

类摩天轮型多孔纤芯超高双折射率太赫兹光子晶体光纤特性

师东方^{1,2}, 惠战强^{1,2*}, 韩冬冬^{1,2}, 巩稼民^{1,2}, 赵峰^{1,2}

¹西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;

²西安邮电大学微波光子学与光通信西安市重点实验室, 陕西 西安 710121

摘要 提出一种以新型聚合物 Topas 作为基底材料的类摩天轮型多孔纤芯光子晶体光纤。利用时域有限差分法对光纤的双折射率、损耗及色散等特性进行数值模拟。结果表明:该光纤在 3~6 THz 的工作频段内可提供 10^{-1} 数量级的双折射率,在 4 THz 处达到 0.1085 的超高双折射率、 10^{-1} dB/cm 的总损耗、 10^{-16} dB/cm 的极低限制损耗和 2.4×10^{-14} dB/cm 的低弯曲损耗;该光纤在 3~5.5 THz 频率范围内拥有近零色散值,为 $\pm 0.11 \text{ THz}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。该光纤的良好特性对太赫兹光器件以及偏振传感等领域的发展具有促进作用。

关键词 光纤光学; 太赫兹; 光子晶体光纤; 高双折射率; 平坦色散

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221802

1 引言

太赫兹 (THz) 波^[1-3]处于电磁波谱中红外波段与微波波段间的特殊区域,具有优良的宽频谱资源、高无线传输速率等特性,有望成为 6G 通信^[4-5]的关键技术之一。各种工作于 THz 波段的光子器件应运而生,如太赫兹金属波导^[6-7]、太赫兹调制器^[8]、太赫兹吸收器^[9]、太赫兹成像系统^[10]与太赫兹传感器^[11]等。作为太赫兹波的理想传输介质之一,光子晶体光纤 (PCF) 的发展也受到学者的广泛关注^[12-14],一般由周期排列的空气孔构成,且空气孔尺寸大小与在其中传输的光波波长处于同一量级,因此该光纤能够灵活地控制电磁波传输,为下一代高速宽带无线通信提供了很好的导波介质。同时,PCF 具有超低损耗、大模场面积、无截止单模、可调控色散等优势,在光纤陀螺^[15]、模分复用^[16]、癌细胞检测^[17]、超连续光谱^[18]、光纤激光器^[19-20]等领域也具有潜在的应用价值。当光波在光纤中传输时,由应力等因素产生的双折射现象是无法避免的,这将导致光纤通信线路中存在偏振串扰、偏振模色散等现象^[21],进而使得整个通信系统性能降低。通过改变光纤截面结构可以极大提高其双折射特性,对实现太赫兹波在单模 PCF 中的保偏传输、偏振操控等具有重要的价值。

一般将 PCF 按照不同的导光机制分为两大类:一类为光子带隙光纤,其纤芯一般由空气填充,因此纤芯有效折射率低于包层,从而对 PCF 的周期性和制造工艺提出很高的要求;第二类为折射率导引型(全内反射型)PCF,根据纤芯填充方式不同,可以分为实心和多孔纤芯两种。在孔的周期性排布和制作方面,实心 PCF 虽然不如光子带隙光纤的要求严格,但其纤芯填充的材料对光波产生较强的吸收效应,会限制光波的传输距离;多孔纤芯 PCF 则避免了上述两种光纤出现的问题,其纤芯空气孔的加入明显改善由基底材料对光的吸收作用导致的传输损耗问题,也降低了对孔周期性排布的要求和制作难度,因此多孔纤芯 PCF 的设计及制造吸引了越来越多学者的关注。2018 年, Yang 等^[22]提出了由多种沟槽型结构组合成的多孔纤芯,在 1 THz 处得到了 0.069 的双折射率, 0.071 dB/cm 的总损耗、 10^{-6} dB/cm 的限制损耗以及超过 0.4 THz 的工作带宽。2019 年,汪成程等^[23]设计出一种渐进式方孔纤芯结构的 PCF,在 0.7 THz 处得到了 0.0532 的双折射率、0.02 dB/cm 的总损耗和 10^{-4} dB/cm 的限制损耗。2022 年,邸志刚等^[24]提出一种条形芯低损耗高双折射率的太赫兹 PCF,在 1.2 THz 处得到了 0.076 的双折射率,总损耗和限制损耗分别为 0.16 dB/cm 和 10^{-11} dB/cm。以上太赫兹光子晶体光纤 (THz-PCF)

收稿日期: 2022-10-09; 修回日期: 2022-11-23; 录用日期: 2022-12-27; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (61875165)、陕西省重点研发计划项目 (2022GY-008)、陕西省工业公关项目 (2021TD-09)、陕西省国际合作与交流项目 (2020KWZ-017)、陕西省教育厅协同创新项目 (20JY060)

通信作者: *zhanqianghui@xupt.edu.cn

的双折射率都较低(小于 10^{-1} 数量级),无法同时实现高双折射率和低限制损耗,同时要兼顾高双折射率、低限制损耗、平坦色散等性能,因此需要研究新型结构的 THz-PCF。

本文设计了一种宽工作频段的超高双折射率低损耗 THz-PCF。该光纤以 Topas 为基底材料,利用类摩天轮型多孔纤芯结构来实现高双折射率。通过控制变量法对光纤结构进行优化,并利用时域有限差分法对光纤的双折射率、损耗、模场能量分布等进行仿真分析。结果表明:该光纤在 3~6 THz 的宽频范围内可提供 10^{-1} 数量级的双折射率,在 4 THz 处实现 0.1085 的双折射率、 10^{-1} dB/cm 的总损耗和 0.8×10^{-12} dB/m 的弯曲损耗,并将限制损耗值大幅降低至 10^{-16} dB/cm。此外,该光纤在 3~5.5 THz 范围内拥有 ± 0.11 THz $^{-2}$ ·cm $^{-1}$ 的近零色散值,在太赫兹光子学领域具有潜在的应用价值。

2 结构设计及优化

所设计的类摩天轮型多孔纤芯 THz-PCF 的横截

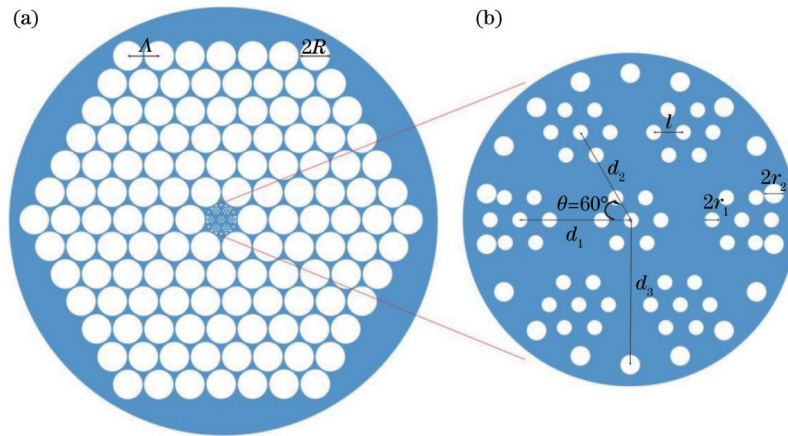


图 1 所提 THz-PCF 的横截面结构图。(a)包层区域;(b)纤芯区域

Fig. 1 Cross sectional structure of proposed THz-PCF. (a) Cladding region; (b) core region

PCF 某一结构参数的变化往往会对其性能、工作频段等产生较大影响,因此,为了得到所设计的类摩天轮型高双折射率 THz-PCF 的最优结构,利用时域有限差分法进行数值模拟。网格数量对模场分布图的清晰度有较大影响,网格越细密,仿真得到的模场分布越清晰,但过大的网格数会导致仿真计算的时间过长,综合考虑后将网格单元数确定为 400×400 。

以下将采用控制变量法逐一调节光纤的 8 个结构参数以得到最优结构,具体包括纤芯内外层小空气孔半径 r_1 、 r_2 ,中心六边形和与其平行的 2 个六边形之间的距离 d_1 ,中心六边形和其余 4 个六边形之间的距离 d_2 ,中心六边形和外层圆环的距离 d_3 ,两个相邻空气孔的距离 l ,包层中小孔半径 R 、小孔间距 Λ ,并对其双折射特性进行系统分析。

首先,对光纤纤芯的半径参数进行数值模拟。模

面如图 1(a)所示,白色部分为空气孔,其有效折射率为 1,蓝色部分为基底材料。光纤中包层空气孔以六角晶格的方式周期排布,孔半径用 R 表示,两空气孔间的距离为 Λ (晶格常数)。最靠近纤芯的包层由 6 个小圆空气孔构成,包层每向外增加一层,空气孔数量递增 6 个。包层数较少可以使制作难度降低,但会使限制损耗增加、双折射率降低。因此,综合权衡双折射率、限制损耗与制作的难易程度,最终确定该光纤包层的空气孔层数为 6。纤芯部分采用多孔芯结构,其局部横截面结构如图 1(b)所示。纤芯区域由内、外两层结构组成:内层由 7 个正六边形单元构成;外层由 18 个空气孔周期性排布成圆形结构。纤芯内层小空气孔半径用 r_1 表示,其孔间距为 l ,7 个小圆孔组成一个正六边形单元,将中心正六边形和与其平行的 2 个正六边形之间的距离定义为 d_1 ,和其余 4 个正六边形之间的距离定义为 d_2 ,外层小空气孔的半径为 r_2 ,内层中心正六边形和外层圆环的距离为 d_3 。

拟中令其余参数保持不变,仅改变 r_1 ,以 $0.2 \mu\text{m}$ 为步长,将 r_1 从 $1.1 \mu\text{m}$ 增加到 $1.9 \mu\text{m}$,得到的结果如图 2(a)所示。当 $r_1 = 1.7 \mu\text{m}$ 时得到的双折射率最大,为 0.1085,此时增大或减小 r_1 都会使双折射率下降,这是因为在 2~4 THz 范围内, y 偏振态的光场向纤芯压缩的速度更快,所以有效折射率随频率增加快速增大,而 x 偏振态的光场向纤芯压缩的速度较慢,这就导致了双折射率随频率增加快速增大;在 4 THz 后 y 偏振态曲线的斜率比 x 偏振态小,使得双折射率缓慢降低。因此,确定参数 r_1 的最优值为 $1.7 \mu\text{m}$ 。接下来考虑 r_2 对双折射率的影响。当 r_2 分别为 1.9、2.1、2.3、2.5、2.7 μm 时,得到的结果如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看出:当 r_2 从 $1.9 \mu\text{m}$ 增加到 $2.3 \mu\text{m}$ 时,双折射率的最大值从 0.0840 增加到 0.1085;当 r_2 从 $2.3 \mu\text{m}$ 增加到 $2.7 \mu\text{m}$ 时,双折射率的最大值从 0.1085 减少到

0.0960。因此,选择 $r_2=2.3\ \mu\text{m}$

其次,分析纤芯中距离参数的改变对双折射率的影响。仿真过程中以 $0.5\ \mu\text{m}$ 为步长,将 d_1 从 $25.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $27.5\ \mu\text{m}$,其他参数保持不变,得到的结果如图 2(c)所示。当 d_1 为 25.5 、 26.0 、 26.5 、 27.0 、 $27.5\ \mu\text{m}$ 时,4 THz 频率处对应的双折射率分别为 0.0914 、 0.1008 、 0.1031 、 0.1085 、 0.0910 ,因此选择 $d_1=27\ \mu\text{m}$ 。图 2(d)所示为仅参数 d_2 变化时,2~6 THz 频率范围内双折射率的变化曲线,可以看到:当 d_2 从 $22\ \mu\text{m}$ 增加到 $24\ \mu\text{m}$ 时,双折射率的最大值从 0.0770 增加到 0.1085 ;当 d_2 从 $24\ \mu\text{m}$ 增加到 $26\ \mu\text{m}$ 时,双折射率的最大值从 0.1085 迅速减小到 0.0510 。因此,选择 $d_2=24\ \mu\text{m}$ 。接着,以 $0.5\ \mu\text{m}$ 为步长,只改变 d_3 (从 $35\ \mu\text{m}$ 增加到 $37\ \mu\text{m}$),得到的双折射率随频率的变化结果如图 2(e)所示。可以看到,当 $d_3=35.5\ \mu\text{m}$ 时双折射率最大(0.1085),此时增大或减小 d_3 都会使双折射率降低,因此得到参数 d_3 的最优值为 $35.5\ \mu\text{m}$ 。接下来考虑 l 对双折射率的影响。当 l 为 7.0 、 7.5 、 8.0 、 8.5 、 $9.0\ \mu\text{m}$ 时,得到的结果如图 2(f)所示。可以看到,在 4 THz 频率处上述 5 个 l 值对应的双折射率分别为 0.0509 、 0.0530 、 0.1085 、 0.0905 、 0.0926 ,因此选择 l 为 $8\ \mu\text{m}$ 。

最后,研究包层中空气孔半径和间距与双折射率的关系。均以 $1\ \mu\text{m}$ 为步长增加 R 和 Λ 的值,并在 $5\ \mu\text{m}$ 的增量范围内讨论包层空气孔半径 R 和包层孔间距对双折射率的影响,结果如图 2(g)、(h)所示。从图 2(g)、(h)可以看到:类摩天轮型 PCF 的双折射率在 2~6 THz 范围内随 R 的增加而增大,随 Λ 的增加而减小,两个结构参数所呈现的变化规律完全相反。分析认为,随着孔径 R 的增加,包层中基底材料的占比相应减小,同理,减小包层空气孔间距 Λ 也会使包层中基底材料的占比减小,即增大 R 和减小 Λ 都会使双折射率增大。因此在 2~6 THz 工作频段内,当 $R=38.5\ \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=79\ \mu\text{m}$ 、 $f=4\ \text{THz}$ 时,得到的最大双折射率为 0.1085 ,且在 $2.4\sim 6\ \text{THz}$ 工作频段内,双折射率高于 0.09 。

3 性能指标及其分析

理想条件下单模光纤的横截面和折射率分布具有良好的几何圆对称性,因此它可以传输偏振方向相互正交、传播常数相等的两个基模 TE 和 TM。由于两个模式的传播常数 β_x 和 β_y 相等,因此这两个基模相互简并。然而对于实际的光纤,由于制造中受到工艺参数误差、光纤内部残余应力的影响,光纤横截面偏离理想圆对称,光纤折射率分布也因内部应力不均匀而呈不均匀分布,从而导致两个基模具有不同的折射率,传播常数不相等,最终破坏了基模的简并特性,引起模式双折射现象。传统的保偏光纤通过在光纤内部人为引入

双折射,使光纤中轴向各位置的双折射率保持不变,以保持入射光的偏振态,但双折射率较小,保偏能力有限。PCF 的问世,为研制新型的高双折射率光纤提供了一个有效的途径。由于 PCF 横截面由很多空气孔组成,一般通过改变空气孔的形状、大小、孔间距以及孔的分布方式来打破光纤截面的圆对称性,从而提高 PCF 的双折射率;也可以采用掺杂或在气孔中注入气体或液体的方法,改变纤芯附近两个横向正交方向的有效折射率差,以提高模式的双折射率。

根据上述仿真结果,类摩天轮型 PCF 的最优结构参数为 $r_1=1.7\ \mu\text{m}$ 、 $r_2=2.3\ \mu\text{m}$ 、 $d_1=27\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=24\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=35.5\ \mu\text{m}$ 、 $l=8\ \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=79\ \mu\text{m}$ 、 $R=38.5\ \mu\text{m}$ 。针对优化后的结构,仿真得到其在 2~6 THz 工作频段内类摩天轮型 PCF 的双折射率 B 、 x 偏振态和 y 偏振态的有效折射率随频率的变化规律。模式双折射率 B 的定义为基模中 x 偏振态和 y 偏振态的有效折射率实部之差的绝对值^[25],计算公式为

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = \frac{2\pi|\beta_x - \beta_y|}{\lambda} = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^y)|, \quad (1)$$

式中: β_x 、 β_y 表示基模中 x 、 y 偏振态的传播常数; $\text{Re}(n_{\text{eff}}^x)$ 和 $\text{Re}(n_{\text{eff}}^y)$ 为基模中 x 、 y 偏振态的有效折射率实部。

在 2~6 THz 工作频段所提 THz-PCF 的双折射率和有效折射率随频率变化的曲线如图 3 所示。可以看到,有效折射率随着频率的增加而增大,其曲线斜率随频率的增加而减小,这与频率增大、限制损耗降低、模场面积缩小、光场泄漏减小有关。

从图 3 所示的所提 THz-PCF 双折射率变化曲线可以看出,双折射率随着工作频率的增加先增大后减小,这是因为:在 2~4 THz 范围内, y 偏振态的光场向纤芯压缩的速度更快,导致其有效折射率随工作频率快速增大,而 x 偏振态的光场向纤芯压缩的速度较慢;在 4 THz 后, y 偏振态的有效折射率随频率的变化逐渐趋于平缓,最终导致 4~6 THz 频率范围内双折射率降低。因此,类摩天轮型 PCF 在 4 THz 处得到的双折射率最大值为 0.1085 ,且在 $2.9\sim 6\ \text{THz}$ 频率区间双折射率大于 0.1 ,属于高双折射率水平。

PCF 对太赫兹波的限制能力通常用限制损耗 α_{CL} 来表征,其计算公式^[26]为

$$\alpha_{\text{CL}} = 8.686 \times k_0 \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^{-2}, \quad (2)$$

式中: $k_0=2\pi f/c$,其中 f 表示所处工作频段, c 表示真空中的光速; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示有效折射率的虚部。

所设计的类摩天轮型 THz-PCF 的限制损耗随频率的变化情况如图 4 所示,可以看到,限制损耗随着频率的增加而减小,这是因为一方面频率增加后光可以被更好地限制在纤芯部分,另一方面 y 偏振态的光场向纤芯压缩的速度更快,导致 y 偏振态的限制损耗相

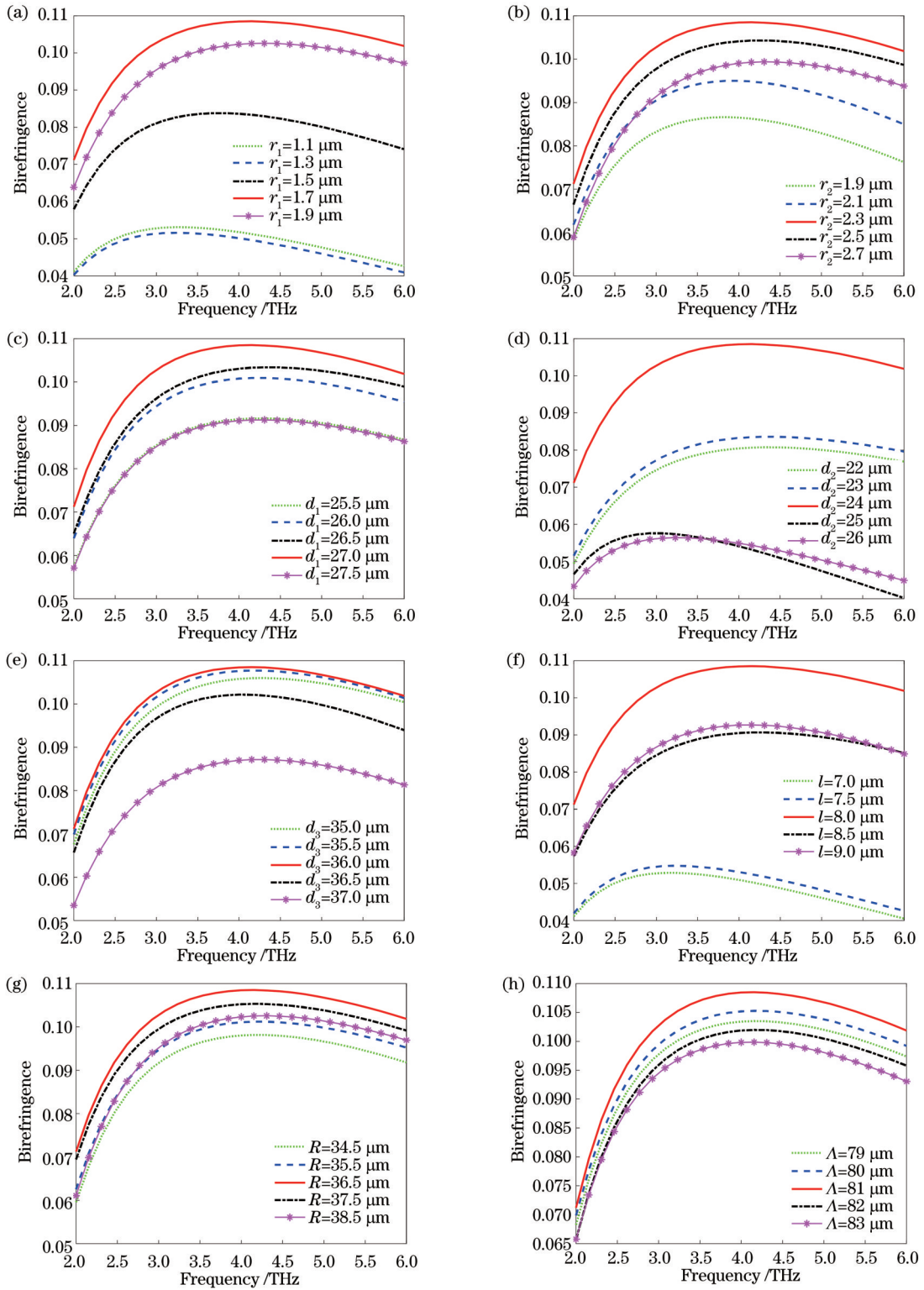


图 2 用控制变量法改变独立结构参数时 THz-PCF 双折射率随频率变化的曲线。(a) r_1 不同; (b) r_2 不同; (c) d_1 不同; (d) d_2 不同; (e) d_3 不同; (f) l 不同; (g) R 不同; (h) Λ 不同

Fig. 2 Birefringence of proposed THz-PCF changing with frequency when independent structural parameters are changed by control variable method. (a) Different r_1 ; (b) different r_2 ; (c) different d_1 ; (d) different d_2 ; (e) different d_3 ; (f) different l ; (g) different R ; (h) different Λ

较于 x 偏振态更小。所设计的类摩天轮型 THz-PCF 与文献[27]THz-PCF 的限制损耗随频率的变化相同。THz-PCF 在 2 THz 处得到最大的限制损耗值, 其中 x

偏振态和 y 偏振态的限制损耗分别为 9.43×10^{-4} dB/cm 和 2.71×10^{-6} dB/cm; 在 2 THz 后限制损耗迅速降低, 在双折射率最大值(工作频率为 4 THz)

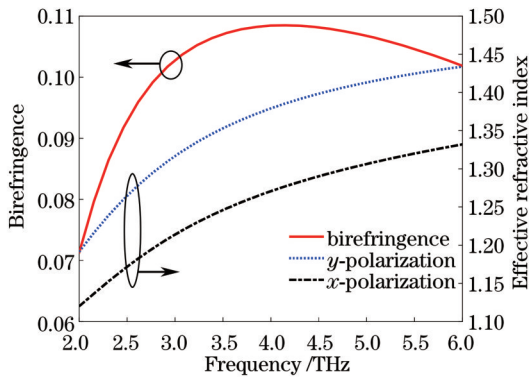


图 3 在 2~6 THz 工作频段所提 THz-PCF 的双折射率和有效折射率随频率变化的曲线

Fig. 3 Birefringence and effective refractive index of proposed THz-PCF changing with frequency in the frequency range of 2-6 THz

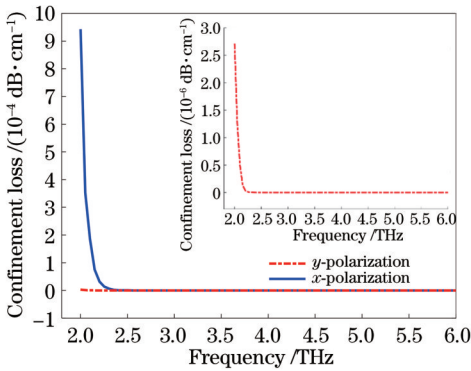


图 4 2~6 THz 工作频段光纤的限制损耗随频率变化的曲线

Fig. 4 Confinement loss for proposed THz-PCF changing with frequency in the frequency range of 2-6 THz

处 x 偏振态和 y 偏振态分别得到 1.36×10^{-21} dB/cm 和 2.43×10^{-20} dB/cm 的极低限制损耗,从而实现了太赫兹波的宽频带低损耗传输。

一般用有效材料吸收损耗这一参数来描述光纤中材料的吸收效应^[27-28],其可表示为

$$\alpha_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{\text{mat}} n_{\text{mat}} |E|^2 \alpha_{\text{mat}} dA}{\left| \int_{\text{all}} S_z dA \right|} \right), \quad (3)$$

式中: 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; α_{mat} 为材料的吸收损耗系数; S_z 为 z 方向的坡印亭矢量, $S_z = \frac{1}{2} (E \times H) \cdot z$; 下标 all 表示光纤剖面结构的整体面积, mat 表示基底材料部分的面积, 材料的体吸收系数在所研究的频率范围内为 $\alpha_{\text{mat}} = 1 \text{ cm}^{-1}$ ^[29]。

所设计 PCF 的有效材料吸收损耗随频率的变化曲线如图 5 所示, 在 2~6 THz 工作频段内, 所设计的类摩天轮型 PCF 的 x 、 y 偏振态在基底材料中的有效材料吸收损耗随频率的增加而增大, 且曲线斜率减小。

这是因为 x 、 y 偏振态的光在低频时部分能量泄漏到光纤包层中, 工作频段增大时, 光场能量从包层向纤芯聚集, 光在包层中的分布占比减小, 在纤芯材料中的分布占比增大, 而基底材料对太赫兹波有一定的吸收作用, 最终导致 PCF 中有效材料吸收损耗随工作频率的增加而增大。此外, 在工作频率较低时 y 偏振态的有效材料吸收损耗略高于 x 偏振态, 这是因为 x 方向的大部分能量进入空气孔, 处于高吸收态基底材料中的能量占比较小, 而 y 偏振态分布在纤芯基底材料中的能量占比较大, 因此 y 偏振态的有效吸收损耗比 x 偏振态大; 在工作频率增大后, x 方向上的模场分布在纤芯材料的部分比 y 方向多, 从而导致此频段内 x 偏振态的有效材料吸收损耗比 y 偏振态大。

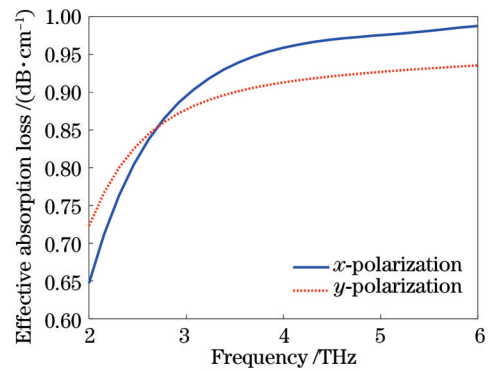


图 5 在 2~6 THz 工作频段所提 THz-PCF 的有效吸收损耗随频率变化的曲线

Fig. 5 Effective absorption loss for proposed THz-PCF changing with frequency in the frequency range of 2-6 THz

利用弯曲光纤的折射率模型, 得到其折射率等效公式^[30-31]为

$$n(x, y) = n_0(x, y) \times \left(1 + \frac{x}{R} \right), \quad (4)$$

式中: $n_0(x, y)$ 为光纤剖面结构初始折射率分布; $n(x, y)$ 为光纤弯曲后剖面结构的折射率分布; R 为光纤的弯曲半径。

弯曲损耗也是衡量光纤性能优劣的一个重要参数, 对光纤中光波传输的稳定性有很大的影响。分别沿 x 、 y 方向弯曲光纤时, 弯曲损耗特性随弯曲半径的变化关系如图 6 所示。可以看出, 在工作频率不变的情况下 (所选频率为 4 THz), 弯曲损耗随着弯曲半径的增大而减少, 且 TE 模的弯曲损耗小于 TM 模, 这是因为沿 x 方向弯曲光纤时, TM 模的模场面积大于 TE 模, 因此 TE 模的弯曲损耗比 TM 模的弯曲损耗低; 沿 y 方向弯曲光纤时, 情况则相反。图 6(a)~(c) 所示为光纤沿 x 方向弯曲, 弯曲半径分别为 1、2、3 cm 时 TM 模式的模场分布。可以看出, 沿 x 方向弯曲光纤时, 随着弯曲半径增大, 模场能量向中心偏移, 也进一步印证了弯曲半径越大, 弯曲损耗越小。

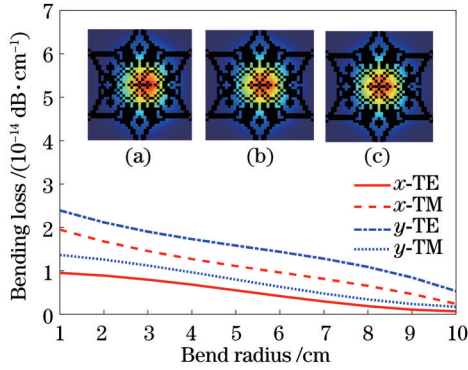


图 6 工作频率为 4 THz, 分别沿 x 、 y 方向弯曲光纤时光纤的弯曲损耗随弯曲半径的变化关系, 插图分别为弯曲半径为 (a) 1 cm、(b) 2 cm、(c) 3 cm 时 TM 模式的模场分布
Fig. 6 Bending loss of optical fiber bent along x and y directions respectively at the operating frequency of 4 THz changing with bending radius, and the illustrations show mode field distribution of TM mode with bending radius is (a) 1 cm, (b) 2 cm, and (c) 3 cm

PCF 中不同区域内的模场能量占比^[32]可以定义为

$$P_f = \frac{\int_{\zeta} S_z dA}{\int_{\text{all}} S_z dA}, \quad (5)$$

式中: P_f 表示 PCF 中的能量分布; ζ 为空气孔或基底材料的面积。

在 2~6 THz 工作频段内, x 、 y 偏振态在基底材料和空气孔中模场能量占比的仿真结果如图 7 所示。随着工作频率增加, 该单模光纤中的模场能量在纤芯材料中的占比增加, 在包层空气孔中的占比减小。这是因为低频时部分模场能量分布在包层空气孔中, 在频率增加的过程中, 光逐渐被限制在光纤纤芯中传输, 并且光在光纤中传输时分布在基底材料和空气中的能量总和不变(占比之和始终等于 1), 这就导致光在材料和空气孔中的能量分布曲线呈完全相反的趋势。并且 y 偏振态在材料中的能量分布占比大于 x 偏振态, 空气孔中 x 、 y 偏振态的能量分布情况则相反。在 4 THz 处(双折射率取最大值处), 光纤基底材料中 x 、 y 偏振态的模场能量占比分别为 87.08% 和 88.93%, 同时其在空气孔中的能量占比分别为 12.92%、11.07%。又因为光纤的限制损耗和基模在纤芯中的总能量占比有关, 所以单模光纤传输基模时能量在纤芯中的占比越大, 则限制损耗越小, 对光的限制能力越强。

由于所设计的 THz-PCF 中填充的环烯烃共聚物(COC)具有近零材料色散特性^[22, 29], 因此该工作频率范围内材料色散值可以忽略不计。波导色散的计算公式^[33]为

$$\beta_2 = \frac{2}{c} \times \frac{dn_{\text{eff}}}{d\omega} + \frac{\omega}{c} \times \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\omega^2}, \quad (6)$$

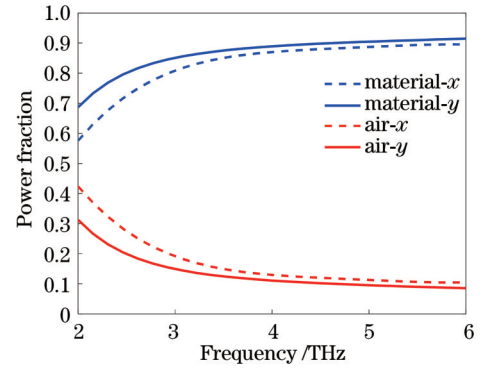


图 7 在 2~6 THz 工作频段所提 THz-PCF 中空气和材料的模场能量占比随频率变化的曲线

Fig. 7 Power fraction in air and material for proposed THz-PCF changing with frequency in the frequency range of 2-6 THz

式中: n_{eff} 为有效折射率; 角中心频率 $\omega = 2\pi f$ 。

图 8 所示为类摩天轮型 THz-PCF 在 2~6 THz 的波导色散特性随频率变化的曲线。由图 8 可知: PCF 的波导色散值在 2~3 THz 频段随着频率的增加而迅速减小, x 偏振态的波导色散值始终大于 y 偏振态; 在 3.5~6 THz 工作频段, x 、 y 偏振态始终拥有 $-0.11 \sim 0.11 \text{ THz}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$ 范围内近零且平坦的色散值, 有效降低了波导色散对太赫兹波高效传输的影响。

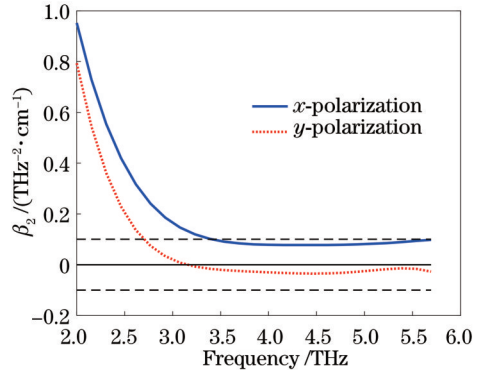


图 8 在 2~6 THz 工作频段所提 THz-PCF 波导色散随频率变化的曲线

Fig. 8 Waveguide dispersion for proposed THz-PCF changing with frequency in the frequency range of 2-6 THz

偏振模色散(PMD)通常用微分群时延^[34]表示, 计算公式为

$$\Delta T = \left| \frac{1}{v_{gx}} - \frac{1}{v_{gy}} \right| = \left| \frac{n_{gx} - n_{gy}}{c} \right|, \quad (7)$$

式中: v_{gx} 和 v_{gy} 表示两个相互垂直的基模偏振态的群速度。偏振模色散中群速度与有效折射率的关系可表示为 $1/v_g = n/c$, 故偏振模色散与双折射率成正比。

当光脉冲在单模光纤中传输时, 会不可避免地受到许多外部因素的影响, 如温度、压力、扭转等, 这些因素会使光脉冲中两个原本简并的偏振态发生耦合。两个偏振态传播速度的不同也会导致入射光在传输过程

中发生一定的展宽,从而造成光学系统性能下降。经过仿真得到偏振模色散随频率变化的关系如图 9 所示,可以看出,偏振模色散随频率的增加先增大后减小,在 4 THz 处出现最大延时差,为 3.615×10^{-10} s。

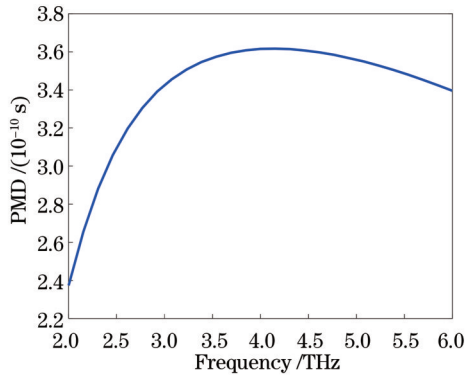


图 9 偏振模色散随频率变化的曲线

Fig. 9 Relationship between PMD and frequency

模场分布特性将影响模式传输质量。所提类摩天轮型多孔芯结构采用了典型的六角晶格包层,使得光纤可以很好地将模场限制在纤芯中。对于类摩天轮型多孔芯结构 PCF,当各参数最优时,其模场分布如图 10 所示。从图 10 可以看出,当工作频率从 1.5 THz 增加到 4 THz 时,光纤中的能量由包层向纤芯区域集中,模场能量泄漏减少。结合图 7 和图 10 可知,在 4 THz 处双折射率取最大值时几乎所有的能量都被限制在光纤纤芯内,能够实现较好的太赫兹波传输。

对于一个仿真设计,能真正应用到工程实际中才算成功,很难保证制备参数与所设计的参数完全一致,因此工艺容差是必须考虑的特性。本实验研究了各参数在 $\pm 1\%$ 误差下对于类摩天轮型 PCF 的双折射率造成的影响,该误差下 PCF 的双折射率发生了较小的变化,仍可以保证在工作频段内保持 0.9 以上的双折射率。

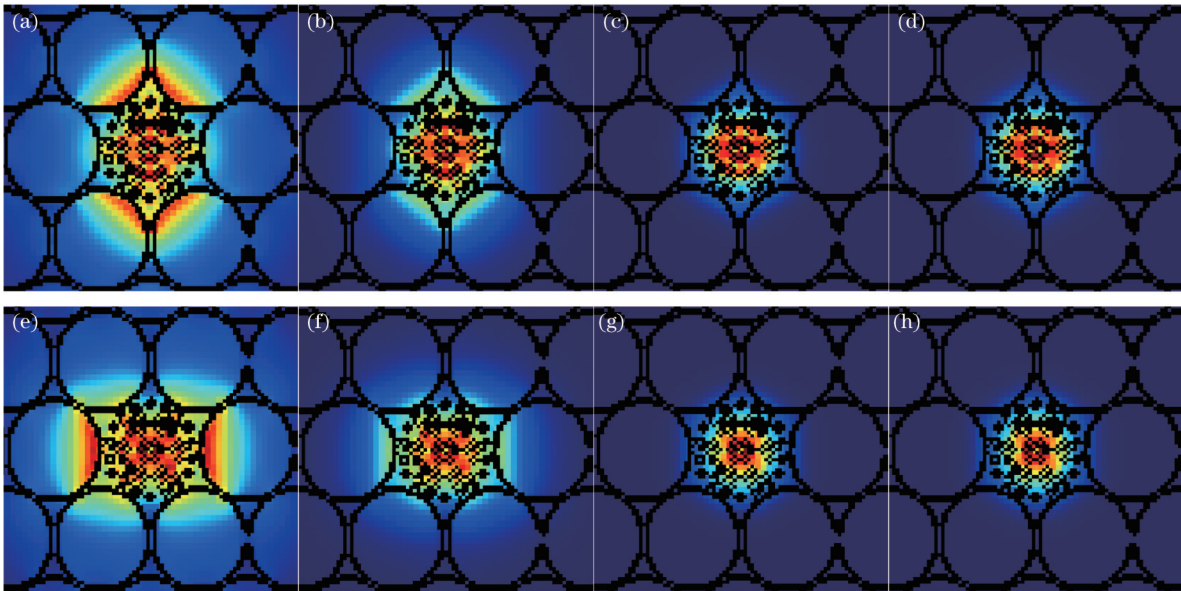


图 10 不同频率下 x 偏振态与 y 偏振态的模场分布。(a) TE, $f=1.5$ THz; (b) TE, $f=2$ THz; (c) TE, $f=3$ THz; (d) TE, $f=4$ THz; (e) TM, $f=1.5$ THz; (f) TM, $f=2$ THz; (g) TM, $f=3$ THz; (h) TM, $f=4$ THz

Fig. 10 Mode field distribution of x -polarization and y -polarization under different frequencies. (a) TE, $f=1.5$ THz; (b) TE, $f=2$ THz; (c) TE, $f=3$ THz; (d) TE, $f=4$ THz; (e) TM, $f=1.5$ THz; (f) TM, $f=2$ THz; (g) TM, $f=3$ THz; (h) TM, $f=4$ THz

4 结 论

为了实现 THz 波在 PCF 中的保偏传输、偏振操控,提出一种以 Topas 为基底材料的类摩天轮型多孔纤芯高双折射率 THz-PCF。利用时域有限差分法对光纤中光波的传输特性进行模拟,结果表明,所设计的 THz-PCF 在 4 THz 处获得了 0.1085 的超高双折射率和 10^{-16} dB/cm 的极低限制损耗。当沿 y 方向弯曲光纤时, x 偏振态的弯曲损耗最大 (2.4×10^{-14} dB/cm),并且在 3 THz 带宽范围内, x 、 y 偏振态始终拥有近零且平坦的色散,其值为 ± 0.11 THz⁻²·cm⁻¹。该 THz-

PCF 具有高双折射率、低限制损耗、低弯曲损耗以及平坦色散特性,在太赫兹通信、传感等领域具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] 武帅, 屈浩, 涂昊, 等. 太赫兹技术应用进展[J]. 电子技术应用, 2019, 45(7): 3-7, 18.
Wu S, Qu H, Tu H, et al. Progresses towards the application of terahertz technologies[J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(7): 3-7, 18.
- [3] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学

- 报, 2020, 41(5): 168-186.
- Xie S, Li H R, Li L X, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.
- [4] 冯伟, 韦舒婷, 曹俊诚. 6G 技术发展愿景与太赫兹通信[J]. 物理学报, 2021, 70(24): 244303.
- Feng W, Wei S T, Cao J C. 6G technology development vision and terahertz communication[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(24): 244303.
- [5] 刘利平, 菅梦楠, 陈艺骞. 太赫兹技术发展及其应用于 6G 的挑战分析[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(2): 17-24.
- Liu L P, Jian M N, Chen Y J. Development and challenges of terahertz technology for 6G applications[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(2): 17-24.
- [6] Wang K L, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. Nature, 2004, 432(7015): 376-379.
- [7] Coleman S, Grischkowsky D. Parallel plate THz transmitter[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(5): 654-656.
- [8] Shi Z W, Cao X X, Wen Q Y, et al. Terahertz modulators based on silicon nanotip array[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(2): 1700620.
- [9] 马栎敏, 徐晗, 刘禹煌, 等. 基于石墨烯超材料的宽频带太赫兹吸收器[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0923001.
- Ma L M, Xu H, Liu Y H, et al. Broadband terahertz absorber based on graphene metamaterial[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0923001.
- [10] 张振伟, 赵跃进, 缪寅宵, 等. 基于线性调频机制的太赫兹无损检测成像技术[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0411002.
- Zhang Z W, Zhao Y J, Miao Y X, et al. Terahertz nondestructive testing imaging technology based on linear frequency modulation mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0411002.
- [11] 杨洁萍, 王民昌, 邓璇, 等. 超材料吸收器集成微流控的双带太赫兹传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2328001.
- Yang J P, Wang M C, Deng H, et al. Dual-band terahertz sensor based on metamaterial absorber integrated microfluidic[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2328001.
- [12] Li Y F, Wang C L, Zhang N, et al. Analysis and design of terahertz photonic crystal fibers by an effective-index method[J]. Applied Optics, 2006, 45(33): 8462-8465.
- [13] Lee Y S, Kim S, Oh K. Highly birefringent slotted-porous-core photonic crystal fiber with elliptical-hole cladding for terahertz applications[J]. Current Optics and Photonics, 2022, 6(2): 129-136.
- [14] Kim S, Kee C S, Lee J M. Single-mode condition and dispersion of terahertz photonic crystal fiber[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2007, 11(3): 97-100.
- [15] 郑辛, 吴衍记, 于怀勇. 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用现状及其关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 1-8.
- Zheng X, Wu Y J, Yu H Y. Key technology & application status of the photonic crystal fiber used in fiber optic gyroscope[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 1-8.
- [16] 王晓凯, 李建设, 李曙光, 等. 一种基于三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器的设计与研究[J]. 物理学报, 2022, 71(4): 044206.
- Wang X K, Li J S, Li S G, et al. Design and research of a broadband mode-division multiplexer based on three-core photonic crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(4): 044206.
- [17] Dinis U S, Balasundaram G, Chang Y T, et al. Sensitive multiplex detection of serological liver cancer biomarkers using SERS-active photonic crystal fiber probe[J]. Journal of Biophotonics, 2014, 7(11/12): 956-965.
- [18] 吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 1040 nm 泵浦的光子晶体光纤超连续光谱产生性能退化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11): 3588-3594.
- Wu Y J, Ye H Q, Han J, et al. Supercontinuum generation degradation of 1040 nm laser pumped photonic crystal fibers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(11): 3588-3594.
- [19] Rong Q Z, Qiao X G, Yang H Z, et al. Mode-locked soliton fiber laser using an intracavity polarization maintaining photonic crystal fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 406-410.
- [20] Liu J T, Zhao N, Chen Y, et al. Tm/Al Co-doped silica glass prepared by laser additive manufacturing technology for 2- μm photonic crystal fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1486-1491.
- [21] Hui Z Q, Qu M J, Li X H, et al. SnS nanosheets for harmonic pulses generation in near infrared region[J]. Nanotechnology, 2020, 31(48): 485706.
- [22] Yang T Y, Ding C, Ziolkowski R W, et al. 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): 3408-3417.
- [23] 汪成程, 张峰, 吴根柱. 渐近式太赫兹多孔光子晶体光纤模式特性研究[J]. 激光技术, 2019, 43(6): 768-772.
- Wang C C, Zhang F, Wu G Z. Study on mode characteristics of asymptotic terahertz porous photonic crystal fibers[J]. Laser Technology, 2019, 43(6): 768-772.
- [24] 邸志刚, 孔令丰, 贾春荣, 等. 高双折射低损耗条形纤芯光子晶体光纤设计[J/OL]. 激光杂志: 1-7[2022-10-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.tn.20221208.1157.007.html>.
- Di Z G, Kong L F, Jia C R, et al. Design of high birefringence low loss bar core photonic crystal fiber[J/OL]. Laser Journal: 1-7 [2022-10-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.tn.20221208.1157.007.html>.
- [25] 邸志刚, 王彪, 杨健侠, 等. 高双折射低色散光子晶体光纤设计[J]. 激光杂志, 2021, 42(1): 25-28.
- Di Z G, Wang B, Yang J T, et al. Design of photonic crystal fiber with high birefringence and low dispersion[J]. Laser Journal, 2021, 42(1): 25-28.
- [26] Hasanuzzaman G K M, Rana S, Habib M S. A novel low loss, highly birefringent photonic crystal fiber in THz regime[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(8): 899-902.
- [27] Liang J, Ren LY, Chen N N, et al. Broadband, low-loss, dispersion flattened porous-core photonic bandgap fiber for terahertz (THz)-wave propagation[J]. Optics Communications, 2013, 295: 257-261.
- [28] Islam M R, Kabir F M, Khandoker M, et al. A novel hollow core terahertz refractometric sensor[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2019, 25: 100295.
- [29] Wu Z Q, Zhou X Y, Xia H D, et al. Low-loss polarization-maintaining THz photonic crystal fiber with a triple-hole core[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2288-2293.
- [30] Olszewski J, Szpulak M, Urbanczyk W. Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(16): 6015-6022.
- [31] 盛新志, 姜淑琴, 尹国路, 等. 一种与标准单模光纤高适配的低弯曲损耗光子晶体光纤[J]. 物理学报, 2013, 62(10): 104217.
- Sheng X Z, Lou S Q, Yin G L, et al. A high-compatibility low-bending-loss photonic crystal fiber with standard single mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(10): 104217.
- [32] Islam M S, Faisal M, Razzak S M A. Dispersion flattened porous-core honeycomb lattice terahertz fiber for ultra low loss transmission[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(6): 8500608.
- [33] Yang T Y, Ding C, Ziolkowski R W, et al. Circular hole ENZ photonic crystal fibers exhibit high birefringence[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17264-17278.
- [34] 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, 2000, 6(2): 181-191.

Polarization Characteristics of High Birefringence Photonic Crystal Fiber with Ferris-Wheel-Like Porous Core in Terahertz Regime

Shi Dongfang^{1,2}, Hui Zhanqiang^{1,2*}, Han Dongdong^{1,2}, Gong Jiamin^{1,2}, Zhao Feng^{1,2}

¹*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China;*

²*Xi'an Key Laboratory of Microwave Photonics and Optical Communication, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China*

Abstract

Objective As an ideal transmission medium of terahertz (THz) wave, THz photonic crystal fiber (THz-PCF) has attracted extensive attention. The structure of THz-PCF is usually composed of periodically arranged air holes whose size is in the same order of the THz wavelength. Therefore, the transmission of THz wave in PCF can be flexibly controlled by adjusting the size and shape of the air hole. However, when the THz wave is transmitted in ordinary PCFs, birefringence caused by stress and other factors is inevitable, which will result in polarization crosstalk, polarization dependent loss, and polarization mode dispersion in THz link, leading to the degraded performance of the entire THz system. High birefringence optical fiber can ensure that the polarization state of the incident THz wave remains unchanged when it is transmitted in the fiber. The birefringence of the THz fiber can be greatly improved by changing the symmetry of the cross-section structure of the fiber, which is of great value for achieving polarization maintaining transmission and polarization manipulation of THz wave in PCFs.

Methods Topas is usually employed as the substrate material of porous core THz-PCF in present study. Firstly, an initial PCF structure is designed. Then, the characteristics of the proposed PCF are numerically analyzed based on the finite difference time domain (FDTD) method. Next, the control variable method is adopted to investigate the polarization characteristics of THz-PCF through the following three ways: optimizing the core structure, adjusting the cladding structure, and changing the parameters of the core and cladding at the same time to obtain the optimal structure. Meanwhile, the crucial performance parameters of PCF are analyzed to evaluate the performance of the designed THz-PCF, which include birefringence, confinement loss, effective absorption loss, bending loss, power fraction, waveguide dispersion, and polarization mode dispersion.

Results and Discussions According to available literature, this paper leverages cyclic olefin copolymer as the substrate and employs the FDTD method to design and analyze a high birefringence THz-PCF based on a porous core structure. The anisotropy and high polarization characteristics of THz-PCF are introduced by changing the arrangement of the air holes in the core area. The specific description is as follows. By adjusting the structural parameters of the fiber core and cladding air holes, the paper designs the porous core high birefringence THz-PCF with Ferris-wheel-like and calculates the birefringence characteristics numerically. The results show that when the Ferris-wheel-like porous core fiber structure parameters are $r_1=1.7\ \mu\text{m}$, $r_2=2.3\ \mu\text{m}$, $d_1=27\ \mu\text{m}$, $d_2=24\ \mu\text{m}$, $d_3=35.5\ \mu\text{m}$, $l=8\ \mu\text{m}$, $\Lambda=79\ \mu\text{m}$, and $R=38.5\ \mu\text{m}$ (Fig. 2) at $f=4\ \text{THz}$, an ultra-high birefringence of 0.1085 (Fig. 3) and an ultra-low confinement loss of 10–16 dB/cm (Fig. 4) are obtained. The porous core PCF structure has achieved an ultra-high birefringence (Fig. 3), low confinement loss (Fig. 4), low bending loss (Fig. 6), and near-zero flattened dispersion (Figs. 8 and 9) in THz technology, which provides important reference value for the design of high birefringence and low loss THz-PCFs in the future.

Conclusions In this paper, a THz-PCF with Ferris-wheel-like porous core is proposed. The Topas is adopted as the substrate material of the designed PCF. The FDTD method is employed to numerically analyze the birefringence, loss, and dispersion of the proposed optical fiber. After structural optimization, the THz-PCF can provide a birefringence of the magnitude of 10^{-1} in the 3–6 THz operating frequency band. Ultra-high birefringence of 0.1085, low confinement loss of 10^{-16} dB/cm, and low bending loss of 2.4×10^{-14} dB/cm are achieved at 4 THz, which is very competitive even compared with the previous results: the reported PCF does not achieve 10^{-1} order of magnitude high birefringence and low confinement loss at the same time. Additionally, the proposed THz-PCF exhibits a low and flattened dispersion in the range of 3–5.5 THz, and the dispersion value is within $\pm 0.11\ \text{THz}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$. The study shows that such kind of PCF with high excellent birefringence and low confinement loss can be obtained through the optical fiber structure design, which combines multi-layer cladding and novel Ferris-wheel-like porous core structure. The excellent properties of the proposed THz-PCF will promote the development of THz optical devices and polarization sensing.

Key words fiber optics; terahertz; photonic crystal fiber; high birefringence; flattened dispersion