性是实现高双折射的关键。双直板结构在 x 和 y 方向引入了几何差异, 使2个正交偏振模式的有效折射率产生显著区别, 从而增强了双折射效应。基于该结构特点, 以下将分析其导波机理及相关性能参数。

在低损耗空芯光纤中, 光场通常呈圆形分布。这是因为圆对称结构能更好地维持光模式的稳定性, 使光波在传播过程中均匀分布于纤芯内部, 不易被纤芯与包层边界散射或吸收。这种圆对称性有助于形成高斯光束分布, 即光场能量集中于中心并向外逐渐衰减, 从而较好地保持能量集中于纤芯, 减少与包层边界的相互作用, 降低散射损耗。

另一方面, 大多数空芯保偏光纤则利用几何结构的不对称性来引入保偏特性。在此类结构中, 非圆对称的光场实现了偏振模式的有效分离, 2个正交方向上的折射率差异导致不同偏振态的光以不同速度在纤芯中传播, 产生双折射效应。双折射大小通常表示为不同偏振方向的有效折射率之差, 计算公式如下:

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \quad (1)$$

其中, Δn 为光纤的双折射大小, $n_{\parallel}$ 为沿光纤核心轴方向的折射率, $n_{\perp}$ 为沿光纤截面平面方向的折射率。然而, 非圆对称结构往往会增强光场与纤芯边界的相互作用, 从而引入更大的散射损耗。为在低损耗前提下利用几何不对称性增强双折射, 本文在现有低损耗太赫兹光纤仿真结构基础上, 引入了2个平行直板。该设计旨在改变光纤的对称性, 同时控制损耗水平。双

直板结构增大了壁面附近的能量分数差异,在提升双折射的同时也可能增加材料损耗,因此需在二者之间取得平衡。在反谐振导光机制中,包层内的圆环与直板等薄壁结构通过满足反谐振条件,将光场限制于空芯中传输。反谐振条件与壁厚密切相关,对于反谐振壁环厚度为 t 的壁结构,其反谐振频率可表示为

$$f_m = \frac{mc}{2t\sqrt{n^2 - 1}} \quad (2)$$

其中, n 、 m 、 c 分别为材料折射率、反谐振阶数、光速。

在材料选择方面,Topas 因其在太赫兹频段的优良性能成为本文首选材料。与其它候选材料(如 PMMA 和 Teflon)相比,Topas 在 0.1~1.5 THz 频段内具有较低的材料损耗和较为稳定的折射率, $n=1.5258$ 。此外,其材料损耗 α_{EML} 与频率 f_m 近似呈线性关系,可表示为 $\alpha_{\text{EML}}=0.36(f_m-0.4)+0.06^{[21]}$,表明其在太赫兹波段内的损耗相对可控。

光纤中的反谐振导光机制依赖于包层中薄壁圆环对光场的反射作用。当满足反谐振条件时,光场被限制在空芯中传播,从而显著降低泄漏损耗。通过合理设计包层厚度与圆环尺寸,可在目标频段形成强反谐振效应,确保信号高效传输。

2.2 仿真方法

本文采用有限元法进行数值模拟,以确保结果的精度与可靠性。在模型边界处设置完美匹配层,用于吸收外向辐射波,避免反射干扰。为保障仿真收敛,空气区域与 Topas 材料区域分别采用 $\lambda/4$ 与 $\lambda/10$ (λ 表示波长)的网格划分尺度。针对完美匹配层区域,参考了文献^[27-28]中的经验参数对吸收边界进行优化,使数值解与已报道的实验结果相符^[25,29]。

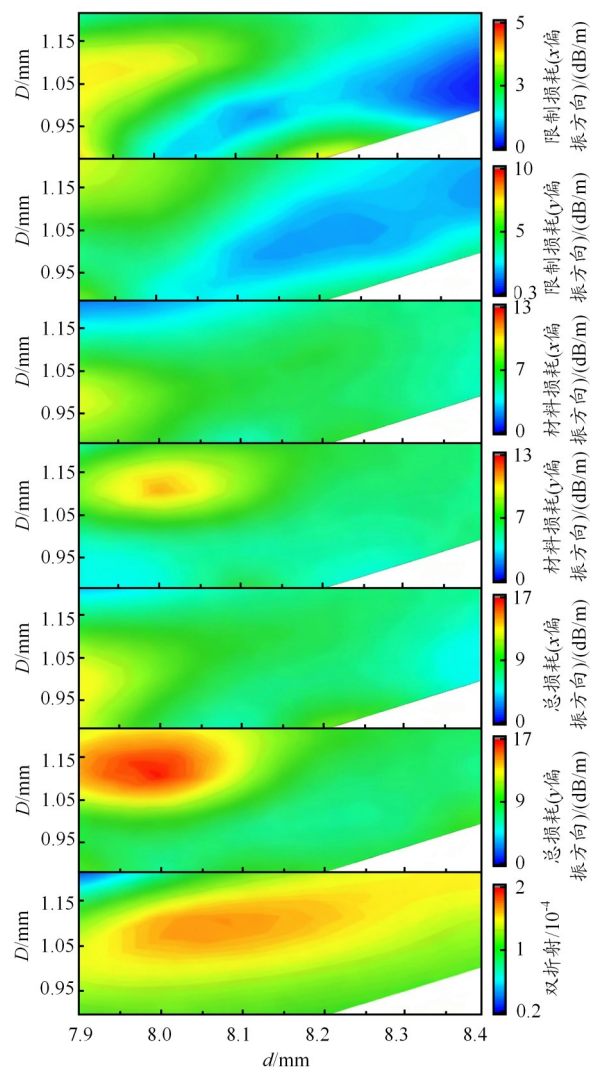
3 参数优化与性能分析

3.1 关键几何参数优化

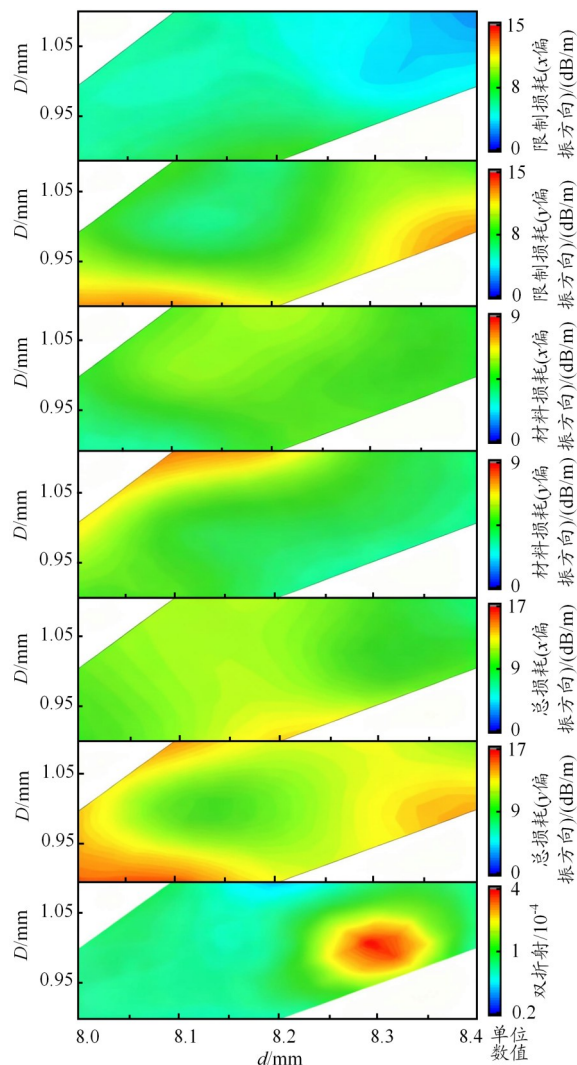
本文直接采用了文献[20]中为最小化损耗而设计的基础模型及其优化参数。初始阶段,将内、外圆环直径 d_1 、 d_2 与圆环壁厚 t_2 分别固定为 2.6、1.3、0.09 mm。为进一步改善传输特性,本文根据光纤在 2 种主要弯曲方向(X 弯曲方向、 Y 弯曲方向)下的弯曲损耗情况(如图 2 所示),确定包层直径 d 、板间距 D 与板厚度 t_1 的最优值。从图 2 可以看出,随着 D 逐渐增大,光纤的总损耗、材料损耗与限制损耗均呈下降趋势,同时双折射值逐渐减小。这一变化规律与结构的几何对称性密切相关:当 D 较大时,光纤结构趋于对称, X 与 Y 弯曲方向的模式分布差异减弱,导致双折射下降;同

时,光场在空芯区域分布更均匀,模式能量主要被限制在中心区域,包层泄漏减弱,从而有效降低了限制损耗。然而,随着 D 进一步减小,结构的不对称性显著增强,两侧直板对光场的约束作用变强,使模式场在纤芯内产生压缩效应。这种压缩一方面增大了 x 与 y 偏振模式的分离度,从而提升双折射性能;另一方面,光场更靠近包层壁面,导致部分能量泄露至 Topas 材料中,引起材料吸收损耗与限制损耗显著上升,最终造成总损耗增加。因此, D 在光纤设计中需谨慎控制:过大将削弱双折射,过小则会引入额外损耗。

综合分析表明,合理调控 D 可在低损耗与高双折射之间实现最佳平衡。通过优化 D 参数,使结构在反谐振条件下保持强约束效应,同时避免光场过度耦合至包层区域,能够显著改善光场的局域性与偏振保持特性。该结果为后续参数优化与器件性能提升提供了重要设计依据,也验证了本文所提双直板结构在几



(a) X 弯曲方向



(b) Y弯曲方向

图2 2种弯曲方向的各向性能

何可调性方面的灵活优势。

为避免模式场畸变并维持较高的双折射水平,本文最终确定最优 D 为1.0 mm, d 为8.2 mm。随着 t 的增加,总损耗与双折射均呈现上升趋势。仿真结果表明,当 t 达到0.12 mm时,光纤双折射取得最佳值,其峰值为 4.5×10^{-4} ,总损耗分别为1.7 dB/m(x 偏振)和1.2 dB/m(y 偏振)。 t 的增加会引起结构有效模场变化,导致共振频率向低频偏移。

3.2 宽带传输性能

双折射、总损耗、材料损耗及限制损耗随频率的变化关系如图3所示。可以看出,所设计的波导结构在0.84~1.10 THz频率范围内表现出稳定的低损耗特性,整体损耗曲线变化平缓,说明该结构在较宽频带内具备良好的传输一致性。在整个工作频段内,光纤总损耗始终维持在较低水平,同时双折射值始终高于

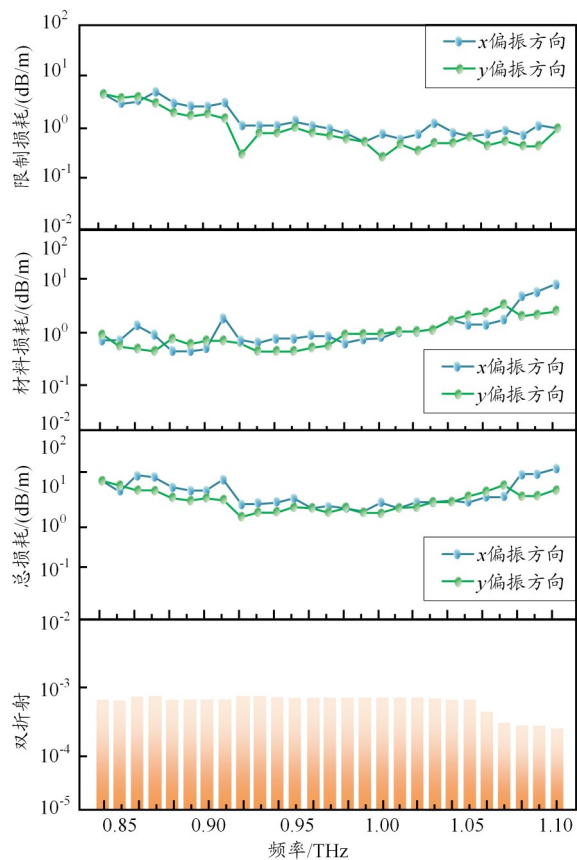


图3 双折射、总损耗、材料损耗及限制损耗随频率的变化关系

10^{-4} ,体现出优异的偏振保持能力。具体而言,在0.88~1.07 THz的主工作区间内,2种正交偏振模式的总损耗均低于5 dB/m,且二者损耗差异极小,表明该结构能够有效抑制模式间耦合与偏振相关损耗。

宽带低损耗特性的实现主要得益于双直板空芯反谐振结构的优化设计。直板的引入有效增强了光场的反射约束能力,使反谐振条件在更宽的频率范围内得以满足,从而抑制了模式泄漏。此外,几何非对称性所引起的高双折射特性,使得 x 与 y 偏振模式在传输过程中保持稳定分离,进一步提升了系统的偏振保持性能。

3.3 弯曲性能分析

为评估所设计光纤在实际应用中的抗弯曲性能,本文采用等效折射率模型进行分析,其表达式为 $n_{eq} = n(x, y)e^R$ 。其中, R 为光纤的弯曲半径, $n(x, y)$ 为直光纤的折射率分布, n_{eq} 为光纤在弯曲状态下的等效折射率。该模型将 R 的变化与光纤折射率特性相关联,从而揭示弯曲对光传播行为的影响: R 的大小直接决定光纤模式场的分布与折射率特性,进而影响传播模式及光信号传输质量。

通过对不同 R 下的等效折射率进行计算,可明确

邓宇翔,葛志辉,张振荣,等:双圆环套管叠加双直板空芯反谐振光纤研究

光纤在弯曲状态下的损耗变化趋势。图4为光纤在X和Y弯曲方向下的弯曲损耗情况。可以看出,R越小,弯曲损耗越大。

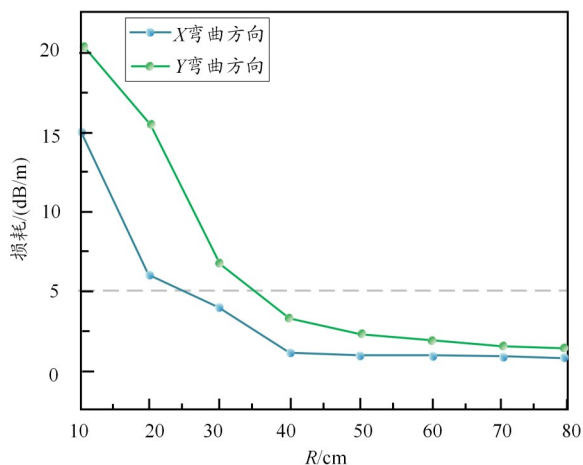


图4 2种弯曲方向的弯曲损耗

分析结果表明,该光纤具备较高的抗弯曲韧性:在X方向和Y方向上的最小R分别为30、40 cm(损耗超过5 dB/m时到达极限弯曲状态)。这一结果为实际应用中需要弯曲布线的光纤系统提供了重要参考,也为进一步优化光纤结构以增强其抗弯性能奠定了基础。

3.4 机械强度对比分析

为验证本文所提结构在机械强度方面的优势,将双圆套管双直板结构与2种基于几何差异产生双折射的结构,以及1种基于壁厚差异产生双折射的结构进行对比分析。所用Topas材料的杨氏模量约为 2.3×10^9 Pa,泊松比约为0.35,密度约为 $1\,020\text{ kg/m}^3$ 。在此基础上,采用固体力学模块对光纤结构进行仿真,在上下与左右方向分别施加总力为 $10\,000\text{ N}$ 的载荷,分析其形变响应。结果表明,本文采用的双直板结构对上下连接区域具有支撑增强作用,在抵抗纵向应力时表现最佳。同时,该双直板结构本身作为反谐振层,有助于将光场限制于中心区域传输,在承受横向应力时,中心导光区所受干扰较小;而对比结构在横向载荷下则出现更明显的中心区域形变,影响导光性能。

3.5 性能对比总结

本文选取多种高双折射空芯反谐振光纤进行性能对比,结果如表1所示。可以看出,与文献[31]和文献[34]相比,在保持高双折射的同时,本文所提出的双圆环套管叠加双直板结构在总损耗与弯曲半径方面分别展现出优势:其总损耗低于文献[31]方案,同时弯曲半径比文献[34]方案更小。该设计不仅在光学性能

表1 THz频段高双折射空芯反谐振光纤性能比较

文献	在工作频段保持的双折射	最小总损耗/(dB/m)	最小弯曲半径/m	工作范围/THz
[30]	$>10^{-5}$	0.5	0.6	—
[31]	$>10^{-4}$	1.68	0.15	1~1.5
[32]	$\approx 10^{-4}$	0.34	—	0.76~1.22
[33]	$\approx 10^{-4}$	1	—	0.46~0.6
[34]	$>10^{-4}$	0.172	0.35	0.7~1.5
[35]	$>10^{-3}$	12.7	—	0.9~1.05
本文	$>10^{-4}$	1.21	0.3	0.84~1.1

上表现优异,在物理特性方面也展现出更高的环境适应性与结构稳定性。此外,该结构设计简洁、可调性强,在制造过程中具有明显的成本与工艺优势。其高度可调的几何参数便于根据不同应用场景灵活优化,进一步拓展了在太赫兹通信、传感等领域的应用潜力。

4 结束语

本文设计了一种双圆环套管结合双直板的空芯反谐振光纤,在低损耗与高双折射特性方面表现优异。通过优化几何参数,该光纤的双折射率达到 4.5×10^{-4} ,有效提升了偏振分离能力,适用于偏振敏感型光通信与传感系统。在1 THz频率下,x偏振与y偏振模式的总损耗分别为1.7 dB/m与1.2 dB/m,展现出极低的传输损耗。该结构在0.84~1.10 THz范围内具备宽频带传输能力,最小弯曲半径可达30 cm,能够满足灵活布线及宽频带传输需求。本文验证了所提光纤模型在综合性能与环境适应性方面的优势,为高效低损耗的宽频带太赫兹通信系统提供了有力支持,也为太赫兹波段光纤器件的设计开辟了新前景。未来工作将聚焦于该结构在复杂环境下的传输性能研究及制造工艺优化,以推动其在实际系统中的应用进程。

参考文献:

- [1] ANASTASSIOU G A. Multivariate hyperbolic tangent neural network approximation[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2011, 61(4): 809–821.
- [2] BÄCK T, SCHWEFEL H P. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization[J]. Evolutionary Computation, 1993, 1(1): 1–23.
- [3] BECK A, TEBoulLE M. Gradient-based algorithms with applications to signal recovery[J]. Convex Optimization in Signal Processing and Communications, 2009, 8(8): 42–88.
- [4] BUNEA F, TSYBAKOV A B, WEGKAMP M H. Aggregation for

- gaussian regression[J]. The Annals of Statistics, 2007, 35(4): 1674–1697.
- [5] CHUGH S, GULISTAN A, GHOSH S, et al. Machine learning approach for computing optical properties of a photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36414–36425.
- [6] WU S, SIWICKI B, CARTER R M, et al. Impact of nonlinear effects on transmission losses of hollow-core antiresonant negative curvature optical fiber[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4988–4996.
- [7] DU Y, ZHOU D, ZHANG R, et al. Anti-resonant hollow-core fibers with high birefringence and low loss for Terahertz propagation[J]. Electronics, 2024, 13(12): 23–82.
- [8] NAYAK J. Fiber-optic gyroscopes: from design to production[J]. Applied Optics, 2011, 50(25): 152–161.
- [9] ZHANG Z F, TAO X M, ZHANG H P, et al. Soft fiber optic sensors for precision measurement of shear stress and pressure[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(5): 1478–1482.
- [10] COZZOLINO D, DALIO B, BACCO D, et al. High-dimensional quantum communication: benefits, progress, and future challenges[J]. Advanced Quantum Technologies, 2019, 2(12): 1900038-1–1900038-17.
- [11] NIELSEN K, RASMUSSEN H K, JEPSEN P U, et al. Porous-core honeycomb bandgap THz fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 666–668.
- [12] ANTHONY J, LEONHARDT R, LEON-SAVAL S G, et al. THz propagation in kagome hollow-core microstructured fibers[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18470–18478.
- [13] LU J Y, YU C P, CHANG H C, et al. Terahertz air-core microstructure fiber[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 064083-1–064083-4.
- [14] VINCETTI L. Hollow core photonic band gap fiber for THz applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(7): 1711–1714.
- [15] ANTHONY J, LEONHARDT R, ARGYROS A, et al. Characterization of a microstructured Zeonex terahertz fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(5): 1013–1018.
- [16] YAHIAOUI R, STRIKWERDA A C, JEPSEN P U. Terahertz plasmonic structure with enhanced sensing capabilities[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2484–2488.
- [17] NESPOLA A, STRAULLU S, BRADLEY T D, et al. Transmission of 61 C-band channels over record distance of hollow-core-fiber with L-band interferers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(3): 813–820.
- [18] XUE L, SHENG X, MU Q, et al. 3D-printed high-birefringence THz hollow-core anti-resonant fiber with an elliptical core[J]. Optics Express, 2023, 31(16): 26178–26193.
- [19] DING W, WANG Y Y. Hybrid transmission bands and large birefringence in hollow-core anti-resonant fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21165–21174.
- [20] LIAN Z, HORAK P, FENG X, et al. Nanomechanical optical fiber[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29386–29394.
- [21] CRUZ A L S, CORDEIRO C M B, FRANCO M A R. 3D printed hollow-core terahertz fibers[J]. Fibers, 2018, 6(3): 43–45.
- [22] CANNING J, HOSSAIN M A, HAN C, et al. Drawing optical fibers from three-dimensional printers[J]. Optics Letters, 2016, 41(23): 5551–5554.
- [23] CRUZ A L S, SERRÃO V A, BARBOSA C L, et al. 3D printed hollow core fiber with negative curvature for terahertz applications[J]. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2015, 14(1): 112–122.
- [24] BRADLEY T D, JASION G T, HAYES J R, et al. Antiresonant hollow core fibre with 0.65 dB/km attenuation across the C and L telecommunication bands[C]//EMC. Proceedings of 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). Dublin: Institution of Engineering and Technology, 2019: 1–4.
- [25] JASION G T, BRADLEY T D, HARRINGTON K, et al. Hollow Core NANF with 0.28 dB/km Attenuation in the C and L Bands[C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2020. Washington: Optica Publishing Group, 2020: 1–4.
- [26] TALATAISONG W, GORECKI J, VAN PUTTEN L D, et al. Hollow-core antiresonant terahertz fiber-based topas extruded from a 3D printer using a metal 3D printed nozzle[J]. Photonics Research, 2021, 9(8): 1513–1521.
- [27] HABIB M S, ANTONIO-LOPEZ J E, MARKOS C, et al. Single-mode, low loss hollow-core anti-resonant fiber designs[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 3824–3836.
- [28] POLETTI F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23807–23828.
- [29] HAYES J R, SANDOGHCHI S R, BRADLEY T D, et al. Antiresonant hollow core fiber with an octave spanning bandwidth for short haul data communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 437–442.
- [30] SUN S, SHI W, SHENG Q, et al. A polarization-maintaining THz anti-resonant fiber based on the mode coupling between core and cladding [C]//IEEE. Proceedings of Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XIV. Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2021, 11685: 216–221.
- [31] YAN S, LOU S, WANG X, et al. High-birefringence hollow-core anti-resonant THz fiber[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(4): 1–13.
- [32] MOLLAH M A, RANA S, SUBBARAMAN H. Polarization filter realization using low-loss hollow-core anti-resonant fiber in THz regime[J]. Results in Physics, 2020, 17(1): 1030–1044.
- [33] XIAO H, LI H, WU B, et al. Low-loss polarization-maintaining hollow-core anti-resonant terahertz fiber[J]. Journal of Optics, 2019, 21(8): 85–101.
- [34] HUI Z, YANG X, HAN D, et al. Sector-type high birefringence hollow-core anti-resonant terahertz photonic crystal fiber with low loss[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 67(3): 1027–1036.
- [35] HAN Z, TIAN F, LU Y, et al. A single-polarization hollow-core anti-resonant fiber based on epsilon-near-zero (ENZ) material in terahertz region[J]. Optik, 2023, 279(1): 1705–1720.