

引用本文: 丁金龙, 丁丽莎, 戴子杰, 等. 具有高双折射特性的空芯反谐振光纤[J]. 光通信技术, 2024, 48(3): 73–76.

具有高双折射特性的空芯反谐振光纤

丁金龙¹, 丁丽莎¹, 戴子杰², 陈明阳^{1*}

(1. 江苏大学 光电信息科学与工程系, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 微纳光电子与太赫兹技术研究院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为了解决现有提高光纤双折射率方法中光纤结构复杂、制造难度大的问题, 设计了一种具有高双折射特性的空芯反谐振光纤。光纤的包层由包层环、4 个半管及半管内嵌套的 1 对小圆组成。采用有限元法分析了光纤的结构参数对其双折射、传输损耗、限制损耗及吸收损耗的影响。仿真结果表明: 改变半管直径对双折射的影响较小; 通过调整光纤中水平方向与垂直方向半管的厚度差异, 可以使光纤获得高双折射, 在 0.25 THz 的宽频率范围内, 双折射率大于 1.5×10^{-4} , 同时保持传输损耗小于 10 dB/m。

关键词: 高双折射; 反谐振光纤; 空芯光纤; 太赫兹传输; 有限元法

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0073-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High-birefringence hollow-core anti-resonant fiber

DING Jinlong¹, DING Lisha¹, DAI Zijie², CHEN Mingyang^{1*}

(1. Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. Institute of Micro-Nano Optoelectronics and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: To solve the problems of complex fiber structure and high manufacturing difficulty in existing methods of improving the birefringence of optical fibers, a hollow-core anti-resonant fiber with high birefringence characteristics is designed. The cladding of the optical fiber is composed of a cladding ring, four half-tubes, and a pair of small circles nested inside the half-tubes. The finite element method is used to analyze the influence of the structural parameters of the fiber on its birefringence, transmission loss, confinement loss, and absorption loss. The simulation results show that changing the diameter of the half-tube has a small effect on the birefringence. By adjusting the thickness difference between the horizontal and vertical half-tubes in the fiber, the fiber can achieve high birefringence, with a birefringence greater than 1.5×10^{-4} over a wide frequency range of 0.25 THz, while maintaining a transmission loss less than 10 dB/m.

Key words: high-birefringence, anti-resonant fiber, hollow-core fiber, terahertz transmission, finite element method

0 引言

高双折射太赫兹光纤在太赫兹传输^[1]、通信^[2]等方面具有广阔的应用前景。研究人员通过调整包层区域

的空气孔结构和排列, 以增加光纤的不对称性, 从而获得高双折射。2016 年, ISLAM R 等人^[3]在多包层结构中引入不对称性结构。2018 年, WEI C L 等人^[4]在负曲率光纤的包层管中加入了 2 个嵌套的谐振管, 以增加光纤在正交方向上的不对称性, 利用嵌套谐振管中的管模与基模之间的模式耦合来增加 2 种偏振中基模的双折射。2019 年, YANG S 等人^[5]在包层区域内设计了一个椭圆结构, 使光纤的结构在正交方向上实现了不对称性。2022 年, DU Z X 等人^[6]通过在纤芯内设置一根细的支柱, 该支柱沿着 y 方向与 2 根聚合物包层管相连, 显著引入了结构的不对称性。以上的研究虽然都通过在结构上引入不对称性实现了高双折射, 但普遍存在结构复杂、制造难度较大的问题。

收稿日期: 2023-05-31。

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB140002)资助; 中国博士后科学基金项目(2022M721378)资助。

作者简介: 丁金龙(1996—), 男, 江西赣州人, 本科就读于江西师范大学光电信息科学与工程专业, 研究生就读于江苏大学光学工程专业, 主要研究方向为太赫兹波导、空芯反谐振太赫兹波导以及布喇格反谐振太赫兹波导传输。

*** 通信作者:** 陈明阳(1976—)男, 博士, 教授, 主要从事微结构光纤、光纤激光器、太赫兹波导和光纤光栅等方面的研究工作。



丁金龙,丁丽莎,戴子杰,等:具有高双折射特性的空芯反谐振光纤

本文设计一种结构简单的具有高双折射特性的空芯反谐振光纤(HC-ARF),通过组合2种不同参数的反谐振结构,使正交方向上的半管厚度不同,从而在几何结构上实现不对称性,达到高双折射效果。

1 结构与原理

本文提出的 HC-ARF 结构截面示意如图 1 所示。该光纤的包层管由 4 个半管组成,每个半管内嵌套有 1 对小圆管,这 2 个小圆管的圆心和纤芯连线的夹角为 40° 。从结构上来看,这 4 个半管都能实现高效的光限制作用。此外,基于多层导向模型,当小圆管的厚度满足反谐振条件时,HC-ARF 的限制损耗会进一步降低。HC-ARF 的总损耗主要由两部分组成:一是由其结构特点引起的限制损耗,这主要是因为 HC-ARF 中的包层管数量有限,导致其对光的限制能力受限,进而造成部分光能量的泄露;二是由于材料吸收所产生的吸收损耗,本文选用了在太赫兹波段具有较低吸收系数的环烯烃共聚物(COC)材料,这有助于降低 HC-ARF 的吸收损耗。

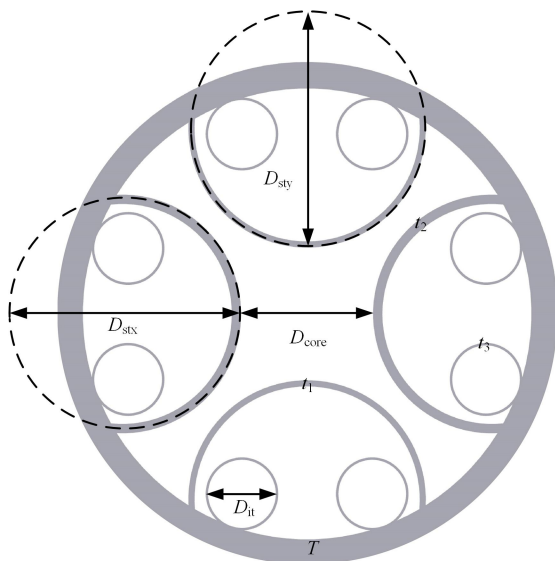


图 1 HC-ARF 结构截面示意图

COC 材料在 0.7~1.4 THz 频段的折射率为 1.527~1.526^[7]。HC-ARF 的主要结构参数包括外环的直径 $D=7.6$ mm 和厚度 $T=0.4$ mm,以及其它关键尺寸如水平方向半管的直径 D_{sx} 、垂直方向半管的直径 D_{sy} 、嵌套管的直径 D_{it} 、纤芯的直径 D_{core} 和嵌套管的厚度 t_3 。其中,水平方向半管厚度 t_2 大于垂直方向半管厚度 t_1 。为了获得高双折射,本文特意设计了这些结构参数,使其呈现出不对称性。

在 HC-ARF 中,光的引导机制基于反共振反射效

应。当光的频率接近共振频率时,原本被限制在纤芯内的电场模式会越过包层管扩散至包层区域。然而,当光的频率远离共振频率时,纤芯模式则会被有效地限制在纤芯内部。共振频率的大小与光速、反谐振的阶次、材料的有效折射率、空气的折射率和半管的厚度^[8]等因素密切相关。

2 传输特性研究

本文采用有限元法深入分析 HC-ARF 的传输特性。为了确保计算结果的准确性,本文对模型进行了细致的网格划分,在 HC-ARF 的外侧设置了厚度为 0.6 mm 的完美匹配层(PML)^[9]。PML 的主要功能在于吸收辐射至 HC-ARF 边界的能量,进而显著减少能量在边界处的反射现象。通过 HC-ARF 的基模有效模式折射率,本文计算出了 HC-ARF 的双折射率^[10]和传输损耗^[11]。

2.1 水平方向半管直径对 HC-ARF 双折射的影响

实现双折射常见的方法是使纤芯形状发生变化。在 1.2 THz 的工作频率下,本文设定水平方向半管厚度和垂直方向半管厚度相等,即 $t_1=t_2=0.093$ mm,嵌套管的厚度 $t_3=0.037$ mm,嵌套管直径 $D_{it}=1.1$ mm,垂直方向半管直径 $D_{sy}=3.6$ mm。通过增大水平方向半管直径 D_{sx} ,可以使结构具有不对称性,从而产生双折射。HC-ARF 的双折射率随水平方向半管直径 D_{sx} 变化的曲线如图 2 所示。可以看出,HC-ARF 的双折射随着水平方向半管直径 D_{sx} 的增大而逐渐增大。这是因为随着半管直径的增大,HC-ARF 在正交方向上的分布差异更为明显,导致两偏振模的场分布差异性增大,从而使其双折射逐渐增大。这一结果进一步证实了包层管的不对称性会导致双折射现象的发生。因此,对于对称结构的空芯太赫兹光纤,控制制作工艺的精度至关重要。另外,即便增加半管直径,双折射仍处于 10^{-5} 量级的低双折射率水平,这说明改变半管直径 D_{sx} 对双折射的影响较小。

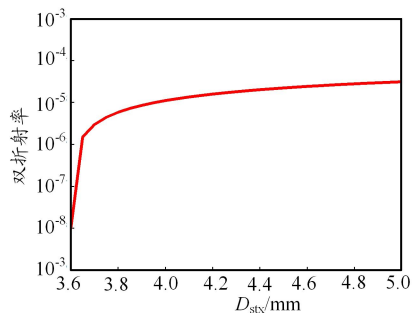


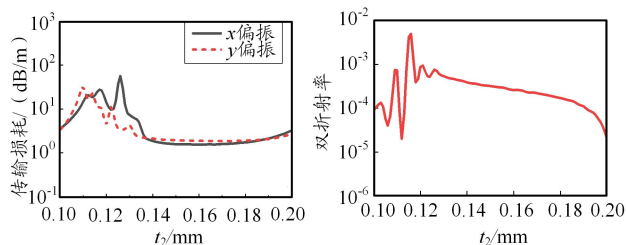
图 2 水平方向半管直径 D_{sx} 与 HC-ARF 双折射的关系曲线

大。这一结果进一步证实了包层管的不对称性会导致双折射现象的发生。因此,对于对称结构的空芯太赫兹光纤,控制制作工艺的精度至关重要。另外,即便增加半管直径,双折射仍处于 10^{-5} 量级的低双折射率水平,这说明改变半管直径 D_{sx} 对双折射的影响较小。

2.2 水平方向半管厚度对 HC-ARF 传输损耗和双折射的影响

本文取水平方向和垂直方向的半管直径相等,即

$D_{\text{slx}}=D_{\text{slx}}=3.6$ mm, 垂直方向半管厚度和嵌套管的厚度不变, 即 $t_1=0.093$ mm, $t_3=0.037$ mm, 嵌套管的直径 $D_4=1.1$ mm。在 1.2 THz 的工作频率下, 当改变水平方向半管厚度 t_2 时, 得到 HC-ARF 的传输损耗和双折射随着水平方向半管厚度 t_2 变化的曲线如图 3 所示。



(a) 传输损耗随 t_2 的变化曲线 (b) 双折射随 t_2 的变化曲线

图 3 HC-ARF 传输损耗和双折射率随着 t_2 变化的曲线

由图 3(a)可知, HC-ARF 的 x 偏振和 y 偏振传输损耗在 $t_2=0.14$ mm 后趋于稳定; 同样地, 由图 3(b)可知, HC-ARF 的双折射在 t_2 为 0.11~0.12 mm 内波动较大; 当 t_2 大于 0.12 mm 后, 双折射开始稳步下降。这是因为在 1.2 THz 的工作频率下, HC-ARF 处于谐振状态, 此时水平方向半管对偏振模式的限制能力减弱, 导致偏振模式的场分布由纤芯扩散到包层。这种场分布的变化增强了基模模场在正交方向上场分布的对称性, 从而减小了 HC-ARF 的双折射率。同时, 由于半管对偏振模式的限制能力减弱, 总损耗也在增加。进一步分析表明, HC-ARF 的双折射与水平方向半管厚度的变化关系呈非线性。当水平方向半管厚度 t_2 继续增大时, 两偏振模式的场分布差别变小, 导致 HC-ARF 的双折射逐渐减小。此外, 水平方向半管与垂直方向半管厚度差异是导致高双折射的一个重要因素。通过逐渐调整水平方向半管的厚度 t_2 , 可以有效地调控 HC-ARF 的双折射特性。

当水平方向半管厚度 t_2 取不同值时, 光纤双折射随频率的变化曲线如图 4 所示。可以看出, 不同的 t_2 取值情况下, 其双折射曲线也呈现不同的变化规律。双折射值波动较大的区域对应于谐振区间, 此时两偏振的有效折射率差异较大。由于当半管厚度增大时, 其谐振峰向低频移动, 因而其双折射波动较小的区间也向低

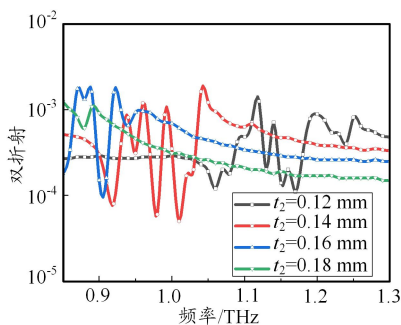


图 4 HC-ARF 双折射率与频率的关系曲线

频区移动。远离谐振区域, 双折射随频率变化规律较稳定。

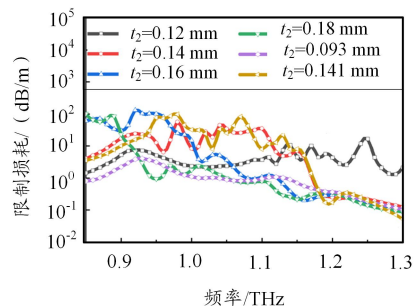
2.3 水平方向半管厚度对 HC-ARF 限制损耗和吸收损耗的影响

当 t_2 取不同值时, 得到 x 偏振和 y 偏振下 HC-ARF 的限制损耗和频率的关系曲线如图 5 所示。可以看出, 2 种偏振下的损耗曲线存在一定的差别, 因此, 为实现高双折射传输, 需要选择 2 个偏振均具有较小传输损耗的区间。当 t_2 增大时, 其限制损耗的谐振峰也随之向低频区移动, 此现象与反谐振公式^[8]描述相符。

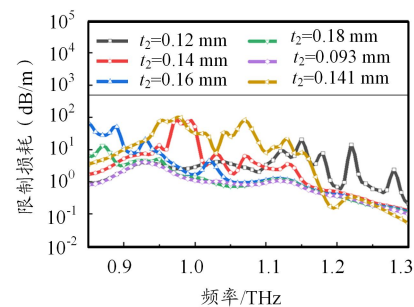
材料吸收所带来的损耗也是不容忽视的, 因此本文还分析了不同水平方向半管厚度 t_2 下 HC-ARF 的吸收损耗与频率的变化关系, 如图 6 所示。可以看出, 当水平方向半管的厚度 t_2 增加时, 对应的吸收损耗曲线的谐振峰也在从右往左移动。这是因为当厚度增加时, 其共振频率会随之减小, 所以谐振峰从高频移动到低频。

2.4 HC-ARF 传输性能

根据前文分析的水平方向半管直径、厚度对双折射、传输损耗、限制损耗、吸收损耗的影响

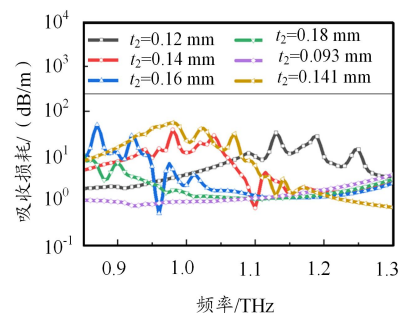


(a) x 偏振

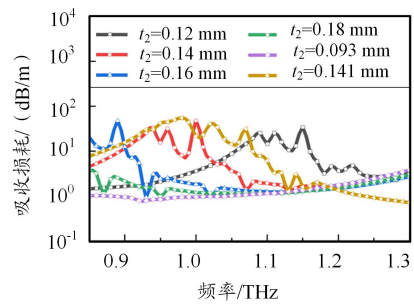


(b) y 偏振

图 5 不同水平方向半管厚度的限制损耗曲线



(a) x 偏振

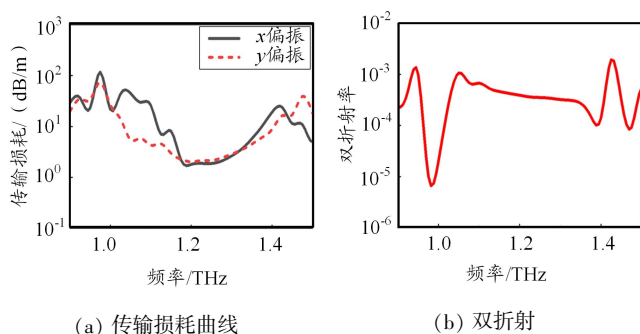


(b) y 偏振

图 6 不同水平方向半管厚度的吸收损耗曲线

丁金龙, 丁丽莎, 戴子杰, 等: 具有高双折射特性的空芯反谐振光纤

响情况, 本文取 $t_1=0.093$ mm、 $t_2=0.141$ mm, 得到 HC-ARF 传输损耗和双折射情况如图 7 所示。可以看出, 当频率为 1.2 THz 时, 光纤的双折射为 8×10^{-4} , 且 x 偏振和 y 偏振的传输损耗分别为 1.80 dB/m 和 2.04 dB/m。此外, 在频率为 1.125~1.375 THz 时, 即在 0.25 THz 的传输带宽内, HC-ARF 的传输损耗都低于 10 dB/m, 双折射率为 $1.5 \times 10^{-4} \sim 5.3 \times 10^{-4}$ 。



(a) 传输损耗曲线

(b) 双折射

图 7 HC-ARF 的传输损耗、双折射与频率的关系曲线

3 结束语

为了实现高双折射, 本文采用有限元法设计了一种具有高双折射特性的 HC-ARF, 通过改变 HC-ARF 包层水平方向半管直径 D_{sx} 和 HC-ARF 包层水平方向半管厚度 t_2 来获得光纤结构的不对称性。仿真结果表明: 改变 D_{sx} 对双折射率的影响较小; 改变 t_2 对双折射率的影响较大, 导致在 x 偏振和 y 偏振下的限制损耗和吸收损耗曲线的谐振峰移动; HC-ARF 在 0.25 THz 的宽频率范围内实现了双折射率大于 1.5×10^{-4} , 且传输损耗低于 10 dB/m 的性能。该光纤结构设计简单, 可以通过 3D 打印的方法制作, 且具有损耗低、工作带宽等优点。

参考文献:

- [1] ISLAM R, HABIB M S, HASANUZZAMAN G K M, et al. A novel low-loss diamond-core porous fiber for polarization maintaining Terahertz transmission[J]. IEEE Photonics Technology Letters 2016, 28(14): 1537–1540.
- [2] WALKER N G, WALKER G R. Polarization control for coherent communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(3): 438–458.
- [3] ISLAM R, HABIB M S, HASANUZZAMAN G K M, et al. Novel porous fiber based on dual-asymmetry for low-loss polarization maintaining THz wave guidance[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 440–443.
- [4] WEI C L, MENYUK C R, HU J. Polarization-filtering and polarization-maintaining low-loss negative curvature fibers [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9528–9540.
- [5] YANG S, SHENG X Z, ZHAO G Z, et al. Simple birefringent Terahertz fiber based on elliptical hollow core[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 102064-1–102064-5.
- [6] DU Z X, YAN Z, LUO S, et al. Highly birefringent hollow-core anti-resonant terahertz fiber with a thin strut microstructure[J]. Optics Express, 2022, 30(3): 3783–3792.
- [7] CUNNINGHAM P D, VALDES N N, VALLEJO F A, et al. Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(4): 043505-1–043505-5.
- [8] 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.
- [9] PUREUR V, BOUWMANS G, PERRIN M, et al. Impact of transversal defects on confinement loss of an all-solid 2-D photonic-bandgap fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3589–3596.
- [10] YAN S B, LOU S Q, WANG X, et al. High-birefringence hollow-core anti-resonant THz fiber[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(3): 162–175.
- [11] HASANUZZAMAN G K M, RANA S, HABIB M S, A novel low loss, highly birefringent photonic crystal fiber in THz regime[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(8): 899–902.