

超低损耗高双折射空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤

惠战强^{1*}, 杨雪¹, 韩冬冬¹, 李田甜¹, 赵峰¹, 杨祎¹, 陈素果²

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121;

2. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文提出了一种以环烯烃共聚物(Cyclic Olefin Copolymer, COC)为基底的超低损耗高双折射空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤, 该光纤的包层由两组(共六个)无节点嵌套管组成。采用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)结合完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)边界条件对其导波特性和色散特性进行分析。仿真结果表明, 在 0.8~1.35 THz 范围内, 总传输损耗小于 0.1 dB/m, 双折射大于 2.12×10^{-5} , 色散为 ± 0.027 ps/THz/cm。在 1.12 THz 处, 最低总传输损耗仅为 0.543×10^{-2} dB/m, 双折射值为 2.06×10^{-4} 。同时, 分析了该光纤的弯曲性能, 表明在 y 方向, 当弯曲半径超过 19 cm 时, 弯曲损耗小于 0.1 dB/m, 具有良好的弯曲性能。

关键词: 空芯反谐振光纤; 太赫兹; 高双折射; 低损耗

中图分类号: TN253

文献标识码: A

High birefringence hollow-core anti-resonant terahertz photonic crystal fiber with ultra-low loss

HUI Zhan-Qiang^{1*}, YANG Xue¹, HAN Dong-Dong¹, LI Tian-Tian¹, ZHAO Feng¹, YANG Yi¹, CHEN Su-Guo²

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;
2. School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: An ultra-low loss and high birefringence hollow core anti-resonant terahertz photonic crystal fiber based on cyclic olefin copolymer (COC) is proposed. The cladding of the fiber consists of two groups (six in total) nodeless embedded sleeves. The guided wave characteristics are analyzed by using the finite difference time domain method combined with the perfectly matched layer boundary conditions. The simulation results show that the total transmission loss is less than 0.1 dB/m, birefringence is more than 2.12×10^{-5} within the range of 0.8-1.35 THz, dispersion in ± 0.027 ps/THz/cm. At 1.12 THz, the minimum total transmission loss is only 0.543×10^{-2} dB/m, birefringence value 2.06×10^{-4} . The bending performance of the fiber is analyzed. It is shown that in y direction, when the bending radius is more than 19 cm, the bending loss is less than 0.1 dB/m, and the bending performance is good.

Key words: Hollow-core anti-resonant fiber, terahertz, high birefringence, low loss

引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)^[1] 的电磁辐射, 位于毫米波和远红外波之间, 由

于其在光谱中的独特位置, 太赫兹波在安全、医疗、传感和通信领域^[2-5] 中的应用日益广泛。但自由空间中的水蒸气对太赫兹波有很强的吸收作用, 极大

收稿日期: 2021-08-19, 修回日期: 2022-03-07

Received date: 2021-08-19, Revised date: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(61875165); 陕西项目创新能力支持计划(NO:2021TD-09); 陕西省国际合作交流项目(2020KWZ-017); 陕西省教育厅协同创新项目(20JY060); 西安邮电大学联合研究生培养工作站(YJGJ201905); 西安邮电大学研究生创新基金(CXJJZ2019025)

Foundation items: Supported by the National Nature Science Fund of China (61875165), Innovation Capability Support Program of Shaanxi Program (No: 2021TD-09), the International Science and Technology Cooperation & Exchange Project of Shaanxi (2020KWZ-017), and Shaanxi Provincial Department of Education Collaborative Innovation Project (20JY060), Xi'an University of Posts and Telecommunications Joint Postgraduate Cultivation Workstation (YJGJ201905), and the Graduate innovation fund of Xi'an University of Posts and Telecommunications (CXJJZ2019025)

作者简介(Biography): 惠战强(1978-), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士, 主要研究领域为光纤通信与微纳光子器件. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

限制了传输距离。因此,设计一种低损耗柔性太赫兹波导,并通过该波导传输和控制THz波,具有重要的工程实用价值。最近,聚合物光纤被认为是一种传输太赫兹波的理想介质^[6-9]。用于制作太赫兹聚合物光纤的材料一般有:聚乙烯^[10]、聚四氟乙烯^[11]、聚甲基丙烯酸甲酯^[12]、聚酰亚胺^[13]、环烯烃共聚物(Cyclic Olefin Copolymer, COC)^[14]等。其中,环烯烃共聚物是烯烃共聚物的一种,属于非结晶的热塑性塑料,因其在太赫兹范围内具有折射率稳定、损耗极低、透光率好、熔点低、高的水蒸气阻隔性、柔软易弯曲等优点而被广泛用作太赫兹光子晶体光纤的基底材料^[15]。到目前为止,已经证明了用于太赫兹波传输的各种聚合物光纤,包括布拉格光纤^[16]、实芯光子晶体光纤^[17]、多孔芯光子晶体光纤^[18]和空芯光子晶体光纤^[19]。其中,布拉格光纤、实芯光子晶体光纤受到材料吸收损耗的严重影响,与之相比,多孔芯光子晶体光纤,其纤芯由微空气孔组成,可以有效减少光与材料的相互作用,有效降低材料吸收损耗^[18,20]。对于空芯光子晶体光纤而言,纤芯均为空气,光在空气中传播,极大减少了材料吸收引起的损耗。根据工作原理不同,空芯光子晶体光纤可分为两种类型:空芯光子带隙光纤(Hollow-Core Photonic Band Gap Fiber, HC-PBGF)和空芯反谐振光纤(Hollow-Core Anti-Resonant Fiber, HC-ARF)。在HC-PBGF中,光通过光子带隙效应传播。而在HC-ARF中,光通过反谐振效应传播^[21]。对于HC-PBGF,虽然借助光子带隙效应可以实现有效的空芯模式传输,但由于相对较差的模式纯度和较大的表面散射损耗,限制了其广泛应用。与之相比,HC-ARF基于反谐振效应导光,其工作频段可以通过改变管厚来灵活调谐,而且具有可调控的色散、极低的传输损耗、柔软易弯曲和更宽的工作频段,吸引了越来越多的关注^[22-24]。

高双折射太赫兹光纤能够实现太赫兹波的保偏传输,在太赫兹通信、成像、太赫兹时域光谱系统和太赫兹频段生物材料测量^[25-28]中具有潜在的应用。2018年,S. Yan^[29]设计了一种基于COC材料的HC-ARF,该光纤具有十个圆形包层管,其中管与管耦合连接。该光纤通过在水平方向添加两个大管破坏结构对称性,来引入高双折射。在2.34 THz下,其最小限制损耗为1.68 dB/m,相应的双折射为 2.5×10^{-4} ,但限制损耗相对较高,且没有分析有效材料吸收损耗。为了进一步降低传输损耗,研究人员

陆续提出了各种“无节点”结构和“嵌套管”结构。如2019年,Xiao等人^[30]提出了一种具有四个半椭圆包层管的新颖HC-ARF,通过改变正交方向上的管厚来引入双折射,在0.9 THz处,最低总损耗为0.5 dB/m,相应的双折射值为 1.52×10^{-4} 。2020年,A M A M等人^[31]提出了一种具有四个圆形包层管的空芯反谐振光纤,通过只在一个方向上加嵌套管破坏结构对称性来引入双折射。在1.1 THz时,最低总损耗为0.34 dB/m,相应的双折射 1.1×10^{-4} 。这些研究极大降低了传输损耗,为高双折射光纤的设计提供了有益参考,但也表明,低损耗和高双折射是两个相互制约的因素,要想实现高双折射,要以牺牲低损耗带宽为代价。因此,要在太赫兹波段设计低损耗高双折射空芯反谐振光纤仍然是一个具有挑战的问题。

本文提出了一种基于COC材料的空芯反谐振高双折射太赫兹光子晶体光纤,包层区域由两组(共六个)无节点嵌套管组成。空芯管的尺寸有大中小三种,其中,大管和中管、中管和小管分别组成了相应的嵌套管。大管有2个分布在y轴上,中管有6个均匀分布在光纤中,小管共4个分别嵌套在y轴两侧的中管内。采用这种新颖结构的原因是,嵌套结构可以形成多层级联,从而减少能量泄露,同时,无节点结构可以避免因包层管接触而产生的谐振损耗,最终降低了光纤的总传输损耗。此外,通过使用两组尺寸不同的嵌套管打破了光纤结构对称性,增大了双折射。采用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)对其双折射、限制损耗、有效材料吸收损耗、模场和波导色散等特性进行了分析。数值结果表明,在0.8~1.35 THz范围内,总传输损耗小于0.1 dB/m,双折射大于 2.12×10^{-5} 。在1.12 THz处,最低总传输损耗为 0.543×10^{-2} dB/m,双折射值为 2.06×10^{-4} 。该光纤在y方向具有良好的弯曲性能,当弯曲半径大于19 cm时,弯曲损耗小于0.1 dB/m。

1 光纤的几何结构与机理分析

所设计的空芯反谐振太赫兹光纤其横截面如图1所示,白色区域是空气,蓝色区域代表COC基底材料。该光纤的包层是由两组(共六个)嵌套管组成。y轴方向上的两个嵌套管尺寸相同,其余四个嵌套管尺寸一致。最大圆环的直径为 d_1 ,中间圆环的直径为 d_2 ,最小圆环的直径为 d_3 。虚线圆的直径为 d_0 (将 d_0 固定在3 mm)。圆环的厚度均为 t 。所设

计光纤的基底材料选用COC,因其在太赫兹波段具有折射率恒定、材料吸收损耗低等优点^[29-30]。该材料折射率与波长的关系可通过 Sellmeier 方程描述如下^[6]:

$$n^2(\lambda) = A_1 + \frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2 - A_3^2}, \quad (1)$$

Sellmeier 方程各个系数分别为 $A_1=2.045$, $A_2=0.266$, $A_3=0.206$ 。根据该公式计算得到在 0.1~10 THz 频率范围内,COC 的有效折射率与频率的关系如下图 2 所示。由图可知,COC 的有效折射率随频率变化在所研究太赫兹频率范围内并不大。

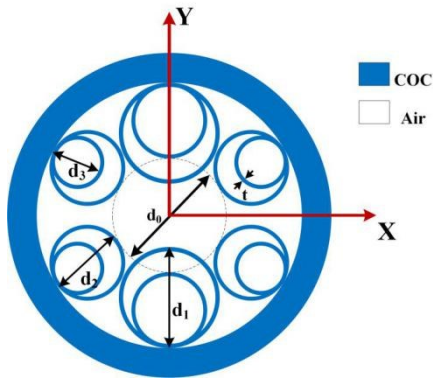


图1 所设计的空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤截面图
Fig. 1 Cross section of the proposed THz HC-ARF

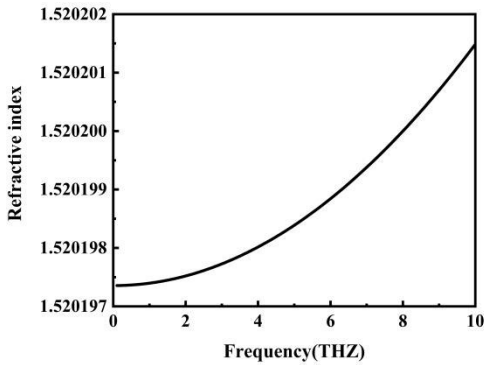


图2 COC有效折射率与频率的关系图
Fig. 2 Relationship between effective refractive index and frequency of COC

空芯反谐振光纤的导光机理是反谐振效应。所谓谐振频率是指光纤中,纤芯和包层模式之间的相位发生匹配的频率。若入射光频率为谐振频率,当其在光纤中传输时,传输损耗最大。与之相比,在反谐振频率处,光被强烈地限制在空气芯中,导致传输损耗较低。谐振频率可以通过以下公式

计算^[6]:

$$f_m = \frac{mc}{2t\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad m \in N^+, \quad (2)$$

其中 c 是真空中光速, n_1 是 COC 的折射率, n_2 是空气的折射率, t 是管的厚度, m 是谐振阶次。

在空芯反谐振光纤中,主要的损耗是限制损耗 (Confinement Loss, CL) 和有效材料吸收损耗 (Effective Material Loss, EML), 二者统称为总传输损耗。限制损耗可以通过以下公式计算^[32]:

$$CL = 8.686 k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ dB/m}, \quad (3)$$

其中, $k_0 = 2\pi f/c$, f 表示频率, c 表示光速, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示有效折射率的虚部。有效材料吸收损耗可以通过以下公式计算^[33]:

$$EML = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{\text{mat}} n_{\text{mat}} |E|^2 \alpha_{\text{mat}} dA}{2 \left| \int_{\text{all}} S_z dA \right|} \right), \quad (4)$$

其中, ϵ_0 为真空中的介电常数, μ_0 为真空中的磁导率, n_{mat} 为材料的折射率, E 为模式电场大小, α_{mat} 为材料的吸收损耗系数, S_z 为 Z 向的坡印廷矢量 $S_z = (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot \vec{Z}$, all 表示光纤整体端面, mat 表示材料部分, 材料的体吸收系数为 $\alpha_{\text{mat}} = 0.36(f - 0.4) + 0.06 \text{ dB/cm}$ (f 的单位为 THz)^[34]。

光纤的双折射是指光波在光纤中传输时,其偏振模在 x 和 y 方向传输常数不同。双折射值可以通过以下公式计算^[29]:

$$B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|, \quad (5)$$

其中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示两个偏振方向上的传播常数所对应的模式折射率。

2 结构优化

双折射和损耗是空芯反谐振太赫兹光纤两个重要的特征参数,其与光纤结构密切相关。因此,我们需要分析光纤结构参数对其双折射和损耗特性的影响,以得到最优结构。本文使用 FDTD 法结合完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML) 边界条件分析导波特性的,其中仿真区域大小为 $8000 \times 8000 \mu\text{m}$, 网格单元数为 500×500 。

首先分析光纤总损耗和双折射随大圆环直径 d_1 的变化,仿真中根据经验法则设定 $d_2=1.9 \text{ mm}$, $d_3=1.4 \text{ mm}$, $t=0.09 \text{ mm}$ 不变,得到结果如图 3(c)。由图可知,所设计光纤的总传输损耗和双折射均随着大圆环直径 d_1 的增大而增大。双折射随 d_1 的增大而增大

的原因是当 d_1 增大时, x 方向与 y 方向之间的非对称性增强,因此双折射增大。总传输损耗随 d_1 的增大而增大的原因可以归结为两方面,一方面是有效材料吸收损耗的影响,有效材料吸收损耗是指材料本身对光场能量的吸收。当大环直径增大时,基底材料增多,对光场能量的吸收增强,从而有效材料吸收损耗增大。另一方面是限制损耗的影响,限制损耗是指由于光子晶体光纤中包层管的层数有限,导致包层对光波的约束能力有一定的局限性,进而造成部分能量泄露。当大圆直径改变时,导模的电磁场能量在光纤中的微观分布会发生变化,不仅引起能量在COC材料和空气中的占比变化,而且相应的导模有效折射率系数也会变化,因而导致有效材料吸收损耗和限制损耗均随之变化,如图3(c)所示。为了得到高双折射而避免损耗过大,因此选 d_1 为2.65 mm。

其次,分析光纤总损耗和双折射随中间圆环直径 d_2 的变化,仿真中设定 $d_1=2.65$ mm, $d_3=1.4$ mm, $t=0.09$ mm,得到结果如图3(b)。由该图可知,总传输损耗和双折射随着中环直径 d_2 的增大而减小。双折射随 d_2 的增大而减小的原因是当 d_2 增大时, x 方向与 y 方向之间的非对称性减弱,因此双折射减小。总传输损耗随 d_2 的增大而减小的原因与前面类似,可以归结为两方面,一方面是当中环直径增大时,基底材料增多,因此有效材料吸收损耗增大。另一方面是当中环直径增大时,纤芯区域增大,泄露到包层的纤芯能量减少,因此限制损耗减小。但材料吸收损耗增大的幅度小于限制损耗减小的幅度,限制损耗占主导,故总传输损耗随 d_2 的增大而减小。为了得到高双折射而避免损耗过大,因此选 d_2 为1.9 mm。

接着,分析了光纤总传输损耗和双折射随小圆环直径 d_3 的变化,仿真中设定 $d_2=1.9$ mm, $d_1=2.65$ mm, $t=0.09$ mm。得到结果如图3(a)。由该图可知,所设计光纤的总损耗和双折射随着小环直径 d_3 的增大而增大。双折射随 d_3 的增大而增大的原因与前面类似,是由 x 与 y 方向之间的非对称性增强所致。而总传输损耗随 d_3 的增大而增大的原因源于有效材料吸收损耗和限制损耗(当小环直径增大时,中环与小环之间的空间减小,嵌套环对光的限制能力减弱)均随 d_3 增大。为了得到高双折射而避免损耗过大,因此选 d_3 为1.4 mm。最后分析了光纤总传输损耗和双折射随管厚 t 的变化,结果如图3(d)所

示。由该图可知,所设计光纤的双折射随着管厚 t 的增大而增大,损耗随着管厚 t 的增大先减小后增大,在 $t=0.09$ mm时有最小损耗。因此将 t 取到0.09 mm。

综合以上分析结果,最终确定光纤的最优结构参数为 $d_1=2.65$ mm, $d_2=1.9$ mm, $d_3=1.4$ mm, $t=0.09$ mm。

3 优化后的光纤性能

通过以上的分析,得到光纤的最优结构参数为 $d_1=2.65$ mm, $d_2=1.9$ mm, $d_3=1.4$ mm, $t=0.09$ mm。根据公式(2)可知,谐振频率与管厚成反比,因此可以通过改变管厚来调整谐振频率。当管厚为0.09 mm时,谐振频率为1.44 THz,使得在0.7~1.5 THz的频率范围内存在传输窗口。图4分别显示了1.12 THz(非谐振频率)和1.44 THz(谐振频率)处光纤的模场分布。可以看出,在远离谐振频率处,模式可以很好地被限制在光纤纤芯中,而在接近谐振频率处,模式扩散到包层中。

所设计光纤的损耗与频率的关系如图5所示,由图5可得,损耗随着频率的增大先减小后增大,当频率靠近谐振频率1.44 THz时,损耗迅速增大。从图5(a)可以观察到, y 偏振模的限制损耗比 x 偏振模的限制损耗大,这是因为在 y 方向上大环 d_1 与中环 d_2 之间的空间比 x 方向上中环 d_2 与小环 d_3 之间的空间大,所以 y 方向上嵌套环对光的限制能力没有 x 方向上嵌套环对光的限制能量强。从图5(b)可以观察到, y 偏振模的有效吸收损耗比 x 偏振模的有效吸收损耗大,这是因为 y 方向上嵌套环的几何尺寸比 x 方向上嵌套环的几何尺寸大,所以基底材料在 y 方向的分布比 x 方向上的分布多。图5(c)中曲线的变化可以由图5(a)和图5(b)综合来解释。

所设计光纤的双折射、有效折射率与频率的关系分别如图5(d)所示,由图可知,双折射随着频率的增大先增大后减小,在1.34 THz处得到最大双折射 2.54×10^{-4} 。有效折射率随着频率的增大而增大,当频率靠近谐振频率1.44 THz时,有效折射率迅速增大,并且 x 偏振模的有效折射率和 y 偏振模的有效折射率之间的差异(即双折射)迅速减小。

偏振模能量分布显示了光纤内部不同区域的电磁场能量分布,它不仅可以直观地体现出不同频率的能量在光纤内的分布情况,还可以通过能量分布规律调节光纤结构参数,通过适度增大空气孔中的能量分布,减小材料中能量分布,从而最终实现

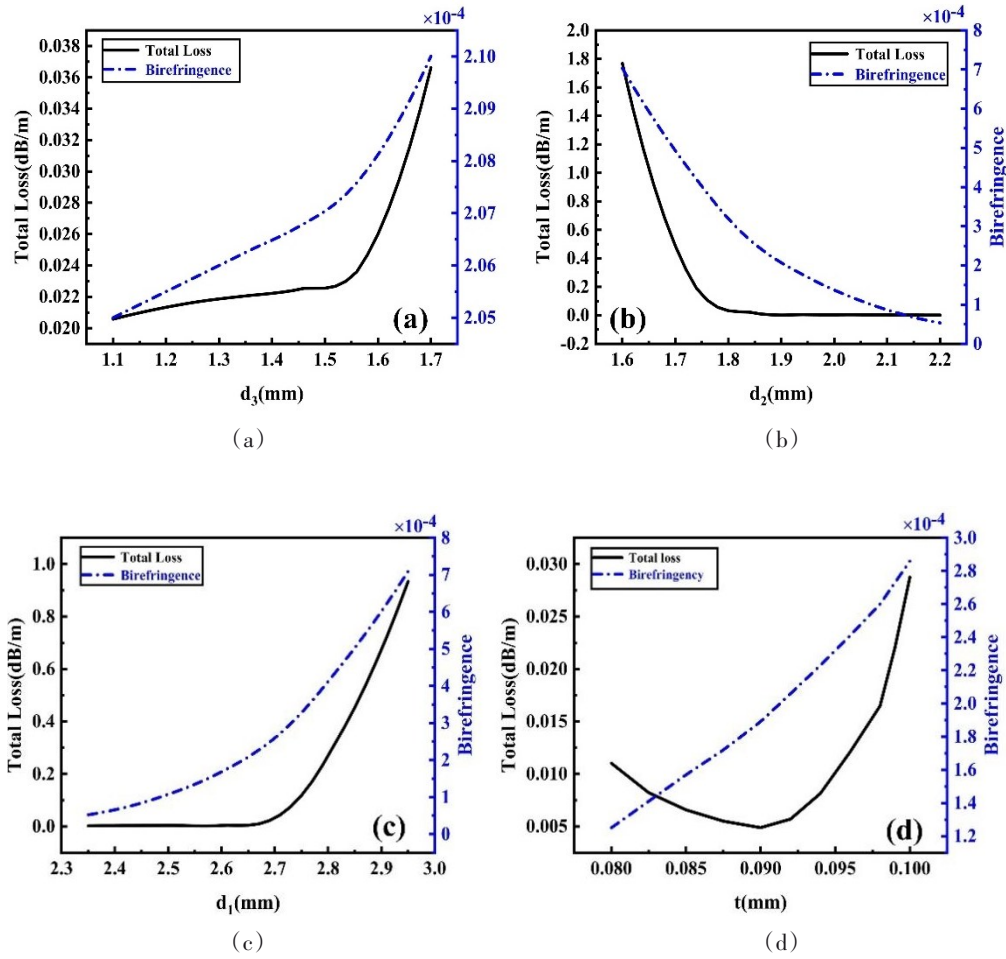


图3 所设计光纤的总损耗和双折射随 (a) d_3 , (b) d_2 , (c) d_1 , (d) t 变化
 Fig. 3 The total loss and birefringence of the designed fiber vary with (a) d_3 , (b) d_2 , (c) d_1 , (d) t

降低太赫兹波在材料中的有效吸收损耗这一目标。光纤中每个区域内的偏振模能量分布可以定义为^[35]:

$$Fraction \ of \ Power = \frac{\int_x \vec{S}_z dA}{\int_{all} \vec{S}_z dA} \quad , \quad (6)$$

其中 x 是空气芯或光纤背景材料两个区域之一。 all 表示的是光纤横截面的所有区域的总和。

针对所设计的光纤, 得到其偏振模能量分布和频率的关系如图6所示, 由图可知: 一方面, 随频率的增加, 所设计光纤能量在基底材料中的分布逐渐增大, 在空气中逐渐减小。原因在于, 当靠近谐振频率时, 纤芯中的模式能量逐渐向包层中泄露, 又因为光纤中材料的能量分布与空气中的能量分布之和为1, 所以光纤空气的能量分布随频率的变化曲线与材料的变化情况呈现相反的趋势。另一方

面, 无论在材料还是空气中, TE 和 TM 两个模式的能量分布随频率的变化趋势基本一致, 分析认为这是因为 TE 和 TM 两个模式的模场差别很小, 这一点也可以从图4得到印证。

色散是光纤的一个重要的光学参数, 色散会引起光纤中传输的光脉冲展宽, 影响光纤通信系统性能, 近零且平坦的色散分布对 THz 波的传输非常重要。单模光纤中的色散主要包括材料色散、波导色散和偏振模色散, 前两种统称为色度色散。由于 COC 的有效折射率在 0.1~1.5 THz 范围内近似是一个常数, 所以该频段下材料色散可以忽略不计, 色度色散主要来源于波导色散, 色度色散可用如下公式计算^[35]:

$$\beta_2 = \frac{dn_{eff}}{d\omega} \frac{2}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d^2 \omega} \quad , \quad (7)$$

其中 n_{eff} 为基模的有效折射率, 角中心频率 $\omega = 2\pi f$, f

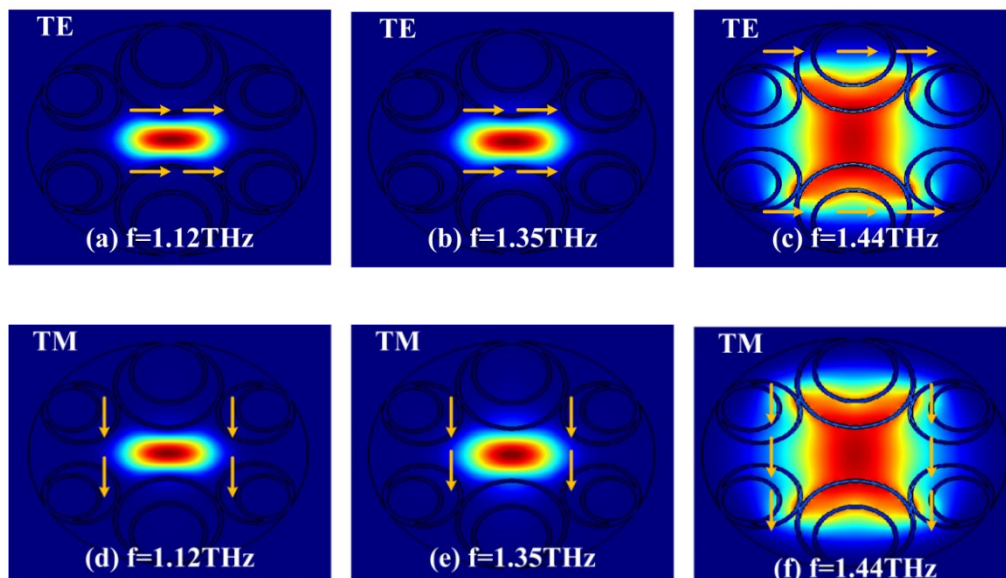


图4 模场分布 (a)TE $f=1.12$ THz, (b) TE $f=1.35$ THz, (c)TE $f=1.44$ THz, (d)TM $f=1.12$ THz, (e)TM $f=1.35$ THz, (f)TM $f=1.12$ THz

Fig. 4 Distribution of mode field (a)TE $f=1.12$ THz, (b) TE $f=1.35$ THz, (c)TE $f=1.44$ THz, (d)TM $f=1.12$ THz, (e)TM $f=1.35$ THz, (f)TM $f=1.44$ THz

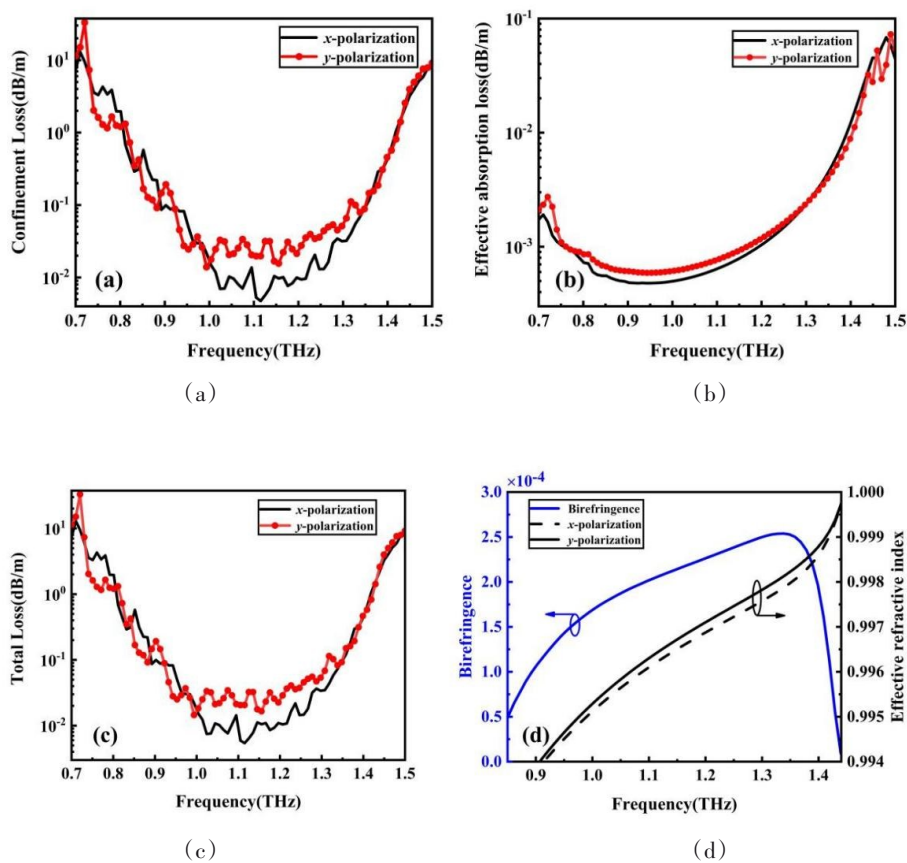


图5 (a) 限制损耗, (b) 有效材料吸收损耗, (c) 总损耗, (d) 双折射和有效折射率随频率的变化

Fig. 5 (a) CL, (b) EML, (c) TL, (d) birefringence and effective refractive index as a function of frequency

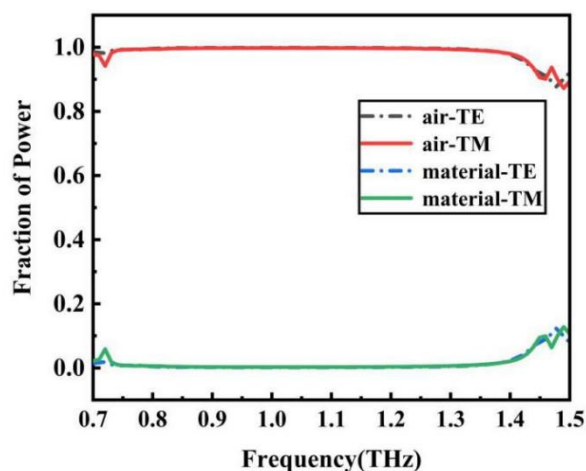


图6 偏振模能量分布随频率的变化曲线

Fig. 6 Curve of polarization mode fraction of power with frequency

表示频率, c 表示真空中的光速。所设计光纤的色散与频率的关系如图7所示, 由图可知, 所设计光纤的近零平坦色散是从 0.7 THz 到 1.42 THz, 其中 $\beta_2 < 0.05$ ps/THz/cm。在平坦带宽范围内色散的变化范围是 0.046725 ± 0.003275 ps/THz/cm。在 0.8 ~ 1.4 THz 范围内, 色散在 ± 0.027 ps/THz/cm。

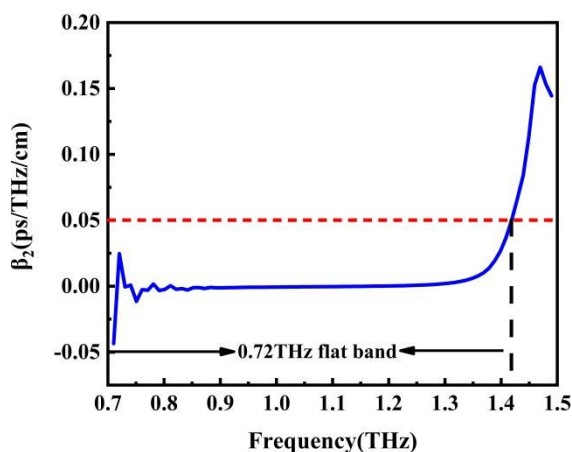


图7 波导色散随频率的变化曲线

Fig. 7 Curve of chromatic dispersion with frequency

偏振模色散 (Polarization Mode Dispersion, PMD) 是指当光脉冲沿着圆形单模光纤传输时, 由于光纤的双折射效应, 光脉冲将分解为两个相互垂直的本征偏振模, 它们沿光纤以不同的速度传输, 造成输出光脉冲展宽的现象。偏振模色散的大小一般用微分群时延描述如下^[36]:

$$\Delta T = \left| \frac{1}{\nu_{gx}} - \frac{1}{\nu_{gy}} \right|, \quad (8)$$

其中 ν_{gx} 和 ν_{gy} 是两个正交偏振模的群速度。计算得到偏振模色散和频率的关系如图8所示, 由图可知, 该曲线的变化趋势是先增加后减小, 在 1.33 THz 处得到最大的时间延时差 8.46×10^{-13} s。出现这一现象的原因是偏振模色散中群速度与有效折射率的关系为 $1/\nu_g = n/c$, 故偏振模色散与双折射值成正比, 变化趋势相同。

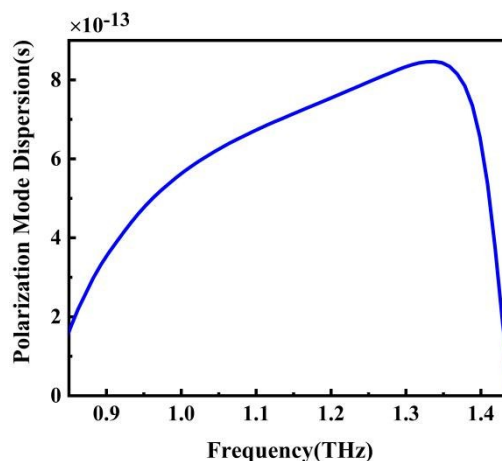


图8 偏振模色散随频率的变化曲线

Fig. 8 Curve of polarization mode dispersion with frequency

在实际工程应用中, 光纤弯曲在所难免, 具有较小弯曲半径的光纤更具有实用价值。为了计算所设计太赫兹光纤的弯曲损耗, 我们采用保角变换方法来估计弯曲状态下的折射率分布, 弯曲损耗可以通过以下公式计算^[37]:

$$n'(x, y) = n(x, y) \exp\left(\frac{S}{R_b}\right), \quad (9)$$

其中 R_b 为光纤弯曲半径, S 是弯曲方向 (x 或 y)。

在 1.12 THz 处, 弯曲损耗和弯曲半径的关系如图9所示, 由图可知, 弯曲损耗总体上随着弯曲半径的增大而减小。值得注意的是, 当沿 x 方向弯曲时, 在 $R_b = 18$ cm 处观察到 11.98 dB/m 的峰值。当弯曲半径大于 42 cm 时, 弯曲损耗开始小于 0.1 dB/m。相反, 沿 y 方向弯曲时, $R_b = 19$ cm 处的峰值损耗为 5.82 dB/m。当弯曲半径大于 29 cm 时, 弯曲损耗开始小于 0.1 dB/m。特别是当弯曲半径大于 14 cm 时, y 方向的弯曲损耗总是小于 x 方向的弯曲损耗。因此, y 方向的弯曲性能优于 x 方向。图9显示了在 1.12 THz 下, 在弯曲半径为 10, 20, 30 cm 时, 光纤朝 x 、 y 方向弯曲时的模场分布图。当弯曲方向相同时, 弯曲半径越大, 纤芯基模能量向包层泄露越少。当弯曲半径相同时, 可由模式图明确观察到 x -bent

的模式图向 x 方向弯曲, y -bent 的模式图向 y 方向弯曲。从另一个方面来说, 图 10 间接验证了图 9。

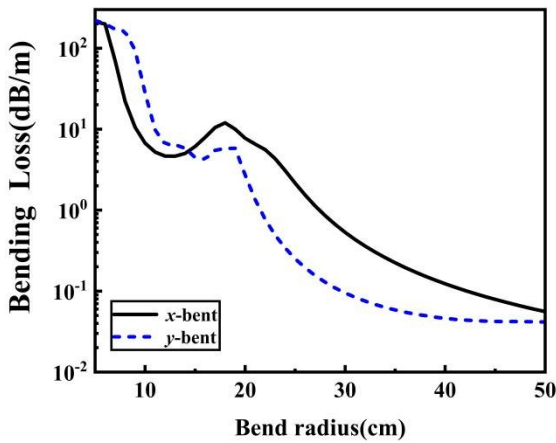


图 9 弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线

Fig. 9 Curve of bending loss with bending radius, the inset shows field distribution of bending radius 10 cm, 20 cm, and 30 cm

从工程实用的角度考虑, 光纤的制作是一个重要的问题, 传统光子晶体光纤的制造方法有超声打孔法、溶胶凝胶法、浇铸法、堆积法、挤压法和 3D 打印法等^[38-42]。超声打孔法、溶胶凝胶法和浇铸法因具有操作过程繁琐耗时、需要特定模具欠灵活、表面粗糙、成本昂贵等缺点, 而逐渐被淘汰。HC-ARF 因其具有多个微观空芯管, 甚至管与管彼此嵌套或耦合, 整体光纤结构力学性能非常敏感, 制作复杂。

若采用堆积法难以制造出具有复杂微观结构的反谐振光纤, 挤压法可能会使反谐振管坍塌和变形。与之相比, 3D 打印法具有成本低、易于制造的特点, 适用于制作结构复杂的反谐振管。2015 年, Alice L. S. Cruz^[43]使用 3D 打印法制备了一种以 Zeonex 为基底材料的 THz HC-ARF。2018 年, L. D. Van Putten^[44]也使用 3D 打印法制备了一种以 COC 为基底材料的 THz HC-ARF, 本文所设计的空芯反谐振光纤也可以使用 3D 打印法来制备。

最后, 我们将本文所设计的空芯反谐振高双折射太赫兹光子晶体光纤与以前文献报道的空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤的性能进行比较, 结果如表 1 所示。从表中可以看出, 本文所设计的空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤具有最低的传输损耗和较高的双折射, 因此具有更好的应用前景, 同时, 其对今后低损耗保偏空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤的设计也提供了重要参考。

4 结论

设计了一种基于环烯烃共聚物 (COC) 的新型空芯反谐振高双折射太赫兹光子晶体光纤, 该光纤的包层通过采用两组 (共六个) 无节点嵌套管组成。分析结果表明: 在 1.12 THz 处, 其具有 0.543×10^{-2} dB/m 的极低总传输损耗, 对应的双折射值为 2.06×10^{-4} 。在 0.8~1.35 THz 范围内, 总传输损耗小于 0.1 dB/m, 且具有非常低和平坦的色散。此外,

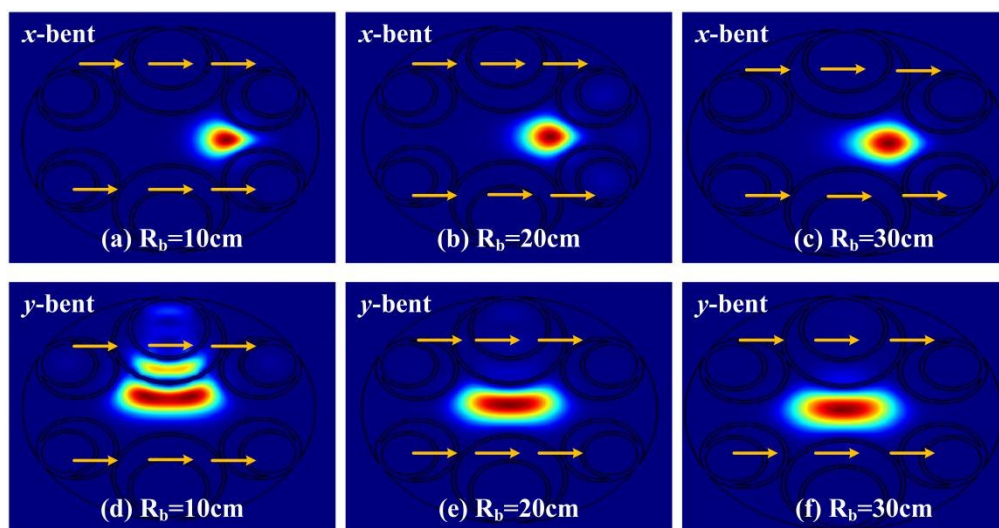


图 10 朝 x 方向弯曲与朝 y 方向弯曲的模式分布图 (a) x -bent $R_b=10$ cm, (b) x -bent $R_b=20$ cm, (c) x -bent $R_b=30$ cm, (d) y -bent $R_b=10$ cm, (e) y -bent $R_b=20$ cm, (f) y -bent $R_b=30$ cm

Fig. 10 Distribution of the mode field for bending in x direction and y direction (a) x -bent $R_b=10$ cm, (b) x -bent $R_b=20$ cm, (c) x -bent $R_b=30$ cm, (d) y -bent $R_b=10$ cm, (e) y -bent $R_b=20$ cm, (f) y -bent $R_b=30$ cm

表 1 太赫兹空芯反谐振光子晶体光纤

Table 1 Hollow-core anti-resonant photonic crystal fiber in the THz band

| 参考文献 | 带宽(THz) | 最低损耗(dB/m) | 双折射 | 色散(ps/THz/cm) | 背景材料 | 时间 |
|-----------|------------------|---|-----------------------|---------------|--------|------|
| [29] | 0.8~1.441.7~2.88 | CL:1.68 (@ 2.34 THz) | 2.5×10^{-4} | — | COC | 2018 |
| [32] | 0.5~1.5 | TL:0.05 (@ 1 THz) | — | 0.08~0.12 | COC | 2018 |
| [30] | 0.46~0.60.74~1.1 | TL:0.5 (@ 0.9 THz) | 1.52×10^{-4} | — | Zeonex | 2019 |
| [23] | 0.6~1.5 | TL:0.34 (@ 1.1 THz) | 1.1×10^{-4} | — | Zeonex | 2020 |
| [31] | 0.5~1.5 | TL:0.034 (@ 1 THz) | — | 0.03~0.18 | Zeonex | 2020 |
| [45] | 2.1~2.8 | CL:0.5 (@ 2.36 THz) | — | -0.19~0.19 | COC | 2020 |
| This Work | 0.8~1.4 | TL:0.543 $\times 10^{-2}$ (@ 1.12 THz) | 2.06×10^{-4} | -0.027~0.027 | COC | |

在 y 方向具有良好的弯曲性能,当弯曲半径大于 19 cm 时,弯曲损耗小于 0.1 dB/m。该光纤为太赫兹波的低损耗保偏传输和相关偏振调控太赫兹光纤器件开发提供了参考。

致谢:感谢匿名评审专家提出的宝贵建议,感谢基金项目:国家自然科学基金(批准号:61875165);陕西项目创新能力支持计划(批准号:2021TD-09);陕西省国际合作交流项目(批准号:2020KWZ-017);陕西省教育厅协同创新项目(批准号:20JY060);西安邮电大学联合研究生培养工作站(批准号:YJGJ201905);西安邮电大学研究生创新基金(批准号:CXJJLZ2019025)。

References

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [2] Walker G C, Berry E, Zinoviev N N, et al. Terahertz imaging and international safety guidelines [J]. *Proceedings of the Spie*, 2002, **4682**: 683-690.
- [3] Nagel M, Haring B P, Brucherseifer M, et al. Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(1): 154-156.
- [4] XIANG Yuan-Jiang, ZHU Jia-Qi, WU Lei-Ming, et al. Highly sensitive terahertz gas sensor based on surface plasmon resonance with graphene [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(1): 1-7.
- [5] Withayachumnankul W, Yamada R, Fujita M, et al. All-dielectric rod antenna array for terahertz communications [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, **3**(5): 051707.
- [6] DING Wei, WANG Ying-Ying. Hybrid transmission bands and large birefringence in hollow-core anti-resonant fibers [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16): 21165-21174.
- [7] BAI Jin-Jun, WANG Chang-Hui, HUO Bing-Zhong, et al. A broadband low loss and high birefringence terahertz photonic bandgap photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 098702. (白晋军, 王昌辉, 霍丙忠, 等. 低损宽频高双折射太赫兹光子带隙光纤 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 098702.
- [8] LI Shan-Shan, ZHANG Hao, BAI Jin-Jun, et al. Ultra-high birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(15): 154201. (李珊珊, 张昊, 白晋军, 等. 隔行分层填充的太赫兹超高双折射多孔光纤 [J]. *物理学报*, 2015, **64**(15): 154201.
- [9] CHEN Li-Jin, CHEN Huang-Wen, LU Ja-Yu, et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(3): 308-310.
- [10] Han H, Park H, Cho M, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(15): 2634-2636.
- [11] LU Ja-Yu, YU Chin-Ping, CHANG Huang-Chung, et al. Terahertz air-core microstructure fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**: 064105.
- [12] Ponceca C S, Pobre R, Estacio E, et al. Transmission of terahertz radiation using a microstructured polymer optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2008, **9**(33): 902-904.
- [13] Abul K A, CHEN Hou-Tong, LU Xin-Chao, et al. Flexible Quasi-Three-Dimensional Terahertz Electric Metamaterials [J]. *Terahertz Science & Technology*, 2009, **2**(1): 15-22.
- [14] Habib M A, Anower M S, Hasan M R. Highly birefringent and low effective material loss microstructure fiber for THz wave guidance [J]. *Optics Communications*, 2018, **423**: 140-144.
- [15] Yakasai I K, Abas P E, Suhaimi H, et al. Low loss and highly birefringent photonic crystal fibre for terahertz applications [J]. *Optik*, 2020, **206**: 164321.
- [16] Dupuis A, Stoeffler K, Ung B, et al. Transmission measurements of hollow-core THz Bragg fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2011,

- 28(4): 896–907.
- [17] JIANG Yue-Jin, SHI Wei-Hua, LI Pei-Liet *al.* A new type of THz photonic crystal fiber with super-flattened dispersion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(8): 5559–5563. (姜跃进, 施伟华, 李培丽, 等. 新型THz波超平坦色散光子晶体光纤 [J]. *物理学报*), 2010, **59**(8): 5559–5563.
- [18] Kaijage S F, OUYANG Zheng-Biao, JIN Xin, *et al.* Porous-Core Photonic Crystal Fiber for Low Loss Terahertz Wave Guiding [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(15): 1454–1475.
- [19] Hasan M R, Akter S. Extremely low-loss hollow-core bandgap photonic crystal fibre for broadband terahertz wave guiding [J]. *Electronics Letters*, 2017, **53**(11): 741–743.
- [20] Islam M S, Faisal M, Razzak S M A. Extremely low loss porous-core photonic crystal fiber with ultra-flat dispersion in terahertz regime [J]. *Journal of the Optical Society of America B, Optical Physics*, 2017, **34**(8): 1747–1754.
- [21] Habib M S, Bang O, Bache M. Low-loss hollow-core silica fibers with adjacent nested anti-resonant tubes [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(13): 17394–406.
- [22] WANG Yu-Xi, Hasan M I, Hassan M R A, *et al.* Effect of the second ring of antiresonant tubes in negative-curvature fibers [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(2): 1168–1176.
- [23] Setti V, Vincetti L, and Argyros A. Flexible tube lattice fibers for terahertz applications [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 3388–3399.
- [24] LU Wen-Liang, LOU Shu-Qin and Argyros A. Investigation of flexible low-loss hollow-core fibres with tube-lattice cladding for terahertz radiation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(2): 214–220.
- [25] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics [J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(6): 371–379.
- [26] Schuster F, Coquillat D, Videlier H, *et al.* Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors [J]. *Optics express*, 2011, **19**(8): 7827–7832.
- [27] Karpowicz N, DAI Jia-Ming, LU Xiao-Fei, *et al.* Coherent heterodyne time-domain spectrometry covering the entire “terahertz gap” [J]. *Applied physics letters*, 2008, **92**(1): 1–3.
- [28] Crowe T W, Globus T, Woolard D L, *et al.* Terahertz sources and detectors and their application to biological sensing [J]. *Philos Trans A Math Phys Eng*, 2004, **362**(1815): 365–374.
- [29] YAN Shi-Bo, LOU Shu-Qin, WANG Xin, *et al.* High-birefringence hollow-core anti-resonant THz fiber [J]. *Optical Quantum Electronics*, 2018, **50**(3): 162.
- [30] XIAO Han, LI Hai-Su, WU Bei-Lei, *et al.* Low-loss polarization-maintaining hollow-core anti-resonant terahertz fiber [J]. *Journal of Optics*, 2019, **21**(8): 085708.
- [31] Mollah M A, Rana S, Subbaraman H. Polarization filter realization using low-loss hollow-core anti-resonant fiber in THz regimer [J]. *Results in Physics*, 2020, **17**: 103092.
- [32] Hasanuzzaman G K M, 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.
- [33] HUI Zhan-Qiang, ZHANG Tian-Tian, HAN Dong-Donget *al.* 2~5 THz broadband high birefringence Terahertz photonic crystal fiber with porous core [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, **40**(5): 616–626. (惠战强, 张甜甜, 韩冬冬等. 2~5 THz宽频段多孔纤芯高双折射太赫兹光子晶体光纤 [J]. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(5): 616–626.
- [34] LIANG Jian, REN Li-Yong, CHEN Na-Na, *et al.* Broadband, low-loss, dispersion flattened porous-core photonic bandgap fiber for terahertz (THz) -wave propagation [J]. *Optics Communications*, 2013, **295**: 257–261.
- [35] Islam M S, Faisal M, Abdur Razzak S M, *et al.* Dispersion Flattened Porous-Core Honeycomb Lattice Terahertz Fiber for Ultra Low Loss Transmission [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, **53**(6): 1–8.
- [36] Agrawal, Govind. *Nonlinear fiber optics* [J]. *Elsevier/Academic Press*, 2013: 27–56.
- [37] WEI Cheng-Li, Menyuk C R, Hu J. Bending-induced mode non-degeneracy and coupling in chalcogenide negative curvature fibers [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(11): 12228–12239.
- [38] Sultana J, Islam M S, Cordeiro C, *et al.* Exploring low loss and single mode in antiresonant tube lattice terahertz fibers [J]. *IEEE Access*, 2020, 2020(8): 113309–113317.
- [39] Falkenstein P, Merritt C D, Justus B L. Fused preforms for the fabrication of photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(16): 1858–1860.
- [40] FENG Xian, Mairaj A K, Hewak D W, *et al.* Nonsilica glasses for holey fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(6): 2046–2054.
- [41] Bise R T, Windeler R S, Kranz K S, *et al.* Tunable photonic band gap fiber: Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002 [C]. NJ: Piscataway, 2002: 466–468.
- [42] WANG Li-Li, ZHANG Ya-Ni, REN Li-Yong, *et al.* A new approach to mass fabrication technology of microstructured polymer optical fiber preform [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(Suppl1): S94–S95.
- [43] Alice L S, Cruzl, Valdir A S, *et al.* 3D Printed hollow core fiber with negative curvature for terahertz applications [J]. *Journal of Microwaves, Optoelectronics & Electromagnetic Applications*, 2015, 14(Special 1): SI45–SI53.
- [44] Van P, Gorecki J, Numkam F E, *et al.* 3D-printed polymer antiresonant waveguides for short-reach terahertz applications [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(14): 3953–3958.
- [45] MENG Miao, YAN De-Xian, LI Jiu-Sheng, *et al.* Research on negative curvature terahertz fiber based on nested triangle structure cladding [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69**(16): 167801. (孟淼, 严德贤, 李九生, 等. 基于嵌套三角形包层结构负曲率太赫兹光纤的研究 [J]. *物理学报*), 2020, **69**(16): 167801.