

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.12.021

面向太赫兹波段的负曲率光纤设计及数值研究

陈 吴, 高伟清, 罗巧霞, 陈 凯, 张 凯, 王 贤

(合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:文章设计了一种基于环烯烃共聚物(cyclic olefin copolymer, COC)的空芯负曲率光纤(negative curvature fiber, NCF),分析结构参数光纤芯径、管径和毛细管厚度对光纤限制损耗的影响,并对参数进行优化,使得单包层 NCF 在 2.0 ~ 2.5 THz 频率范围内限制损耗为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ dB/m,损耗最低值可降到 8.90×10^{-5} dB/m;引入内包层管破坏常规负曲率光纤的对称性,使纤芯模式与内包层管壁模式进行耦合,从而增加 x 和 y 偏振方向的折射率和损耗差异产生双折射;对影响光纤双折射特性和限制损耗的因素进行分析,在 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内双折射系数可达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。该文结果为太赫兹 NCF 的长距离传输、偏振敏感等应用提供了一条新的途径。

关键词:负曲率光纤(NCF);太赫兹波段;光纤设计;限制损耗;双折射

中图分类号:O436 文献标志码:A 文章编号:1003-5060(2023)12-1722-07

Design and numerical analysis of hollow-core negative curvature fiber for transmission in terahertz waveband

CHEN Wu, GAO Weiqing, LUO Qiaoxia, CHEN Kai, ZHANG Kai, WANG Xian

(School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: A hollow-core negative curvature fiber(NCF) based on cyclic olefin copolymer(COC) is designed. The effects of structural parameters such as fiber core diameter, tube diameter and capillary thickness on the confinement loss of NCF are analyzed, and the parameters are optimized. The simulation results show that the confinement loss of single-cladding NCF is 10^{-4} - 10^{-5} dB/m in the frequency range of 2.0-2.5 THz, and the minimum confinement loss is reduced to 8.90×10^{-5} dB/m. By introducing the inner cladding tube to destroy the symmetry of the conventional NCF, the fiber core mode is coupled with the cladding capillary mode, which increases the difference in refractive index and loss in the polarization directions of x and y to produce birefringence. The factors affecting birefringence and confinement loss of NCF are analyzed. The birefringence can reach 10^{-4} - 10^{-5} in the frequency range of 2.0-3.0 THz. The simulation results provide a new way for long distance transmission and polarization sensitive applications of terahertz NCF.

Key words: negative curvature fiber(NCF); terahertz waveband; optical fiber design; confinement loss; birefringence

电磁波谱中的太赫兹波段介于微波和中红外波段之间,频率范围为 0.1 ~ 10.0 THz,对应波长范围为 0.03 ~ 3.00 mm^[1-3]。随着通信技术

的发展,为了更有效地研究与应用太赫兹波,越来越需要开发新的信号源、探测器、波导和其他传输元件。太赫兹波在无损检测^[4]、生物医学光谱

收稿日期:2022-04-02;修回日期:2022-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61875052;61905059;62105087;62105088);安徽省重点研发计划资助项目(202104a07020010);安徽省自然科学基金资助项目(1908085QF273;2018085QF273;2108085QF282)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGTA0065;JZ2021HGTA0145;JZ2021HGQA0255;JZ2021HGTA0148)

作者简介:陈 吴(1997—),男,安徽当涂人,合肥工业大学硕士生;

高伟清(1979—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:gaoweiqing@hfut.edu.cn.

学^[5]、国防和安全^[6]等领域的应用是不可估量的。其中太赫兹波段的低损耗传输波导研究已成为实际应用的重要组成部分之一^[7]。太赫兹波对水汽和部分光学材料的高吸收阻碍了高性能太赫兹传输波导的发展。目前已经报道了几种太赫兹波段的低损耗波导,如金属线^[8]、平行板^[9]、介质带波导^[10]、亚波长光纤^[11]、空芯光纤^[12]、多孔芯光纤^[13]等。金属波导不是太赫兹电磁信号的完美电导体,信号以弱导波形式沿无限长的圆线传播,称为表面等离子体波(sommerfeld wave)^[14],典型的线极化太赫兹波与径向极化的表面等离子体波的空间重叠很差,波导模式和自由传播模式之间的失配导致耦合效率较低。聚合物介质波导具有价格较低、种类多、质量轻等特点,且聚合物的材料色散也相对较低,但太赫兹聚合物波导材料吸收损耗往往都在 0.1 ~ 10.0 dB/mm 范围,用于长距离传输损耗很大。空芯微结构光纤包括 Kagome 光纤、空芯光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)和空芯负曲率光纤(negative curvature fiber, NCF)^[15-17],空芯 PCF 和 NCF 纤芯内部的空气干燥,传输中几乎不吸收太赫兹波,传输损耗也较低,与传统的实芯光纤相比,NCF 可以显著降低色散和非线性,提供更高的损伤阈值,具有更宽的传输带宽和更低的光介质重叠。因此,空芯微结构光纤是最有前途的太赫兹波导之一。

文献[18]报道了一种特殊的空芯光纤,并将其结构命名为 Kagome 结构;文献[19]利用一维平板反谐振反射式波导(anti-resonant reflection optical waveguide, ARROW)模型对 Kagome 光纤的导光机理进行研究,纤芯模式处于谐振波长时,由于谐振耦合到包层而导致光的衰减,处于反谐振波长的纤芯模式则不会泄漏到包层中从而可以稳定传输;文献[20]首次制作了太赫兹波段的空芯 Kagome 光纤,采用聚合物材料聚四氟乙烯(Teflon)材料,在 0.77 THz 频率处损耗为 1.0×10^{-2} dB/cm;文献[21]利用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)材料拉制了太赫兹空芯 Kagome 光纤,在 0.65 THz 时传输损耗为 6.0×10^{-1} dB/cm;文献[22]利用 3D 打印技术制作太赫兹波段的 Kagome 光纤,实现 0.2 ~ 1.0 THz 范围内的平均传输损耗为 2.0 dB/cm;文献[23]分析了一种基于环烯烃共聚物(cyclic olefin copolymer, COC)材料的中空太赫兹光纤,该光纤可以获得近零波导色散、高传输带宽和 $5.0 \times$

10^{-2} dB/cm 的低材料损耗;文献[24]提出反谐振椭圆光纤芯与管模耦合的研究,在 1.0 THz 时的限制损耗低于 5.0×10^{-4} dB/cm;文献[25]利用 3D 打印技术实现了聚合物光纤的半椭圆制造,在 2.44 THz 时,限制损耗最低为 3.2×10^{-6} dB/cm,在 2.04 ~ 2.40 THz 频率范围内波导色散保持在 $-0.18 \sim 0.05$ ps/(THz/cm) 之间。

本文采用 COC 材料,提出一种新的波导结构空芯 NCF,研究 2.0 ~ 2.5 THz 频率范围内结构参数对 NCF 高效单模低损耗传输的影响。计算结果表明,反共振包层结构可以有效地降低太赫兹 NCF 限制损耗,最低值可降到 8.9×10^{-5} dB/m;在 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围通过引入纵向内包层破坏光纤的对称性,分析结构参数变化造成的模式耦合对双折射的影响,2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内双折射可达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。该光纤可以使用 3D 打印技术制造。

1 太赫兹 NCF 基本理论和物理模型

1.1 有限元法

与传统光纤直接求解麦克斯韦方程组获得解析解不同,由于负曲率光纤 NCF 端面微结构,通过数值计算来求解光纤相关结构。目前已有多种数值计算方法相继应用,如时域差分法、等效折射率法、束传输法、平面波展开法、有限元法(finite element method, FEM)等,本文主要应用 FEM^[26]法。FEM 法具有灵活度高、准确性好、复杂结构适应性高等优良特点,配合数值计算上的完美匹配层(perfectly matched layer, PML)和边界条件^[27],可以准确求出 NCF 中的模场分布和传输参数特性,如有效折射率、限制损耗、双折射等。FEM 原理是把边值问题转化为变分问题,再通过将所求解的变分问题剖分插值离散为普通多元函数的极值问题,求解出待求边值问题的数值解。过程中最主要的是剖分插值,将连续场剖分为有限单元,每个有限单元的解由较为简单的插值函数表达。通过将全部单元总体合成后引入边界条件,可以对内部和边界上的每个单元采用同样的插值函数,使得构造方法简便。自然边界条件也被包含在泛函达到极值的要求中,最后只需考虑边界条件的处理,即可进一步简化对光纤微结构的计算。

1.2 NCF 的基本理论与物理模型

本文研究的太赫兹六环 NCF 结构如图 1 所示,最外层黑色区域为 PML,相邻的橙色区域为

保护层,填充材料为 COC。光纤由 6 个包层圆环组成,蓝色区域为包层管壁,管壁材料为 COC,壁厚为 t 。确定 PML 边界厚度时,通常选取的厚度小于光纤外保护层,可设置为选取波长的 $1/2$ 。被 6 个包层圆环围绕的虚线灰色区域即为光纤的纤芯区域,纤芯区域由空气填充。

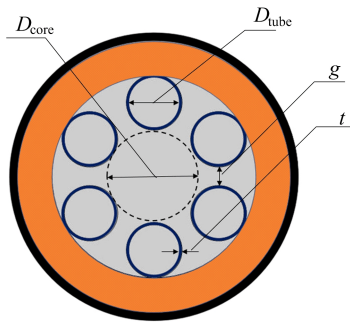


图 1 太赫兹波段 NCF 的结构剖面图

图 1 中: D_{tube} 为包层管直径; g 为包层环之间的间隙; D_{core} 为纤芯直径。

由图 1 可得包层管直径 D_{tube} 与纤芯直径 D_{core} 的关系为:

$$D_{\text{core}} = \frac{D_{\text{tube}} + 2t + g}{\sin(\pi/p)} - (D_{\text{tube}} + 2t) \quad (1)$$

其中, p 为管环的数量。

根据反谐振波导理论,可以通过计算满足太赫兹频率下的谐振壁厚和反谐振壁厚,即

$$t = \frac{mc}{2f(n_1^2 - n_0^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$t = \frac{(m - 0.5)c}{2f(n_1^2 - n_0^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

其中: m (正整数)为共振的阶数; f 为对应的太赫兹频率; n_0 为纤芯中空气的有效折射率,一般为 1.0; n_1 为 COC 材料的有效折射率。COC 材料的有效折射率 n_1 可根据变形后的 Sellmeier 方程^[28]给出:

$$n_1^2 = A_1 + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - A_3} \quad (4)$$

其中: $A_1 = 2.405$; $A_2 = 0.266$; $A_3 = 0.206$; λ 为对应频率下的波长。

太赫兹信号在光纤中传输时,除了纤芯中存在模式以外,在包层管壁、包层管中同样也存在模式。在满足反谐振条件下,太赫兹信号会从包层管壁中反射回纤芯中,减少纤芯模式的泄露。因此,包层管壁厚要满足反谐振条件,可以有效降低限制损耗;包层管直径需要满足反谐振条件,将模式限制在纤芯中。包层管模式有效折射率会随着

直径的变化与纤芯模式有效折射率逐渐接近,使得纤芯模式与包层管模式发生耦合。因此,可以通过改变纤芯和包层管的直径大小抑制纤芯模式和包层管模式耦合。

太赫兹信号在光纤中传输时,传输限制损耗 (confinement loss, CL)^[29] 可以表示为:

$$L_C = \frac{40\pi f \text{Im } n_{\text{eff}}}{c \ln 10} \quad (5)$$

其中: c 为真空光速; $\text{Im } n_{\text{eff}}$ 为有效折射率的虚部。通过式(5)计算有效折射率可以得出传输中模式泄露造成的限制损耗。

本文不仅研究太赫兹信号在光纤中限制损耗的大小,还将研究 NCF 的双折射特性。光纤中产生双折射的原因如下:① 应力产生双折射,光纤受到应力作用时,折射率会发生相应的改变;② 几何结构产生双折射,通过改变光纤的结构降低横截面上的旋转对称性;③ 由于外部形状改变导致双折射,例如光纤的弯曲、扭曲;④ 场致双折射,当外界电磁场施加在光纤上,会产生克尔效应和法拉第效应,导致双折射产生。

双折射系数 B 公式如下:

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_{x\text{-eff}} - n_{y\text{-eff}}| \quad (6)$$

其中: k_0 为传播常数; $n_{x\text{-eff}}$ 为 x 方向有效折射率; $n_{y\text{-eff}}$ 为 y 方向有效折射率。

2 光纤参数对传输特性的影响

2.1 壁厚和包层管直径对限制损耗的影响

基于反谐振理论,光纤壁厚和包层管直径影响纤芯基模限制损耗曲线如图 2 所示。

以 2.5 THz 为基准频率进行设计,采用单包层六环 NCF,管内纤芯直径设置为 2.0 mm,包层管直径设置为 1.2 mm,计算包层管壁厚随着频率变化对传输损耗的影响。

从图 2a 可以看出:随着管壁厚度的增加,有 3 个损耗呈先减小后增大的周期变化;纤芯中传输的信号光在不同的壁厚下发生反谐振,随着管壁的逐渐变大依次发生一阶、二阶和三阶反谐振;损耗最低点分别在 0.028、0.080、0.130 mm 处;最低限制损耗出现在一阶反谐振区域,为 2.66×10^{-3} dB/m。因此,选取合适的包层管壁厚 t 来降低限制损耗是必要的,在考虑损耗最低和制造尺寸不过大的情况下,选取 0.028 mm 作为最佳的壁厚 t 尺寸。

图 2b 所示为包层管直径 D_{tube} 大小对限制损

耗的影响,频率为 2.5 THz,固定 t 为 0.028 mm, D_{core} 为 2.0 mm,通过改变包层管直径研究限制损耗的变化。从得到的限制损耗随 NCF 管径变化的曲线可以看出:随着包层管直径从 0.3 mm 增加到 1.2 mm 时,限制损耗也会随之逐渐降低,这是由于在包层管较小时,相邻包层管之间的间隙较大,纤芯中传输的信号光会泄漏到这些较大的间隙中;但随着间隙的减小,纤芯中的模式泄露也在逐渐变小,在 1.2 mm 时限制损耗达到最小为 1.3×10^{-3} dB/m;管径继续增大时,包层管中的模式与纤芯中的模式会发生模式耦合,导致限制损耗增加。因此,包层管直径与纤芯直径的比例应该保持在 0.6,可以得到最低限制损耗。设置合理的管径与纤芯直径比例在一定程度上能抑制包层管模式与纤芯模式耦合。

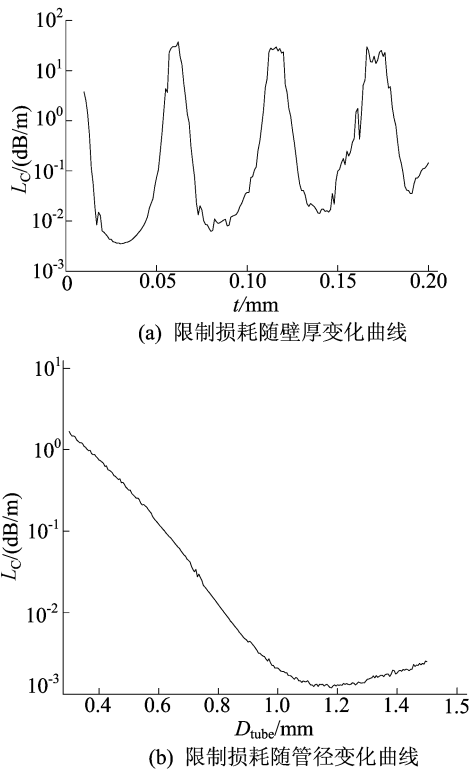


图 2 光纤壁厚和管径对限制损耗的影响

2.2 纤芯直径对限制损耗的影响

纤芯直径对光纤传输损耗也会有一定的影响,因此需要考虑光纤能够低损耗导光传输下计算得到合适的纤芯尺寸。设置相应的包管壁厚 t 为 0.028 mm,研究在 2.0 ~ 2.5 THz 频率范围内纤芯直径逐渐增大的情况下,限制损耗随频率的变化。

纤芯直径逐渐变大后限制损耗随频率变化的曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出:当纤芯直径从 1.5 mm 增大到 4.0 mm 时,频率为 2.0 THz 时的

限制损耗从最高 1.50×10^{-1} dB/m 降到 2.80×10^{-4} dB/m;频率为 2.5 THz 时的限制损耗从 1.07×10^{-2} dB/m 降到 8.90×10^{-5} dB/m。

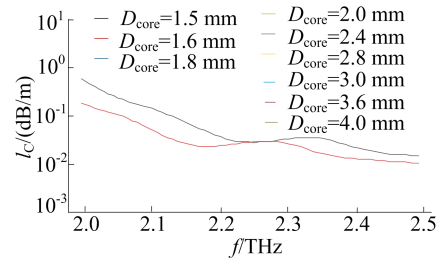


图 3 纤芯直径改变后限制损耗随频率变化的曲线

由上可知,纤芯直径越大限制损耗越低。在一些实际的应用场景中,如光纤激光器,需要保证光纤单模传输,增大纤芯直径会产生高阶模,影响光纤模式的纯度。因此为了保证高效单模传输,设置纤芯直径为 3.0 mm。

2.3 内包层直径和壁厚对双折射的影响

引入内包层管来研究 NCF 的双折射,太赫兹波段双折射 NCF 剖面图如图 4 所示。

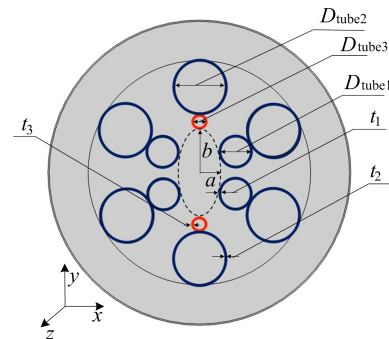


图 4 太赫兹波段双折射负曲率光纤剖面图

图 4 中:蓝色区域和橙色区域均为包层管壁,材料为 COC 聚合物; t_1 为内层蓝色包层管的壁厚; D_{tube1} 为内包层管径; t_2 为外层蓝色大包层管的壁厚; D_{tube2} 为大包层管径;橙色区域为改变结构后的小内包层,其壁厚为 t_3 ,管径为 D_{tube3} ;包层管中椭圆虚线区域和各个包层管中间灰色区域为空气填充材料。

通过改变垂直 y 方向上的小内包层管的管壁和包层管直径,研究对光纤双折射和限制损耗的影响。外包层管大小只影响限制损耗,而不影响双折射,合理设计外包层的管径和壁厚可以有效控制限制损耗。改变内包层管的壁厚,使纤芯中的模式和管壁模式发生反交叉的模式耦合,从而

改变光纤中纤芯模式的有效折射率。

设置太赫兹频率为 2.5 THz, 外包层的壁厚为 0.028 mm, 外包层管径为 2.0 mm, 纤芯直径为 3.0 mm。

当管壁 t_3 与其余包层管壁 t_1 、 t_2 相同时, 只改变光纤内包层直径的大小, 在 y 方向上不同的小内包层管径 $D_{\text{tube}3}$ 随着频率变化下的双折射系数 B 和限制损耗变化曲线如图 5 所示。

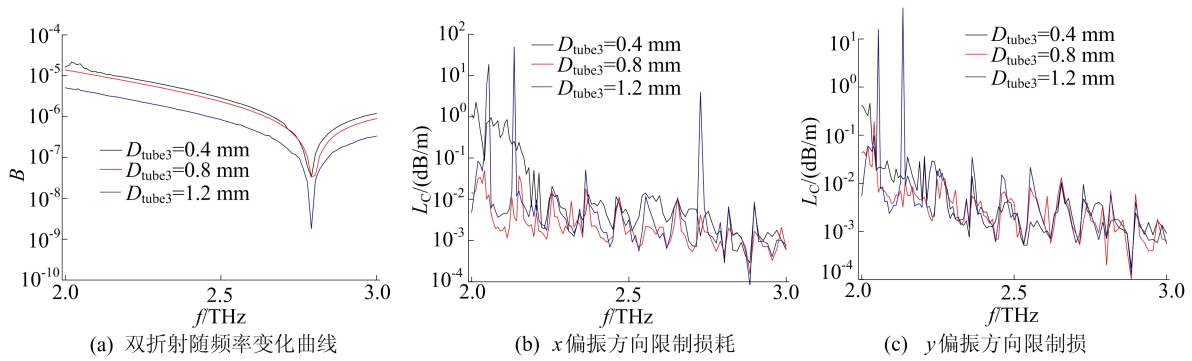


图 5 改变内管径 $D_{\text{tube}3}$ 后双折射和限制损耗随频率变化曲线

由图 5a 可知: 随着频率在 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内增加, 双折射系数先逐渐降低再逐渐增加, 这是由于随着频率的增加, 固定的 t_3 接近反谐振壁厚最低损耗点, 此时壁厚能很好地抑制纤芯模式泄露, 双折射系数逐渐降低; 当频率继续增加时, 对应的反谐振区的壁厚值继续降低, 逐渐远离 t_3 固定值, 使得双折射系数继续增加, 频率 2.0 THz 时双折射 B 最大, 为 2.1×10^{-5} 。从图 5a 还可以看出, 包层管直径对双折射系数也有一定的影响, 且包层管直径越小, 双折射的系数越高。此时由于内、外包层管壁厚 t_1 、 t_2 与 t_3 差异较小, 双折射主要受到小内包层管 $D_{\text{tube}3}$ 的管径大小的影响, 这是由于光纤中的包层管不对称排列破坏

了结构对称性产生双折射。因此当管径 $D_{\text{tube}3}$ 越小时, 双折射系数越大。

图 5b 和图 5c 给出了对应管径 $D_{\text{tube}3}$ 下的 x 和 y 方向的限制损耗, 可以看出随着频率的增加, 损耗在不断地降低。由于外包层管可以有效抑制纤芯模式的泄露, 光纤的整体损耗在 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内, 依然不超过 10 dB/m, 最低损耗为 1.64×10^{-4} dB/m。将小内包层管壁厚 t_3 改变为 0.040 mm, 使得外包层与大内包层的管壁厚度 0.028 mm 有明显区别。研究随着小内包层管直径 $D_{\text{tube}3}$ 改变的双折射系数变化曲线以及不同管径 $D_{\text{tube}3}$ 下对应的 x 方向和 y 方向纤芯基模限制损耗曲线, 如图 6 所示。

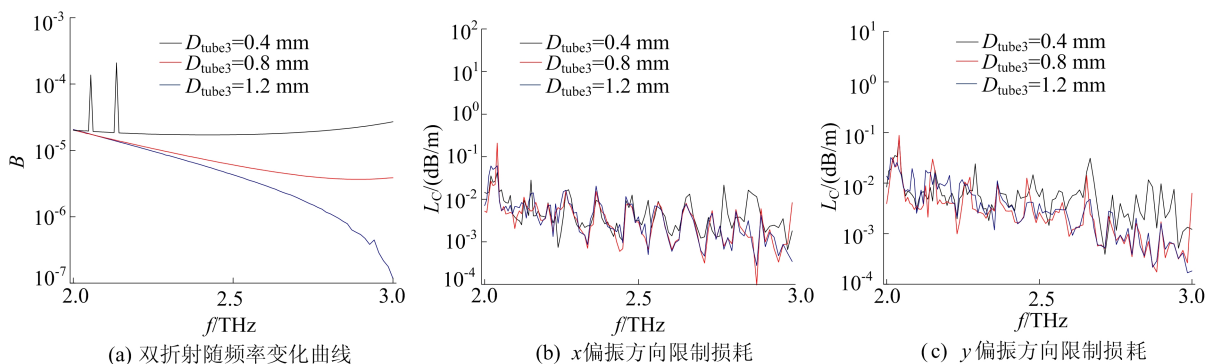


图 6 改变内包层管径 $D_{\text{tube}3}$ 和壁厚 t_3 后双折射和限制损耗随频率变化曲线

从图 6a 可以看出, 相较于小内包层管壁厚 $t_3 = 0.025$ mm, t_3 为 0.040 mm 时的双折射系数明显提高。依旧固定 t_1 、 t_2 为 0.028 mm, 大内包层 $D_{\text{tube}1}$ 为 1.2 mm, 外包层管径 $D_{\text{tube}2}$ 为 2.0 mm, 由图 6a 可知, 当包层管径越大时双折射系数越高,

在 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内, 双折射系数可以达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 范围, 在 2.13 THz 时最高双折射系数为 2.09×10^{-4} 。

图 6b 和图 6c 给出了 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内, x 和 y 偏振方向下的纤芯基模限制损耗, 损

耗最大不超过 1.0 dB/m, x 和 y 偏振方向上损耗维持在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ dB/m 内。

由以上分析可知,当同时改变壁厚 t_3 和小内包层管径 D_{tubc3} ,可以有效地改变纤芯模式与管壁模式之间的耦合,获得更高的双折射系数,此时的壁厚 t_3 接近共振壁厚,管壁与纤芯模式的耦合会改变 y 偏振方向的有效折射率,从而产生双折射。

3 结 论

本文设计了一种可以在太赫兹波段传输的新型 NCF 波导,通过研究 NCF 的光纤包层管壁厚、包层管直径、纤芯直径等结构参数对限制损耗的影响,计算得到在 2.0 ~ 2.5 THz 范围内限制损耗为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ dB/m 的 NCF,并对影响损耗的关键因素进行数值模拟,得到最低损耗为 8.9×10^{-5} dB/m。通过引入纵向内包层破坏光纤的对称性,改变纤芯模式和管壁模式的耦合,分析影响太赫兹波段 NCF 双折射的因素,双折射在 2.0 ~ 3.0 THz 频率范围内维持在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$,限制损耗最大不超过 10 dB/m, x 和 y 偏振方向上损耗保持在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ dB/m 范围内。

本文工作为长距离通信、偏振敏感和滤波等应用提供了一定的理论依据和数值参考。

[参 考 文 献]

- [1] KARL N J, MCKINNEY R W, MONNAI Y, et al. Frequency-division multiplexing in the terahertz range using a leaky-wave antenna[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 717.
- [2] WITHAYACHUMNANKUL W, PNG G M, YIN X X, et al. T-ray sensing and imaging[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1528-1558.
- [3] ISLAM M S, COREIRO C M D B, FRANCO M A R, et al. Terahertz optical fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16089-16117.
- [4] RUTZ F, HSEK T, KOCH M, et al. Terahertz birefringence of liquid crystal polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(22): 221911-1-221911-3.
- [5] FISCHER B M, WALTHER M, PUHD J, et al. Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, 47(21): 3807-3814.
- [6] HUANG Y W, TSENG T F, KUO C C, et al. Fiber-based swept-source terahertz radar[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1344-1346.
- [7] CERQUEIRA A S, JU R. Hybrid photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 926-931.
- [8] MENDIS R, MITTLEMAN D M. Comparison of the lowest-order transverse-electric (TE₁) and transverse-magnetic (TEM) modes of the parallel-plate waveguide for terahertz pulse applications[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14839-14850.
- [9] KIM S H, LEE E S, JI Y B, et al. Improvement of THz coupling using a tapered parallel-plate waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1289-1295.
- [10] JAMISON S P, MCGOWAN R W, D GRISCHKOWSKY, et al. Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulses in sapphire fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(15): 1987-1989.
- [11] HASSANI A, DUPUIS A, SKOROBOGATYIY M, et al. Low loss porous terahertz fibers containing multiple subwavelength holes[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(7): 3.
- [12] PONSECA C S, POBRE R, ESTACIO E, et al. Transmission of terahertz radiation using a microstructured polymer optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 902-904.
- [13] BAO H L, NIELEN K, RASMUSSEN H K, et al. Fabrication and characterization of porous-core honeycomb band-gap THz fibers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29507-29517.
- [14] ZHENG Z, KANDA N, KONISHI K, et al. Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal-wires[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10642-10650.
- [15] HASAN M R, ANOWER M S, HASAN M I, et al. Polarization maintaining low-loss slotted core kagome lattice THz fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1751-1754.
- [16] WANG G Y, LU Y, YANG X C, et al. Square-lattice alcohol-filled photonic crystal fiber temperature sensor based on a Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2132-2136.
- [17] MURAO T, SAITOH K, M KOSHIBA, et al. Multiple resonant coupling mechanism for suppression of higher-order modes in all-solid photonic bandgap fibers with heterostructured cladding[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 1713-1727.
- [18] DUGUAY M A, KOKUBUN Y, KOCH T L, et al. Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(1): 13-15.
- [19] PEARCE G J, WIEDERHECKER G S, POULTON C G, et al. Models for guidance in kagome-structured hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12680-12685.
- [20] LU J Y, YU C P, CHANG H C, et al. Terahertz air-core microstructure fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(6): 3.
- [21] 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.
- [22] YANG J, ZHAO J Y, GONG C, et al. 3D printed low-loss THz waveguide based on Kagome photonic crystal structure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22454-22460.
- [23] HASANUZZAMAN G K M, IEZEKIEL S, MARKOS C,

- et al. Hollow-core fiber with nested anti-resonant tubes for low-loss THz guidance[J]. Optics Communications, 2018, 180: 477-482.
- [24] SUN S, SHI W, SHENG Q, et al. Investigation of mode couplings between core and cladding of terahertz antiresonant fibres[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2021, 54(18): 7.
- [25] MENG M, YAN D X, YUAN Z W, et al. Novel double negative curvature elliptical aperture core fiber for terahertz wave transmission[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2021, 54(23): 7.
- [26] BRECHET F, MARCOU J, PAGNOUX D, et al. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method[J]. Optical Fiber Technology: Materials, Devices and Systems, 2000, 6(2): 181-191.
- [27] SELLERI S, ZOBO L. Performance comparison of finite-element approaches for electromagnetic waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science and Vision, 1997, 14(7): 1460-1466.
- [28] KHANARIAN G, CELANESE H. Optical properties of cyclic olefin copolymers [J]. Optical Engineering, 2001, 40(6): 1024-1029.
- [29] POLETTI F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23807-23828.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1705 页)

- [19] WANG X, DING Z, ZHAO Y N, et al. Effects of lutein particle size in embedding emulsions on encapsulation efficiency, storage stability, and dissolution rate of microencapsules through spray drying[J]. LWT, 2021, 146: 111430.
- [20] 梁秀萍. 乳清分离蛋白海藻酸钠乳液递送体系的设计及其对番茄红素稳态化的机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [21] 闫勇. 多酚蛋白糖共价复合物稳定叶黄素乳液的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [22] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [23] 潘怡. 酰化接枝双改性乳清蛋白基纳米乳液的制备及应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [24] 李琳, 赵倩, 闻汉康, 等. 半乳甘露聚糖聚(N-异丙基丙烯酰胺)复合水凝胶的制备与性能[J]. 林业工程学报, 2021, 6(5): 120-127.
- [25] MA J, HUNG X, YIN S, et al. Bioavailability of quercetin in zein-based colloidal particles-stabilized Pickering emulsions investigated by the in vitro digestion coupled with Caco-2 cell monolayer model[J]. Food Chemistry, 2021, 360(30): 130-152.
- [26] 陈艾霖, 林琼妮, 张若兰, 等. pH和热处理对负载叶黄素的尼罗罗非鱼分离蛋白乳液贮藏稳定性和体外消化的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(8): 189-201.
- [27] 冯慧敏. 玉米纤维胶在叶黄素纳米乳液中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [28] 夏书芹, 李雪琦, 姚宽, 等. 叶黄素微胶囊的制备及稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 274(10): 59-63.
- [29] 王燕. 自组装壳聚糖 Pickering 乳液对其负载 β -胡萝卜素的稳定性研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2020.
- [30] 贾润红. pH对糖基化花生蛋白乳化特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(3): 107-110.
- [31] 刘圣雅, 彭媛媛, 张甫生, 等. 酸诱导对大豆蛋白/高酯果胶复合体系凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(6): 104-109.
- [32] 高雅馨. 乳铁蛋白肉桂酸复合沙棘籽油凝胶的制备及其消化特性的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [33] HU Y, LIU F, PANG J X, et al. Biopolymer additives enhance tangeretin bioavailability in emulsion-based delivery systems: an *in vitro* and *in vivo* study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 69(2): 730-740.

(责任编辑 张 镅)