

# 高双折射太赫兹光子晶体光纤的研究进展

刘梦楠<sup>1</sup>, 李梦雪<sup>1</sup>, 姜澄溢<sup>1</sup>, 闫旭<sup>2</sup>, 万勇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071;

<sup>2</sup>青岛大学非织造材料与产业用纺织品创新研究院, 山东 青岛 266071

**摘要** 随着太赫兹技术的不断发展,太赫兹波导逐渐成为研究热点之一。相比于太赫兹聚合物波导,太赫兹光子晶体光纤(PCF)在高双折射方面具有明显优势。在介绍传统太赫兹波导技术研究现状的基础上,重点分析和总结了基于不同原理和不同结构的高双折射太赫兹 PCF,对其优缺点进行了对比,并对高双折射太赫兹 PCF 的应用现状及后续的工作方向进行了总结和展望。

**关键词** 光纤光学; 太赫兹; 高双折射; 光子晶体光纤; 聚合物

**中图分类号** TN202; TN203 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.090006

## Research Progress on High Birefringence Terahertz Photonic Crystal Fibers

Liu Mengnan<sup>1</sup>, Li Mengxue<sup>1</sup>, Jiang Chengyi<sup>1</sup>, Yan Xu<sup>2</sup>, Wan Yong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

<sup>2</sup>Institute of Nonwovens & Industrial Textiles Innovation, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract** With the development of terahertz techniques, terahertz waveguides have gradually become one of the research hotspots. Compared to the terahertz polymer waveguide, the terahertz photonic crystal fiber (PCF) has obvious advantages in the aspect of high birefringence. Based on the introduction of the research status of traditional terahertz waveguide techniques, the high birefringence terahertz PCFs with different principles and different structures are mainly analyzed and summarized, and their advantages and disadvantages are compared. In addition, the application status and the future work directions of high birefringence terahertz PCFs are summarized and prospected.

**Key words** fiber optics; terahertz; high birefringence; photonic crystal fiber; polymer

**OCIS codes** 060.5295; 160.5298; 130.5296; 130.5460

## 1 引言

太赫兹波一般是指频率在 0.1~10 THz(对应波长为 3 mm~30  $\mu\text{m}$ )范围内的电磁波,它介于毫米波与红外辐射之间,是宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,也是电子学向光子学的过渡区域<sup>[1]</sup>。太赫兹波在波谱中处于特殊位置,具有很多优越的特性,其在天文学、生物医学<sup>[2]</sup>、系统成像<sup>[3-4]</sup>、通信<sup>[5]</sup>、雷达、电子对抗、无损检测及安全检查<sup>[6]</sup>等方面有着重要的学术价值和广泛的应用前景。

太赫兹波的发生、检测、传输和应用是太赫兹技术的核心研究内容。其中,太赫兹波传输是太赫兹技术中的一个核心问题,也是近年来世界各国研究的重点和热点问题之一。太赫兹波传输大多采用自由空间传输技术,但受空气中水蒸气强烈吸收的影响,太赫兹波在自由空间中的传输不仅难以调控方向,而且吸收损

**收稿日期:** 2017-03-06; **收到修改稿日期:** 2017-04-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(11144007)、山东省自然科学基金(ZR2016AM27)

**作者简介:** 刘梦楠(1993—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤和太赫兹波方面的研究。

E-mail: mengnanliu93@126.com

**导师简介:** 万勇(1965—),男,博士,教授,主要从事光子晶体和电磁场方面的研究。

E-mail: wanyongqd@hotmail.com(通信联系人)

耗较大。因此,以波导为基础的太赫兹器件成为了太赫兹传输的重要基础之一,也是太赫兹波能够长距离传输的重要手段之一<sup>[7-8]</sup>。由此,各种类型的太赫兹波导应运而生,如太赫兹金属波导<sup>[9]</sup>、太赫兹介质/金属膜结构空芯波导<sup>[10]</sup>、太赫兹聚合物波导<sup>[11]</sup>、太赫兹光子晶体波导<sup>[12]</sup>、太赫兹光子晶体光纤(PCF)<sup>[13]</sup>、太赫兹蓝宝石光纤<sup>[14]</sup>等。基于 PCF 的太赫兹波导是太赫兹波的一种介质传输方式,具有柔性可弯曲、使用方便等优点。高双折射光纤能够保持光信号以线偏振态在光纤中传输,属于保偏光纤。PCF 因其灵活的设计和优良的光学性能,为高双折射光纤的设计和应用提供了新的可能。与传统保偏光纤相比,高双折射 PCF 具有设计自由度大、双折射值高、温度稳定性好、单模工作波长范围大、抗辐射能力强等优点,被广泛应用于光纤激光器、光纤传感器、偏振耦合器、偏振分束器、密集型波分复用器等方面<sup>[15]</sup>。太赫兹 PCF 在高双折射方面具有明显优势,近年来受到世界各地学者极大的关注。

本文在分析国内外相关文献的基础上,结合本课题组在 PCF 方面的研究工作,对高双折射太赫兹 PCF 的研究进展进行了分析、总结和展望。

## 2 几种新型的高双折射太赫兹 PCF

研究表明,各类太赫兹波导中,在低损耗和弯曲灵活性两方面较为突出的是聚合物太赫兹波导,其中太赫兹 PCF 在高双折射性能方面的优势尤为突出<sup>[11]</sup>。典型的 PCF 按导波机制可分为折射率引导型和光子带隙型两种;按包层空气孔的排布结构可分为三角形、正方形、矩形、六边形、圆形、环形等<sup>[16]</sup>;按结构可分为多孔型、实芯型、空芯型<sup>[17]</sup>等。

2006 年,Wang 等<sup>[18]</sup>提出了一种新型的高双折射聚乙烯矩形晶格 PCF,光纤截面如图 1 所示,其中  $\Delta_x$  为横向孔间距, $\Delta_y$  为纵向孔间距, $r_1$  为小孔半径, $r_2$  为大孔半径。该组研究人员采用时域有限差分(FDTD)法对其双折射和色散性能进行了理论分析,结果显示,由于在纤芯区域引入了两个大的圆形空气孔,该光纤相较于传统的矩形 PCF,可以获得更高的双折射(双折射率高达  $10^{-2}$  数量级),在太赫兹频段可以单模单偏振运行。

2008 年,Cho 等<sup>[19]</sup>成功制备了一种由高密度聚乙烯(HDPE)管和实心细丝制作而成的长度为 2 cm 的太赫兹保偏塑料实芯 PCF,其光学显微照片如图 2 所示。研究发现,该光纤具有较高的双折射率(约  $2.1 \times 10^{-2}$ ),比之前报道的 PCF 的高了一个数量级,但光纤中大部分导模能量处于实纤芯内,损耗较大,不适用于长距离传输。

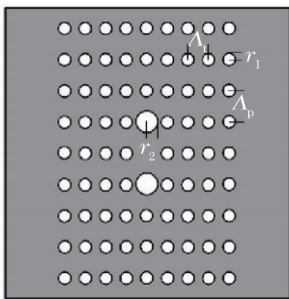


图 1 矩形晶格 PCF 的截面图<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Cross section of rectangular lattice PCF<sup>[18]</sup>

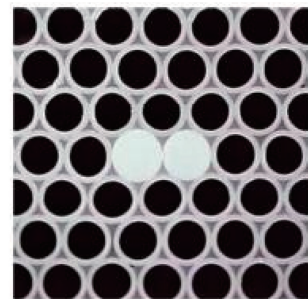


图 2 双折射塑料 PCF 的光学显微照片<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Optical micrograph of birefringent plastic PCF<sup>[19]</sup>

同年,Ren 等<sup>[20]</sup>为了减小材料的吸收损耗,提出了一种方晶格结构的高双折射光子带隙光纤,并对其进行了理论分析,所用材料为聚四氟乙烯(PTFE)。结果表明,方晶格结构光纤虽然有效地减少了材料对太赫兹波的吸收,且双折射率可达  $10^{-3}$  数量级,但是带宽较窄,因此其传输带宽在一定程度上受到限制。随后,科研人员相继提出并研究了矩形孔、椭圆孔、超晶胞结构的多孔高双折射光纤。

2008 年,Atakaramians 等<sup>[21]</sup>首次报道了向多孔型太赫兹光纤芯区引入非对称的亚波长空气孔的结果,理论分析表明该光纤可以获得高双折射(双折射率约为 0.026)。多孔结构光纤的截面如图 3 所示,其中圆形空气孔的孔隙度为 57%,纤芯直径为  $560 \mu\text{m}$ ;矩形空气孔的孔隙度为 57%,纤芯直径为  $570 \mu\text{m}$ ;槽形空气孔的孔隙度为 61%,纤芯直径为  $600 \mu\text{m}$ ,这为太赫兹区域的保偏光纤设计提供了一种新思路。

2009 年,Chen 等<sup>[22]</sup>提出了一种高双折射的挤压格子椭圆孔太赫兹光纤。研究表明,在较宽的太赫兹频

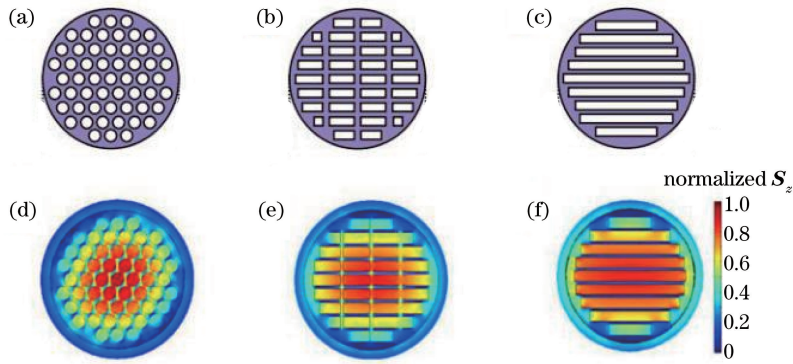


图3 (a)圆形、(b)矩形、(c)槽形空气孔的多孔光纤截面图；(d)圆形、(e)矩形、(f)槽形空气孔光纤的归一化坡印廷矢量  $z$  分量  $S_z$  二维图<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Cross-sectional diagrams of porous fibers with (a) circular, (b) rectangular and (c) slot-shaped air-holes; two dimensional views of normalized  $z$  component of Poynting vector  $S_z$  for fibers with (d) circular, (e) rectangular and (f) slot-shaped air-holes<sup>[21]</sup>

段内,该光纤的双折射率均达到了  $10^{-2}$  数量级,且由于部分功率分布于空气孔内,材料吸收所引起的损耗得到了有效降低。

2010年,Chen等<sup>[23]</sup>又提出了一种新型的基于超晶胞结构的高双折射太赫兹光纤,该光纤能够将制作过程中的结构形变最小化。主要讨论了两种典型的高双折射太赫兹光纤:在光纤芯区内分别引入钻石形和哑铃形单元,光纤截面图如图4所示。理论分析结果表明,其双折射率均达到了  $10^{-2}$  数量级,该类光纤为研究复杂横截面结构的太赫兹光纤提供了参考。

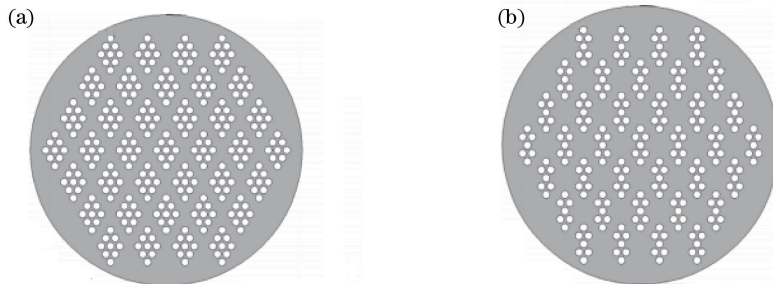


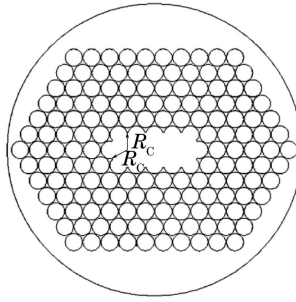
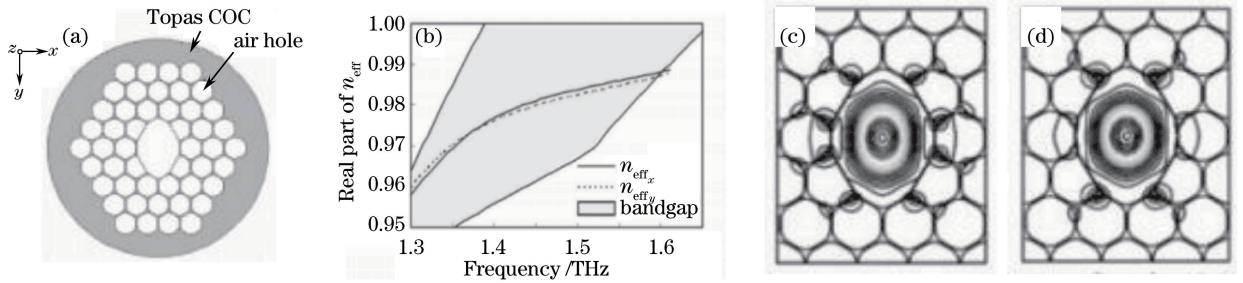
图4 两种太赫兹光纤的截面图。(a)钻石形单元；(b)哑铃形单元<sup>[23]</sup>

Fig. 4 Cross-sectional diagrams of two kinds of terahertz fibers. (a) Diamond-shaped cell; (b) dumbbell-shaped cell<sup>[23]</sup>

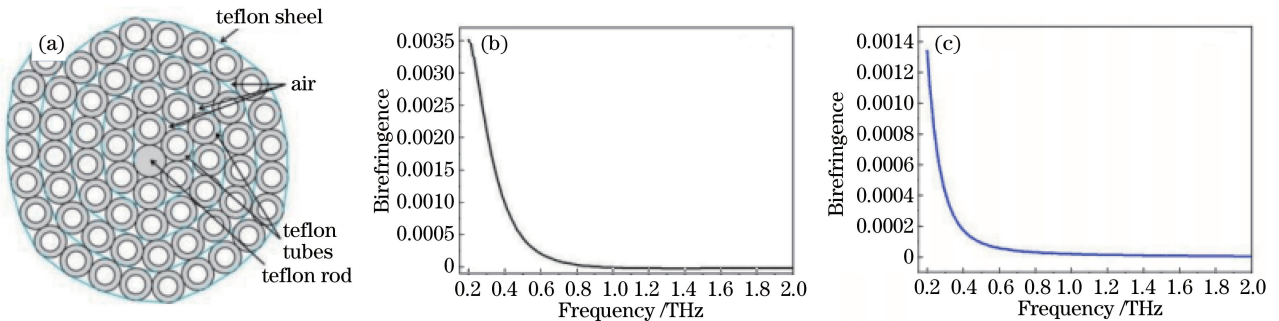
研究表明,不同结构的多孔高双折射光纤和实芯 PCF 的双折射率具有相同的数量级,但多孔高双折射光纤以空气作为包层,很容易受到外界干扰。

2011年,南开大学白晋军等<sup>[24]</sup>以高密度聚乙烯为基材,设计了一种低损耗、宽频段、高双折射率的太赫兹光子带隙光纤,端面如图5所示,其中  $R_c$  为类矩形纤芯的半径。类矩形纤芯去掉了中心16个空气孔,呈三角晶格排列的亚波长空气孔包层实现了带隙的局域作用,有效地降低了模式的吸收损耗。采用全矢量有限元法,对该光纤双折射及损耗特性进行了理论分析。结果表明,在0.3 THz频率处,光纤损耗小于  $0.009 \text{ cm}^{-1}$ ,相双折射率在  $10^{-3}$  数量级,群双折射率可达  $10^{-2}$  数量级,具有较低的模式吸收损耗,且该类光纤在保偏控制、滤波、生物传感等领域都有潜在的应用价值。

2014年,王豆豆等<sup>[8]</sup>以新型聚合物材料 Topas COC(环烯烃共聚物)为基质材料,设计了一种三角形晶格、近菱形空气芯的 Topas 带隙型 PCF。这种光纤具有结构简单、易制备、直径小、易弯曲的特点,其横截面如图6(a)所示,其中  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $n_{\text{eff}_x}$ 、 $n_{\text{eff}_y}$  分别为有效折射率在  $x$ 、 $y$  方向上的分量。采用有限元法,对该光纤在太赫兹波段的传输特性进行了理论研究,结果显示,在1.2~1.8 THz宽频范围内存在光子带隙,然而有限的包层空气孔圈数导致基模能量泄露,且  $x$  偏振基模的泄露最为明显。图6(b)~(d)所示分别为光纤的光子带隙结构、带隙范围内  $x$ 、 $y$  偏振基模的色散曲线以及模场分布。在1.4~1.6 THz范围内,两个偏振基模80%以上的能量在空气芯中传输,具有  $10^{-3}$  数量级的高双折射率。

图5 类矩形纤芯光子带隙光纤的端面示意图<sup>[24]</sup>Fig. 5 End-face diagram of quasi-rectangular fiber-core photonic band-gap fiber<sup>[24]</sup>图6 (a) PCF横截面;(b)光子带隙及基模色散曲线;1.5 THz时(c)  $x$ 偏振基模和(d)  $y$ 偏振基模的模场分布等高线图<sup>[8]</sup>Fig. 6 (a) Cross section of PCF; (b) photonic bandgap and dispersion curves of fundamental modes; contour maps of mode field distributions for (c)  $x$ -polarized fundamental mode and (d)  $y$ -polarized fundamental mode at 1.5 THz<sup>[8]</sup>

同年, Kim等<sup>[25]</sup>提出了一种采用卷取法制备的聚四氟乙烯高双折射太赫兹PCF,如图7所示,其中 $D_{out}$ 为外层直径, $D_{in}$ 为内层直径。用这种方法制作的PCF具有非对称模式分布的高双折射,双折射率达 $10^{-3}$ 。

图7 (a)卷曲法制备PCF的截面图;当PTFE棒和管参数(b)  $D_{out}=1\text{ mm}$ 、 $D_{in}=0.6\text{ mm}$ 和(c)  $D_{out}=2\text{ mm}$ 、 $D_{in}=1.2\text{ mm}$ 时光纤的双折射<sup>[25]</sup>Fig. 7 (a) Cross-sectional diagram of PCF fabricated by roll-up method; fiber birefringence when PTFE rod and tube parameters are (b)  $D_{out}=1\text{ mm}$ ,  $D_{in}=0.6\text{ mm}$ , and (c)  $D_{out}=2\text{ mm}$ ,  $D_{in}=1.2\text{ mm}$ <sup>[25]</sup>

2016年,蒋文丽等<sup>[26]</sup>提出了一种非对称三角晶格单偏振单模(SPSM)太赫兹PCF,截面如图8所示,该光纤具有高双折射、宽带宽及SPSM传输等特性。采用全矢量有限元法分析得出,在 $330\text{ }\mu\text{m}$ (0.91 THz)处光纤双折射率高达0.0365;在波长 $326.5\sim 359\text{ }\mu\text{m}$ 范围内能实现SPSM传输。

同年,Hasan等<sup>[27]</sup>设计了一种多孔螺旋结构的太赫兹PCF,截面如图9(a)所示。该光纤可使太赫兹波进行有效的保偏传输。采用有限元法并结合完美边界匹配层,对其导波特性和理论分析,结果表明,通过多孔纤芯中人为创造不对称性,可在1 THz处获得高达0.0483的超高双折射率。图9(b)所示为在不同直径下,1 THz处光纤双折射率随纤芯填充率的变化曲线。图9(c)所示为在不同直径下,纤芯填充率为0.24时光纤的双折射率随频率的变化曲线。通过优化参数,还可以得到宽带、较为平坦的色散、较低的材料吸收损耗和较小的限制损耗。

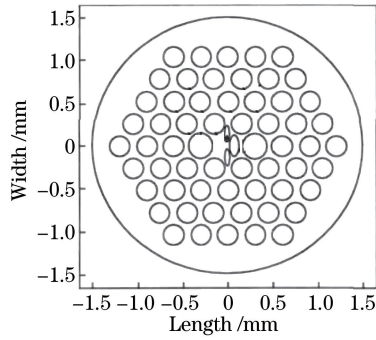
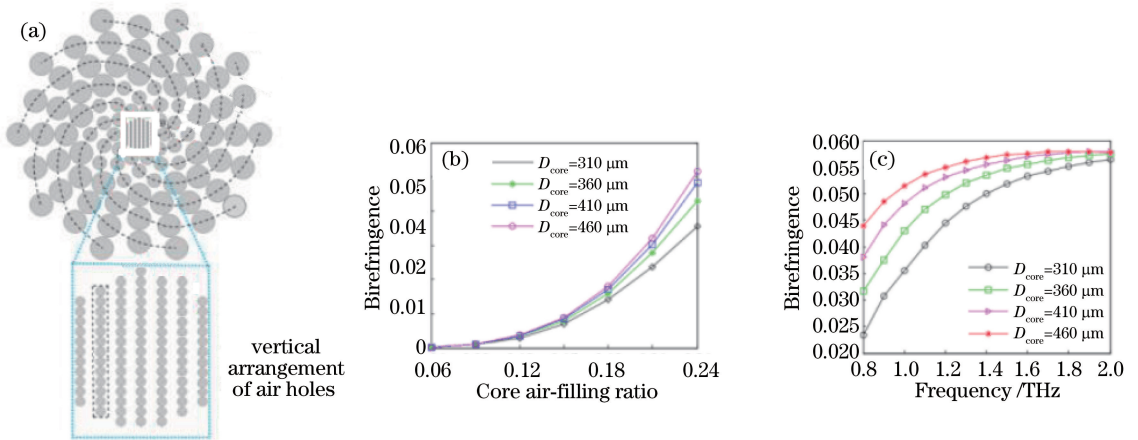
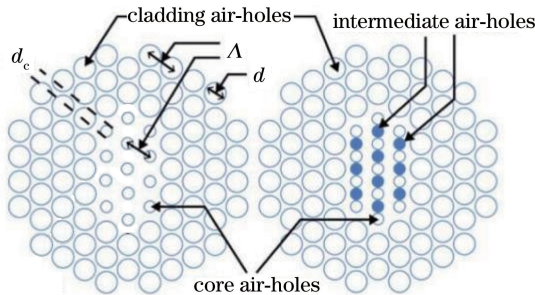
图 8 SPSM 太赫兹 PCF 横截面示意图<sup>[26]</sup>Fig. 8 Schematic of SPSM terahertz PCF cross section<sup>[26]</sup>

图 9 (a)以 TOPAS 为基材的多孔纤芯螺旋太赫兹光纤横截面图(插图为多孔芯的放大视图);(b)在 1 THz 处不同纤芯直径的 PCF 双折射率随纤芯填充率的变化曲线;(c)当纤芯填充率为 0.24 时,不同直径的 PCF 双折射率随频率的变化曲线<sup>[27]</sup>

Fig. 9 (a) Cross-sectional view of porous-core spiral terahertz fiber with TOPAS as base material (inset: enlarged view of porous core); (b) birefringence of PCF versus core air-filling ratio for different core diameters at 1 THz; (c) birefringence of PCF versus frequency for different diameters when core air-filling ratio is 0.24<sup>[27]</sup>

2016 年, Islam 等<sup>[28]</sup>提出了一种新型的多孔 PCF, 如图 10 所示, 其中  $\Lambda$  为孔间距,  $d$  为包层空气孔直径,  $d_c$  为纤芯空气孔直径, 蓝色的实心圆圈表示中间空气孔。该光纤可有效保持太赫兹波在传输系统中的偏振状态。研究人员通过在多孔纤芯和多孔包层内同时引入非对称性结构来获得超高双折射。有限元法数值模拟结果表明, 在 1 THz 处, 光纤双折射率高达 0.045, 有效吸收损耗为  $0.08 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 10 PCF 结构对称性破坏的原理图。(a)包层;(b)包层和纤芯<sup>[28]</sup>Fig. 10 Schematic of PCF structure with symmetry breaking. (a) Cladding; (b) cladding and core<sup>[28]</sup>

将基于不同原理、不同结构的高双折射太赫兹 PCF 进行对比, 结果见表 1。研究发现, 虽然实芯结构和多孔结构的太赫兹 PCF 可以实现超高的相双折射率( $10^{-2}$  数量级), 但实芯光纤材料的吸收损耗非常大; 多孔光纤的损耗比实芯光纤的小一个数量级, 但多孔光纤以空气作为包层, 易受外界干扰; 光子带隙型光纤的

相双折射率都在  $10^{-3}$  数量级, 损耗较低。因此, 设计新型结构, 并采用新型材料和技术制备高双折射的太赫兹 PCF 迫在眉睫。在结构设计优化方面, 可以尝试设计一种新型的高双折射太赫兹 PCF, 通过引入石墨烯包层结构和高折射率椭圆纤芯, 以有效保持太赫兹波在传输过程中的偏振状态。其中, 基底可采用 Topas COC 或硅, 包层选用圆形或椭圆形空气孔, 并基于石墨烯结构有序排列; 椭圆纤芯的设计能使两轴向线偏振光传输时产生相位差, 以获取更高的双折射。在材料选用方面, PTFE、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚乙烯 (PE)、聚甲基戊烯 (TPX)、聚碳酸酯 (PC)、Topas COC 等高分子化合物材料具有高度透明、色散小、损耗低、柔韧性和光滑性好等优点, 且成本低、制作技术成熟, 是一种非常理想的选择。另外, 在制备技术方面, 可以尝试采用静电纺丝等新技术制备太赫兹 PCF。

表 1 不同高双折射太赫兹 PCF 的比较

Table 1 Comparison among different high birefringence terahertz PCFs

Fiber structure	Structural parameter	Birefringence
Solid core PCF <sup>[19]</sup>	Lattice constant is $500 \mu\text{m}$ , tube thickness is $50 \mu\text{m}$ , air filling factor is 0.673	about $2.1 \times 10^{-2}$
PCF with square-lattice structure <sup>[20]</sup>	Refractive index of PTFE is 1.445, effective refractive index of PTFE is 1	about $10^{-3}$
PCF with triangular-lattice structure and rectangular fiber core <sup>[24]</sup>	Lattice period is $292 \mu\text{m}$ , filling ratio is 0.96, refractive index of air is 1, refractive index of HDPE is 1.534	about $10^{-3}$
Topas bandgap PCF <sup>[8]</sup>	Distance between two adjacent holes is $400 \mu\text{m}$ , duty cycle is 0.96, relative thickness of dielectric ring is 0.5	about $10^{-3}$
Supercell porous PCF <sup>[23]</sup>	Fiber diameter is $440 \mu\text{m}$ ; lattice spacing is $60 \mu\text{m}$ ; distance between two adjacent holes is $15 \mu\text{m}$ ; diamond-shaped cell: diameter of air hole is $12 \mu\text{m}$ ; dumbbell-shaped cell: diameter of air hole is $13.6 \mu\text{m}$	about $10^{-2}$
Asymmetric triangular-lattice SPSM-PCF <sup>[27]</sup>	Distance between two adjacent holes is $300 \mu\text{m}$ , diameter of cladding air hole is $230 \mu\text{m}$ , diameter of air holes near fiber core is $296 \mu\text{m}$ , ellipticity of large elliptical air hole is 2.59, ellipticity of small elliptical air hole is 4, refractive index of air is 1.0, refractive index of Topas is 1.53	about $3.65 \times 10^{-2}$

另外, 值得说明的是, 上述研究中多数结果都只是光纤的理论模拟分析结果, 只有文献[19]、[25]不仅对光纤进行了理论模拟分析, 也成功进行了制备和测试。

### 3 高双折射太赫兹 PCF 的应用

太赫兹 PCF 的制备工艺成熟, 成本较低, 且具有良好的高双折射及保偏等特性, 在保偏控制、滤波、生物传感、偏振分束器等领域有潜在的应用价值。

2013 年, 姜子伟等<sup>[29]</sup>设计了一种太赫兹菱形双空芯光纤定向耦合器, 在  $1.55 \sim 1.80 \text{ THz}$  范围内其耦合长度小于  $1.8 \text{ cm}$ , 能够实现该范围内的窄带耦合, 且损耗系数低于  $0.02 \text{ cm}^{-1}$ 。定向耦合器在太赫兹通信系统滤波、波分复用、偏振分离和开关等技术中有潜在的应用价值。

2014 年, 南开大学的李珊珊等<sup>[30]</sup>采用普通三角晶格多孔光纤, 通过隔行填充破坏其对称性, 利用两根纤芯微结构具有正交关系的填充式多孔光纤, 实现了  $0.8 \sim 2.5 \text{ THz}$  频率范围内的偏振分离功能。

南京邮电大学的王梦艳等<sup>[31]</sup>在设计低损耗太赫兹 PCF 的基础上, 利用光学设计软件 Zemax, 设计了一种焦距为  $24.80 \text{ mm}$ 、厚度为  $2.00 \text{ mm}$ 、有效孔径为  $6.25 \text{ mm}$  的环烯烃共聚物 Topas COC 太赫兹单透镜, 该透镜能有效增强太赫兹光束与波导的耦合, 耦合效率可达  $75.01\%$ 。

太赫兹 PCF 应用的相关工作还有很多。2010 年, 张良<sup>[32]</sup>研究了太赫兹 PCF 和太赫兹多孔光纤中两种太赫兹波导倏逝波传感的特性。2013 年, Zhang 等<sup>[33]</sup>设计了一种包层有四个非圆形大孔洞的新型 PCF 气体传感器, 可用于太赫兹波频段的倏逝波传感。南开大学的侯宇等<sup>[34]</sup>应用折射率匹配耦合法, 研究了一种

基于空芯 PCF 结构的太赫兹可调谐偏振分离器,该器件可以将太赫兹波的传输很好地限制在两个空气纤芯中,能够有效降低基底材料对太赫兹波的吸收,其在太赫兹通信和偏振传感系统中有重要的应用价值。

## 4 结束语

近年来,利用 PCF 传输太赫兹波已经成为太赫兹传输领域的研究热点,学者们研究的目的是实现太赫兹波低损耗、低色散、宽频范围内的单模传输,同时要求波导具有灵活的弯曲性能。相较于太赫兹聚合物波导,太赫兹 PCF 在高双折射方面具有明显优势。高双折射太赫兹 PCF 进一步的研究可集中在结构设计优化、新型材料的研发、制备技术的研究及通信、传感应用等方向。

## 参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Pickwell E, Wallace V P. Topical review: Biomedical applications of terahertz technology[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(17): 301-310.
- [3] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [4] Zhao J, Chu W, Guo L, *et al.* Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air[J]. *Scientific Reports*, 2013, 4(1): 3880.
- [5] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.
- [6] Shen Y C, Lo T, Taday P F, *et al.* Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24): 377.
- [7] Zhong Renbin, Zhou Jun, Liu Shenggang. Research progress of terahertz waveguide[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(2): 247-251.  
钟任斌, 周俊, 刘盛纲. 太赫兹波导的研究进展[J]. *电子科技大学学报*, 2012, 41(2): 247-251.
- [8] Wang Doudou, Wang Lili, Zhang Tao, *et al.* Low loss and high birefringence terahertz Topas photonic bandgap fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0606002.  
王豆豆, 王丽莉, 张涛, 等. 低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤[J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 0606002.
- [9] Wang K, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 376-379.
- [10] Li Yiqing, Tan Zhiyong, Cao Juncheng. Fabrication and characterization of terahertz waveguide with large diameter flexible dielectric film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0106003.  
李怡卿, 谭智勇, 曹俊诚. 大口径柔性介质金属膜太赫兹波导的制作与特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0106003.
- [11] Hochberg M, Baehrjones T, Wang G, *et al.* Terahertz all-optical modulation in a silicon-polymer hybrid system[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(9): 703-709.
- [12] Bingham A L, Grischkowsky D. Terahertz two-dimensional high-Q photonic crystal waveguide cavities[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 348-350.
- [13] 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.
- [14] Jamison S P, McGowan R W, Grischkowsky D. Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulses in sapphire fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(15): 1987-1989.
- [15] Hao Rui. Structural design and characteristics of high birefringence photonic crystal fiber[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013: 10-14.  
郝锐. 高双折射光子晶体光纤的结构设计与特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013: 10-14.
- [16] Zhang Ning, Yang Yi, Lou Meizhen. Dispersion characteristics of plastic photonic crystal fiber with hexagonal hole in the cladding air hole[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology*, 2009, 17(3): 34-38.  
张宁, 杨一, 娄美真. 包层空气孔为正六边形的塑料光子晶体光纤色散特性分析[J]. *北京石油化工学院学报*, 2009, 17(3): 34-38.
- [17] Cerqueira S A, Jr. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2010, 73(2): 024401.

- [18] Wang L, Yang D, Chen Y, *et al.* Single-polarization single-mode photonic crystal fiber for Terahertz applications[C]. Joint International Conference on Infrared Millimeter Waves and Terahertz Electronics, 2006.
- [19] Cho M, Kim J, Park H, *et al.* Highly birefringent terahertz polarization maintaining plastic photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2008, 16(1): 7-12.
- [20] Ren G, Gong Y, Shum P, *et al.* Low-loss air-core polarization maintaining terahertz fiber[J]. Optics Express, 2008, 16(18): 13593-13598.
- [21] Atakaramians S, Shanraam A V, Fischer B M, *et al.* Low loss, low dispersion and highly birefringent terahertz porous fibers[J]. Optics Communications, 2008, 282(1): 36-38.
- [22] Chen H, Chen D, Hong Z. Squeezed lattice elliptical-hole terahertz fiber with high birefringence[J]. Applied Optics, 2009, 48(20): 3943-3947.
- [23] Chen D, Tam H Y. Highly birefringent terahertz fibers based on super-cell structure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(12): 1858-1863.
- [24] Bai Jinjun, Wang Changhui, Huo Bingzhong, *et al.* Low loss broadband high birefringence terahertz photonic bandgap fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 1-4.  
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): 1-4.
- [25] Kim S, Lee Y S, Kee C-S, *et al.* Dispersion flattened terahertz photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss[C]. SPIE, 2014, 8985: 89851L.
- [26] Jiang Wenli, Zheng Yi. Design of high birefringence single-mode single polarization terahertz photonic crystal fiber[J]. Study on Optical Communications, 2016, 1: 22-25.  
蒋文丽, 郑义. 高双折射单模单偏振太赫兹光子晶体光纤设计[J]. 光通信研究, 2016, 1: 22-25.
- [27] Hasan M R, Anower M S, Islam M A, *et al.* Polarization-maintaining low-loss porous-core spiral photonic crystal fiber for terahertz wave guidance[J]. Applied Optics, 2016, 55(15): 4145-4152.
- [28] Islam R, Selim H M, Hasanuzzaman G K, *et al.* Novel porous fiber based on dual-asymmetry for low-loss polarization maintaining THz wave guidance[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 440-443.
- [29] Jiang Ziwei, Bai Jinjun, Hou Yu, *et al.* Terahertz double hollow fiber directional coupler[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 028702.  
姜子伟, 白晋军, 侯宇, 等. 太赫兹双空芯光纤定向耦合器[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 028702.
- [30] Li Shanshan, Chang Shengjiang, Zhang Hao, *et al.* Terahertz polarization separator based on filled porous optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0723003.  
李珊珊, 常胜江, 张昊, 等. 基于填充式多孔光纤的太赫兹偏振分离器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0723003.
- [31] Wang Mengyan, Shi Weihua, Gu Da. Study on single lens coupling of terahertz wave and photonic crystal fiber[J]. Study on Optical Communications, 2014, 185: 52-54.  
王梦艳, 施伟华, 顾达. 太赫兹波与光子晶体光纤的单透镜耦合研究[J]. 光通信研究, 2014, 185: 52-54.
- [32] Zhang Liang. Study on the characteristics of evanescent wave sensing of photonic crystal fiber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 52-59.  
张良. 光子晶体光纤倏逝波传感的特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 52-59.
- [33] Zhang L, Ren G J, Yao J Q. A new photonic crystal fiber gas sensor based on evanescent wave in terahertz wave band: Design and simulation[J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(6): 438-440.
- [34] Hou Yu. Design and research of terahertz optical fiber devices[D]. Tianjin: Nankai University, 2013: 91-100.  
侯宇. 太赫兹光纤功能器件的设计与研究[D]. 天津: 南开大学, 2013: 91-100.