

文章编号: 2095-4980(2024)06-0581-13

太赫兹波导研究进展

韩冰冰^{1,2}, 穆启元^{1,2}, 邵伟³, 曾庆龄^{1,2}, 朱忠博³, 袁苑^{*1}, 孔德鹏^{*1}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要: 太赫兹技术在下一代通信、生物成像、质量监测等领域应用潜力巨大, 高品质太赫兹波导的研制使轻量化、小型化太赫兹系统成为可能, 是推动太赫兹技术发展的关键。本文根据不同基材, 将太赫兹波导分为金属波导、聚合物波导及复合波导, 对其发展情况进行梳理, 并对太赫兹聚合物波导这种高柔性、低成本导波技术进行重点介绍, 讨论其不同的导光机制; 最后对太赫兹导波技术进行了总结, 并针对制约太赫兹波导商品化推广应用的瓶颈问题进行了初步探讨。

关键词: 太赫兹; 传输; 金属波导; 聚合物波导; 复合波导

中图分类号: TN814

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024108

Research progress of terahertz waveguide

HAN Bingbing^{1,2}, MU Qiyuan^{1,2}, SHAO Wei³, ZENG Qingling^{1,2}, ZHU Zhongbo³,
YUAN Yuan^{*1}, KONG Depeng^{*1}

(1.State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Shaanxi 710119, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3.National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave Technology, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Terahertz (THz) technology has great potential in the next generation communication, biological imaging, quality monitoring and other fields, and the development of high-quality terahertz waveguides makes it possible to create lightweight and miniaturized terahertz systems, which is vital to promote the development of terahertz technology. In this paper, terahertz waveguides are divided into metal waveguides, polymer waveguides and composite waveguides according to different materials. Terahertz polymer waveguides with high flexibility and low cost are emphatically introduced, and different guiding mechanisms are discussed. Finally, the technology of guiding terahertz wave is summarized, and the bottleneck problem restricting the commercial application of terahertz waveguide is preliminarily discussed.

Keywords: terahertz; transmission; metal waveguide; polymer waveguide; composite waveguide

太赫兹 (THz) 波通常指频率为 0.1~10 THz, 相应波长为 3 mm~30 μm , 介于毫米波与红外光之间的电磁波。THz 波在电磁波谱中占有特殊位置, 处于电子学向光子学的过渡区域。THz 技术在超快过程探测、物体成像、医疗诊断、宽带通信等领域具有广阔的应用前景, 被多个国家列为战略性发展技术之一。美国政府将 THz 技术评为“改变未来世界的十大技术”之一, 日本将其列为“国家支柱十大重点战略目标”之首, 欧盟以及中国等将 THz 通信列入第六代移动通信技术 (the 6th Generation Mobile Communication Technology, 6G) 研究计划。

近年来, 太赫兹发射源、探测器技术得到了快速发展, 相关的应用研究也在多个领域中持续推进。在 THz 技术的应用和推广中, THz 波的传输是非常重要的一个环节。与传统电磁波的传输方式一样, THz 波的传输也分为自由空间传输和波导有线传输 2 种, 但 THz 波的自由空间传输存在波束较发散、水汽吸收大等问题, 早在

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071465; 12204530); 空间微波技术国家重点实验室稳定支持基金资助项目 (HTKJ2022KL504001); 中国科学院“西部之光”资助项目(XAB2021YN11); 陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-111)

*通信作者: 袁苑 email:yuanyuan2015@opt.ac.cn; 孔德鹏 email:kongdp@opt.ac.cn

2010年,姚建铨院士就指出THz通信技术的发展急需可以传播THz波的波导^[1]。THz波的波导有线传输在6G局域有线通信、片上集成、设备互联等领域都有迫切的应用需求^[2-10],引起了国内外研究人员的极大重视。研制高品质的THz波导及其器件具有重要的科学意义和实用价值,伴随着THz技术的发展,世界各地的学者们一直在探索高效、柔性、廉价、轻质的THz波导技术。目前看,THz波导按基材主要分为金属波导、聚合物波导、复合波导3种,其中,THz复合波导至少包含金属和聚合物2种材料,并结合结构设计实现THz波的约束和传输。本文对THz波导的研究历程及最新进展进行综述。

1 THz 金属波导

1.1 空芯金属波导

THz波在金属表面的反射率很高,因此空芯金属波导常用全内反射原理来引导THz波。1999年,美国俄克拉荷马州立大学Grischkowsky课题组的McGowan等^[11]首次在实验中将THz波耦合进直径为240 μm 的圆形金属空芯波导中。实验装置如图1所示,由光电发射器、接收器和光学器件组成。聚焦的THz光束被耦合至圆形空芯波导,并通过波导传播至第二硅透镜再次进行耦合并测量,在0.8~3.5 THz范围内,总能量吸收系数低于 0.7 cm^{-1} (即304.01 dB/m),波导总长度仅24 mm,但传输损耗较大。2000年,该课题组的Gallot等^[12]继续对THz空芯圆形金属波导和矩形金属波导进行研究,其中圆形波导的直径仍为240 μm ,长24 mm;矩形波导长为25 mm,横截面为 $125 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$,金属材料为不锈钢。他们对2种波导的损耗性质及工作模式进行了深入分析,结果见图2,图2(a)和图2(b)分别为圆形波导和矩形波导内电磁波模的场分布。实验入射光为线性极化THz脉冲,实验结果表明,对于圆形金属波导,仅耦合进 TE_{11} 、 TE_{12} 和 TM_{11} 3种模式;对于矩形金属波导,仅耦合进 TE_{10} 和 TM_{12} 两种模式。

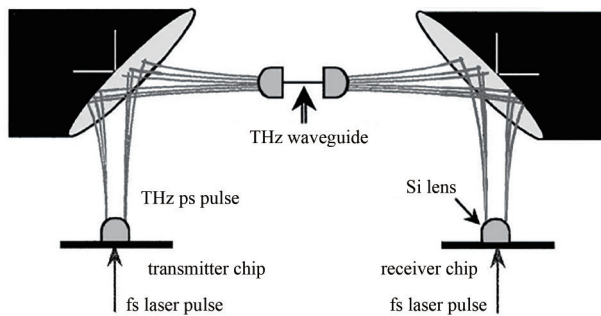


Fig.1 Schematic diagram of the optoelectronic THz-time-domain spectroscopy system

图1 光电太赫兹时域光谱系统示意图

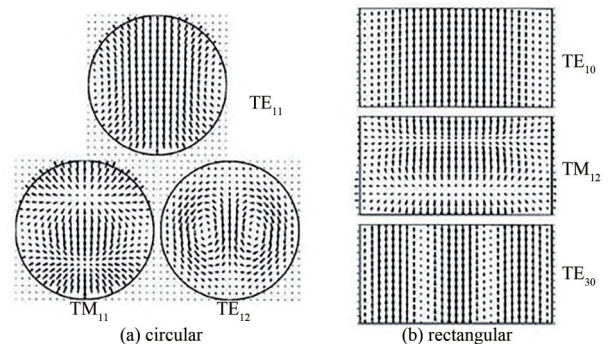


Fig.2 Field distribution of metal waveguide transmission mode

图2 金属波导传输模式场分布

虽然空芯波导在传输时能有效地将光束限制在波导内,但由全内反射引起的金属对THz波的吸收较大,金属空芯波导的损耗较高。为解决这一问题,美国罗格斯大学的Harrington等^[13]于2004年用液相化学沉积法制备了一种介质-涂层空芯波导,其中介质管是直径为3 mm的聚碳酸酯,金属涂层为铜膜,厚度为0.5~0.7 μm 。实验表明,这种带有金属涂层的空芯波导具有极低的损耗,在1.89 THz处,损耗仅为 0.009 cm^{-1} ,即3.9087 dB/m,比金属波导低了2个数量级。2019年,复旦大学石艺尉课题组^[14]通过在聚碳酸酯管内部镀金属膜和介质膜,制作了微波G波段和4.3 THz处的介质金属膜波导,并通过实验证明,在G波段,波导损耗随着介质膜的增加而增大;4.3 THz处波导损耗随着波导弯曲角度的增大而增加,其4.3 THz处直波导损耗约为 0.025 cm^{-1} ,即10.857 5 dB/m。2021年,该课题组对介质-金属波导结构在G波段的传输特性进行了仿真^[15],分析了介质层厚度对传输损耗、色散和耦合效率的影响。仿真结果表明,在G波段,介质-金属结构中波导是多模传输的,对于波导的基模,介质层无法降低其损耗;对于波导的高次模,最优介质层厚度与波导空气芯大小有关。但由于镀膜涂层要求一定的均匀性,这种波导的直径不能过小,且长度不能过长,不利于实际应用。

1.2 金属丝波导

在THz波传输技术领域内,金属丝波导是一种兼具低损耗、低色散等优点的重要波导。2004年,美国莱斯大学的WANG等^[16]为解决THz波无法远距离传输问题,提出了裸金属线波导。实验显示,所用金属丝直径为0.9 mm时,其损耗低至 0.03 cm^{-1} ,即13.029 dB/m。2005年,他们在此基础上构建出一个简单的Y型分束器^[17],波导结构和实验结果见图3。

2005年,美国俄克拉荷马州立大学 Grischkowsky 课题组的 Tae-In Jeon 等^[18]进行了 THz 波在单根铜线上传播的实验和理论研究,证明了金属表面波为索末菲波。2006年,中科院上海光机所 He^[19]等展开了类似研究,在索末菲模型的基础上,证明金属线波导传输 THz 波时具有低损耗和低色散特性,原因为在该频段金属具有高介电常数。

1.3 金属平行板波导

2001年,美国俄克拉荷马州立大学 Grischkowsky 课题组的 Mendis 等^[20]提出了 THz 金属平行板波导 (Parallel Plate Waveguide, PPWG)。实验中,平行板间隙为 108 μm ,平行板厚度为 12~24 mm,平行板长度为 24.4 mm,在 0.1~4 THz 范围内实现小于 0.3 cm^{-1} ,即 130.29 dB/m 的低损耗传输。这种 PPWG 支持单一横电磁 (Transverse Electromagnetic, TEM) 模式的传输,迅速引起了关注。对于板间距为 100 mm 的平行平板铜波导,0.5 THz 时的吸收损耗约为 0.06 cm^{-1} ,即 26.058 dB/m,与频率的平方根成正比,与板间距成反比。由于 TEM 模式没有截止频率,PPWG 的群速度和相速度几乎均等于光速,群速度色散也很小,传输几乎不失真,但由于其半封闭结构,传输能量会从板间空隙泄露,不利于长距离传输,且其损耗与 THz 中空型金属波导相比,并无明显优势。

2 THz 聚合物波导

聚合物材料在 THz 波段具有比金属和玻璃更好的透明特性,如环烯烃共聚物 (Cyclic Olefin Copolymer, Topas/COC)、环烯烃聚合物 (Cyclo Olefin Polymer, Zeonex/COP)、聚四氟乙烯 (Poly Tetra Fluoroethylene, Teflon/PTFE)、聚乙烯 (Polyethylene, PE)、聚丙烯 (Polypropylene, PP) 等^[21],因而成为 THz 波导的首选基材。THz 聚合物波导是指基材为聚合物,用于传输 THz 波的波导。常见的 THz 聚合物波导根据传输机理的不同,大致分为折射率引导 (Index-guiding, IG) 型、光子带隙 (Photonic Bandgap, PBG) 型、反谐振 (Anti-Resonance, AR) 型以及其他基于单一传导机理的 THz 聚合物波导,如拓扑通道效应^[22]。此外,还有基于多种机理共同作用的 THz 聚合物波导。

2.1 IG 型 THz 聚合物波导

IG 型 THz 波导是指纤芯的有效折射率高于包层的 THz 波导,THz 波能以全内反射形式在纤芯内部传输。与传统通信波导/光纤不同,IG 型 THz 波导可由一种或多种聚合物材料构成,其纤芯或包层中往往存在一些空气孔,形成微结构,但始终会保持纤芯的有效折射率最高,因此也称为改进型全内反射 THz 波导。聚合物制成的实芯丝是一种非常简单的 IG 型 THz 波导,2006年,台湾大学的 CHEN 等^[23]用一根直径为 200 μm 的 PE 丝实现了 THz 波的传输。这种波导以高折射率的聚合物材料为纤芯,其周围的空气作为包层形成全内反射条件,可引导 THz 波在聚合物纤芯中传输。此类型波导的纤芯尺寸可降至亚波长级别,减少纤芯聚合物材料对 THz 波的吸收,达到降低传输损耗的目的。波导在 0.3 THz 处的损耗低至 4.3 dB/m,但这种波导需悬浮使用,否则极易破坏其全内反射条件,增加波导传输损耗。此外,较大的耦合损耗也进一步限制了其应用。

在纤芯外包覆一层较低折射率的聚合物,如泡沫作为包层^[24],形成与传统通信光纤相似的结构,可有效解决波导不可接触的问题,并降低耦合损耗。加拿大蒙特利尔理工学院 Maksim 课题组提出如图 4(a) 所示的波导,但额外引入的聚合物材料不可避免地增加了波导的传输损耗。由于干燥空气对 THz 波的吸收低至可以忽略,因此在包层中引入一些空气孔缺陷,可有效降低波导包层的材料占比,从而降低其传输损耗。这种类型的波导多由一种聚合物材料制成,纤芯为实芯,周围分布的空气孔和聚合物共同组成包层,最外层则为波导的保护层,这种带有空气孔缺陷的波导也称微结构波导。由于 THz 波主要在纤芯中传输,增加包层中空气的占空比,可有效降低损耗,同时减少 THz 波的泄露^[25-26]。图 4(b) 中,Zeonex 实芯微结构波导在 0.4 THz 附近的最低损耗约为 43 dB/m,图 4(c) 和图 4(d) 中的 Topas 实芯微结构波导在 0.6 THz 处损耗小于 10 dB/m。

若要进一步降低波导的损耗,同时调控其色散或双折射,可在纤芯中加入亚波长尺度的空气孔,形成多孔

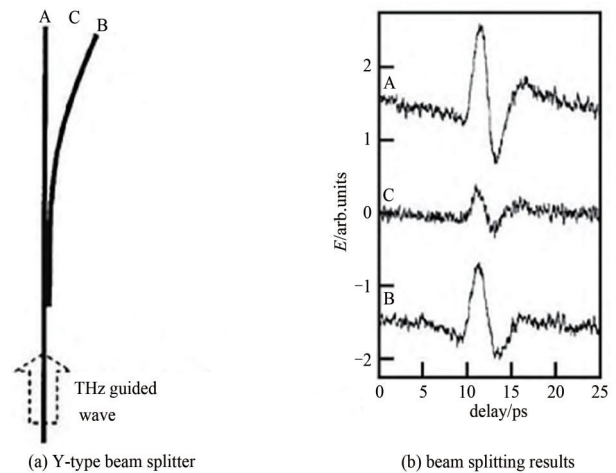


Fig.3 Y-type beam splitter and beam splitting results based on bare metal wires

图3 基于裸金属线的Y型分束器及分束结果

芯的聚合物 THz 波导^[27-29]。中科院西安光机所孔德鹏课题组 2019 年提出了如图 4(e)所示的 Zeonex 波导^[27]，将纤芯中的空气孔大小按梯度分布，使其在具备低损耗的同时实现 $(0.015 \pm 0.0004) \text{ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$ 的近零色散；2022 年，该课题组将 IG 型 THz 波导的纤芯制成多孔芯，降低损耗，如图 4(f)所示，基材为 Zeonex，该波导在 0.3 THz 处最低损耗为 7.8 dB/m^[28]。2022 年，Hanig 等^[29]提出了图 4(g)中的多孔芯波导，通过打破其结构对称性，增加 x 和 y 两个偏振方向的模式有效折射率差，产生高达 0.123 的双折射，实现波导的保偏功能。

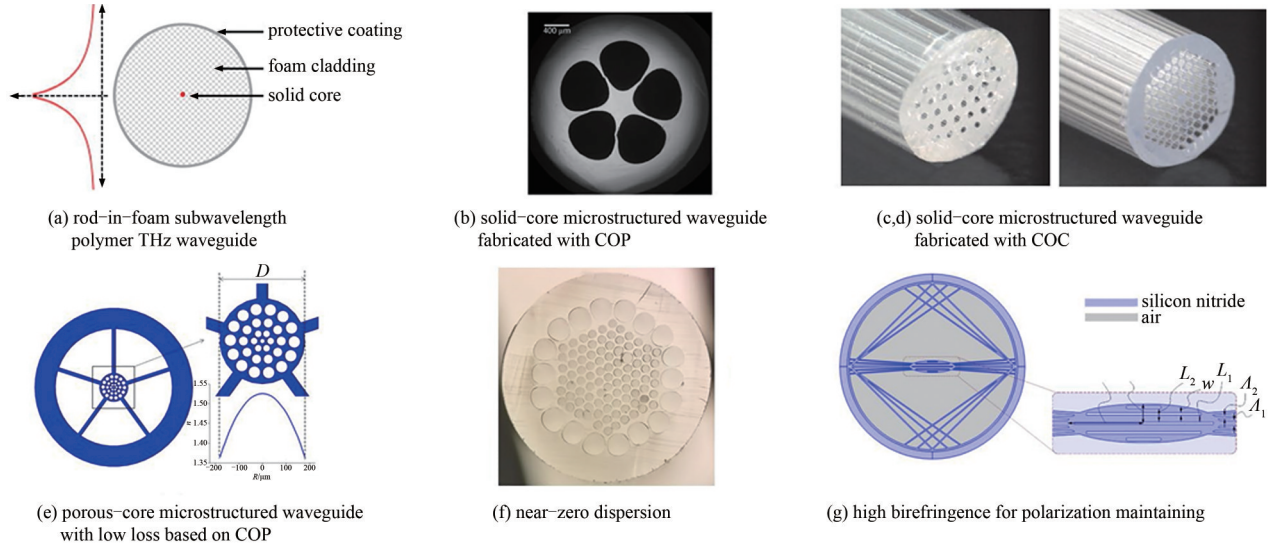


Fig.4 IG THz polymer waveguide

图4 IG型THz聚合物波导

除了单纯用于 THz 波传输的 IG 型聚合物波导，近年来出现了用于传输一种特殊 THz 结构光场——THz 轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 光束的 IG 型波导^[30-33]。OAM 光束又称为涡旋光束，用于传输该光束的波导被称为“涡旋波导”。目前 THz 涡旋波导的设计重点在于提高 OAM 模式数量、扩宽工作频带。2017 年，美国南卫理公会大学的 Aflakian N 等提出了一种基材为 COC 的波导结构，如图 5(a)所示，该波导可在 0.2~0.3 THz 传输 2 个 OAM 模式^[30]。2020 年，马瓦纳巴沙尼科技大学的 Kabir 等提出了基材为玻璃的波导结构，如图 5(b)所示，可在 0.2~0.55 THz 传输 58 个 OAM 模式，但由于其基材在 THz 频段的高吸收，波导综合性能并不好^[31]。2022 年，中科院西安光机所孔德鹏课题组提出了一种包层为气孔阵列的环芯波导结构，如图 5(c)所示，基材为 COC，工作频段宽至 0.6~1.25 THz，OAM 模式数量高达 66 个^[32]；2023 年，该课题组将多环芯引入波导设计，提出一种多环芯 IG 型 THz 涡旋波导结构，如图 5(d)所示，进一步将 OAM 模式数量提升至 178 个@0.7~1.5 THz^[33]。

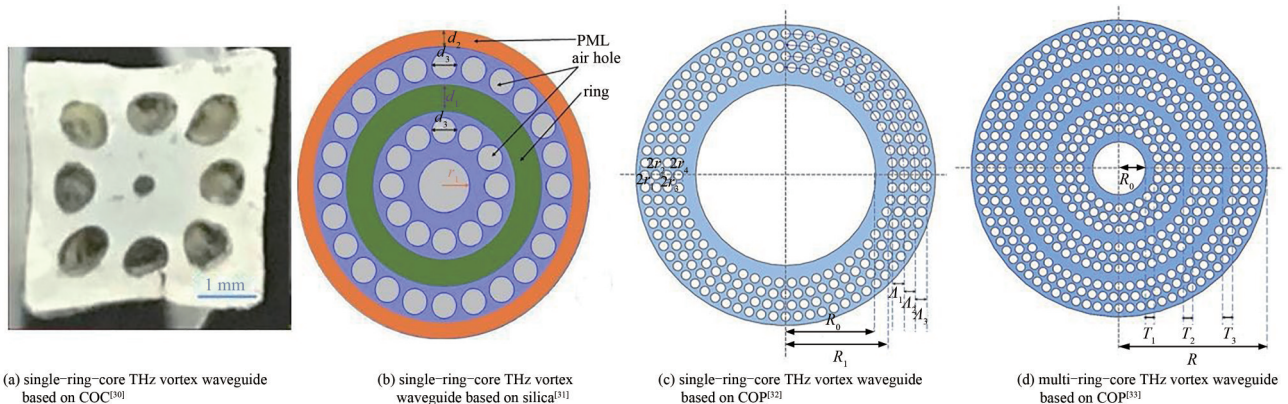


Fig.5 THz vortex waveguide

图5 太赫兹涡旋波导

2.2 光子带隙型 THz 聚合物波导

不同于折射率引导型 THz 聚合物波导，PBG 型 THz 聚合物波导的纤芯有效折射率低于包层有效折射率。通过结构设计在波导中形成 PBG，阻止电磁波的横向传输；并通过在中心引入缺陷形成纤芯，将光限制在纤芯中纵向传输，因此又被称为带隙引导型 THz 聚合物波导^[34]。带隙引导型波导按照结构的不同又可以分为两种(如图

6 所示): a) Bragg 带隙引导型波导。包层由不同材料折射率的同心圆环交替构成, 纤芯为空气; b) 空芯(Hollow Core, HC)/多孔芯(Porous Core, PC)带隙引导型波导。其包层由周期排列的微气孔构成, 纤芯为空芯或多孔芯。本文主要就 THz 频段的空芯带隙引导型(HC-PBG)及多孔芯带隙引导型(PC-PBG)波导进行综述, 如表 1 所示。

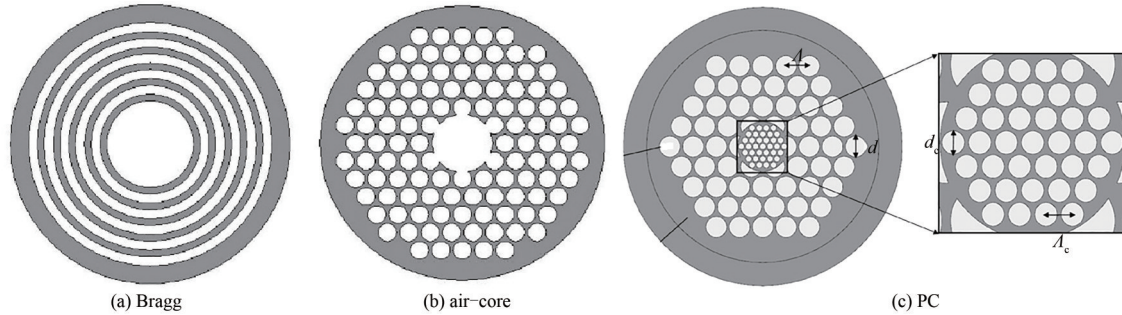


Fig.6 Typical PBG waveguide

图 6 典型带隙引导型波导

表 1 带隙引导型太赫兹聚合物波导

Table 1 PBG polymer waveguide in THz range

type	cross-section	core diameter /mm	material	bandwidth /THz	loss/(dB·m ⁻¹)	experiment or simulation	comments	publication year
Hollow Core		0.67	PMMA	—	90@1.3 THz	Exp.	the first experimentally reported THz PBG waveguide	2008 ^[36]
		2.7	Teflon HDPE	0.25 0.185	0.98@1.07 THz 0.66@0.95 THz	Sim. Sim.	numerically investigation based on FEM	2009 ^[37]
		8.2	(UV)-curable polymer	—	300@0.105 THz	Exp.	—	2011 ^[39]
		0.84	Teflon	0.4	17.4@1.65~1.95 THz	Sim.	—	2016 ^[40]
Porous Core		1.02	Teflon	0.3	<4.3@1.5~1.8 THz	Sim.	—	2019 ^[41]
		0.6	COC	0.35	25@1.05 THz	Sim.	the first THz PC-PBG waveguide	2011 ^[42]
		0.8	COC	0.54	<150@0.78~1.05 THz <100@0.78~1.02 THz	Exp.	the first experimentally reported THz PC-PBG waveguide	2012 ^[43]
		0.4	COC	1.2	<500@0.7~2.0 THz	Sim.	a general design strategy of broadband THz PBG waveguide is presented	2016 ^[44]
		0.52	COC	0.31	<45@0.81~1.12 THz	Sim.	adopting a honeycomb lattice to arrange dielectric tubes to achieve broader PBG waveguide	2021 ^[45]

第一根光波段基材为石英的带隙引导型波导早在 1999 年就已由英国巴斯大学的 Russell 课题组研制成功^[35], 但由于 THz 波段的高透材料——聚合物的热力学及其他材料特性使波导的制备难度激增, 直至 2008 年才出现第

一根 THz 波段的 PBG 波导, 由日本分子科学研究所的 Carlito S Ponceca 等提出并制备, 基材为聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethylmetacrylate, PMMA), 该波导的传输损耗低至 $90 \text{ dB/m}@1.3 \text{ THz}$ ^[36]。2009 年, 意大利摩德纳大学的 Luca Vincetti 提出了基材为 Teflon/高密度聚乙烯 (High-Density Polyethylene, HDPE) 的 HC-PBG 波导用于 THz 波传输, 使用有限元法 (Finite Element Method, FEM) 对 THz 波段的 PBG 波导进行了结构设计及数值分析, 最优结构传输损耗为: 当基材为 Teflon 时, 传输损耗 $<3 \text{ dB/m}@0.895\sim 1.145 \text{ THz}$, 最低传输损耗为 $0.98 \text{ dB/m}@1.07 \text{ THz}$; 当基材为 HDPE 时, 最低传输损耗为 $0.66 \text{ dB/m}@0.95 \text{ THz}$ ^[37]。2010 年, 该团队进一步分析了该结构的孔径场分布, 结果表明所提出的波导结构不仅可用于传输 THz 波, 还可用作孔径天线^[38]。2011 年, 美国亚利桑那大学的 Ziran WU 等使用 3D 打印技术制备了 HC-PBG 波导, 基材为紫外 (Ultraviolet, UV) 固化聚合物, 纤芯直径达 8.2 mm , 波导整体笨重无柔性, 传输损耗为 $300 \text{ dB/m}@0.105 \text{ THz}$ ^[39]。2016 年, 丹麦科技大学的 Ajanta Barh 等对 AC-PBG 做进一步优化, 最终得到的结构带宽为 0.4 THz , 且在 $1.65\sim 1.95 \text{ THz}$ 频段内, 传输损耗约 17.4 dB/m , 色散为 $\pm 5 \text{ ps/THz/cm}$ ^[40]。2019 年, 设拉子理工大学的 H Pakarzadeh 等提出了一种基材为 Teflon 的 HC-PBG, 最优结构可在 $1.5\sim 1.8 \text{ THz}$ 频段内实现低损耗和近零平坦色散^[41]。

对于 HC-PBG 波导, 为实现较宽的带隙, 包层需要空气填充率高、空芯缺陷大。通常空芯缺陷与包层气孔的尺寸并不相同, 制造该种聚合物波导挑战巨大。为解决这一问题, 2011 年, 丹麦科技大学 Ole Bang 课题组的 Kristian Nielsen 等将多孔芯波导与 AC-PBG 波导结合, 首次提出了 PC-PBG 波导, 基材为 COC。与传统 HC-PBG 波导^[36]相比, 这种波导不仅更容易制备, 且带宽更宽, 损耗更低^[42]。2012 年, 该课题组的 Hualong Bao 等首次对 THz PC-PBG 波导进行了制备, 基材为 COC, 所研制波导的传输损耗在 $0.78\sim 1.05 \text{ THz}$ 频段内小于 150 dB/m , 在 $0.78\sim 1.02 \text{ THz}$ 频段内小于 100 dB/m , 验证了 PC-PBG 较 AC-PBG 波导带宽更宽的正确性^[43]。2016 年, 天津大学的 Jintao Fan 等提出了带宽 THz PBG 波导设计的一般策略, 使 PC-PBG 的工作带宽拓展至 $1.3 \text{ THz}(0.7\sim 2.0 \text{ THz})$, 但相应地牺牲了低损耗特性^[44]。

PBG 型波导与 IG 型波导相比, 材料吸收更少, 即传输损耗更小, 但由于其特殊的导光机制, 只能传输在光子禁带频率范围内的光, 带宽较窄。关于 THz 频段 PBG 波导的研究主要集中在 2015 年左右, 近年来科研人员将研究重点转移到了带宽更宽的空芯 THz 波导——AR 波导, THz 频段 AR 波导的研究论文数量发展趋势及研究机构占比分布如图 7 所示。2021 年, 广州大学的 Dunke LU 等将 AR 波导与 PBG 波导相结合, 将聚合物管排列为晶格状, 获得了更宽带宽、更少色散的 PBG 波导, 该波导在 $0.81\sim 1.12 \text{ THz}$ 频段内有近零平坦色散及小于 45 dB/m 的传输损耗, 且最低传输损耗为 $30 \text{ dB/m}@1 \text{ THz}$ ^[45]。

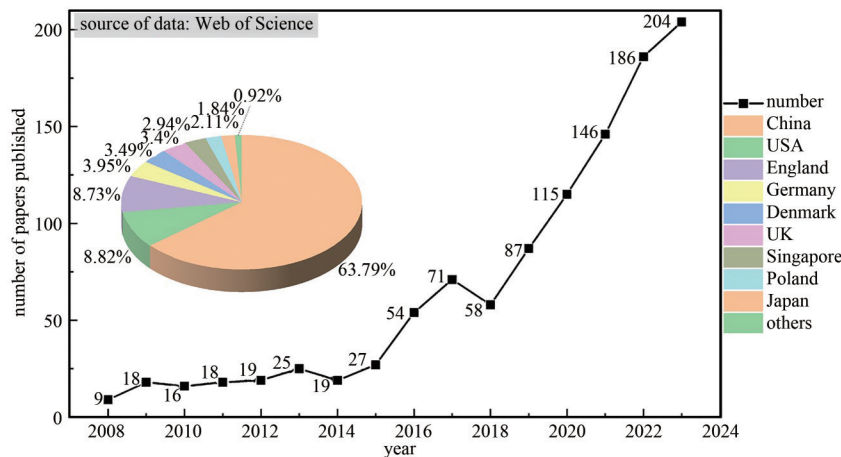


Fig.7 The number of published papers and the proportion of research institutions about the AR waveguide in THz range

图 7 太赫兹反谐振波导研究论文数量发展趋势及研究机构占比分布图

2.3 反谐振型 THz 聚合物波导

AR 型 THz 波导是一种利用包层的反谐振效应, 将 THz 波限制在空气纤芯中传输的空芯波导。与纤芯相邻的包层壁类似于一个法布里-珀罗腔, 其厚度会影响谐振的频率。当入射到纤芯中的 THz 波满足包层的谐振条件时, 波会从波导中泄露出去; 反之, 则会被限制在空气纤芯中。因此, AR 型空芯波导的传输带宽很宽。此外, 其还兼具了 PBG 型空芯波导低损耗、低色散、低非线性、高损伤阈值等特点。

早在 1986 年, 美国贝尔实验室的 Duguay 便提出了 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 的反谐振式反射光波导 (Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide, ARROW)^[46]。2002 年, Litchinitser 等^[47]将 ARROW 应用到空芯波导中, 提出了二维空芯反谐

振波导带宽的计算方法，并沿用至今。同年，英国巴斯大学的 Benabid^[48]在研究图 8(a)所示的 Kagome 包层的空芯波导时发现，它不仅能实现空芯导光，且具有很宽的传输带宽，但较高的损耗对其应用产生了制约，之后众多具有 Kagome 包层的空芯波导的研究被报道。2008 年，国立台湾大学的 LU 等^[49]用 Teflon 毛细管制备了第一根笼式结构 THz 波导，如图 8(b)所示。该波导在 0.9 THz 处实现了低至 0.9 dB/m 的损耗，作者认为其传输机理类似于 ARROW。虽然该波导的纤芯边界是负曲率的，但作者并未对此进行讨论，且波导因直径较大，无法实现单模传输。2010 年，英国巴斯大学 Benabid 课题组的 Y Y WANG 等^[50]减少 Kagome 包层的层数，并将纤芯内壁改为向内凸起的形状，即负曲率形状，如图 8(c)所示。与文献[48]相比，波导损耗降低了一个数量级，作者表明纤芯的形状和包层数量对纤芯模式的束缚有很大的影响。此后多数反谐振空芯波导的纤芯边界均采用了负曲率的形状。同年，意大利摩德纳大学的 Vincetti 等^[51]简化波导结构，只用一层包层管实现了 THz 波的单模传输，如图 8(d)所示。波导在 2.30~2.85 THz 频率范围内，获得了低于 5 dB/m 的基模传输损耗。在此基础上，将包层的毛细管彼此独立，即减少节点，以及在毛细管内嵌套更小直径的毛细管都能有效降低损耗^[52-53]。

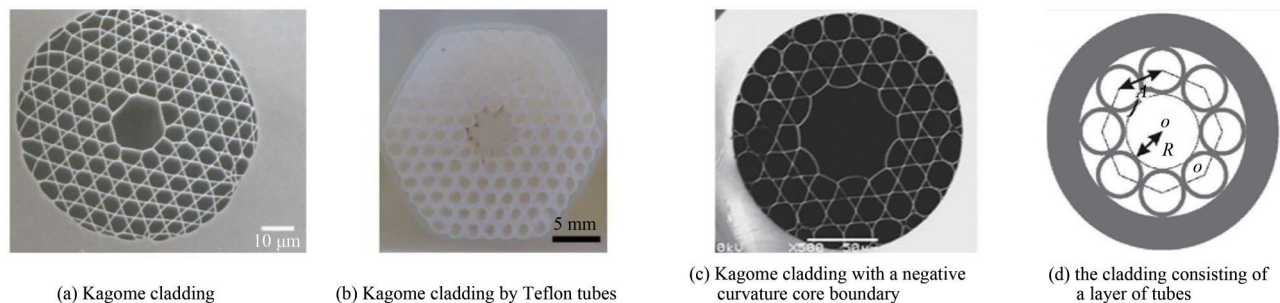


Fig.8 AR hollow-core waveguides with different cladding structures

图 8 几种不同包层结构的反谐振空芯波导

除降低损耗外，具有单模特性和高双折射的 AR 型空芯 THz 波导也得到了广泛研究。目前报道的波导的双折射高达 10^{-2} ^[54]，单模波导的仿真损耗低至 0.05 dB/m^[55]。然而 AR 型空芯 THz 波导的制备，始终是无法彻底突破的难题。由于聚合物材料加热柔软易变形的特点，因而无法像石英管那样用多个毛细管拼装在一起再次加热拉伸。而传统的预制棒-拉伸法，很难制备出包层只有毫米厚度的预制棒。挤出法是最有希望制备出 AR 型空芯 THz 波导的方法，然而在挤出过程中如何保证波导包层管不塌陷且壁厚均匀，是急需解决的问题。近年来，有许多利用 3D 打印技术制备 AR 型空芯 THz 波导的研究^[54-57]。然而 3D 打印机制备波导的长度有限，一般为十几厘米，且打印所用的材料对 THz 波的吸收较高，进而导致波导损耗升高。此外 3D 打印机的精确度有限，所能打印的最小包层厚度也限制了波导的带宽。有研究人员对 3D 打印机进行改造，使其能连续不间断打印波导^[58]。但因打印机模具精确度有限，无法打印一阶反谐振厚度的包层，只能选择二阶反谐振厚度的包层，使损耗增加。但因其打印所用材料为对 THz 低吸收的 TOPAS，波导的损耗仅有 3 dB/m。

2.4 多种机理共同作用的 THz 聚合物波导

除了基于单一传导机理的 THz 聚合物波导，近些年还出现了多种导光机理共同作用的 THz 聚合物波导，通过结构设计使 IG、PBG、AR 等中的两种及以上导光机制体现在同一波导中。那种类型的波导报道较少^[59-63]，其中 THz 频段仅有 2 项^[62-63]：2011 年，中国计量大学的 MENG 等提出一种反谐振环芯 THz 涡旋波导，基材为单一耐热树脂，如图 9 所示，这是首个基于 AR 和 IG 的混合引导机制的 THz 聚合物波导，该波导可在 0.4~0.8 THz 传输 50~52 个 OAM 模式^[62]；2022 年，浙江师范大学的 Zixuan DU 等提出了一种新型的具有中心支柱的高双折射低传输损耗空心反谐振 THz 波导，导光机制为 AR 和 IG 的混合型，结构如图 10 所示，这种结构设计进一步增加了波导对光场的限制能力，因此 1.0 THz 时，该波导在实现较高双折射(1.45×10^{-2})的前提下，依旧有着较低的限制损耗(1.69×10^{-4} dB/cm)^[63]。

3 THz 复合波导

看似裸露的金属表面实际上由于氧化或污染等常覆盖有薄介质层，因此探究介质覆盖对金属表面电磁波的传播特性影响也成为新的研究方向。1902 年，约翰霍普金斯大学的 Wood 等用光照射光栅后观察到了异常的吸收峰^[64]，称之为 Wood 异常。1956 年，D Pines 首次在理论上通过金属中自由电子集体振荡模型来解释 Wood 异常^[65]，他将这种自由电子集体振荡称为“等离激元(Plasmons)”。

2004 年, 德国亚琛工业大学的 J Saxler 等对比了裸金属平面和覆盖有不同厚度环烯介质膜的金属平面上 THz 表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)的传播特性^[66], 证明了在金属表面存在介质膜时, SPPs 场分布会发生剧烈变化, 产生强约束, 如图 11 所示, 且这种约束随着薄膜厚度的增加将变得更强。从频域上看, 当介质膜厚度恒定时, 频率越高, 穿透空气的能力越低。代尔夫特理工大学的 Nick 等在 2005 年证明了不同频率下镀膜金属线的有效折射率不同, 覆盖薄膜后的金属线上的 SPPs 具有强色散性^[67]。可以将金属线波导作为 THz 频率下的敏感探针。

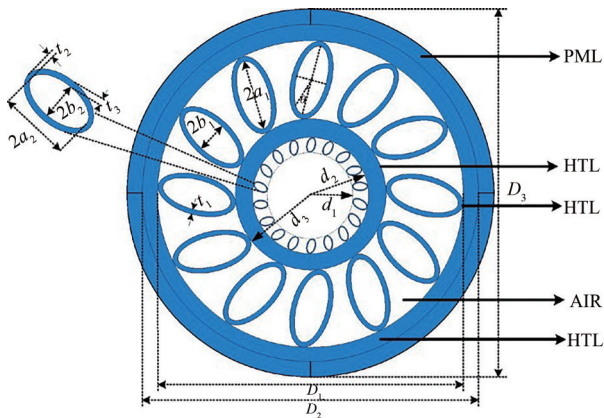


Fig.9 Cross-section of the ring-core AR waveguide
图 9 环芯反谐振波导

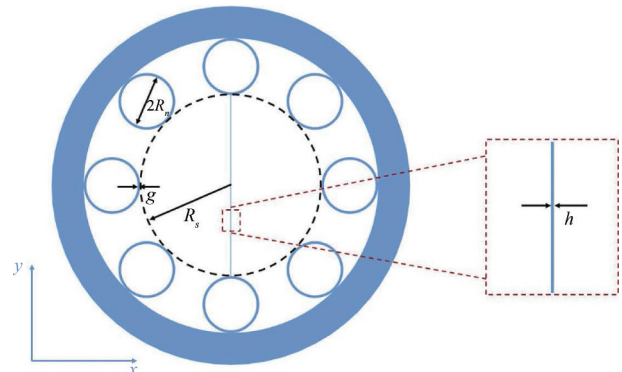
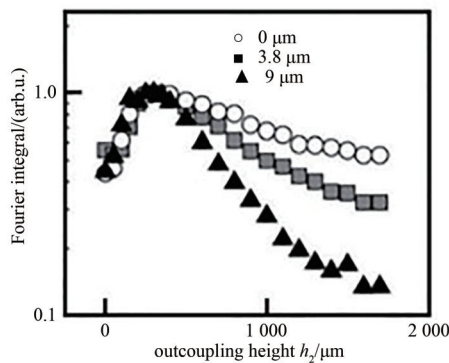
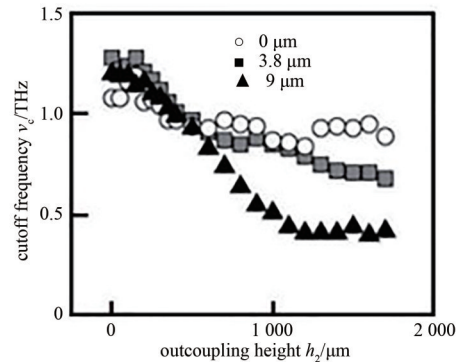


Fig.10 Cross-section of the HC-AR waveguide
图 10 空芯反谐振波导截面示意图



(a) Fourier integral in the spectral range 0.2-2 THz of the SPP's time-domain transients plotted versus the outcoupling height



(b) surface plasmon polariton field amplitude in air as a function of the height to the sample surface

Fig.11 SPPs on a coated metal plane
图 11 被涂层覆盖的金属平面上的 SPPs

当电磁波频率下降到微波以及 THz 波段时, 虽然金属的介电常数的实部仍小于 0, 但工作频率要远小于金属的等离子体频率, 表现出完美电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)特性, 此时金属表面等离子体响应比较微弱, 局域性也较差。针对这种情况, 英国伦敦帝国理工学院的 Pendry 等通过在金属表面引入亚波长尺度的方形孔阵列, 提出了人工表面等离子激元(Spoof Surface Plasmon Polaritons, SSPPs)的概念^[68], 见图 12(a)。2008 年, 英国巴斯大学的 Williams 等将方形孔阵列改为凹槽^[69], 制作了 THz 波段的 SSPPs 结构, 见图 12(b), 实验上验证了 THz 波段 SSPPs 的存在。图 12(c)为样品图, 图 12(d)为数值模拟的 THz-SSPPs 场分布图。因此基于波长和亚波长微结构, 特别是亚波长周期阵列结构的表面等离子体传输和仿表面等离子体传输也成为 THz 波传输的一种新结构, 得到了人们的广泛关注。

2010 年, 西班牙马德里自治大学的 D Martin-Cano 等研究了周期性排列的立方体波导的色散特性与其几何参数的关系^[70]。研究表明, 立方体结构的 SSPPs 色散关系与立方体的高度有很大关系, 见图 13(a), 当立方体的高度趋于 0 时, 金属块阵列趋近于无限大金属平面, 同一频率下的 SSPPs 波矢更接近于自由空间光。同理, 在一维周期性空穴波导中, 当空穴深度较小时, 其传导模式也将向金属平面靠近。另外, 由图 13(a)中的黑色曲线组可以看出, 该结构色散特性几乎不受横向宽度的影响, 因此可以适当降低横向尺寸来实现波导的小型化集成。

除了三维立体结构外, 平面周期金属波导因其加工方法简单, 也成为人们研究的热门方向。2013 年, 东南

大学崔铁军课题组的 Shen 等通过在介质薄膜上光刻制作超薄的一维光栅，相当于把三维凹槽结构“压”到一个平面上，提出了共形表面等离子体(Conformal Surface Plasmons, CSPs)^[71]的概念，如图 13(b)所示。该结构的传播长度被证明可高达 100λ ，波导在平面上直角转弯损耗低于 8%，光刻在柔性基底上做如图 13(b)所示的空间弯曲 90° 损耗仅 4%，绕柱旋转两圈后输出端平均功率密度仍高达输入端的 83%，实现了 SSPPs 在曲面上的低弯曲损耗传播，这一进展使波导结构变得更加灵活，进一步推动了 SSPPs 在片上集成中的应用。

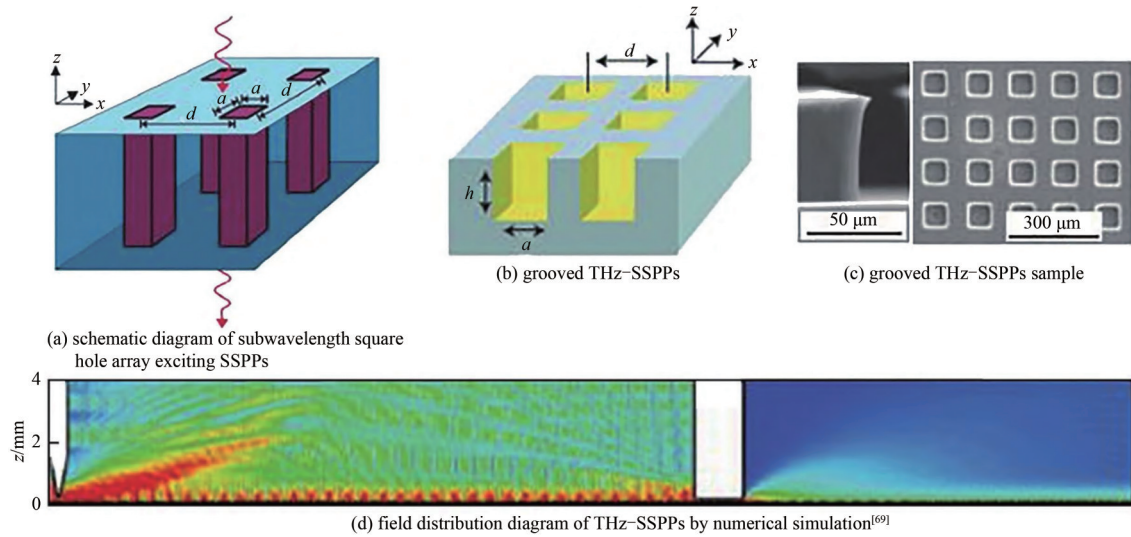


Fig.12 Spoo Surface Plasmon Polaritons of metal
图 12 金属人工表面等离激元

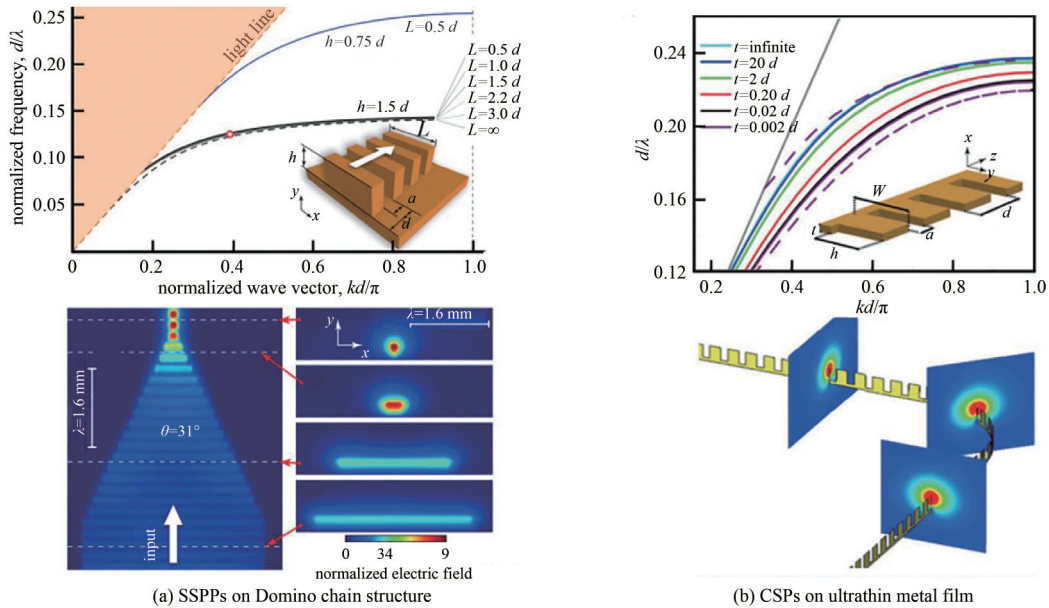


Fig.13 Integrated applications of SSPPs
图 13 SSPPs 的集成应用

4 结论

本文对 THz 波导研究进展进行了较系统的介绍。材料选择和波导结构对波导性能有很大影响，直接决定 THz 波导的传输损耗、色散、偏振等特性。聚合物材料在 THz 频段拥有比金属更高的透明性，成为了目前主流的使用材料。THz 波在聚合物中的引导机理主要有折射率引导、光子带隙、空芯反谐振以及多种机理混合等，其中空芯反谐振式太赫兹波导是目前研究的热点，从理论上存在实现低损耗、低色散、高带宽、低延时等特性的可能。此外，随着 THz 超材料、拓扑结构等新理论和技术的发展，在金属-电介质界面传播的 THz 表面等离激元也

成为实现 THz 设备集成化、微型化的一种潜在方法。短期内, THz 波信号的长距离、高速率传输应用仍面临较大挑战。特别是在全面兼顾传输特性、外形尺寸、成缆布线、成本及批量化生产等实际应用要求场景时, THz 波导的工业化应用之路还很长。

参考文献:

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010,22(6):703-707. (YAO Jianquan. Introduction of THz-wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010,22(6):703-707.) doi:10.3979/j.issn.1673-825X.2010.06.003.
- [2] NALLAPPAN K, SKOROBOGATIY M. Wired channel modeling for frequency hopping system in secure terahertz communications[C]// 2021 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference(RAPID). Miramar Beach,FL, USA:IEEE, 2021:1-2. doi:10.1109/RAPID51799.2021.9521450.
- [3] LEE J Y,WON H,SONG H I,et al. A 14 Gb/s clad dielectric waveguide link using 73 GHz carrier frequency with a stochastic RF phase synchronization system in 40 nm CMOS[C]// 2018 International Conference on Electronics,Information,and Communication (ICEIC). Honolulu,HI,USA:IEEE, 2018:1-4. doi:10.23919/ELINFOCOM.2018.8330630.
- [4] LEE J Y,SONG H I,KWON S W,et al. Future of high-speed short-reach interconnects using clad-dielectric waveguide[C]// Proceedings Volume 10109,Optical Interconnects XVII. San Francisco:SPIE, 2017:1010903. doi:10.1117/12.2249252.
- [5] TYTGAT M,VAN THIENEN N,REYNAERT P. A 90 GHz receiver in 40 nm CMOS for plastic waveguide links[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2015,83(1):55-64. doi:10.1007/s10470-015-0510-6.
- [6] TYTGAT M,REYNAERT P. A plastic waveguide receiver in 40 nm CMOS with on-chip bondwire antenna[C]// 2013 Proceedings of the ESSCIRC(ESSCIRC). Bucharest,Romania:IEEE, 2013:335-338. doi:10.1109/ESSCIRC.2013.6649141.
- [7] KIM Y,NAN Lan,CONG J,et al. High-speed mm-wave data-link based on hollow plastic cable and CMOS transceiver[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013,23(12):674-676. doi:10.1109/LMWC.2013.2283862.
- [8] ZHANG Yang,DE WITM,REYNAERT P. A D-band foam-cladded dielectric waveguide communication link with automatic tuning[C]// ESSCIRC 2018 IEEE the 44th European Solid State Circuits Conference. Dresden,Germany:IEEE, 2018:234-237.
- [9] OOMS S,REYNAERT P. A flexible low-latency DC-to-4 Gbit/s link operating from -40 to +200° C in 28 nm CMOS for galvanically isolated applications[C]// 2018 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). Philadelphia,PA, USA:IEEE, 2018:100-103. doi:10.1109/RFIC.2018.8428995.
- [10] DE WIT M,ZHANG Yang,REYNAERT P. Analysis and design of a foam-cladded PMF link with phase tuning in 28 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019,54(7):1960-1969. doi:10.1109/JSSC.2019.2907163.
- [11] MCGOWAN R W,GALLOT G,GRISCHKOWSKY D. Propagation of ultrawideband short pulses of terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides[J]. Optics Letters, 1999,24(20):1431-1433. doi:10.1364/ol.24.001431.
- [12] GALLOT G,JAMISON S P,MCGOWAN R W,et al. Terahertz waveguides[J]. JOSA B, 2000,17(5): 851-863. doi: 10.1364/JOSAB.17.000851.
- [13] HARRINGTON J A,GEORGE R,PEDERSEN P,et al. Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation[J]. Optics Express, 2004,12(21):5263-5268. doi:10.1364/OPEX.12.005263.
- [14] 张学文,谭智勇,陈可旺,等. 介质金属膜波导在 G 波段和 4.3 THz 的传输特性[J]. 红外与毫米波学报, 2019,38(2):215-222. (ZHANG Xuwen,TAN Zhiyong,CHEN Kewang,et al. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic waveguides in G band and 4.3 THz[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019,38(2):215-222. doi:10.11972/j.issn.1001-9014.2019.02.015.)
- [15] 李维轩,朱晓松,石艺尉. 介质/金属波导在 G 波段的损耗和色散特性[J]. 光学学报, 2021,41(18):42-49. (LI Weixuan,ZHU Xiaosong,SHI Yiwei. Loss and dispersion properties of dielectric-coated metallic waveguide in G-band[J]. Acta Optica Sinica, 2021,41(18):42-49.) doi:10.3788/AOS202141.1806004.
- [16] WANG Kanglin,MITTMELMAN D M. Guided propagation of terahertz pulses on metal wires[J]. Journal of The Optical Society of America B-optical Physics, 2005,22(9):2001-2008. doi:10.1007/978-1-4020-6503-3_5.
- [17] WANG Kanglin,MITTMELMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. Nature, 2004,432(7015):376-379. doi:10.1038/nature03040.
- [18] JEON T I,ZHANG Jiangquan,GRISCHKOWSKY D. THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire[J]. Applied Physics Letters, 2005,86(16):1904-1-3.
- [19] HE Xiaoyong,CAO Juncheng,FENG Songlin. Simulation of the propagation property of metal wires terahertz waveguides[J]. Chinese Physics Letters, 2006,23(8):2066. doi:10.1088/0256-307X/23/8/029.

- [20] MENDIS R,GRISCHKOWSKY D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses[J]. *Optics Letters*, 2001,26(11):846–848. doi:10.1364/ol.26.000846.
- [21] ISLAM M S,CORDEIRO C M B,FRANCO M A R,et al. Terahertz optical fibers [Invited][J]. *Optics Express*, 2020,28(11):16089–16117. doi:10.1364/OE.389999.
- [22] BERAVAT R,WONG G K L,FROSZ M H,et al. Twist-induced guidance in coreless photonic crystal fiber:a helical channel for light[J]. *Science Advances*, 2016,2(11):e1601421. doi:10.1126/sciadv.1601421.
- [23] CHEN Lijin,CHEN Huangwen,KAO T F,et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding[J]. *Optics Letters*, 2006,31(3):308–310. doi:10.1364/OL.31.000308.
- [24] NALLAPPAN K,CAO Yang,XU Guofu,et al. Dispersion-limited versus power-limited terahertz communication links using solid core subwavelength dielectric fibers[J]. *Photonics Res*, 2020,8(11):1757–1775.
- [25] ANTHONY J,LEONHARDT R,ARGYROS A,et al. Characterization of a microstructured Zeonex terahertz fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011,28(5):1013–1018. doi:10.1364/JOSAB.28.001013.
- [26] NIELSEN K,RASMUSSEN H K,ADAM A J L,et al. Bendable,low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range[J]. *Optics Express*, 2009,17(10):8592–8601. doi:10.1364/oe.17.008592.
- [27] MEI Sen,KONG Depeng,WANG Lili,et al. Suspended graded-index porous core POF for ultra-flat near-zero dispersion terahertz transmission[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019(52):101946. doi:10.1016/j.yofte.2019.101946.
- [28] MEI Sen,KONG Depeng,MU Qiyuan,et al. A porous core Zeonex THz fiber with low loss and small dispersion[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022(69):102834. doi:10.1016/j.yofte.2022.102834.
- [29] KAVEH H,JAHANGIRI F,AMINI T. Silicon nitride based photonic crystal fiber with highly improved birefringence for low loss terahertz propagation[J]. *Optics Communications*, 2022,1(2):388–398. doi:10.1364/OPTCOM.443208.
- [30] AFLAKIAN N,LAFAVE T P,KENNETH K O,et al. Design,fabrication,and demonstration of a dielectric vortex waveguide in the sub-terahertz region[J]. *Applied Optics*, 2017,56(25):7123–7129. doi:10.1364/AO.56.007123.
- [31] KABIR M A,AHMED K,HASSAN M M,et al. Design a photonic crystal fiber of guiding terahertz orbital angular momentum beams in optical communication[J]. *Optics Communications*, 2020(475):126192. doi:10.1016/j.optcom.2020.126192.
- [32] YUAN Yuan,KONG Depeng,GUAN Lei. A novel microstructured polymer tube for THz vortex beams guidance[J]. *Optics Communications*, 2022,505(1):127502.
- [33] YUAN Yuan,KONG Depeng,GUAN Lei,et al. Terahertz fiber with multi-concentric ring cores for OAM modes propagation[J]. *Physica Scripta*, 2023,98(4):045504. doi:10.1088/1402-4896/acbf87.
- [34] YAKASAI I K,ABAS P E,BEGUM F. Review of porous core photonic crystal fibers for terahertz waveguiding[J]. *Optik*, 2021,(229):166284. doi:10.1016/j.ijleo.2021.166284.
- [35] CREGAN R F,MANGAN B J,KNIGHT J C,et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999,285(5433):1537–1539. doi:10.1126/science.285.5433.1537.
- [36] PONSECA J C S,POBRE R,ESTACIO E,et al. Transmission of terahertz radiation using a microstructured polymer optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2008,33(9):902–904. doi:10.1364/OL.33.000902.
- [37] VINCETTI L. Hollow core photonic band gap fiber for THz applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009,51(7):1711–1714. doi:10.1002/mop.24407.
- [38] VINCETTI L,POLEMI A. Numerical analysis of propagating and radiating properties of hollow core photonic band gap fibres for THz applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010,58(7):2465–2468. doi:10.1109/TAP.2010.2048854.
- [39] WU Ziran,NG W R,GEHM M E,et al. Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid prototyping[J]. *Optics Express*, 2011,19(5):3962–3972. doi:10.1364/OE.19.003962.
- [40] BARH A,VARSHNEY R K,PAL B P,et al. Design of a polymer-based hollow-core bandgap fiber for low-loss terahertz transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016,28(15):1703–1706. doi:10.1109/LPT.2016.2544198.
- [41] PAKARZADEH H,REZAEI S M,NAMROODI L. Hollow-core photonic crystal fibers for efficient terahertz transmission[J]. *Optics Communications*, 2019(433):81–88. doi:10.1016/j.optcom.2018.09.065.
- [42] NIELSEN K,RASMUSSEN H K,JEPSEN P U,et al. Porous-core honeycomb bandgap THz fiber[J]. *Optics Letters*, 2011,36(5):666–668. doi:10.1364/OL.36.000666.
- [43] BAO Hualong,NIELSEN K,RASMUSSEN H K,et al. Fabrication and characterization of porous-core honeycomb bandgap THz fibers[J]. *Optics Express*, 2012,20(28):29507–29517. doi:10.1364/OE.20.029507.
- [44] FAN Jintao,LI Yanfeng,HU Minglie,et al. Design of broadband porous-core bandgap terahertz fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016,28(10):1096–1099. doi:10.1109/LPT.2016.2531023.

- [45] LU Dunke, WAN Minggu, LI Zhiwei, et al. Photonic bandgap terahertz fibers based on honeycombed tubes[J]. *Optics Express*, 2021,29(26):43516–43530. doi:10.1364/OE.433608.
- [46] DUGUAY M A, KOKUBUN Y, KOCH T L, et al. Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures[J]. *Applied Physics Letters*, 1986,49(1):13–15. doi:10.1063/1.97085.
- [47] LITCHINITSER N M, ABEELUCK A K, HEADLEY C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002,27(18):1592–1594. doi:10.1364/ol.27.001592.
- [48] BENABID F, KNIGHT J C, ANTONOPOULOS G, et al. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002,298(5592):399–402. doi:10.1126/science.1076408.
- [49] LU Jayu, YU Chinpeng, CHANG Hung, et al. Terahertz air-core microstructure fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2008,92(6):064105. doi:10.1063/1.2839576.
- [50] WANG Yingying, COUNY F, ROBERTS P J, et al. Low loss broadband transmission in optimized core-shape Kagome hollow-core PCF[C]// *CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications*. San Jose, CA, USA: IEEE, 2010: 1–2. doi: 10.1364/CLEO.2010.CPDB4.
- [51] VINCETTI L, SETTI V, ZOBOLI M. Terahertz tube lattice fibers with octagonal symmetry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010,22(13):972–974. doi:10.1109/LPT.2010.2048426.
- [52] KOLYADIN A N, KOSOLAPOV A F, PRYAMIKOV A D, et al. Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region[J]. *Optics Express*, 2013,21(8):9514–9519. doi:10.1364/OE.21.009514.
- [53] KOSOLAPOV A F, ALAGASHEV G K, KOLYADIN A N, et al. Hollow-core revolver fibre with a double-capillary reflective cladding[J]. *Quantum Electronics*, 2016,46(3):267. doi:10.1070/QEL15972.
- [54] XUE Lu, SHENG Xinzhi, MU Qiyuan, et al. 3D-printed high-birefringence THz hollow-core anti-resonant fiber with an elliptical core[J]. *Optics Express*, 2023,31(16):26178–26193. doi:10.1364/OE.497258.
- [55] XUE Lu, SHENG Xinzhi, JIA Haoqiang, et al. An ultra-wide single-mode frequency bandwidth and low-flattened dispersion hollow-core negative-curvature THz waveguide[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023,41(18):6043–6052. doi:10.1109/JLT.2023.3269788.
- [56] CRUZ A L S, CORDEIRO C M B, FRANCO M A R. 3D printed hollow-core terahertz fibers[J]. *FIBERS*, 2018,6(3):43. doi:10.3390/fib6030043.
- [57] XUE Lu, SHENG Xinzhi, LOU Shuqin, et al. High-birefringence low-loss hollow-core THz waveguide embedded parallel slab cladding[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022,12(5):471–480.
- [58] PHANCHAT N, TALATAISONG W, KLOKKOU N, et al. Extruded TOPAS hollow-core anti-resonant fiber optimized for THz guidance at 0.9 THz[J]. *Optics Express*, 2022,30(8):13059–13069. doi:10.1364/OE.450550.
- [59] TU Jiajing, LIU Zhengyong, GAO Shecheng, et al. Ring-core fiber with negative curvature structure supporting orbital angular momentum modes[J]. *Optics Express*, 2019,27(15):20358–20372. doi:10.1364/OE.27.020358.
- [60] HAYASHI J G, MOUSAVI S M A, VENTURA A, et al. Numerical modeling of a hybrid hollow-core fiber for enhanced mid-infrared guidance[J]. *Optics Express*, 2021,29(11):17042–17052. doi:10.1364/OE.423257.
- [61] 高福宇, 徐小斌, 宋凝芳, 等. 独立反谐振纤芯低损耗光子带隙光纤[J]. *中国激光*, 2022,49(19):168–174. (GAO Fuyu, XU Xiaobin, SONG Ningfang, et al. Low-loss isolated anti-resonant core photonic bandgap fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19):168–174.) doi:10.3788/CJL202249.1906002.
- [62] MENG Miao, YAN Dexian, CAO Mingxuan, et al. Design of negative curvature fiber carrying multi-orbital angular momentum modes for terahertz wave transmission[J]. *Results in Physics*, 2021(29):104766. doi:10.1016/j.rinp.2021.104766.
- [63] DU Zixuan, ZHOU Yan, LUO Si, et al. Highly birefringent hollow-core anti-resonant terahertz fiber with a thin strut microstructure[J]. *Optics Express*, 2022,30(3):3783–3792. doi:10.1364/OE.448105.
- [64] WOOD R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum[J]. *Proceedings of the Physical Society of London*, 1902,18(1):269–275. doi:10.1088/1478-7814/18/1/325.
- [65] PINES D. Collective energy losses in solids[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1956,28(3):184. doi:10.1103/RevModPhys.28.184.
- [66] SAXLER J, RIVAS J G, JANKE C, et al. Time-domain measurements of surface plasmon polaritons in the terahertz frequency range[J]. *Physical Review B*, 2004,69(15):155427. doi:10.1103/PhysRevB.69.155427.
- [67] VAN-DER-VALK NCJ, PLANKEN PCM. Effect of a dielectric coating on terahertz surface plasmon polaritons on metal wires[J]. *Applied Physics Letters*, 2005,87(7):071106. doi:10.1063/1.2011773.
- [68] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004,305(5685):847–848. doi:10.1126/science.1098999.

- [69] WILLIAMS C R, ANDREWS S R, MAIER S A, et al. Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces[J]. Nature Photonics, 2008,2(3):175-179. doi: 10.1038/nphoton.2007.301.
- [70] MARTIN-CANO D, NESTEROV M L, FERNANDEZ-DOMINGUEZ A I, et al. Domino plasmons for subwavelength terahertz circuitry[J]. Optics Express, 2010,18(2):754-764. doi:10.1364/OE.18.000754.
- [71] SHEN Xiaopeng, CUI Tiejun, MARTIN-CANO D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1):40-45. doi: 10.1073/pnas.1210417110.

作者简介：

韩冰冰(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光纤 .email:hanbingbing2022@opt.ac.cn.

穆启元(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为负曲率反谐振空芯太赫兹波导.

邵伟(1992-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹柔性导波技术、太赫兹通信技术.

曾庆龄(2000-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹透明聚合物吸收特性.

朱忠博(1980-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空间太赫兹通信技术.

袁苑(1993-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为轨道角动量波导、特种聚合物光纤与器件.

孔德鹏(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为特种聚合物光纤及器件.