

引用本文:章玉卓,肖庆生. 基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤[J]. 光通信技术,2023,47(6):21-28.

基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤

章玉卓,肖庆生

(江西理工大学 信息工程学院,江西 赣州 341000)

摘要:针对光纤包层管正曲率部分现有研究较少的情况,提出一种基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤。首先,对比研究了圆形包层管与半圆半椭圆形包层管的太赫兹反谐振光纤的结构,分析了正曲率对光纤限制损耗的影响及主要机理;然后,对太赫兹反谐振光纤的结构进行优化,即在光纤间隙处采用了2层包层管结构;最后,对3种结构的光纤的限制损耗性能进行仿真计算,并对新型太赫兹反谐振光纤的单模特性进行分析。仿真结果表明:与其它结构的光纤相比,新型太赫兹反谐振光纤的限制损耗为 10^{-5} dB/m数量级,且在2.5~3.1 THz波段保持良好的单模特性。

关键词:太赫兹波导;反谐振光纤;正曲率;限制损耗

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)06-0021-08

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Novel Terahertz anti-resonant fiber based on positive curvature regulation of cladding tube

ZHANG Yuzhuo, XIAO Qingsheng

(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: In view of the few studies on the positive curvature of fiber cladding tube, a new Terahertz antiharmonic fiber based on the positive curvature regulation of fiber cladding tube is proposed. Firstly, the structure of Terahertz anti-resonant fiber with circular cladding tube and semi-circular semi-elliptical cladding tube is studied, and the influence of positive curvature on the limiting loss of fiber and the main mechanism are analyzed. Then, the structure of Terahertz antiharmonic fiber is optimized, and the two-layer cladding tube structure is adopted in the fiber gap. Finally, the loss limiting performance of three kinds of fiber structures is simulated, and the single-mode characteristics of the new Terahertz antiharmonic fiber are analyzed. The simulation results show that compared with other fiber structures, the new antiresonant THz fiber has a limited loss of 10^{-5} dB/m, and maintains good single-mode characteristics in 2.5~3.1 THz band.

Key words: Terahertz waveguide, anti-resonant fiber, positive curvature, confinement loss

0 引言

太赫兹波谱具有巨大的开发潜力,在光谱检测^[1]、安防^[2]、生物成像^[3]、传感^[4]及宽带通信^[5]等领域都有独特的优势和潜在的应用价值。然而,太赫兹波对空气中的水蒸气高度敏感,在自由空间中传输容易与空气

水分子耦合,从而产生较大的传输损耗^[6],这限制了其在远程传输和高稳定性场景中的应用。低损耗光纤或波导具有屏蔽外界环境干扰和柔性可弯曲的优点,可以促进太赫兹波的推广应用。因此,低损耗太赫兹波导技术成为新一代太赫兹系统中的关键技术之一^[7],尤其是在太赫兹通信系统中。

在过去十几年中,为了实现低损耗的太赫兹波传输,人们提出了多种不同导光机理的光纤^[8]。其中,基于光子带隙^[9-11]和反谐振原理^[12-14]的空芯光纤是目前主流的发展方向。相比于光子带隙空芯光纤,反谐振空芯光纤的结构简单、制造冗余度大,且材料损耗更低、传输带宽更大,因而更受青睐。2002年,LIT-CHINITSER N M等人^[15]在空芯光纤中引入反谐振反射

收稿日期:2023-03-14。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:61665003)资助;江西省自然科学基金资助项目(编号:20192BAB207036)资助。

作者简介:章玉卓(1994—),男,硕士研究生,现就读于江西理工大学信息工程学院电子信息专业,主要从事太赫兹通信及其波导等方面的研究工作。参与了国家自然科学基金项目《片上光子轨道角动量叠加态的产生与调控研究》、江西省自然科学基金项目《单片集成光子轨道角动量复用器基础研究》。



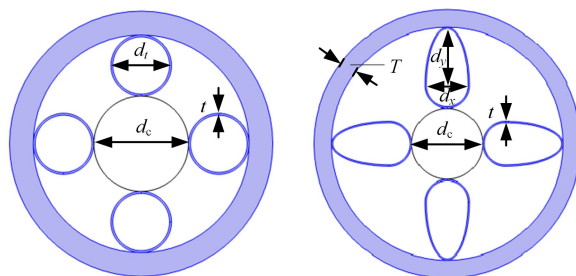
章玉卓,肖庆生: 基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤

波导 (ARROW) 机理, 并提出了反谐振空芯光纤的概念。在太赫兹波导领域, LAICH 等人^[16]在 2009 年首次引入了这一概念, 并提出了一种基于 ARROW 原理的低折射率太赫兹管状波导。次年, GÉRÔME F 等人^[17]提出了一种同样基于 ARROW 原理的太赫兹光纤, 从简化光子晶体光纤结构的角, 将 kagome-lattice 光纤的包层简化成了单层气孔, 成为了经典六包层管太赫兹反谐振光纤的原型。在 2013 年之前, 反谐振空芯光纤的损耗普遍较高, 直到 2013 年, VINCETTI L 等人^[18]制备了包层由一个圆形排列的电介质管组成的负曲率光纤, 在 0.375 THz 和 0.828 THz 处获得了较低的损耗 (0.3、0.16 dB/cm)。随后, 在众多研究者不断的探索下, 太赫兹光纤限制损耗的研究获得了突破性进展, 如 2021 年, 孟森等人^[19]提出了一种以椭圆管为包层结构的新型双负曲率太赫兹光纤, 在 2.44 THz 的频段内实现了 3.2×10^{-6} dB/cm 的最低限制损耗; 在 2.22~2.5 THz 的频段内限制损耗达到了 10^{-5} 、 -10^{-6} dB/cm 的数量级。如今, 人们主要围绕材料、结构、制造等方面对反谐振光纤开展了密集的研究。在太赫兹波低吸收损耗材料选取方面, 人们逐渐将目光聚焦到了以 COC (Topas) 为代表的聚合物材料上^[20]; 在制造技术方面, 近些年新兴的 3D 打印技术^[21]成为了亮点; 在结构优化和导光机理方面, 负曲率结构^[22-23]、无节点包层管结构^[24]、嵌套包层管结构^[25]的提出都使反谐振光纤的限制损耗技术研究取得了重大的突破。但是, 这些研究大都将目光聚焦于空芯光纤的负曲率方面, 很少涉及包层管正曲率部分的作用和它对空芯光纤限制损耗的影响。2020 年, HAN Y 等人^[26]仿真研究了石英包层管由半圆半椭圆拼接的结构, 结果显示包层管正曲率较大时限制损耗效果比常规圆包层管的反谐振光纤更好。由此可见, 太赫兹反谐振光纤中包层管的正曲率部分也发挥着重要的作用, 进一步探究包层管正曲率部分对限制损耗的影响具有重要的理论意义。基于此, 本文提出一种新型太赫兹反谐振光纤。

1 正曲率对限制损耗的调控分析

为了进一步探究包层管正曲率部分对传输限制损耗的影响程度, 同时考虑给包层管的大小优化留出足够的调控空间, 本文首先研究四包层管结构的太赫兹反谐振光纤, 其光纤示意图如图 1 所示。白色区域代表空气, 蓝色区域代表实心材料的管壁。其中, d_c 表示纤芯直径, d_i 表示包层管的直径, T 表示外包层壁厚, t 表示内包层管壁厚, d_x 表示包层管半椭圆短轴,

d_y 表示半椭圆半长轴。包层管正曲率部分的曲率大小可以通过 d_y 来调控, 当 d_y 与 $d_i/2$ 相等时, 包层管就会变成圆形管; 当 d_y 小于 $d_i/2$ 时, d_y 变更为半椭圆的半短轴。



(a) 传统的圆形包层管结构 (b) 半圆半椭圆形包层管结构

图 1 四包层管结构的太赫兹反谐振光纤示意图

根据 ARROW 原理^[15], 波长满足谐振条件的光波将在包层管壁形成谐振效应, 从而易于泄露到包层; 而波长不满足该条件的光波将会在包层区域发生相干相消效应 (反谐振) 而被管壁反射回纤芯区域继续传播。包层管壁厚 t 的表达式为

$$t = \frac{m \lambda_m}{2 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (1)$$

其中, n_1 为包层管壁的材料折射率, n_2 为纤芯区域材料 (本文中为空气) 的折射率, λ_m 为谐振波长, m 为共振阶数 (取整数)。

由于在 2.5 THz 频段容易获得高功率的太赫兹源^[27-28], 因而目前绝大多数的研究和应用都集中于该频段。在 2.5 THz 频段内 COC (Topas) 材料的折射率为 $n_{\text{COC}}=1.53$, 几乎保持不变; 空气的折射率 $n_a=1$ 。将式 (1) 中的共振阶数 m 错开半个阶数 (将 m 替换为 $m-0.5$) 即可逆推出满足远离谐振条件 (反谐振) 的包层管壁厚 $t=0.078$ mm。

本文应用 COMSOL Multiphysics 软件开展仿真实验研究, 在 2.0~3.0 THz 频段内模拟计算反谐振光纤的结构参数对其传输性能的影响进行分析。

1.1 正曲率对限制损耗的影响

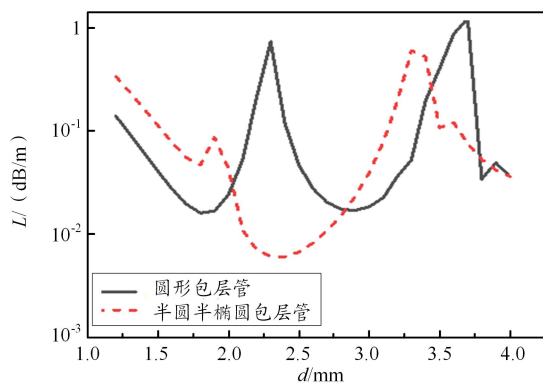
为了探究包层管正曲率部分对光纤限制损耗的定量影响, 在以 2.5 THz 为中心频率的 1.3~3.5 THz 频段内对四包层管结构的太赫兹反谐振光纤结构进行仿真计算, 其光纤的限制损耗 C 定义为

$$C = 40 \pi \lambda \frac{\text{Im}(n_{\text{eff}})}{\ln 10} \quad (2)$$

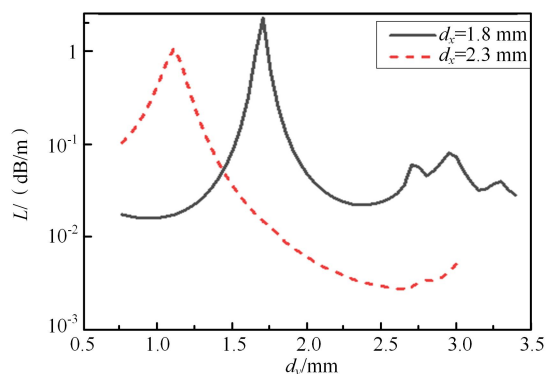
其中, n_{eff} 为基模的有效折射率 (由仿真计算求解模式的过程中得到)。

首先,研究负曲率变化对光纤限制损耗的影响。取纤芯直径 $d_c=2.0$ mm, 半椭圆半长轴 $d_y=2.0$ mm, 定义 $d=d_c=d_x$, 固定不变, d 为半圆半椭圆形包层管负曲率直径, 即 d 可定义为两者共有的负曲率直径, 其限制损耗 L 随 d 的变化结果如图 2(a) 所示。可以看出, 2 种结构光纤的 L 随 d 的增大不断变化, 圆形包层管结构呈现出一定的周期性, 这与文献[26]研究结果一致, 证明反谐振光纤包层管负曲率的变化(由 d 决定)对限制损耗的影响非常明显; 同时, 2 种结构光纤的包层管负曲率随着的 d 的变化始终保持一致, 即包层管负曲率始终相等, 但它们的限制损耗曲线却并不相同, 尤其在 1.9~2.9 mm 之间, 2 种包层管结构的光纤限制损耗呈相反的趋势, 而它们之间结构的差异只表现在包层管正曲率部分, 说明包层管在负曲率相同、正曲率各异的情况下光纤的限制损耗均存在差异。此外, 当 $d=1.8$ mm 时, 圆形包层管结构光纤的限制损耗最低值为 1.6×10^{-2} dB/m, 而在 $d=2.1\sim 2.7$ mm 内, 半圆半椭圆包层管结构光纤的限制损耗低于圆形包层管结构的光纤, 并在 $d=2.4$ mm 时, 其限制损耗最低值为 0.6×10^{-3} dB/m, 较之同等 d 值情况下的圆形包层管结构光纤的限制损耗更是低于 2 个数量级以上。由此可知, 在特定情况下半圆半椭圆形包层管的结构在限制损耗方面要优于常规圆形包层管。

然后, 取纤芯直径 $d_c=2.0$ mm, 半椭圆短轴 d_x 取图 2 中半圆半椭圆包层管 $d_x=2.3$ mm 和 $d_x=1.8$ mm 研究正曲率变化对光纤限制损耗的影响, 结果如图 2(b) 所示。可以看出, 随着正曲率的变化(本文正曲率的变化由 d_y 决定), 2 条曲线不断发生变化, 证明包层管正曲率对限制损耗有着较大的影响。当 $d_y=0.9$ mm 时, $d_x=1.8$ mm 的光纤的限制损耗最低值为 1.6×10^{-2} dB/m, 此时该光纤包层管正曲率部分为半圆形; 当 $d_y=2.6$ mm 时, $d_x=2.3$ mm 光纤的限制损耗最低值为 2.8×10^{-3}



(a) 限制损耗随负曲率直径 d 的变化曲线



(b) 限制损耗随正曲率变化(半椭圆半长轴 d_y)的变化曲线

图 2 光纤限制损耗随包层管几何参数的变化曲线

dB/m, 此时包层管正曲率部分为半椭圆形, 说明包层管在不同负曲率情况下的限制损耗方面的最优正曲率不同。因为椭圆的曲率由长轴和短轴共同决定, 半圆半椭圆形包层管的正曲率会受到负曲率影响(d_x 的影响), 不同负曲率下包层管的正曲率无法保证相同, 所以此处最优正曲率特指最优 d_y 值。

1.2 正曲率对限制损耗产生影响的主要机理

前文所述的 ARROW 原理虽然能够很好地解释反谐振空芯光纤的导光机理并确定损耗峰的位置, 但是却无法定量地给出限制损耗的实际大小和低损耗波段的带宽。为此, 人们常常借用电磁波(光波)理论中的“模式”概念来研究反谐振空芯光纤中各种定量问题。按照光波导模式理论, 光波在光纤的横截面上产生驻波振荡, 从而形成横向的场分布, 即本征“模式”。本征模式是一组正交完备的模式集, 一般情况下彼此不发生耦合。若要使两本征模式发生耦合, 需要满足 2 个基本条件: ①两模式的有效折射率相等或接近; ②模场分布在空间上有重叠。对于反谐振光纤, 其横截面的结构比普通光纤复杂得多, 所以形成的本征模式也更多、更复杂。为了更好地定量描述光纤内光波的泄漏机理和泄漏过程, 本文将反谐振光纤的横截面分为纤芯区、包层管区、间隙区, 将落入这些区域的本征模式称为芯模、管模、间隙模, 如图 3 所示。ARROW 原理在模式理

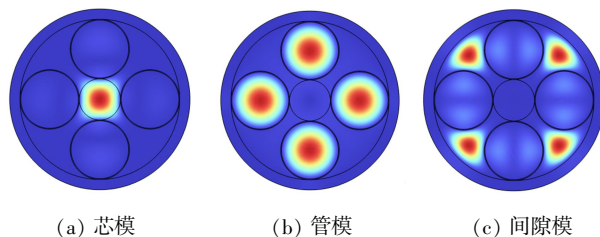


图 3 圆包层管反谐振光纤中的 3 种区域模式及其场分布图

章玉卓,肖庆生: 基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤

论中可以理解为:光波在纤芯中形成的芯模(可能是基模也可能是高阶模)通过与包层区的管模和间隙区的间隙模发生耦合,导致光波泄漏至纤芯外造成传输损耗。

在反谐振光纤中,基模与高阶模的模场不可避免地发生重叠,那么这些模式之间的有效折射率差就成了2种模式能否发生耦合的决定因素。本文对圆形包层管结构中的最低阶芯模、管模、间隙模的有效折射率随包层管直径增大的变化规律进行了仿真计算,结果如图4所示。可以看出,随着圆形包层管直径 d_t 的增大,纤芯中基模的有效折射率单调减小,仅在 $d_t=2.3$ mm(与纤芯直径相等)和 $d_t=3.7$ mm附近出现过2次陡然下降;而包层区域中管模的有效折射率呈对数增长趋势,即一开始管模的有效折射率远低于纤芯基模且急剧增长,并在 $d_t=2.3$ mm处与基模相交,之后变成缓慢增长;间隙区域中的间隙模的有效折射率则整体呈线性增长,在 d_t 为1.6、4.4 mm时分别与管模和基模相交。由此可见,基模与管模在 $d_t=2.3$ mm时发生了强烈耦合,这对应了图2(a)中限制损耗第一个周期的最高值,能量在两者间发生了重新分布,导致损耗急剧上升。

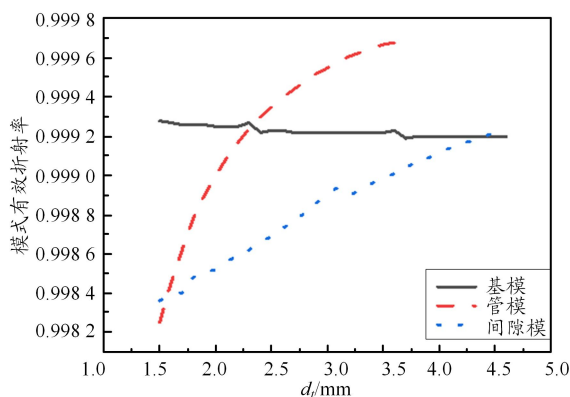
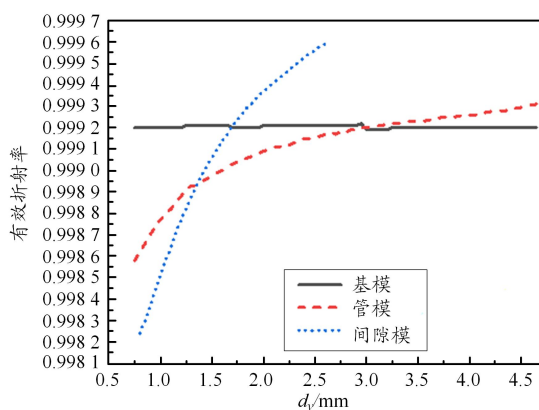
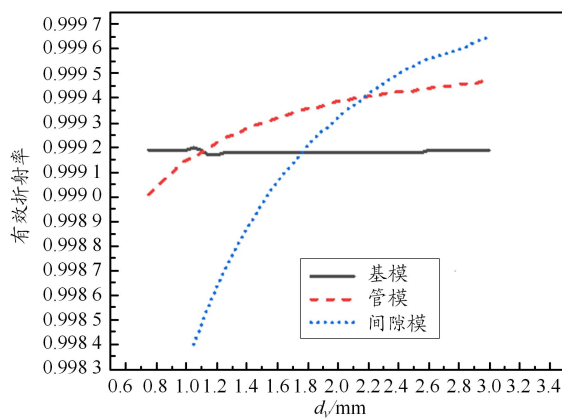


图4 3种模式的有效折射率随包层管半径增大的变化曲线

保持 $d_c=2.3$ 、1.8 mm不变,半圆半椭圆包层管结构中的最低阶基模、管模、间隙模的有效折射率随包层管半椭圆部分半长轴 d_t 的变化曲线如图5所示。图5(a)中,基模有效折射率随 d_t 的增大整体呈现单调递减的趋势,共有4次波动,其中2次波动表现为陡然下降,而这2次波动分别与管模有效折射率、间隙模有效折射率相交,主要原因为管模和间隙模与基模的强烈耦合造成,这与图2(b)中黑色实线的2个峰值相对应;图5(b)中,当 d_t 在1.15 mm附近时(半圆半椭圆形包层管趋于圆形),基模与管模相交,基模在该点附近呈现不符合整体趋势的下降,这与图2(b)中红色虚线的限



(a) 当 $d_c=1.8$ mm时,3种模式的有效折射率



(b) 当 $d_c=2.3$ mm时,3种模式的有效折射率

图5 3种区域模式的有效折射率和功率比随包层管正曲率半径增大的变化曲线

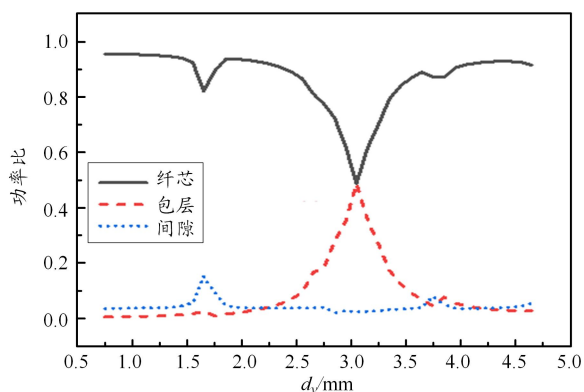
制损耗最高值相对应。随着 d_t 大小的增加,基模与管模有效折射率差也逐渐增加,两者之间的耦合效率因此降低,限制损耗呈现下降趋势。此外,虽然间隙模与基模在 $d_t=1.78$ mm处相交,却没有对基模造成较大的影响,说明此处间隙模对基模的影响很小。仿真结果表明:反谐振光纤在包层管负曲率不变的情况下,可以通过对正曲率部分的调控来扩大基模和光纤中其它模式的有效折射率差,避免模式之间的强烈耦合,从而达到降低损耗的目的。

为了进一步量化上述耦合因素产生的能量传递(泄漏)过程,本文采用纤芯功率比、包层管功率比、间隙功率比来计量各区域的功率分布变化。各区域的功率比 R_{PR} 定义为

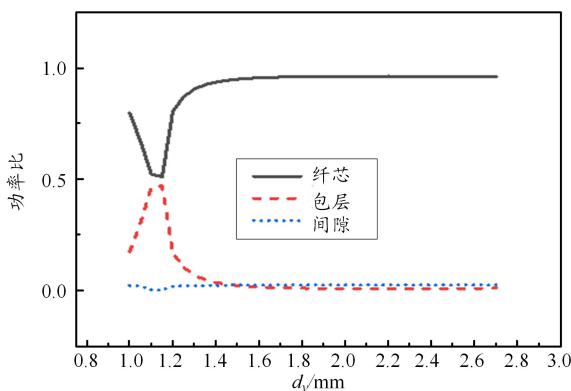
$$R_{PR} = \frac{\iint_P (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\iint_S (E_x H_y - E_y H_x) dx dy} \quad (3)$$

其中, P 表示需要研究的区域, S 表示光纤全部区域, E_x 、 E_y 分别表示电场矢量在光纤截面内的横向分量和纵向分量, H_x 、 H_y 分别表示磁场矢量在光纤截面内的横向分量和纵向分量。

3 种区域模式的有效折射率和功率比随包层管正曲率半径增大的变化情况, 如图 6 所示。图 6(a) 中, 当 d_y 分别为 1.65、3.05 mm 时的纤芯功率比出现谷值, 分别对应间隙功率比和包层管功率比的峰值, 与图 5(a) 中基模有效折射率与另外 2 种模式有效折射率相交处对应, 说明基模与其它模式强烈耦合时纤芯区域对能量的约束力明显下降, 损失的能量传递到了对应模式主要集中的区域, 限制损耗最低值处纤芯、包层管、间隙功率比分别为 95.6%、0.65%、3.7%; 图 6(b) 中, 纤芯功率比出现了一次凹陷, 谷值对应图 5(b) 中基模有效折射率与管模有效折射率相等处, 而间隙区域功率比整体变化幅度不大, 尤其在 $d_y=1.78$ mm 处 (基模有效折射率与间隙模有效折射率相等处) 几乎没有变化, 所以在 $d_y=2.3$ mm 时, 间隙模与基模之间的耦合效率极低, 纤芯能量几乎不会向间隙区域泄露, 限制损



(a) 当 $d_x=1.8$ mm 时各区域的功率比



(b) 当 $d_x=2.3$ mm 时各区域的功率比

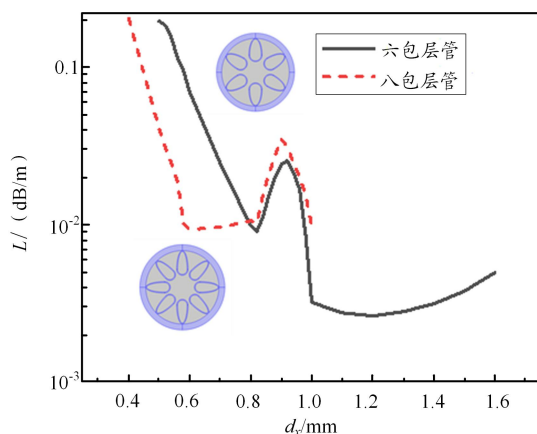
图 6 3 种区域模式的有效折射率和功率比随包层管正曲率半径增大的变化曲线

耗最低值处的纤芯、包层管、间隙功率比分别为 96.2%、1.1%、2.6%。结合图 2(b) 可知, 2 种不同包层管结构的光纤在调节包层正曲率过程中, 两者限制损耗最低值却相差接近一个数量级, 此时在基模几乎不与光纤中其它模式发生强烈耦合, 主要原因有 2 个: 一是对比 $d_x=1.8$ mm, 在 $d_x=2.3$ mm 时包层管之间的间隙距离更小, 纤芯能量向间隙区域泄露更少; 二是包层正曲率部分曲率变化由半椭圆管的半长轴 d_y 和短轴 d_x (负曲率部分半圆管半径) 共同决定, 且 $d_x=2.3$ mm 情况下包层管正曲率调控后纤芯对能量约束力更强。综上所述, 合理调控包层管正曲率部分可以同时抑制基模与管模、基模与间隙模之间的模式耦合, 提高纤芯能量的约束性, 从而降低光纤传输时的限制损耗。

2 新型太赫兹反谐振光纤的设计与特性分析

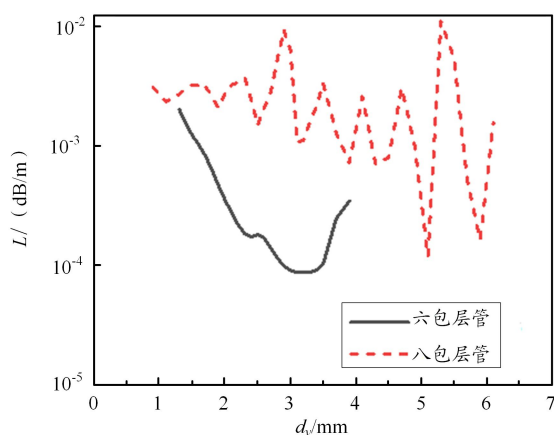
2.1 包层管数与包层管正曲率最优值的关系

保持半椭圆长半轴为 2.6 mm, 本文进一步研究在六包层管和八包层管情况下, 限制损耗随半圆直径 (半椭圆短轴) 的变化规律, 如图 7(a) 所示。图中, 2 个圆形分别为六包层管和八包层管的光纤横截面示意图。可以看出, 当 $d_x=1.2$ mm 时, 六包层管光纤的限制损耗最低; 当 $d_x=0.6$ mm 时, 八包层管光纤的限制损耗最低。分别取六包层管和八包层管 d_x 的最优值测试半椭圆长轴大小对光纤限制损耗的影响, 结果如图 7(b) 所示。可以看出, 当半圆直径 (半椭圆短轴) 大小不变, 半椭圆长半轴长度变化同样会对限制损耗产生影响。当 $d_y=3.2$ mm 时, 六包层管光纤的限制损耗最低; 当 $d_y=5.1$ mm 时, 八包层管光纤的限制损耗最低。因此, 半圆半椭圆形包层管结构在不同数量包层管下完全适用, 不同包层管数量下包层结构正曲率抑制耦合的最优值不同, 同时包层管数量越多, 光纤限制损耗最低



(a) 六包层管和八包层管的限制损耗的变化规律

章玉卓,肖庆生: 基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤



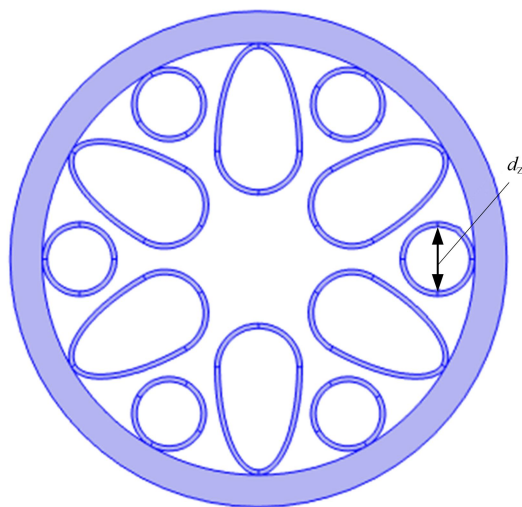
(b) 六包层管和八包层管几何参数的变化

图7 不同包层管数量下光纤限制损耗随包层管几何参数的变化曲线

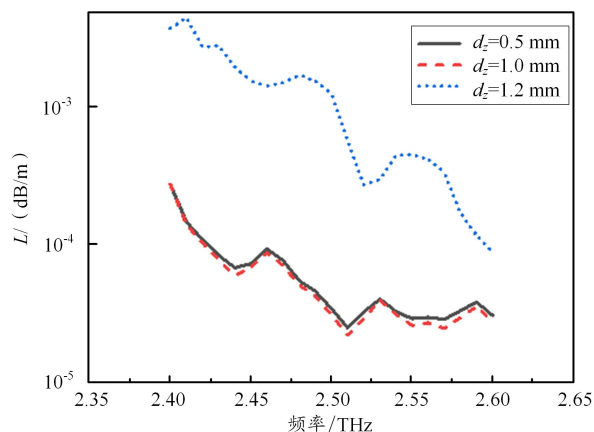
值时的包层正曲率越大。对比四包层结构可知,六包层管和八包层管结构下光纤的限制损耗明显较低,且六包层管结构下光纤本体直径最小。因此,本文将六包层管的半圆半椭圆包层管作为基准结构进行优化设计。

2.2 空气间隙圆管填充降低限制损耗

虽然半圆半椭圆形包层管结构比圆形包层管结构的反谐振光纤在限制损耗方面具有明显的优势,但是随着半椭圆长半轴的拉长,包层管间的间隙也在不断拉大。这使得纤芯中的光波更容易渗透到这个间隙中,且纤芯中的基模在向包层区域渗透的同时也向间隙区域渗透。为了克服这一问题,本文对该结构进行优化,在间隙处加入圆管,形成双层包层光纤结构(即新型太赫兹反谐振光纤),其结构图如图8(a)所示;同时,选择圆管的管壁厚度和材料与半圆半椭圆形包层管一致。仿真研究了第二层包层管直径 d_z 的大小对光纤



(a) 双层包层管光纤结构

(b) 圆管直径 d_z 对限制损耗的影响图8 双层包层管光纤结构及圆管直径 d_z 对限制损耗的影响

传输时限制损耗的影响。结果表明,当 d_z 为0.4~1.0 mm时限制损耗达到极低的程度且相互之间差距不大;而 d_z 为1.0 mm时限制损耗相对最低,如图8(b)所示。

本文对半圆半椭圆形包层管光纤、嵌套圆光纤^[29-30]以及优化后的新型太赫兹反谐振光纤在2.1~3.2 THz频段上的限制损耗性能进行仿真,设圆形包层管直径为1.1 mm,嵌套圆直径为0.5 mm,其它参数与新型光纤一致,结果如图9所示。可以看出,新型太赫兹反谐振光纤结构的整体损耗降低非常明显,在2.5~3.1 THz频段内一直保持着 10^{-5} 数量级的限制损耗,在半圆半椭圆形包层管结构光纤的基础上进一步降低约一个数量级,并在2.8 THz处达到最低 1.58×10^{-5} dB/m。这说明通过在半圆半椭圆包层之间的间隙中加入圆形包层结构可以有效降低光纤的限制损耗。圆形包层的主要作用是在间隙区域增加了一层反谐振单位元,使得原本从第一层半圆半椭圆包层管间隙中泄露的传输模式,通过第二层反谐振元反射回纤芯区域,使得管

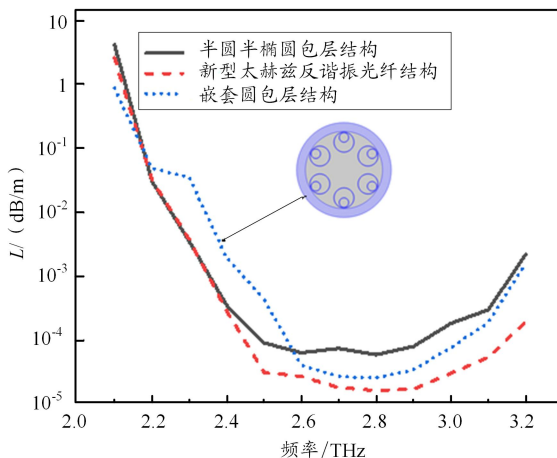


图9 3种光纤结构的限制损耗

约束力更强, 从而降低限制损耗。同时, 可以看出在 2.1~2.5 THz 频段, 半圆半椭圆形包层管光纤优化前后的限制损耗都要低于嵌套圆光纤, 特别是优化后的新型光纤在 2.1~3.2 THz 频段上与嵌套圆光纤相比在限制损耗上有着明显差距。

为了进一步验证新型太赫兹反谐振光纤低限制损耗的特性, 本文将其与目前已报道的文献中的光纤进行对比, 如表 1 所示。可以看出, 本文设计的双层包层光纤在较高太赫兹频段处的限制损耗远低于其它光纤。

表 1 本文光纤与其它文献光纤参数对比

参考 光纤	光纤结构	频率/ THz	材料	限制损耗/ (dB/cm)
文献[31]	嵌套圆形包层	1.0	环烯烃共聚物	5×10^{-1}
文献[31]	金属丝包覆层	1.0	环烯烃聚合物 和铝金属	5.8×10^{-3}
文献[31]	6 个均匀排列的 椭圆孔管和 6 个圆形管相 互连接	2.44	环烯烃共聚物	3.2×10^{-4}
本文	半圆半椭圆形 包层	2.8	环烯烃共聚物	5.8×10^{-5}
本文	双层包层	2.8	环烯烃共聚物	1.58×10^{-5}

2.3 单模特性

由于纤芯高阶模会引发比基模更明显的损耗和耦合的问题, 因此本文对优化后新型太赫兹反谐振光纤的基模 LP_{01} 与第一高阶模 (具有最低损耗的高阶模) LP_{11} 的有效折射率和限制损耗进行了仿真。基模与高阶模的模场分布图如图 10 所示。 LP_{01} 模的模场主要呈高斯分布集中在光纤的中心, 而 LP_{11} 模的模场呈空心状分布在纤芯的外部及包层管内。新型太赫兹反谐振光纤的单模特性仿真结果如图 11 所示。从图 11(a)可以看出, LP_{01} 模的有效折射率明显高于 LP_{11} 模的有效折射率, 折射率差在 10^{-3} 以上, 说明 2 个模式之间的隔离度非常高, 发生耦合的几率非常小; 从图 11(b)可以看出, 由于 LP_{11} 模限制性更差, 与包层管及外围介质接触的面积远比 LP_{01} 模大得多, 因而其限制损耗远高于 LP_{01} 模, 两者相差约 3 个数量级左右, 说明基模的传播路径集中, 光信号传

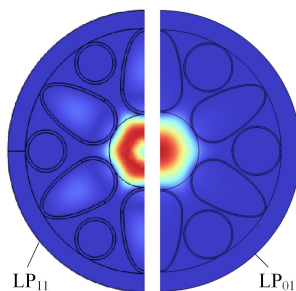
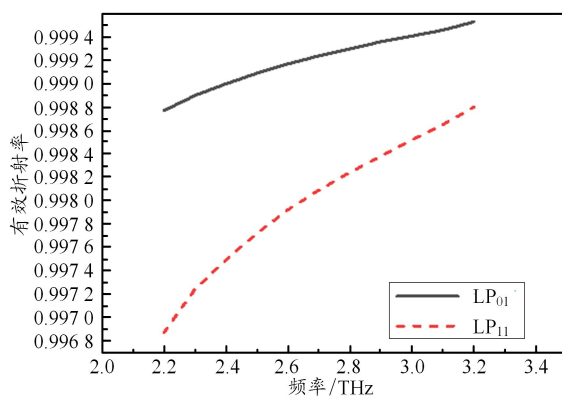
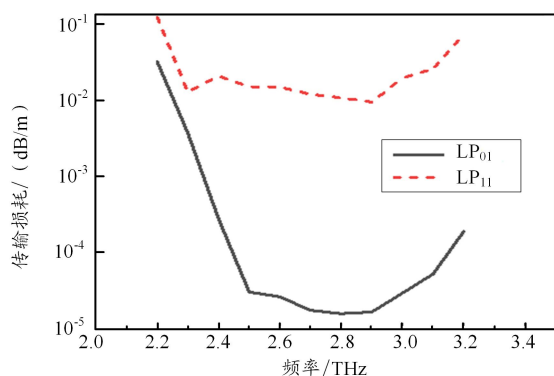


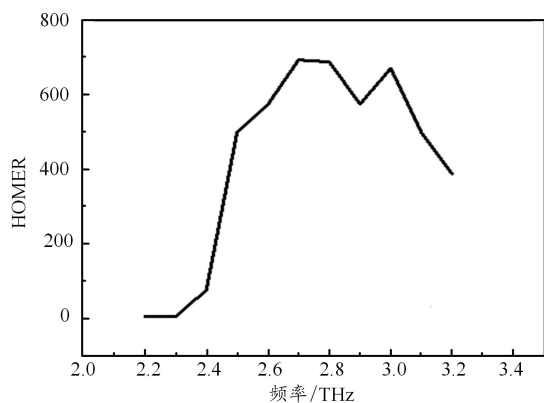
图 10 高阶模 LP_{11} 与基模 LP_{01} 的模场分布图



(a) 有效折射率仿真结果



(b) 限制损耗仿真结果



(c) HOMER 仿真结果

图 11 新型太赫兹反谐振光纤的单模特性

播损耗较小, 信号衰减较慢, 而高阶模的传播路径较分散, 信号传播损耗较大, 信号衰减较快。本文将 LP_{11} 模与 LP_{01} 模的限制损耗之比定义为消光比 (HOMER)^[31]。从图 11(c)可以看出, HOMER 在 2.4~3.0 THz 波段上基本保持在数百以上的较高数值, 因此可以判断该光纤在这一频段上具有良好的单模特性。

3 结束语

本文基于模式耦合理论探究了反谐振光纤包层

章玉卓,肖庆生: 基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤

正曲率影响限制损耗的主要原理,研究了不同包层管下正曲率在限制损耗方面的表现,并在此基础上对结构进行了优化,设计了一种新型太赫兹反谐振光纤,使得纤芯对太赫兹波的约束进一步加强。仿真结果表明:该新型光纤在 2.1~3.2 THz 内的限制损耗比目前常规的嵌套圆光纤更低,最低限制损耗为 1.58×10^{-5} dB/m,拥有良好的单模特性,且结构简单、易于制造;此外,所提新型光纤超低的限制损耗和宽传输带宽的特性,在通信和医疗成像等领域都有着巨大的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHAO S T, ZHANG Y H, QIU Z J, et al. Towards a fast and generalized microplastic quantification method in soil using terahertz spectroscopy [J]. Science of the Total Environment, 2022, 841: 156624-1-156624-13.
- [2] CHEN S Y, REED D J, MACKELLAR A R, et al. Terahertz electrometry via infrared spectroscopy of atomic vapor [J]. Optica, 2022, 9(5): 485-491.
- [3] CASTRO-CAMUS E, KOCH M, MITTLEMAN D M. Recent advances in terahertz imaging[EB/OL]. [2023-03-14]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00340-021-07732-4>.
- [4] ISLAM M S, SULTANA J, BIABANIFARD M, et al. Tunable localized surface plasmon graphene metasurface for multiband superabsorption and terahertz sensing [J]. Carbon, 2020, 158: 559-567.
- [5] O'HARA J F, EKIN S, CHOI W, et al. A perspective on Terahertz next-generation wireless communications[J]. Technologies, 2019, 7(2): 7020043-1-7020043-18.
- [6] ISLAM M S, CORDEIRO C M B, FRANCO M A R, et al. Terahertz optical fibers [Invited][J]. Optics Express, 2020, 28(11): 16089-16117.
- [7] 陈再高. 三维全电磁粒子模拟技术在真空电子器件中的应用研究[J]. 真空电子技术, 2019(6): 37-45.
- [8] 蔡伟,郝文慧,王舰洋,等. 太赫兹光纤研究进展[J]. 真空电子技术, 2021(3): 1-8.
- [9] GOTO M, QUEMA A, TAKAHASHI H, et al. Teflon photonic crystal fiber as Terahertz waveguide[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(No. 2B): L317-L319.
- [10] NIELSEN K, RASMUSSEN H K, ADAM A J L, et al. Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range [J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [11] AHMED K, CHOWDHURY S, PAUL B K, et al. Ultrahigh birefringence, ultralow material loss porous core single-mode fiber for Terahertz wave guidance [J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3477-3483.
- [12] LI S, DAI Z, WANG Z, et al. A 0.1 THz low-loss 3D printed hollow waveguide [J]. Optik, 2019, 176: 611-616.
- [13] YANG S, SHENG X, ZHAO G, et al. Anti-deformation low loss double pentagon nested terahertz hollow core fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 56: 102199-1-102199-7.
- [14] HABIB M S, BANG O, BACHE M. Low-loss single-mode hollow-core fiber with anisotropic anti-resonant elements[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8429-8436.
- [15] LITCHINITSER N M, ABEELUCK A K, HEADLEY C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [16] LAI C H, HSUEH Y C, CHEN H W, et al. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3457-3459.
- [17] GÉRÔME F, JAMIER R, AUGUSTE J L, et al. Simplified hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1157-1159.
- [18] VINCETTI L, SETTI V. Elliptical hollow core tube lattice fibers for terahertz applications [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(1): 31-34.
- [19] MENG M, YAN D, YUAN Z, et al. Novel double negative curvature elliptical aperture core fiber for Terahertz wave transmission [EB/OL]. [2023-03-14]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/abed6d>.
- [20] ISLAM M S, CORDEIRO C M B, NINE M J, et al. Experimental study on glass and polymers: determining the optimal material for potential use in Terahertz technology [J]. IEEE Access, 2021, 9: 2705-2705.
- [21] TALATAISON 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.
- [22] YU F, KNIGHT J C. Negative curvature hollow-core optical fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(2): 4400610-1-4400610-10.
- [23] WEI C L, WEIBLEN R J, MENYUK C R, et al. Negative curvature fibers[J]. Advances In Optics And Photonics, 2017, 9(3): 504-561.
- [24] 丁伟,汪滢莹,高寿飞,等. 高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(12): 50-67.
- [25] POLETTI F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23807-23828.
- [26] HAN Y, DONG T T, QING Y, et al. Low loss hollow-core anti-resonant fiber in infrared band [J]. Journal of Infrared And Millimeter Waves, 2020, 39(1): 32-38.
- [27] ZHONG K, SHI W, XU D G, et al. Optically pumped terahertz sources [J]. Science China-technological Sciences, 2017, 60(12): 1801-1818.
- [28] GENG L J, ZHANG R L, ZHANG Z F, et al. Study of lasing action in a pulsed optically pumped D₂O gas Terahertz laser [J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2018, 39(12): 1175-1184.
- [29] POGGIOLINI P, POLETTI F. Opportunities and challenges for long-distance transmission in hollow-core fibres [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(6): 1605-1616.
- [30] ALIA O, TESSINARI R S, BAHRANI S, et al. DV-QKD coexistence with 1.6 tbps classical channels over hollow core fibre[J]. Journal of Light wave Technology, 2022, 40(16): 5522-5529.
- [31] 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.