

2~5 THz宽频段多孔纤芯高双折射太赫兹光子晶体光纤

惠战强*, 张甜甜, 韩冬冬, 赵峰, 张美志, 巩稼民

(西安邮电大学电子工程学院, 陕西西安710121)

摘要:提出了一种以Topas环烯烃共聚物为基底,采用级联六边形单元多孔纤芯结构的宽频带高双折射太赫兹光子晶体光纤。采用全矢量有限差分法对其导波特性的分析,结果表明:在工作频率为3.5 THz处,得到0.0965(接近 10^{-1})的超高双折射, 10^{-12} dB/cm的超低限制损耗,以及小于 1 cm^{-1} 的有效材料吸收损耗。此外,所提出的结构在2.25~5 THz的频带内表现出 $\pm 0.2\text{ ps/THz/cm}$ 的近平坦色散。该光纤所实现的双折射值不仅是迄今已知太赫兹聚合物光纤中最高的,而且其新颖的多孔纤芯结构设计有效降低了太赫兹波的传输损耗。同时,光纤结构均采用圆形空气孔,便于工程制备,该工作对今后太赫兹光子晶体光纤的发展具有一定的参考价值。

关键词:光子晶体光纤;太赫兹;高双折射;有效材料吸收损耗

中图分类号: TN256

文献标识码: A

2~5 THz broadband high birefringence Terahertz photonic crystal fiber with porous core

HUI Zhan-Qiang*, ZHANG Tian-Tian, HAN Dong-Dong, ZHAO Feng, ZHANG Mei-Zhi, GONG Jia-Min

(College of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, 710121, China)

Abstract: A novel broadband high birefringence terahertz photonic crystal fiber (PCF) with cascaded hexagonal unit porous core based on Topas cycloolefin copolymer is proposed. The full vector finite difference method is used to analyze the guided wave characteristics. The results show that the ultra-high birefringence of 0.0965 (close to 10^{-1}), the ultra-low confining loss of 10^{-12} dB/cm and the effective material absorption loss less than 1 cm^{-1} are obtained at the frequency of 3.5 THz. In addition, the proposed PCF exhibits nearly zero flat dispersion of $\pm 0.2\text{ ps/THz/cm}$ in the frequency of 2.25~5 THz. The birefringence value of the proposed PCF is not only the highest among the reported THz polymer fibers, but also the novel porous core structure effectively reduces the transmission loss of THz wave. Moreover, only circular air holes are used in the fiber, which is feasible for engineering fabrication. This work has certain reference value for the future development of THz PCF.

Key words: Photonic crystal fiber, terahertz, high birefringence, effective material absorption loss

引言

太赫兹(THz)波是指频率在0.1~10 THz之间的电磁波,处于电磁频谱中红外辐射与毫米波之间,具有丰富的科学内涵和独特的优越特性,在物理、化学、生命科学、材料科学、天文学、大气与环境监

测、电子信息、国家安全与反恐等多个领域具有重要的应用前景^[1-2]。然而,由于THz区缺乏有效的传输波导,现有的THz系统体积庞大且依赖于自由空间传输,自由空间中的水蒸气对太赫兹辐射有很强的吸收作用,导致传输效率较低,因此,设计柔性太

收稿日期:2020-08-15,修回日期:2021-03-02

Received date: 2020-08-15, Revised date: 2021-03-02

基金项目:国家自然科学基金(61775180, 61875165, 61772417);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);西邮新星(2016)和研究生创新基金(CXJJL2019032)。

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61775180, 61875165, 61772417); the Collaborative Innovation Project of Shaanxi Provincial Department of Education (20JY060); Xi'an University of Posts and Telecommunications Joint Postgraduate Training Workstation (YJGJ201905); West Post New Star (2016) and Graduate Innovation Fund (CXJJL2019032) funding.

作者简介(Biography): 惠战强(1978-),男,陕西渭南人,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

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^[3]。太赫兹光子晶体光纤的出现,为太赫兹波的传输提供了一种理想介质^[4]。双折射是光子晶体光纤的一个重要特性,会引起光纤通信系统中偏振串扰、偏振相关损耗、偏振模色散等效效应,影响光纤通信系统性能^[5]。高双折射太赫兹光子晶体光纤可以实现太赫兹波的保偏传输,进而完成偏振滤波、偏振分束、偏振旋转等太赫兹信号处理功能,在太赫兹通信、传感、成像等领域具有广泛应用。伴随着太赫兹技术的蓬勃发展,研制高双折射低损耗太赫兹光子晶体光纤显得尤为迫切。

一般来说,人们通过两种方法在 THz 范围实现高双折射:一种是在光纤中引入应力区(应力双折射),另一种是在光纤纤芯或包层中引入各向异性结构,二者均可实现高双折射^[6]。但前者的缺点在于应力引入不能精确控制,而后者因其设计灵活、获得的高双折射值比前者普遍高一个数量级以上,因此受到广泛关注。截至目前,以打破光纤结构对称性来实现 THz 光子晶体光纤高双折射特性的方式主要可以分为三种:(1)通过改变包层空气孔的形状和排列方式,如引入椭圆空气孔^[7-9]、菱形空气孔^[10]、亚波长沟槽形空气孔^[11]、圆角方形空气孔^[12]、类领结型单元结构^[13]、钻石形和哑铃形单元结构^[14]、3D 打印的圆环内切椭圆管结构^[15]、部分空气孔中填充 ENZ 材料^[16]或液体^[4,17]等方式;(2)通过改变纤芯区域空气孔的形状或排列方式,如采用沟槽型^[18-20]、菱形^[21]空气孔、孪生空气孔^[22]、椭圆空气孔^[23]、矩形多孔芯^[24]、六边形多孔芯^[25]以及采用三角/正方混合晶格组成的多孔纤芯^[26];(3)同时改变包层和纤芯区域的空气孔结构和排列方式来提高光纤整体不对称性,如采用六角晶格包层双孔芯^[27]、正方晶格包层矩形芯^[28]、kagome 状包层沟槽芯^[29-30]、螺旋状包层多孔芯^[31]、半圆状包层沟槽芯^[32]、六角包层椭圆空芯^[33]、悬浮沟槽型^[34-35]等类型。研究发现,在 1 THz 处,Abdur Razzak 课题组提出两种基于 kagome 状包层沟槽纤芯结构的光纤^[29-30],分别得到高双折射值为 0.097 和 0.082,有效材料吸收损耗均小于 0.06 cm^{-1} 。Habib^[19]提出基于三角晶格包层/沟槽纤芯结构光纤,其高双折射值在 1.5 THz 处达到 0.096。Islam 提出由不同大小椭圆空气孔组合成的纤芯结构^[23,36],该光纤实现了在 1 THz 处双折射为 0.08,有效材料损耗小于 0.07 cm^{-1} 。但是,在 3 THz 处的研究相对较少,且得到的

高双折射值较小,如 Wu 提出的五层圆形空气孔三角晶格包层,小圆孔纤芯结构^[27,37-38]在 3 THz 附近实现了双折射值为 0.04。Yakasai 提出的三角晶格包层椭圆纤芯结构,在 3 THz 处双折射达到 0.08,有效材料吸收损耗 0.03 cm^{-1} ^[39]。可见,现有的高双折射太赫兹光子晶体光纤存在双折射值偏低,高双折射与低损耗之间不能同时兼顾的问题,实现高双折射、低损耗和色散平坦的太赫兹光子晶体光纤仍是实际工程应用领域的一项挑战。

本文提出了一种级联六边形单元多孔纤芯结构的高双折射聚合物太赫兹光子晶体光纤。纤芯区域由正六边形单元空气孔组成,其中一共包含 7 个正六边形空气孔单元,实现了宽频带高双折射低损耗近零色散的特性。采用频域有限差分法对其双折射、限制损耗、有效材料吸收损耗、模场能量分布和波导色散等特性进行数值分析。结果表明,在 2~5 THz 的频率范围内,该光纤具有接近 10^{-1} 数量级的超高双折射。在 3.5 THz 频率处的双折射值为 0.096 5,这是迄今为止其它太赫兹聚合物光子晶体光纤未曾实现的。限制损耗可以降低到 10^{-12} dB/cm ,有效材料吸收损耗为 1 cm^{-1} ,在 2.25~5 THz 工作频带内波导色散曲线近零平坦,这对于实现 THz 波的无畸变传输非常重要。另外,所提出的光纤结构均由圆形空气孔组成,便于工程制作。

1 光纤几何结构与机理分析

图 1(a)表示的是级联正六边形单元多孔纤芯光子晶体光纤的横截面图,白色区域代表空气孔,蓝色区域代表光纤基底材料。包层为由圆形空气孔组成的正六边形,空气孔半径为 R ,孔间距是 Λ (晶格常数)。包层最里面的一层由 6 个空气孔组成,第二、三、四、五、六层分别有 12、18、24、30、36 个空气孔。纤芯采用多孔微结构,放大后的纤芯横截面结构如图 1(b)所示。可见,纤芯区域以 6 个小圆孔围成的一个正六边形区域为基本单元,以中心六边形单元为 midpoint,其余 6 个六边形单元环绕成一个大六边形结构。纤芯微结构中每个小空气孔的半径定义为 r ,相邻两个小空气孔间的距离为 $A=L/\sqrt{3}$,相邻两个正六边形单元的距离为 d (类似于相邻两花瓣间的距离)。综合考虑光纤双折射、限制损耗与制作难易等因素,我们将光纤结构的包层数设定为 6 层。

所设计的光子晶体光纤的基底材料选用 Topas 环烯烃共聚物(COC),因其在所考虑太赫兹波段具

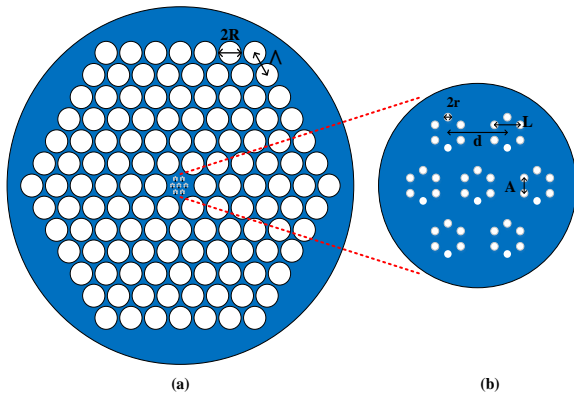


图1 所设计光子晶体光纤的截面图 (a) 包层区域, (b) 纤芯区域

Fig. 1 Cross-sectional view of proposed PCF (a) cladding region and (b) core region

有折射率恒定、材料吸收损耗低、低温处理方便、柔软易弯曲等优点^[40-41]。该材料折射率与波长的关系可通过 Sellmier 方程描述如下^[42]:

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

式中各个系数分别为 $A_1=2.045$, $A_2=0.266$, $A_3=0.206$, 得到 COC 材料的有效折射率与波长的关系如下图 2 所示。

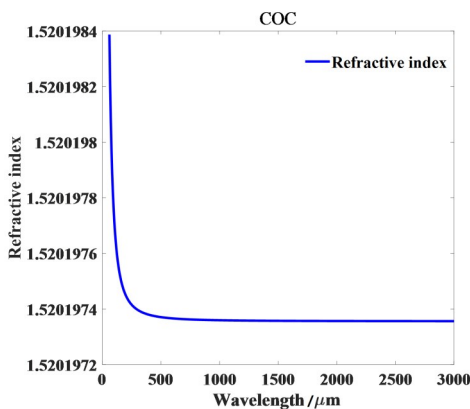


图2 COC 材料的有效折射率与波长的关系图

Fig. 2 The relationship between effective refractive index and wavelength of COC

图中研究了波长范围为 59.958 5~3 000 μm (对应频段为 1~5 THz) 的情况, 由上图可知, COC 材料的有效折射率随波长变化在所研究范围内并不大, 这与大多数文章中所设 COC 在 1~5 THz 范围内折射率为 1.52 一致^[38,43]。又由于 COC 材料的折射率在上述频段不随频率发生变化, 因此无需考虑材料色散。

针对上述光纤结构, 采用离散化全矢量有限差分法^[44], 结合完美匹配层边界条件对其进行数值分析。具体做法是将求解区间划分为二维 Yee 网格, 对电场和磁场采取交替抽样的离散方式, 每一个电场(或磁场)分量周围有四个磁场(或电场)分量环绕, 利用这种离散方式将麦克斯韦微分方程转化为一组差分方程, 从二维 Yee 网格来看, 所有的横向场分量都与网格单元边界相切, 满足连续条件。网格中某一点的电场(或磁场)都与周围格点的磁场(或电场)相联系, 由麦克斯韦方程组通过基于自由空间阻抗 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 对电场进行缩放并将旋度展开、空间离散及进行代数运算后, 得到横向电场的本征值方程和横向磁场的本征值方程如下。通过求解本征值方程, 可以得到不同模式的有效折射率系数。

$$P \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$Q \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2b)$$

由于本文所设计光纤中引入了结构不对称性, 破坏了标准单模光纤中两个基本正交偏振模的简并, 导致 x 和 y 方向两个基模的有效折射率不同, 即偏振方向相互垂直的两个基模的传播常数不同, 产生模式双折射 B , 其值可通过如下公式计算^[21]:

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = \frac{2\pi|\beta_x - \beta_y|}{\lambda} = |n_{eff}^x - n_{eff}^y| \quad (3)$$

其中 β_x, β_y 分别表示两个偏振方向的传播常数, 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有效折射率。

对于光子晶体光纤来说, 限制损耗和有效材料吸收损耗是主要考虑的因素。从限制损耗方面分析, 限制损耗是衡量太赫兹光子晶体光纤的一个重要特性参数, 它是由于光子晶体光纤中周期性空气孔的层数有限, 导致对 THz 光波的限制能力有一定的局限性, 造成部分能量泄露引起的。一般用限制损耗 α_{cl} 来表示光子晶体光纤对太赫兹波的限制能力, 它可以通过有效折射率的虚部计算得到^[22,45]:

$$\alpha_{cl} = 8.686k_0 \text{Im}(n_{eff}) \times 10^{-2} \text{dB/cm} \quad (4)$$

其中, $k_0 = 2\pi f/c$, f 表示频率, c 表示光速, $\text{Im}(n_{eff})$ 表示有效折射率的虚部。

另一方面, 由于许多材料对太赫兹波具有较大的吸收, 因此用有效吸收损耗来描述材料的吸收效应, 该参数也是太赫兹光子晶体光纤的最重要的特

性之一,可由公式(5)来表示^[38,46]:

$$\alpha_{eff} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{mat} n_{mat} |E|^2 \alpha_{mat} dA}{\left| \int_{all} \vec{S}_z dA \right|} \right), \quad (5)$$

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, \vec{S}_z 为 Z 向的坡印廷矢量 $\vec{S}_z = \frac{1}{2}(\vec{E} \times \vec{H}) \cdot \vec{Z}$, 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 $\alpha_{mat} = 1 \text{cm}^{-1}$ ^[38]。

所设计的太赫兹光子晶体光纤在频率分别为 1.3 THz、3 THz、3.5 THz、5 THz 时, 其 x 偏振和 y 偏振方向的 TE、TM 模光场分布如图 3 所示。从图中可以看出, 一方面, 随着频率的增加能量向纤芯区域集中, 这意味着有效模场面积减小; 另一方面, x 方向偏振模的电场强度较 y 方向的强, 说明所设计光纤对 x 方向基模的限制能力较强。从 1.3 THz 增长到 5 THz 时, 光场泄露逐渐减弱, 能量逐渐向纤芯区域聚集, 到 5 THz 处, 光场能量被很好地限制在正六边形单元组成的纤芯区域, 这也在一定程度上印证了后续限制损耗随频率增大而降低的变化趋势。

2 参数优化与特性分析

光纤结构参数会影响其导波特性和, 为了得到光纤最优结构, 基于频域有限差分法, 我们对所设计

的级联正六边形多孔纤芯光子晶体光纤进行数值分析, 仿真中网格单元数设置为 200×200 。采用控制变量法调节光纤的五个独立结构参数, 对其双折射特性进行系统分析。

首先, 分析太赫兹光子晶体光纤纤芯中小空气孔半径 r 对有效折射率的影响。此处以 $0.5 \mu\text{m}$ 为步长, 改变小空气孔半径从 $1 \mu\text{m}$ 增加到 $3 \mu\text{m}$ 进行分析。在数值模拟中, 令 $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 固定不变, 仅改变小圆半径 r , 当分别取 $r=1 \mu\text{m}$, $r=1.5 \mu\text{m}$, $r=2 \mu\text{m}$, $r=2.5 \mu\text{m}$, $r=3 \mu\text{m}$ 时得到结果如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可以看出, 当 $r=2 \mu\text{m}$ 时, 高双折射值在 3.5 THz 频率处达到最大。在此基础上分别增加或减小 r 都会不同程度地减小高双折射特性。当 r 从 $1 \mu\text{m}$ 变化到 $2 \mu\text{m}$ 时, 高双折射值随着小圆半径的增加而增加; 当 r 从 $2 \mu\text{m}$ 变化到 $3 \mu\text{m}$ 时, 高双折射值随着小圆半径的增加而减小。

其次, 研究了纤芯中两个相邻空气孔间距离 A 与高双折射值的关系。仿真中以 $0.5 \mu\text{m}$ 作为步长, 改变相邻两个小空气孔间的距离 $A=L/\sqrt{3}$, 令 L 从 $13 \mu\text{m}$ 增加到 $15 \mu\text{m}$ 。数值分析时, 令 $r=2 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 保持不变。当分别取 $L=13 \mu\text{m}$, $L=13.5 \mu\text{m}$, $L=14 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $L=15 \mu\text{m}$ 时得到结果如图 4(b) 所示。从图 4(b) 可以看出当 $L=14.5 \mu\text{m}$ 时, 高双折射值在 3.5 THz 处取最大值。分别增加或减小 L 均会使高双折射特性发生不同程

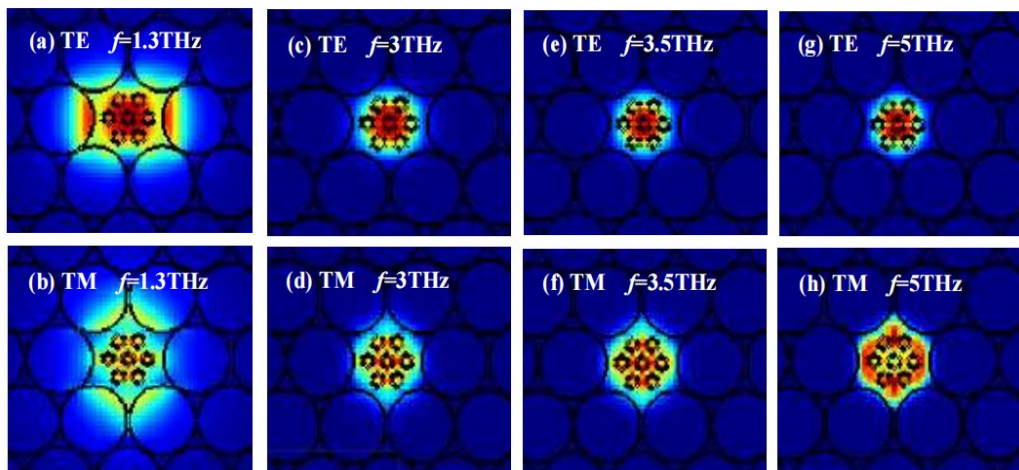


图 3 x 偏振方向(TE)与 y 偏振方向(TM)的模场分布 (a) TE $f=1.3 \text{ THz}$ (b) TM $f=1.3 \text{ THz}$ (c) TE $f=3 \text{ THz}$ (d) TM $f=3 \text{ THz}$ (e) TE $f=3.5 \text{ THz}$ (f) TM $f=3.5 \text{ THz}$ (g) TE $f=5 \text{ THz}$ (h) TM $f=5 \text{ THz}$

Fig. 3 Mode field distribution of x -polarization and y -polarization (a) TE $f=1.3 \text{ THz}$ (b) TM $f=1.3 \text{ THz}$ (c) TE $f=3 \text{ THz}$ (d) TM $f=3 \text{ THz}$ (e) TE $f=3.5 \text{ THz}$ (f) TM $f=3.5 \text{ THz}$ (g) TE $f=5 \text{ THz}$ (h) TM $f=5 \text{ THz}$

度的变化。当 L 从 $13\ \mu\text{m}$ 变化到 $14.5\ \mu\text{m}$ 时,高双折射值随 L 的增加而增加;当 L 从 $14.5\ \mu\text{m}$ 变化到 $15\ \mu\text{m}$ 时,高双折射值随 L 的增加而减小。

接着,又讨论了纤芯微结构中相邻两个正六边形单元的中心距离 d 与双折射特性的关系。仿真过程中以 $1\ \mu\text{m}$ 作为步长,改变相邻两个正六边形单元的距离 d 从 $27\ \mu\text{m}$ 增加到 $31\ \mu\text{m}$ 。同时令 $r=2\ \mu\text{m}$, $L=14.5\ \mu\text{m}$, $R=49\ \mu\text{m}$, $\Lambda=100\ \mu\text{m}$ 保持不变。 d 分别为 $d=27\ \mu\text{m}$, $d=28\ \mu\text{m}$, $d=29\ \mu\text{m}$, $d=30\ \mu\text{m}$, $d=31\ \mu\text{m}$ 时得到结果如图4(c)所示。从图4(c)可以看出,当 $d=29\ \mu\text{m}$ 时,双折射特性达到最优,分别增加或减小 d 的值也会使得高双折射特性产生不同程度变化。当 d 从 $27\ \mu\text{m}$ 变化到 $28\ \mu\text{m}$ 时,高双折射值随 d 的增加而减小;当 d 从 $29\ \mu\text{m}$ 变化到 $31\ \mu\text{m}$ 时,高双折射值随 d 的增加而明显减小;而当 d 从 $28\ \mu\text{m}$ 变化到 $29\ \mu\text{m}$ 时,高双折射特性明显提升。最大双折射出现在频率为 $3.5\ \text{THz}$ 处,其值为 0.0965 。

同理,图4(d)、(e)分别为太赫兹光子晶体光纤的包层空气孔半径 R 和包层空气孔间距 Λ 与双折射 B 的关系。分析时均以 $1\ \mu\text{m}$ 为步长,在 $5\ \mu\text{m}$ 变化范围内讨论高双折射特性。从图中可以看出:所设计光纤的双折射特性分别随包层空气孔半径 R 值的增加而增加,随包层空气孔间距 Λ 的增加而减小,两者呈现出相反的变化趋势。这是由于增加 R 而不改变其它参数时,两包层空气孔间的材料占比减小,如同保持其他参数一定,仅减小 Λ 值使得相邻包层空气孔间的材料占比减小一样,均可以有效地提高双折射值。数值分析表明:在 $1.3\sim 5\ \text{THz}$ 频率范围内,当 $R=49\ \mu\text{m}$, $\Lambda=100\ \mu\text{m}$, $f=3.5\ \text{THz}$ 时,双折射特性最优,其值为 0.0965 (接近 10^{-1}),在工作频率为 $3\ \text{THz}$ 时,双折射值为 0.0955 。在 $2.3\sim 5\ \text{THz}$ 频率范围内,双折射值均高于 0.08 。由于本文所设计光纤的纤芯区域是由7个正六边形排列组成的级联正六边形结构,七个正六边形空气孔单元的空间分布属于三角晶格结构,即具有六重旋转对称性。同理,光纤包层是由三角晶格空气孔组成的正六边形,也具有六重旋转对称(各向异性)结构,即包层、纤芯的旋转对称角一致,均为 60° 。研究表明任意晶格结构的双折射都可以通过改变几何结构的各向异性(非对称性)来实现,通过在晶体中优化空气孔的排列方式而引入大的轴向各向异性产生,它很大程度上依赖于晶格的几何形状及不对称的程度。据文献报道,对于一种特殊的非对称结构设计,在

高双折射情况下三角晶格几何结构是最佳选择^[47],本文与上述文献研究得到的三角晶格结构具有较高的双折射特性相吻合,所不同的是,本文的纤芯和包层采用了一致的三角晶格旋转对称结构,这在一定程度上证实了实现高双折射特性,三角晶格结构是较好的选择。

通过以上分析可知,所设计的多孔纤芯太赫兹光子晶体光纤的最优结构参数为 $r=2\ \mu\text{m}$, $L=14.5\ \mu\text{m}$, $A=L/\sqrt{3}=8.3718\ \mu\text{m}$, $d=29\ \mu\text{m}$, $R=49\ \mu\text{m}$, $\Lambda=100\ \mu\text{m}$ 。针对上述优化结构,在 $1.3\sim 5\ \text{THz}$ 频率范围内研究双折射值及 x 、 y 方向的有效折射率系数随频率的变化情况如图5所示。图5中红色和黑色曲线分别给出了 x 、 y 两个偏振模式的有效折射率,它们随着入射光频率的增大而增大,而有效折射率曲线的斜率均变小,这意味着两个模式的有效折射率值逐渐趋于稳定。分析认为,这与频率增大,模场面积变小,更多的模式功率聚集在纤芯中有关;同时, x 方向偏振模的有效折射率大于 y 方向偏振模,这是由于 y 方向比 x 方向的空气孔密集、轴向距离更近。另一方面,图5中蓝色曲线代表光纤的双折射值,其随频率的增加表现出先增大后减小的趋势,原因在于:在较低频率下, x 方向偏振模式的有效折射率随频率增加较快, y 方向偏振模式的有效折射率随频率增加较慢,但是在某个频率(本文为 $3.5\ \text{THz}$)之后, x 偏振方向的有效折射率随频率变化趋于平缓,对应有有效折射率曲线的斜率甚至低于 y 方向偏振模式有效折射率曲线的斜率,导致双折射缓慢降低,因此在中间特定频率点 $3.5\ \text{THz}$ 处有一峰值双折射值。即所设计的级联正六边形单元多孔纤芯高双折射太赫兹光子晶体光纤具有较高的双折射值,在工作频率为 $3\ \text{THz}$ 时,得到双折射值为 0.0955 ,在 $3.5\ \text{THz}$ 下可达 0.0965 。总结 $1\ \text{THz}$ 、 $3\ \text{THz}$ 相关高双折射光子晶体光纤的参考文献如表1所示,数据表明:大部分文献的研究范围集中在 $0.5\sim 2\ \text{THz}$ 附近,且在 $1\ \text{THz}$ 处对高双折射值的研究进展较大,与以往 $3\ \text{THz}$ 附近的研究相比,本文设计的光纤结构高双折射特性更具参考价值。

太赫兹光子晶体光纤的两种偏振模式的限制损耗随工作频段的变化关系如图6所示。可以看出,限制损耗随着频率的增加而减小,并且 y 方向偏振模式的限制损耗略大于 x 方向偏振模式。这与前人研究的高双折射太赫兹光子晶体光纤的限制损耗特性相一致^[38]。在 $1.3\ \text{THz}$ 处限制损耗最大,其

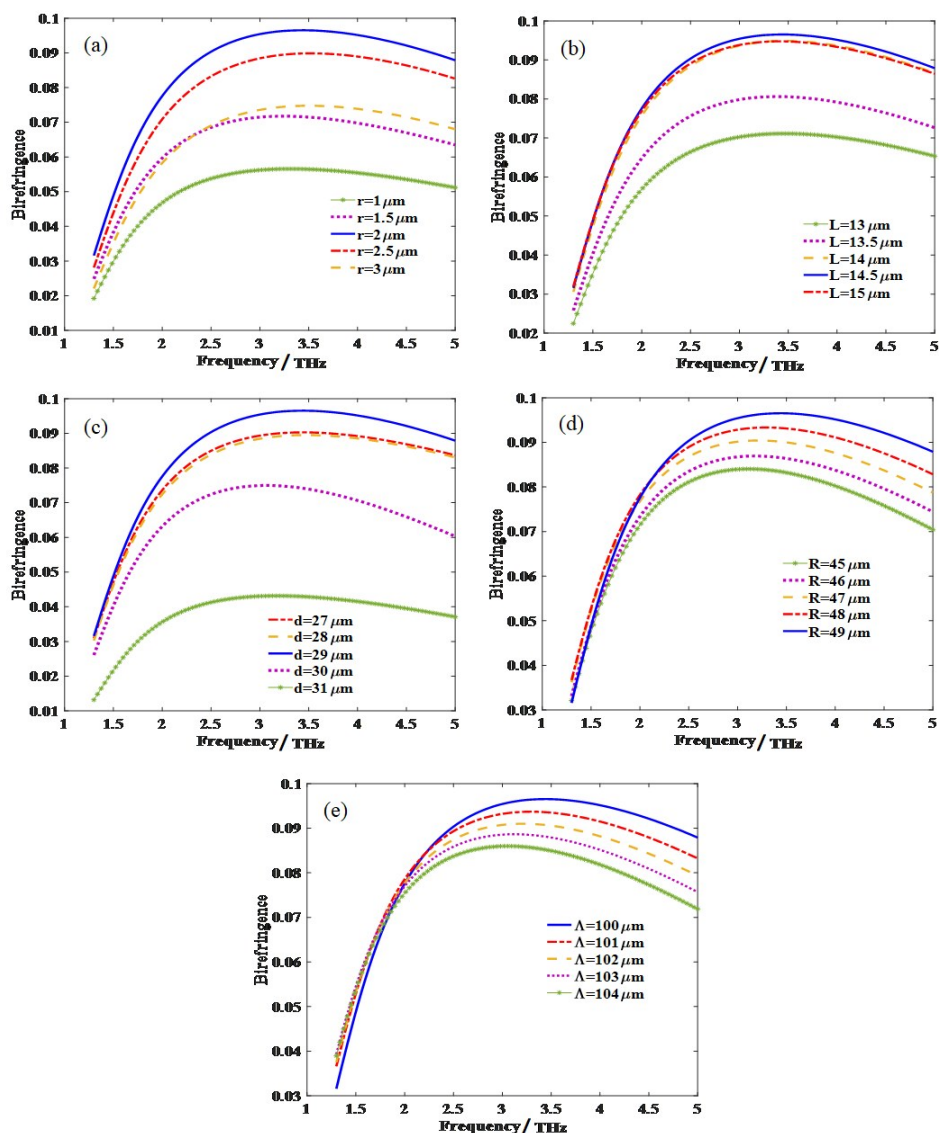


图4 光纤各结构参数对其双折射的影响 (a) 各小圆空气孔半径 r 不同时, (b) 相邻小孔间距 L 不同时, (c) 相邻六边形单元间距离 d 不同时, (d) 空气孔半径 R 不同时, (e) 空气孔间距 Λ 不同时

Fig. 4 The influence of PCF structural parameters on birefringence (a) different radius r of small air holes, (b) different distances L between two adjacent small air holes, (c) different distances d between two adjacent hexagonal elements, (d) different air hole radius R , (e) different air hole spacing Λ

中 y 偏振模的限制损耗为 0.0551 dB/cm , x 偏振模的限制损耗为 0.0042 dB/cm 。在所计算的其它频率上, 限制损耗均小于此值, 因此在整个工作频带内实现了太赫兹波宽频带低损耗传输。

由于 COC 材料的吸收损耗系数在 $2\sim 4.5 \text{ THz}$ 频段内近似保持不变, 为 $\alpha_{mat} = 1 \text{ cm}^{-1}$ 。数值计算结果表明, 在 $2\sim 4.5 \text{ THz}$ 频带内, 所设计太赫兹光子晶体光纤的两种偏振模式在材料中的有效吸收损耗曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 材料有效吸收损耗随频率的增加而增加, 原因在于: 随着频率的增加, x, y 方向的模场分布从包层区域逐渐向纤芯附

近聚集, 包层空气孔的电场能量逐渐降低, 传导模的大部分能量从空气孔中挤出来, 从而减少了导模的吸收损耗, 导致材料有效吸收损耗随频率的增加而增加。另一方面, x 偏振模式的材料有效吸收损耗高于 y 偏振模式的材料有效吸收损耗, 这一现象与文献报道的情况相似^[23,25], 出现这种现象是由于 y 方向的孔隙率大于 x 方向, y 方向大部分电磁场能量进入空气孔, 其电磁场在高吸收背景材料的功率占比较小, 导致有效材料损失减小, 而 x 方向偏振模在高吸收背景材料的分布较多, 在材料中的有效吸收损耗逐渐增大, 因此 y 偏振模式的材料有效吸收

表 1 与文献结果的比较

Table 1 Comparison with reported results

来源	f (THz)	β_2 (ps/THz/cm)	B	α_{eff} (cm ⁻¹)	L_c (cm ⁻¹)	研究范围	光纤结构
[30]	1	—	0.082 2	0.05	4.13×10^{-5}	0.8~1.6 THz	kagome 状包层沟槽芯
	1.6	—	0.09	—	—		
[19]	1	—	0.088	0.035	<0.1	0.8~1.5 THz	沟槽型纤芯
	1.5	—	0.096	—	—		
[29]	1	—	0.097 3	0.056	2.29×10^{-5}	0.7~1.7 THz	Kagome 包层椭圆槽芯型
[23]	1.1	—	0.086	0.065	3.8×10^{-9}	0.5~1.8 THz	椭圆空气孔纤芯
[36]	1	0.53 ± 0.07	0.086	0.05	10^{-9}	0.5~1.48 THz	渐变椭圆芯型
[39]	1.3	—	0.08	0.03	—	0.6~2 THz	椭圆芯型
[27]	2.1	—	0.034	—	—	2~4 THz	六角晶格包层双孔芯
[37]	3	0.2~1	0.03	0.6	4.34×10^{-4}	2~4 THz	双孔单元纤芯
[38]	3.5	<0.7	0.033	0.7	—	2~4 THz	三孔芯单元纤芯
本文设计	3.5	± 0.2	0.096 5	<1	10^{-12}	2~5 THz	级联六边形单元多孔纤芯
	3	± 0.2	0.095 5	<1	10^{-13}		

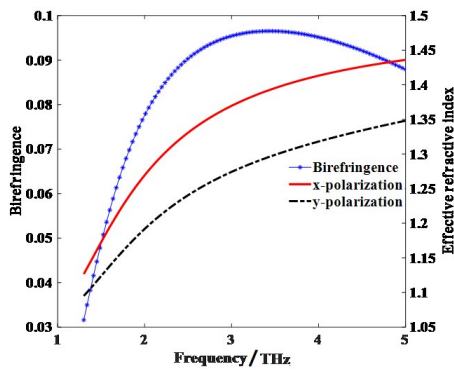
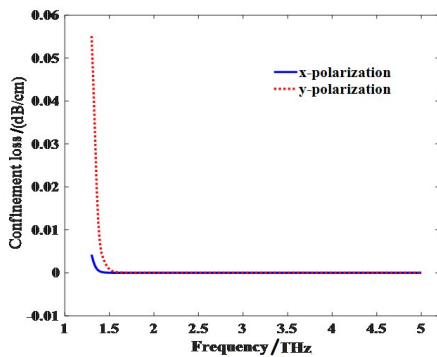
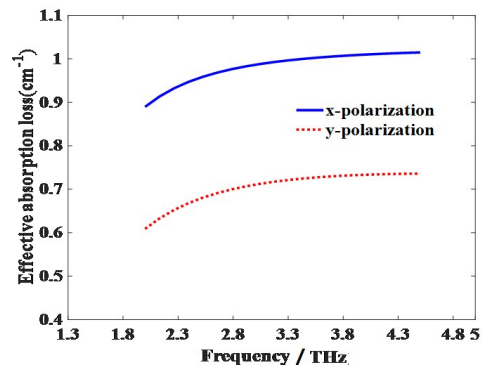


图 5 在 1.5~5 THz 频率范围内模式双折射和有效折射率曲线

Fig. 5 Modal birefringence and effective refractive index of proposed THz PCF in the frequency range of 1.3~5 THz

图 6 当 $r=2 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 时, 1.3~5 THz 频率范围内光纤的限制损耗特性Fig. 6 Confinement loss for the proposed THz PCF in the frequency range of 1.3~5 THz, while $r=2 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$

损耗比 x 偏振模式的材料有效吸收损耗要小。

图 7 当 $r=2 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 时, 2~4.5 THz 频率范围内光纤的有效吸收损耗曲线Fig. 7 Effective absorption loss for the proposed THz PCF in the frequency range of 2~4.5 THz, while $r=2 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$

模场能量分布表示了光纤内部不同区域能量分布百分比, 它不仅可以直观地看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的趋势调节光纤结构参数, 增大空气孔中的能量分布, 减小材料中能量分布, 从而减小太赫兹波在材料中的有效吸收损耗。每个区域内的模场能量分布可以定义为^[48]:

$$P_f = \frac{\int_x \vec{S}_z dA}{\int_{\text{all}} \vec{S}_z dA}, \quad (6)$$

其中 P_f 表示模式能量分布, x 被认为是纤芯空气孔、包层空气孔或背景材料三个区域之一。all 表示的是光纤横截面的所有区域的总和。为了进一步解

释上述图 7,我们研究了各个偏振模在材料和空气中的模场能量分布,结果如图 8 所示。

图 8 表明,随频率的增加,所设计光子晶体光纤能量在基底材料中的分布逐渐增大,在空气孔中逐渐减小。原因在于,随着频率的增加,电场分布逐渐由包层向纤芯聚集,导致光纤基底材料中的模式能量分布逐渐增加,又因为光纤中材料的能量分布与空气孔中的能量分布之和为 1,所以光纤空气孔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,对于 x 方向偏振模来说,材料中能量分布较 y 方向偏振模大,空气孔中能量分布较小,对于 y 方向偏振模来说,空气孔中能量分布较大,材料中能量分布较 x 方向偏振模少。这也与图 7 所示结果相符。同时,根据 1.3~5 THz 频率范围的模场能量分布可知,在 3.5 THz 双折射取最大值时,在材料中 x 、 y 偏振方向模场能量分布约占总功率的 97.4%、93.3%,相对应的在空气中的占比分别为 2.6%、6.7%。又因为基模在空气中的总能量分布越大,表明光纤的材料吸收损耗越小,对于该光纤在高频处光纤的限制能力较强,模式双折射越高。结合电场分布图可知,几乎所有能量都被限制在光纤内,能够实现较好的太赫兹波传输。

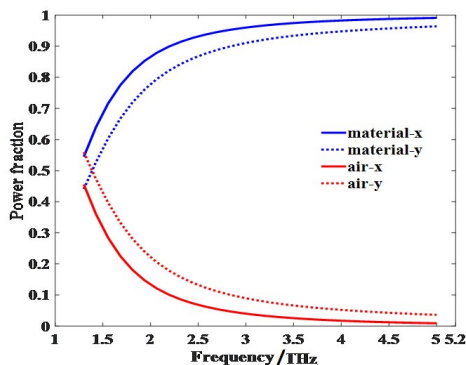


图 8 当 $r=2 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 时,1.3~5 THz 频率范围内光纤空气和材料的模场能量分布
Fig. 8 Power fraction in air and material for the proposed THz PCF in the frequency range of 1.3~5 THz, while $r=2 \mu\text{m}$, $L=14.5 \mu\text{m}$, $d=29 \mu\text{m}$, $R=49 \mu\text{m}$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$

色散是光纤的另一个重要的光学参数,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。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。由于所采用的环烯烃共聚物材料具有零材料色散特性^[25,38],所以该频段下材料

色散可以忽略不计,只考虑波导色散和偏振模色散,其中,波导色散可用如下公式计算^[16]:

$$\beta_2 = \frac{2}{c} \frac{dn_{\text{eff}}}{dw} + \frac{w}{c} \frac{d^2n_{\text{eff}}}{dw^2} \quad (7)$$

其中 n_{eff} 为基模的有效折射率,角中心频率 $\omega=2\pi f$, f 表示频率, c 表示真空中的光速。图 9 是所设计的太赫兹光子晶体光纤在 1.3~5 THz 的波导色散曲线。可以看出,该光纤的波导色散在 1.3~2.25 THz 频率范围内随频率的增大而迅速下降,在 2.5~5 THz 范围内始终保持着相对较低且平坦的色散,随频率的增大色散曲线更加平稳, x 偏振态在 2.07 THz 时到达第一个色散零点,临近 5 THz 附近达到第二个色散零点, y 偏振态在 2.75 THz 附近处有一近零色散点。 x 、 y 偏振态在 1.56 THz 处有一交点,在 1.56 THz 之前, y 偏振态的波导色散值小于 x 偏振态的波导色散,1.56 THz 之后, y 偏振态的波导色散值始终大于 x 偏振态的波导色散。在较宽的频率范围内 (2.25~5 THz), x 、 y 偏振态始终在 $\pm 0.2 \text{ ps/THz/cm}$ 范围内保持着较低的近零平坦波导色散特性,这有利于宽带 THz 波的高效无畸变传输。

偏振模色散是指当一个光脉冲沿着单模光纤传输时,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沿光纤以不同的速度传输,造成输出光脉冲展宽^[49]。偏振模色散的大小一般用微分群时延描述如下:

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

其中, V_{gx} 和 V_{gy} 是两个正交偏振模的群速度。计算得到偏振模色散和太赫兹波频率的关系如图 10 所示,由图可知,该曲线的变化趋势是先增加后减小,在 3.5 THz 处得到最大的时间延时差 $3.217 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。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 $1/v = n/c$,故偏振模色散与双折射值成正比,变化趋势相同。

3 结论

设计了一种基于 Topas 环烯烃共聚物的高双折射低损耗太赫兹光子晶体光纤。通过采用以圆形空气孔为基本单元的级联正六边形多孔纤芯结构,结合六层正六边形空气孔包层实现。该光纤结构仅采用圆形空气孔,降低了光纤工程制造难度。仿真结果表明,当工作频率为 3.5 THz 时,该光纤的双折射值高达 0.0965,接近于 10^{-1} ,比已报导文献的太赫兹光子晶体光纤的双折射值都高。且在同一

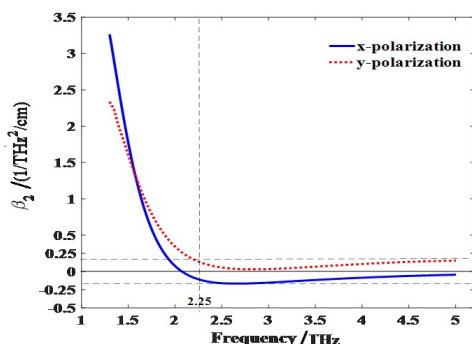


图9 太赫兹光子晶体光纤在 1.3~5 THz 处,当 $r=2\ \mu\text{m}$, $L=14.5\ \mu\text{m}$, $d=29\ \mu\text{m}$, $R=49\ \mu\text{m}$, $\Lambda=100\ \mu\text{m}$ 的波导色散曲线

Fig. 9 Waveguide dispersion for the proposed THz PCF in the frequency range of 1.3~5 THz, while $r=2\ \mu\text{m}$, $L=14.5\ \mu\text{m}$, $d=29\ \mu\text{m}$, $R=49\ \mu\text{m}$, $\Lambda=100\ \mu\text{m}$

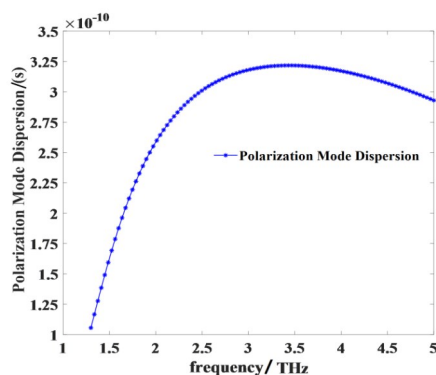


图10 PMD 随频率的变化曲线

Fig. 10 The relationship between PMD and frequency

频率下,具有 $10^{-12}\ \text{dB/cm}$ 的超低限制损耗和 $1\ \text{cm}^{-1}$ 的有效材料损耗。此外,在 2.25~5 THz 的频率范围内,该光纤表现出 $\pm 0.2\ \text{ps/THz/cm}$ 的低而平坦的近零色散,其偏振模色散为 $3.217 \times 10^{-10}\ \text{s}$ 。该光纤在太赫兹技术领域具有潜在应用,也为以后高双折射低损耗太赫兹光子晶体光纤的设计提供了重要参考价值。

致谢

作者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(61775180, 61875165, 61772417)资助,陕西省教育厅协同创新项目(20JY060)资助;西安邮电大学联合研究生培养工作站(YJGJ201905)、西邮新星(2016)和研究生创新基金(CXJJLZ2019032)资助。

Reference

[1] TONOCHI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 97105.

- [2] Zhong Ren-Bin, Zhou Jun, Liu Sheng-Gang. Research progress of terahertz waveguide [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, (钟任斌,周俊,刘盛纲. 太赫兹波导的研究进展. *电子科技大学学报*) 2012, **41**(02): 247-252
- [3] Li Shuai, Dai Zi-Jie, Gao Xiang, et al. Low-loss terahertz waveguide and its imaging application [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (李帅,戴子杰,高翔,等. 低损耗太赫兹波导及其成像应用. *红外与毫米波学报*) 2019, **38**(01): 68-73.
- [4] LI Shan-Shan, ZHANG Hao, BAI Jin-Jun, LIU Wei-Wei, CHANG Sheng-Jiang. Ultrahigh birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015, **64**(15): 154201.
- [5] HUI Zhan-Qiang, QU Meng-Jia, LI Xiao-Hui, et al. SnS nanosheets for harmonic pulses generation in near infrared region [J]. *Nanotechnology*, 2020, **31**: 485706.
- [6] 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*, (白晋军,王昌辉,霍丙忠,等. 低损耗宽频高双折射太赫兹光子带隙光纤. *物理学报*) 2011, **60**(09): 783-787
- [7] RANA S, ALI S, AHMED N, ISLAM R, ALJUNID S A. Ultra-high birefringent and dispersion-flattened low loss single-mode terahertz wave guiding [J]. *IET Communications*, 2016, **10**(13): 1579-1583.
- [8] LI Shao-Peng, LIU Hong-Jun, HUANG Nan, et al. Broadband high birefringence and low dispersion terahertz photonic crystal fiber [J]. *Journal of Optics*, 2014, **16**(10): 105102.
- [9] CHEN Hai-Bin, CHEN Da-Ru, & HONG Zhi. Squeezed lattice elliptical-hole terahertz fiber with high birefringence [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(20): 3943-3947.
- [10] Wang Jing-Li, Chen He-Ming. Single-Polarization Single-Mode Rhombic-Hole Terahertz Photonic Crystal Fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, (汪静丽,陈鹤鸣. 菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光. *物理学报*) 2014, **34**(09): 68-72
- [11] Atakaramians S, Afshar V S, Fischer B M, et al. Low dispersion and highly birefringent terahertz porous fibers [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(1): 36-38.
- [12] Ren Gou-Bin, Gong Yan-Dong, Shum Ping, Yu Xia and Hu Juan-Juan. Polarization maintaining air-Core bandgap fibers for terahertz wave guiding [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(5): 506-513.
- [13] WANG Jing-Li, YAO Jian-Quan, CHEN He-Ming, ZHONG Kai, LI Zhong-Yan. Ultrahigh birefringent polymer terahertz fiber based on a near-tie unit [J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**: 055402.
- [14] CHEN Da-Ru, TAM H Y. Highly birefringent terahertz fibers based on super-cell structure [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(12): 1858-1863.
- [15] YANG Shu-Ai, SHENG Xin-Zhi, ZHAO Guo-Zhong, LI Shu-Ai. Simple birefringent terahertz fiber based on elliptical hollow core [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, **53**: 102064.
- [16] YANG Tian-Yu, DING Can, ZIOLKOWSKI R W, GUO Y J. Circular hole ENZ photonic crystal fibers exhibit high birefringence [J]. *Opt. Express.*, 2018, **26** (13) :

- 17264-78.
- [17] Li Shan-Shan, Hao Xia, Bai Jin-Jun, et al. Terahertz Single-Polarization Single-Mode Photonic Crystal Fiber with Tunable Polarization [J]. Chinese Journal of Lasers, (李珊珊, 郝霞, 白晋军, 等. 偏振可调的太赫兹单偏振单模光子晶体光纤. 中国激光) 2016, **43**(09): 38-44
- [18] ISLAM R, HABIB M S, HASANUZZAMAN G K M, AHMAD R, RANA S, KAIJAGE S F. Extremely high-birefringent asymmetric slotted-core photonic crystal fiber in THz regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2015, **27**(21): 2222-2225.
- [19] HABIB A M, ANOWER S M, HASAN R M. Ultrahigh birefringence and extremely low loss Slotted-core microstructure fiber in terahertz regime [J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, **1**(6): 567-572.
- [20] YANG Tian-Yu, DING Can, ZIPLKOWSKI R W, GUO Y J. A scalable THz photonic crystal fiber with partially-slotted core that exhibits improved birefringence and reduced loss [J]. *Journal of lightwave technology*, 2018, **36**(16): 3408-17.
- [21] Ding Run-qi. Design and Properties of Photonic Crystal Fiber for Terahertz Transimission [D]. Lanzhou University of Technology, (丁润琪. 太赫兹波段光子晶体光纤的设计与传输性能. 兰州理工大学)2018.
- [22] HASANUZZAMAN G K M, HABIB M S. A novel low loss, highly birefringent photonic crystal fiber in THz regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, **28**(8): 899 - 902.
- [23] ISLAM M S, SULTANA J, FAISAL M, et al. A modified hexagonal photonic crystal fiber for terahertz applications [J]. *Optical Materials*, 2018, **79**: 336 - 339.
- [24] HABIB M A, ANOWER M S, HASAN M R. Highly birefringent and low effective material loss microstructure fiber for THz wave guidance [J]. *Opt Commun*, 2018, **423**: 140-144.
- [25] ISLAM R, HABIB M S, HASANUZZAMAN G K M, RANA S, SADATH M A. Novel porous fiber based on dual-asymmetry for low-loss polarization maintaining THz wave guidance [J]. *Opt. Lett.*, 2016, **41**(3): 440-443.
- [26] Wang Jing-Li, Yao Jian-Quan, Chen He-Ming, et al. Design and study of high birefringent terahertz photonic crystal fiber with hybrid crystal lattice [J]. *Acta Physica Sinica*, (汪静丽, 姚建铨, 陈鹤鸣, 等. 高双折射的混合格子太赫兹光子晶体光纤的设计与研究. 物理学报) 2011, **60**(10): 377-382
- [27] WU Zhi-Qing, ZHOU Xiao-Yan, SHI Zhao-Hua, XIA Han-Ding, HUANG Jin, JIANG Xiao-Dong, et al. Proposal for high-birefringent terahertz photonic crystal fiber with all circle air holes [J]. *Opt Eng*, 2016, **55**(3): 037105.
- [28] LUO Jian-Feng, TIAN Feng-Jun, QU Hong-Kun, LI Li, ZHANG Jian-Zhong, YANG Xin-Hua., YUAN Li-Bo. Design and numerical analysis of a THz square porous-core photonic crystal fiber for low flattened dispersion, ultrahigh birefringence [J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(24): 6993.
- [29] ISLAM M S, FAISAL M, ABDUR RAZZAK S M. Dispersion flattened extremely high- birefringent kagome lattice elliptic core photonic crystal fiber in THz regime [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2019, **51**(35): 1-15.
- [30] HASAN M R, ANOWER M S, HASAN M I, ABDUR RAZZAK S M. Polarization maintaining low-loss slotted core kagome lattice THz fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters.*, 2016, **28**(16):1751-1754.
- [31] HASANG M R, ANOWER M S, ISLAM M A, RAZZAK S M A. Polarization-maintaining low-loss porous-core spiral photonic crystal fiber for terahertz wave guidance [J]. *App. Opt.*, 2016, **55**(15): 4145-4152.
- [32] MONIR M K, HASAN M, PAUL B K, et al. High birefringent, low loss and flattened dispersion asymmetric slotted core-based photonic crystal fiber in THz regime [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, **33**(20): 1950218.
- [33] XIAO Han, LI Hai-Su, WU Bei-Lei, JIAN Shui-Sheng. Polarization-maintaining terahertz bandgap fiber with a quasi-elliptical hollow-core [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, **105**: 276-280.
- [34] LUO Jian-Feng, CHEN Shan-Shan, QU Hong-Kun, SU Zhen-Lan, LI Li, TIAN Feng-Jun, Highly birefringent single-mode suspended-core fiber in terahertz regime [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(16): 3242-3248.
- [35] FAISAL M, SHARIFUL ISLAM M. Extremely high birefringent terahertz fiber using a suspended elliptic core with slotted airholes [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(13): 3340.
- [36] Sultana Jakeya, Islam Md. Saiful, Faisal Mohammad, Islam Mohammad Rakibul, et al. Highly birefringent elliptical core photonic crystal fiber for terahertz application [J]. *Optics Communications*, 2018, 407.
- [37] WU Zhi-Qing, SHI Zhai-Hua, XIA Han-Ding, ZHOU Xiao-Yan, et al. Design of highly birefringent and low-loss oligoporous-core THz photonic crystal fiber with single circular air-hole unit [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(6): 1 - 11.
- [38] WU Zhi-Qing, ZHOU Xiao-Yan, XIA Han-Ding, SHI Zhai-Hua, HUANG Jin, et al. Low-loss polarization-maintaining THz photonic crystal fiber with a triple-hole core [J]. *Appl. Opt.*, 2017, **56**(8): 2288-2293 .
- [39] Yakasai Izaddeen K., Abas Pg Emeroylariffion, et al. Low loss and highly birefringent photonic crystal fibre for terahertz applications [J]. *Optik*, 2020, **206**:164321.
- [40] IALAM M S, SULTANA J, RANA S, et al. Extremely low material loss and dispersion flattened TOPAS based circular porous fiber for long distance terahertz wave transmission [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, **34**: 6-11.
- [41] NIELSEN K, RASMUSSEN H K, et al. Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8592-8601.
- [42] KHANARIAN G, CELANESE H. Optical properties of cyclic olefin copolymers [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(6): 1024-1029.
- [43] CUNNINFHAM P D, et al. Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials [J]. *J. Appl. Phys.* 2011, **109**(4): 043505-1-5.
- [44] ZHU Zhao-Ming, BROWN T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Opt.*

- Express*, 2002, **10**: 853 - 864.
- [45] ZHANG Ya-Ni, XUE Lu, QIAO Dun, GUANG Zhe. Porous photonic-crystal fiber with near-zero ultra-flattened dispersion and high birefringence for polarization-maintaining terahertz transmission [J]. *Optik*, 2019.
- [46] ISLAM M R, FAIYAZ KABIR M, *et al.* A novel hollow core terahertz refractometric sensor [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2019, 25.
- [47] Mondal Kajal. A comparative study of birefringence in photonic crystal fiber employing various lattice geometries with all-circular air holes [J]. *Optik*, 2020, **215**: 164699.
- [48] ISLAM M S, FAISAL M, ABDUR RAZZAK S M. Dispersion flattened porous-core honeycomb lattice terahertz fiber for ultra low loss transmission [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, **53**(6): 1-8.
- [49] 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]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**: 181-190.