

文章编号: 1672-8785(2024)06-0001-15

# 太赫兹传输波导器件研究进展

梅 亮<sup>1</sup> 徐 振<sup>2,3</sup> 徐德刚<sup>2,3</sup> 乔秀铭<sup>1</sup> 刘龙海<sup>2,3</sup> 李吉宁<sup>2,3\*</sup>  
罗 曼<sup>2,3</sup> 张嘉昕<sup>1</sup> 姜 晨<sup>1</sup>

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854;  
2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;  
3. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 随着太赫兹技术的发展, 太赫兹传输波导器件的研究成为待解决的重要问题之一。太赫兹波位于微波与红外光之间, 寻找高效的传输、耦合器件一直是研究人员的目标。主要介绍了太赫兹传输波导研究现状, 并总结了各类型太赫兹波导的优势与不足。根据材料与结构分别对金属波导、介质波导的研究进展进行了分析。其中金属波导包括裸金属线波导、微结构波导、空芯波导以及平板波导, 介质波导包括介质空芯波导、多孔芯波导以及微结构波导。最后分别对太赫兹传输波导未来需要解决的研究方向进行了展望。

**关键词:** 太赫兹; 金属波导; 介质波导; 微结构波导; 空芯波导; 平行平板波导

**中图分类号:** TN252; TN814; TN622; TN202 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.06.001

## Research Progress in Terahertz Transmission Waveguides

MEI Liang<sup>1</sup>, XU Zhen<sup>2,3</sup>, XU De-gang<sup>2,3</sup>, QIAO Xiu-ming<sup>1</sup>, LIU Long-hai<sup>2,3</sup>,  
LI Ji-ning<sup>2,3\*</sup>, LUO Man<sup>2,3</sup>, ZHANG Jia-xin<sup>1</sup>, JIANG Chen<sup>1</sup>

(1. Defense Technology R&T Center, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China;  
2. School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the development of terahertz technology, the research on terahertz transmission waveguide devices has also become one of the important issues to be solved. Terahertz wave is located between microwave and infrared light, and the search for efficient transmission and coupler devices has always been the goal of researchers. This article mainly introduces the current research status of terahertz transmission waveguides and summarizes the advantages and disadvantages of various types of terahertz waveguides. The research progress of metal waveguides and dielectric waveguides is analyzed according to material and structure. Metal waveguides include bare metal wire waveguides, microstructure waveguides, hollow core waveguides, and flat waveguides, while dielectric waveguides include dielectric hollow-core waveguides, porous core waveguides,

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20123; 62175182; 62275193; U22A20353)

作者简介: 梅亮(1987-), 男, 江西宜春人, 高级工程师, 主要从事太赫兹技术、无损检测技术方面的研究。

\*通讯作者: E-mail: jiningli@tju.edu.cn

and microstructure waveguides. Finally, prospects are presented for the future research directions that need to be addressed in terahertz transmission waveguides.

**Key words:** terahertz; metal waveguide; dielectric waveguide; microstructured waveguide; hollow waveguide; parallel planar waveguide

## 0 引言

太赫兹(THz)波的频率(0.1~10 THz)位于微波与红外光之间。该波段覆盖很多有机分子和生物大分子的振动以及转动能级<sup>[1]</sup>。太赫兹技术曾被美国评为“改变世界的十大技术”之一,以独特的优势在无线通信<sup>[2]</sup>、雷达探测<sup>[3-4]</sup>、无损检测<sup>[5]</sup>、安全检查<sup>[6]</sup>、生命医药<sup>[7]</sup>、化学分析<sup>[8]</sup>和天文气象<sup>[9]</sup>等重要领域受到研究者的广泛关注。与其他频段的电磁波相比,太赫兹波具有许多独特的性质,比如光子能量低、穿透性强、相干性好等<sup>[10-11]</sup>。

当前,关于太赫兹技术的研究主要集中在太赫兹的产生与探测、传输与耦合方面。其中关于太赫兹的产生与探测技术的研究经过不断发展,已经趋向成熟<sup>[12]</sup>。目前太赫兹波的传输主要依赖两种方式:一是通过分立的光学元件在自由空间传输,传输损耗低,但传输系统稳定性差、体积大且移动不便;二是将太赫兹波限制在传输波导内部或者表面,实现低损耗、低色散、强稳定性的传输<sup>[13]</sup>。

提高太赫兹波导的传输性能是推动太赫兹技术高效发展的关键之一。当前太赫兹传输的波导材质主要是金属与介质,结构主要包括空芯、微结构、平板等。本文从材料与结构两方面对不同类型的太赫兹传输器件的研究现状进行总结,并对比不同类型的太赫兹传输波导的优缺点,分析未来太赫兹传输波导的研究方向。

## 1 太赫兹金属波导

太赫兹波的频率范围介于微波与红外光之间,因此微波波导与红外波导均可能用来传输太赫兹波。微波波导主要采用金属材料,红外波导主要采用电介质材料。根据材料的不同,

太赫兹传输波导可分为金属波导与介质波导;根据结构的不同,太赫兹传输波导可分为实芯波导、空芯波导、多孔波导、平板波导以及微结构波导。

### 1.1 金属线波导

金属在太赫兹波段不是完美电导体。根据经典趋肤模型得到 300 K 时金、银、铜、铝、钨几种常见金属材料在 0.1~10 THz 频率范围内的趋肤深度(结果见图 1)。太赫兹波在金属中的趋肤深度可忽略不计,因此太赫兹波可通过缩小尺寸的金属波导传输。

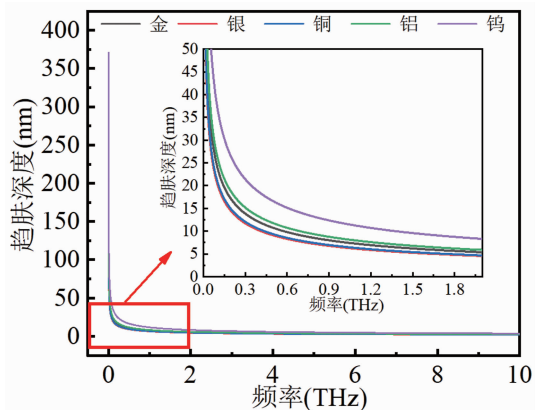
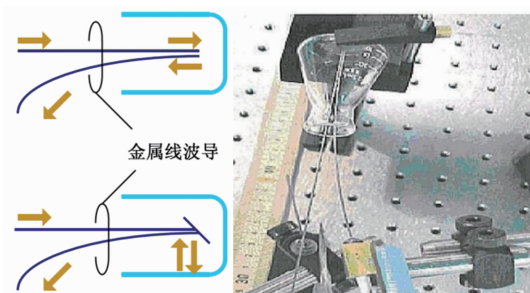


图 1 常见金属在太赫兹波段的趋肤深度

2004 年, Mittleman D 等<sup>[14-16]</sup>搭建图 2 所示的实验装置, 率先开展不同直径和形状 of 太赫兹金属线波导的传输特性研究, 发现直径为 0.9~6 mm 的金属线的形状对太赫兹传输特性没有明显的影响。结果表明, 简单的金属波导结构可以实现太赫兹波与金属线的低色散、低损耗的耦合。但 Mittleman D 并未从理论层面对金属波导的传输特性以及耦合效率进行分析。2005 年, Jeon T I 等<sup>[17]</sup>从理论分析与实验验证两个方面研究 THz 波在单根铜线上的传输特性, 将由光电导天线产生的太赫兹脉冲耦合到直径为 0.52 mm 的铜线上, 在铜线的末

图 2 金属线波导测试结构图<sup>[14]</sup>

端探测到很低的衰减和群速度色散。他们发现, 由铜线传输的太赫兹波径向电场振幅与径向距离成反比, 该现象与理论分析结果一致。2012 年, Zhu Z 等<sup>[18]</sup>对宽带径向极化太赫兹脉冲光束与裸铜线的耦合效率进行研究。当频率为 0.3 THz 时, 最大耦合效率为 66.3%, 模式重叠计算和数值模拟的结果与实验数据具有良好的一致性。

当金属线截面不规则或者发生形变时, 其传输特性可能受到影响, 因此有必要对发生形变的金属波导进行研究。2013 年, 李爽等<sup>[19]</sup>采用有限元方法分析圆柱形金属线在 0.5 THz 时的表面等离子激元特性。当长轴与短轴的比值增加时, 模场逐渐分裂开, 并向椭圆的两个尖端区域集中; 传输损耗逐渐减小, 传播距离逐渐增加。同样是研究形变金属线的太赫兹传输特性, 2022 年董章华等<sup>[20]</sup>对不同螺线间距的金属弹簧的太赫兹波传输特性进行研究, 实验测量系统如图 3 所示。当弹簧的线径为 0.8 mm、外直径为 12 mm、长度为 14 cm、螺距为 3.5/4.4 mm 时, 具有偏振特性好、传输带宽大、损耗低的优势。当金属线波导表面存在介电涂层时, 会影响太赫兹脉冲的传输特性。2023 年, Petrov N I<sup>[21]</sup>利用具有高阶色散项的麦克斯韦方程对金属线传输脉冲电场的表达式进行解析, 发现介电涂层会导致太赫兹脉冲出现啁啾信号。通过对该啁啾信号进行调控, 测试出带有涂层的金属线波导的电介质特性。

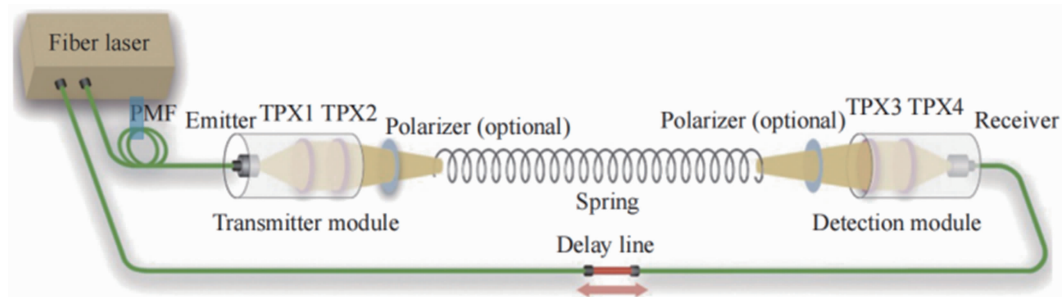
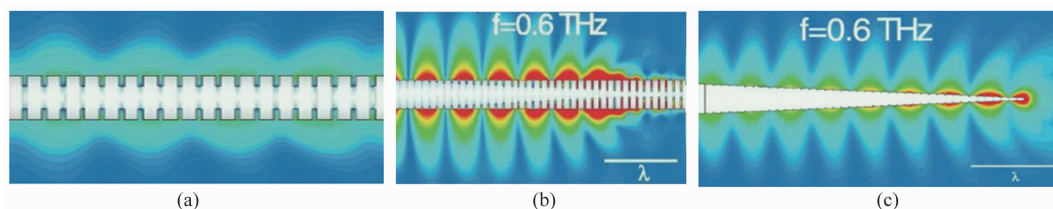
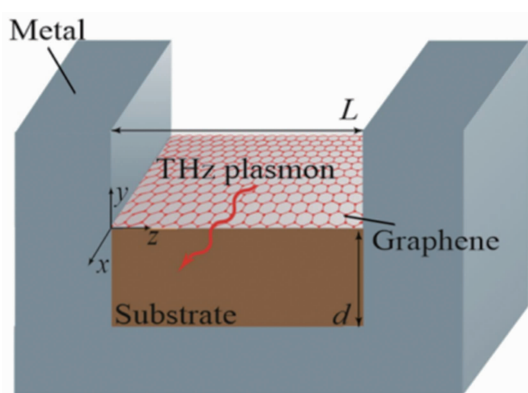
太赫兹金属线波导不仅结构简单, 而且具有较高的灵活度和较好的弯曲特性, 还具有低

损耗的优势。但是太赫兹金属线波导通常是裸露的结构, 因此需要设计额外的结构来弥补其较差的抗干扰性。

## 1.2 微结构波导

在金属表面设计微结构能够在太赫兹波的作用下激发出表面等离子激元, 突破衍射极限, 将电磁波局域在亚波长尺度内。基于表面等离子激元的优良特性, 近些年来许多研究人员开始在金属表面设计用于传输太赫兹波的结构。2005 年, Maier S A 等<sup>[22]</sup>在圆柱形金属导体表面刻蚀上周期性凹槽结构, 得到均匀的表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 波导, 如图 4 所示。通过改变凹槽的深度以及锥形结构, 可在 0.6 THz 处获得良好的传输与聚焦效果。该金属-介质等离子体波导的传输损耗较大。2010 年, 张许丰<sup>[24]</sup>研究了太赫兹波在刻有周期性一维槽的金属结构上的传输特性。通过优化槽的横向宽度, 使人工表面等离子激元在横向上实现对太赫兹波的亚波长约束以及长距离单模传输, 且具有极低的弯曲损耗。

石墨烯材料由于具有表面导电性、高载流子迁移率、稳定的化学和机械性能, 被认为是最有前途的超薄光电材料。图案化的石墨烯结构可以支持红外和太赫兹区域的表面等离子体响应。与图案化金属结构相比, 石墨烯表面等离子体激元可以实现更低的传输损耗和更强的场限制效应<sup>[25-26]</sup>。2022 年, Mikhail Y M 等<sup>[27]</sup>提出一种基于有源石墨烯金属槽的太赫兹波导等离子体放大结构。如图 5 所示, 将介电常数为  $\epsilon_r$  的石墨烯沉积在金属槽里。在截止频率附近, 纵向截面磁 (Longitudinal-Section Magnetic, LSM) 波导等离子体激元的功率放大因子可以比层状石墨烯结构中横向磁 (Transverse Magnetic, TM) 等离子体激元在相同频率下的放大因子高 4 个数量级。以芯片规模的形式传输和处理太赫兹信号也至关重要。2023 年, Huang C C 等<sup>[27]</sup>提出了一种由两条工作在 1~5 THz 的圆柱形金属线与嵌在其间的石墨烯缝隙组成的新型太赫兹波导 (见图 6)。通过调制

图 3 金属弹簧波导及测试系统<sup>[20]</sup>图 4 金属微型凹槽波导结构及电场分布<sup>[22]</sup>：(a)圆柱形金属槽波导；(b)金属凹槽渐深波导；(c)锥形金属凹槽波导图 5 基于有源石墨烯金属槽的太赫兹波导<sup>[26]</sup>

由石墨烯缝隙波导和圆柱形金属线杂交的模式，可以获得长度为  $192\ \mu\text{m}$  的传播距离，同时保持超小模式面积；品质因数达到 12985，性能优于已报道的相关结构。

### 1.3 空芯波导

太赫兹金属空芯波导结构简单，由金属管壁与中间的空气芯组成。太赫兹波基于反谐振理论在金属管内传输时被波导管壁不断反射，从而被限制在空气芯中并向前传输，具有传输损耗低的优点。2007 年，陆东梅等<sup>[27]</sup>对有金属镀层的太赫兹空芯波导的传输特性进行了理论分析，比较了不同频率的太赫兹波在内壁镀金(Au)、铅(Pb)、镍(Ni)的空芯圆波导中的理论衰减常数，并分析了其与波导内直径的关

系。结果表明，上述材料均可作为空芯圆波导中的金属镀层来实现太赫兹波的低损耗传输。介电涂层不仅对金属线波导的传输特性有明显影响，而且对空芯金属波导的特性也有显著影响。Bradley B 等<sup>[29]</sup>在圆柱形银波导内壁沉积  $10\ \mu\text{m}$  厚的聚苯乙烯(Polystyrene, PS)涂层时，能够有效地抑制  $2.5\ \text{THz}$  时的  $\text{TE}_{01}$  模式，并保持低介电吸收。这说明介电涂层可以改善太赫兹波的传输特性，使沿着波导内壁轮廓的边界处电场逐渐减小，从而降低传输损耗。2016 年，李怡卿等<sup>[30]</sup>基于介质/金属膜结构空芯波导原理，在基管内面镀制金属薄膜后，再镀制介质层，如图 7 所示。利用多层膜得到高反射率，实现了低损耗传输。该空芯波导的传输损耗及弯曲附加损耗均随介质膜厚度的增加而减小，光斑能量则随介质膜厚度的增加而更加集中于低阶传输模式。

提高太赫兹波导对模场的约束能力，是太赫兹波导的研究目标之一。当空芯波导内部存在不同结构时，其模场限制能力也可能发生变化。2015 年，Marko G 等<sup>[31]</sup>采用三维全波法对有脊和无脊两种不同类型的铝空心太赫兹波导的耦合效率、振幅传输、色散和单模带宽进行了对比。图 8 所示为梯形无脊波导和梯形有

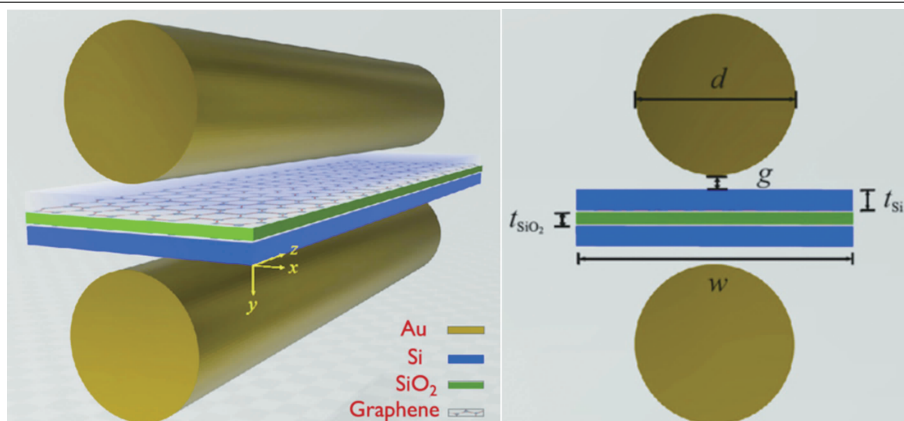


图 6 石墨烯嵌入缝隙等离子体极化子的太赫兹波导<sup>[27]</sup>: (a) 三维结构; (b) 前视图

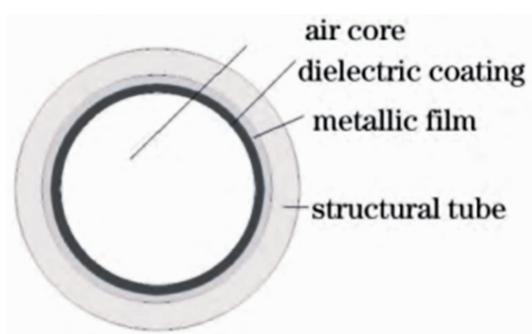


图 7 介质/金属膜空芯波导截面结构<sup>[30]</sup>

脊波导  $TE_{10}$  电场振幅的截面分布。梯形波导对自由空间辐射的耦合效率至少为 60%，能够保证传输信号的高信噪比。

#### 1.4 平板波导

平行平板波导 (Parallel Plate Waveguide, PPWG) 结构相对较为简单, 衰减相对较低, 因此在太赫兹传输领域具有明显的优势。鉴于 PPWG 良好的传输特性, 历年来研究者们逐渐探索出 T 型腔平行平板波导、十字腔平行平板波导等多种结构的平板波导<sup>[33-35]</sup>。2011 年, Hui Z 等<sup>[35]</sup>对各种 PPWG 几何结构的太赫兹场约束特性进行了研究。其中, 沿非屏蔽方向具有自由空间衍射的有限宽 PPWG 与无限宽 PPWG 相比, 前者在输出端对太赫兹场的限制能力更强。2012 年, Gerhard M 等<sup>[36]</sup>对聚焦之后的太赫兹波与不同亚波长间隙的金属平行平板波导的耦合进行了研究。平板波导的截面图与实验装置如图 9 所示。研究发现, 从自由空间到波导的振幅耦合率达到 80%; 波导越长, 耦合效率越低, 且平板间距对耦合效率的影响

较小。2018 年, 王凯等<sup>[37-38]</sup>提出了基于平行平板金属波导的太赫兹 T 形腔的消逝共振模模型 (见图 10)。他们分别用理论推导与数值仿真两种方法对不同参数下消逝模的共振频率进行研究, 发现余弦-高斯模与高斯光束具有较高的耦合效率以及较低的传输损耗。2020 年, 李哲等<sup>[39]</sup>对太赫兹金属平行平板波导的最低阶横电 ( $TE_1$ ) 模式进行理论研究, 推导出一个适用于太赫兹金属平行平板波导  $TE_1$  模式有效折射率的近似表达式, 并采用有限元分析法对  $TE_1$  模式进行数值模拟, 得到与理论推导一致的结果。

平行平板波导具有精确度高、适用范围广的特点。在平行平板中设计合理的微结构可以对太赫兹信号进行有效调控。2021 年, 吴经纬等<sup>[40]</sup>利用太赫兹时域光谱系统研究了图 11 所示的平行平板波导-超表面。在外部横电模式的激励下, 通过改变超表面的结构参数, 在理论和实验上均实现了等离子诱导透明效应的有效调控。由于太赫兹波导模式的闲置, 太赫兹功能器件的性能受到严重影响。在器件中引入缺陷时, 可以产生很强的局域化效应。2023 年, Ma J 等<sup>[41]</sup>基于多模谐振理论研究了太赫兹波在非布拉格性质谐振的周期平行板波导中的反对称局域化。该谐振可以产生两个透射率接近 1 的高效传输, 最窄线宽可以达到 2 MHz,  $Q$  因子接近  $7.44 \times 10^5$ 。Ma J 等研究者的工作使具有微结构的平行平板波导在太赫兹传感器和滤波器中将被广泛应用。

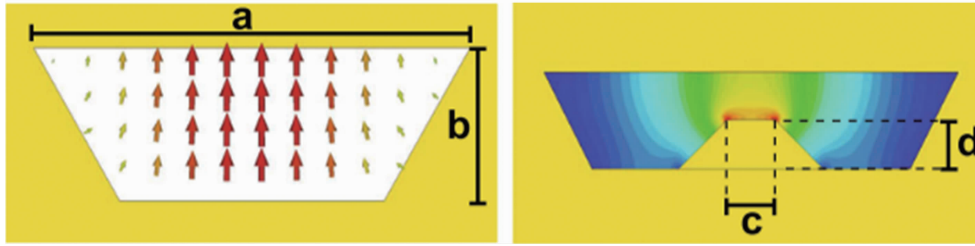


图 8 梯形无脊波导和梯形有脊波导的  $TE_{10}$  模电场分布<sup>[31]</sup>

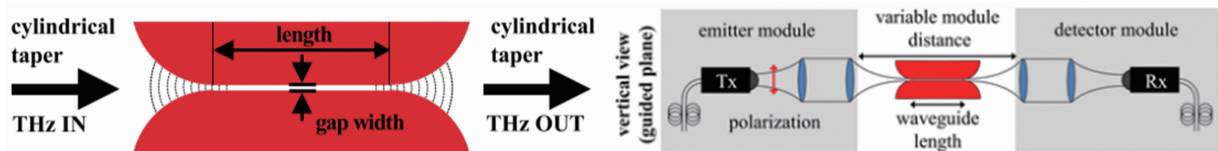


图 9 锥形金属平行板波导与实验系统<sup>[36]</sup>

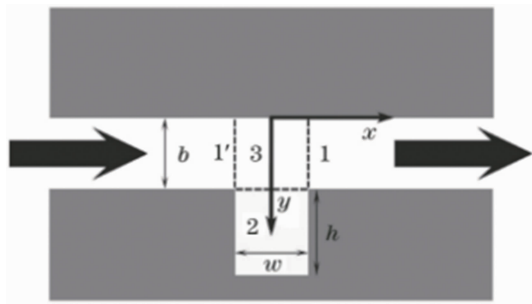


图 10 T 型腔平行平板波导<sup>[37]</sup>

## 2 太赫兹介质波导

### 2.1 空芯波导

太赫兹介质空芯波导结构简单, 传输介质为空气, 包层为介质材料。当传输环境的空气湿度较低时, 可以显著降低因水蒸气产生的吸收, 在理论上获得极低的传输损耗。近年来已有研究者设计并加工了太赫兹介质空心波导, 并获得较好的太赫兹传输特性。2010 年, Daru C 等<sup>[42]</sup>提出了一种截面为环形结构的聚合物空芯管波导(见图 12)。他们从有效模式折射率、模场面积、相对吸收损耗以及模式分布等方面对聚合物管和聚合物光纤的传输特性进行了对比。结果表明, 聚合物管比聚合物光纤具有更优良的太赫兹传输性能。2015 年, Li H 等<sup>[43]</sup>研究了一种能够反射 TM 波、透射 TE 波(即只限制 TM 模)的太赫兹混合包层波导。该波导在 0.22~0.34 THz 范围内具有单模工作区, 其中在 0.29 THz 处具有最低的传输损

耗(14.76 dB/m)。

传输带宽以及弯曲性能是影响波导能否被推广应用的重要因素, 因此有研究者对传输带宽及弯曲损耗进行研究。2021 年, 谢国兴<sup>[13]</sup>基于反谐振理论设计图 13 所示的太赫兹介质管空芯波导, 通过在聚合物管外镀银, 制备出 Ag/PP 介质空芯波导。当弯曲角度为  $270^\circ$  (弯曲半径为 15 cm) 时, 传输损耗仅为 1.34 dB/m, 且同时实现宽频带(1.9 THz)传输。

空芯波导是一种较为理想的低损耗太赫兹传输结构。聚乙烯、聚四氟乙烯等塑料或高分子材料具有良好的弯曲性能。因此将空芯结构与弯曲性能良好的材料结合, 可设计出损耗低、色散低、成本低、性能好的太赫兹波导, 有望在远距离传输太赫兹信号中得到应用。

### 2.2 多孔芯波导

在研究太赫兹波导的传输特性时, 更低的损耗、更强的模场限制能力、更宽的传输频带以及更低的色散均是追求的目标。在传统的单模传输波导中, 波导的传输特性调节程度有限<sup>[44]</sup>。为了实现低损耗、宽频带的传输特性, 主要利用以下手段优化波导的传输特性: 改变包层空气孔的形状与排列方式; 改变纤芯区域空气孔的形状或排列方式; 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整体的不对称性<sup>[46]</sup>。因此, 大量研究者基于多孔芯结构波导朝低损耗与宽频带方向不断努力。

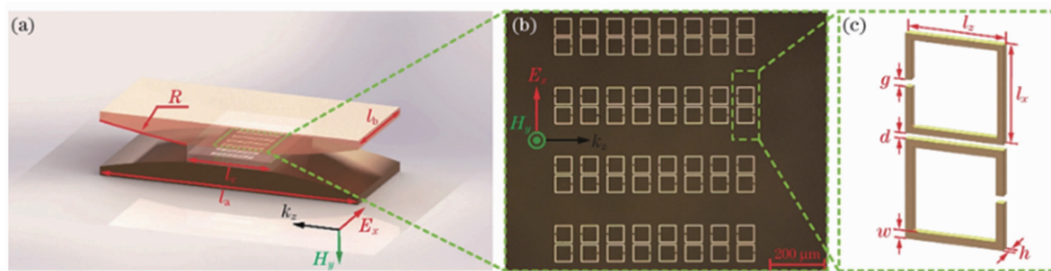


图 11 平行平板-超表面结构图<sup>[40]</sup>: (a)平行平板波导-超表面结构; (b)超表面布局; (c)微结构显微放大图

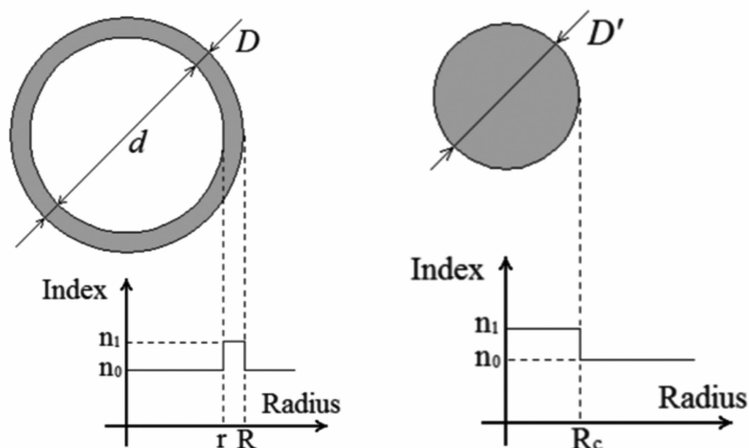


图 12 环形聚合物波导截面<sup>[42]</sup>: (a)环形空芯聚合物波导截面; (b)聚合物光纤横截面

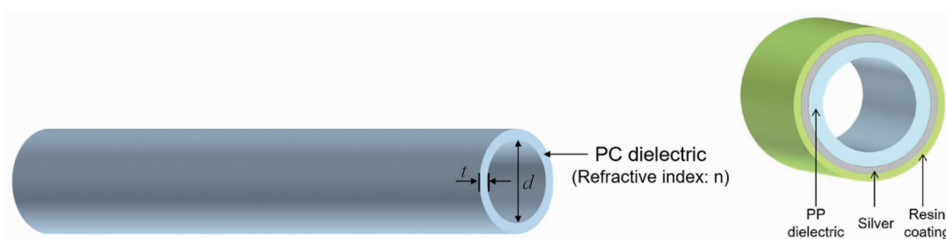


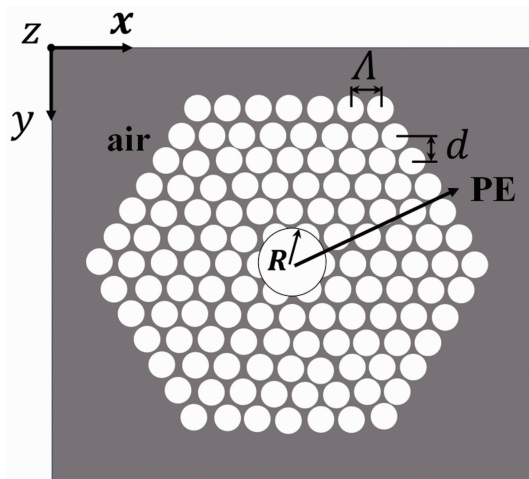
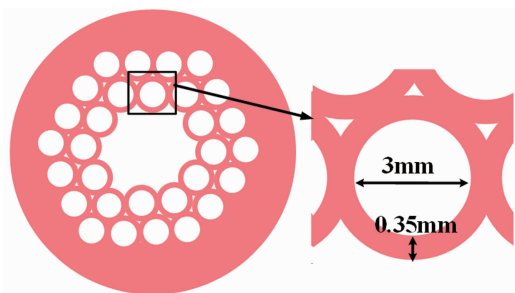
图 13 反谐振介质空芯波导<sup>[12]</sup>

### 2.2.1 低损耗

光子晶体是一种介电常数在空间上呈周期性分布的人工新材料,其概念最早由 John S<sup>[46]</sup>及 Yablonovitch E<sup>[47]</sup>在 1987 年提出。由于其特殊的结构以及导光机制,光子晶体具有人为可控的光学特性,在太赫兹波传输领域被广泛应用<sup>[48]</sup>。光子晶体波导的弯曲损耗小、非线性较强,有利于大规模的太赫兹系统集成。

2008 年,胡婕等<sup>[49]</sup>提出一种包层为硅介质的新型光子晶体太赫兹波导,内部是由聚乙烯材料组成的空气孔,按三角形格子周期排列,如图 14 所示。他们采用平面波法 (Plane Wave Method, PWM) 研究空气填充

率变化对光子带隙 (Photonic Band Gap, PBG) 结构的影响,并采用频域有限差分法 (Finite Difference Frequency Domain, FDFD) 计算不同参数太赫兹波导的传输损耗。结果表明,较高填充率、较大孔间距以及较多周期结构层数的光子晶体波导的最低传输损耗仅为 1.5 dB/km。当空气孔的形状和尺寸发生变化时,其传输损耗也会受到影响。2009 年,陈海滨<sup>[50]</sup>通过在聚合物光子晶体波导中引入椭圆形空气孔,降低了太赫兹波导的传输损耗。这种太赫兹波导可通过改变空气孔的尺寸及排布方式调整包层及芯层折射率,进而使其在设计上具有较高的灵活性。

图 14 光子晶体波导结构<sup>[49]</sup>图 15 低损耗空心光子晶体太赫兹波导模型截面<sup>[52]</sup>

当光子晶体中存在缺陷时,能够影响波导的传输特性。2014 年,潘武等<sup>[52]</sup>在光子晶体慢波导中引入线缺陷,形成矩形孔缺陷。他们分析了缺陷对带隙结构、群速度、传播模式的影响。最终当频率为 338 GHz 时,在布里渊边界处实现  $c/1543$  ( $c=3 \times 10^8$  m/s) 的低群速度,证明矩形缺陷光子晶体太赫兹波导具有良好的慢波特性。2016 年, Yang J 等<sup>[53]</sup>基于 Kagome 光子晶体结构设计了一种低损耗空心太赫兹波导(见图 15)。该波导在 0.2~1.0 THz 范围内的平均功率传播损耗为  $0.02 \text{ cm}^{-1}$ 。与陈海滨等人的研究不同, Sen S 等<sup>[54]</sup>提出将一种芯部和包层都由圆形空气孔构成的圆形光子晶体光纤(Circular Photonic Crystal Fiber, C-PCF)作为太赫兹波导(见图 16)。当工作频率为 1 THz 时,吸收损耗与有效模场面积分别为  $0.04 \text{ cm}^{-1}$  和  $2.80 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ 。

2019 年, Paul B K 等<sup>[54]</sup>对包层材料为环烯烃共聚物的光子晶体光纤(Quasi Photonic

Crystal Fiber, Q-PCF)进行了研究(见图 17)。当工作频率为 4.1 THz 时,有效损耗为  $0.038 \text{ cm}^{-1}$ 。在该频率下,体积吸收损耗降低了 81%。2023 年, Rahman M H 等<sup>[55]</sup>利用 Comsol 软件模拟了具有六边形包层和旋转六椭圆形状芯的光子晶体光纤。结果表明,最低的有效材料损耗为  $0.00689 \text{ cm}^{-1}$ 、核心功率分数为 82%、限制损耗为  $3.45 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-1}$ ,模场面积仅为  $3.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。该结构的太赫兹波导将会在太赫兹通信领域得到应用。

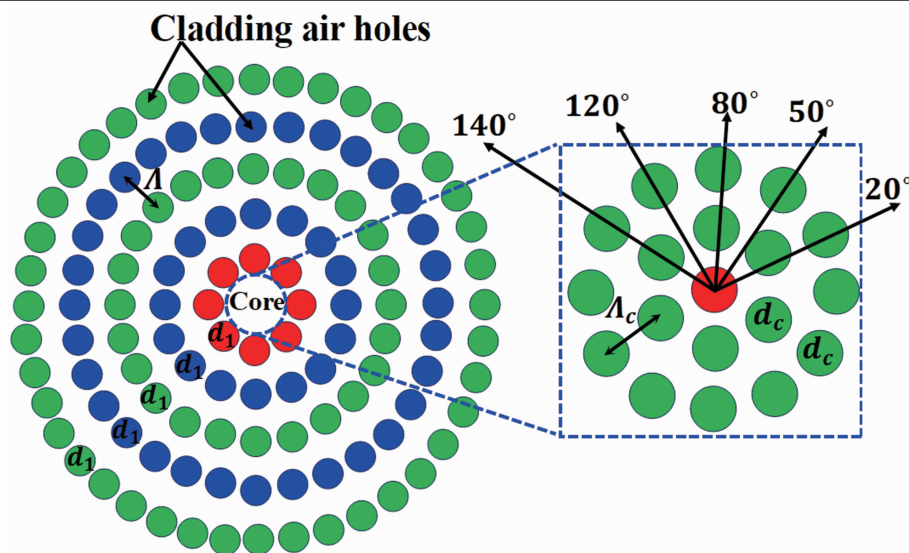
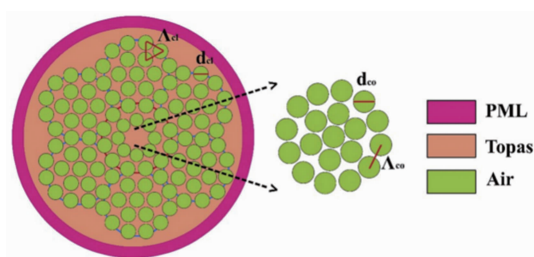
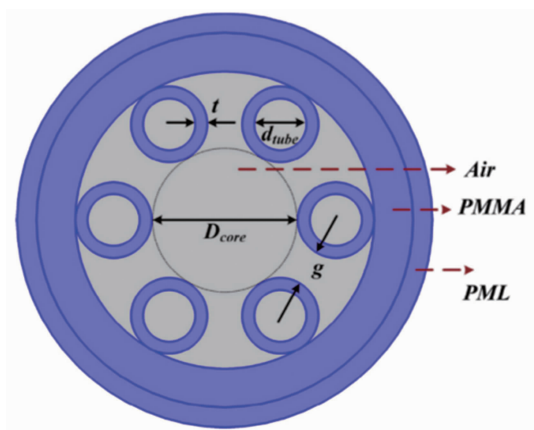
太赫兹光子晶体波导的优势是设计自由度高,易实现单模传输,传输损耗低。但是目前太赫兹光子晶体波导的加工工艺复杂,因此现在的太赫兹光子晶体波导研究多以仿真为主<sup>[56-58]</sup>。

## 2.2.2 宽频带

基于光子带隙<sup>[59]</sup>和反谐振原理<sup>[60-61]</sup>的空芯波导是近年来的主流研究方向。与光子带隙空芯波导相比,反谐振空芯波导具有传输带宽更宽的优势<sup>[62]</sup>。

2019 年, Yan D X<sup>[63]</sup>设计了图 18 所示的聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)负曲率新型太赫兹波导。当六管光纤的相邻包层管间存在最佳间隙时,可使约束损耗降低 3.5 倍;当管壁厚度为  $40 \mu\text{m}$ 、间隙范围为  $357 \sim 416.5 \mu\text{m}$  时,约束损耗为  $0.08 \text{ dB/cm}$ ,传输带宽为 700 GHz,功率比高达 99%。

2021 年,杨帅<sup>[64]</sup>提出了一种五角星形空芯反谐振 THz 波导(在 0.848 THz 频率处的最低损耗为  $0.041 \text{ cm}^{-1}$ ),并在以 5 个三角形作为包层结构的基础上,研制出一种双五边形嵌套空芯反谐振 THz 波导(见图 19)。结果表明,在 0.995 THz 处的最低损耗为  $0.011 \text{ cm}^{-1}$ ,在 0.2~1 THz 的范围内的平均传输损耗为  $0.07 \text{ cm}^{-1}$ 。2022 年,惠战强等<sup>[65]</sup>设计了一种以环烯烃共聚物(Cyclic Olefin Copolymer, COC)为基底的超低损耗高双折射空芯反谐振太赫兹波导。该光纤的包层由 2 组(共 6 个)无节点嵌套管组成。此波导在 0.8~1.35 THz 范围内的总

图 16 圆形光子晶体太赫兹波导横截面及核心区域结构<sup>[53]</sup>图 17 Q-PC 包层与芯区的截面图<sup>[54]</sup>图 18 PMMA 负曲率波导截面<sup>[63]</sup>

传输损耗小于 0.1 dB/m, 双折射值大于  $2.12 \times 10^{-5}$ , 色散为  $\pm 0.027$  ps/THz/cm; 在 1.12 THz 处, 最低总传输损耗仅为  $0.543 \times 10^{-2}$  dB/m, 双折射值为  $2.06 \times 10^{-4}$ 。同时, 该波导具有良好的弯曲性能。当弯曲半径超过 19 cm 时, 弯曲损耗小于 0.1 dB/m, 与文献[12]相比有明显提升。2023 年, Dong Z Y 等<sup>[66]</sup>在

空气芯中构造周期性拱桥支撑结构, 形成图 20 所示的反谐振波导。通过样品测试发现, 0.84~0.887 THz 波段的太赫兹波传输损耗仅为 0.245 dB/m, 与传统的多支撑结构太赫兹布拉格波导的传输损耗相当。

基于反谐振机理的太赫兹空芯波导通常具有较宽的传输带宽。与光子晶体空芯波导不同的是, 反谐振波导大多采用 3D 打印制备, 加工工艺较为成熟, 但加工材料的吸收会影响传输损耗<sup>[56-68]</sup>。

### 2.3 微结构波导

微结构能够明显改善太赫兹波导的传输特性。2009 年, Atsushi I 等<sup>[69]</sup>利用负磁导率超材料设计一种基于磁等离子体激元的亚波长太赫兹波导, 在直波导、90°弯曲波导和分束器中能够将太赫兹波约束在衍射极限以下。2011 年, Gagan K 等<sup>[70]</sup>设计了一种基于一维周期间隔盲孔阵列的平面太赫兹波导(结构与几何参数见图 21)。其中, 矩形孔的长度为  $S$ , 深度为  $H$ 。当盲孔深度增加时, 对传输模式的约束程度增加。当盲孔深度为  $6.35 \mu\text{m}$  时, 可将导模严格限制在 12 cm 的波导中。

与单光栅相比, 双光栅能约束保形表面等离子体(Conformal Surface Plasmons, CSPs), 且对 CSPs 的约束能力更强, 可以极大地降低辐射损耗, 提高传输效率。2015 年, Yang B J

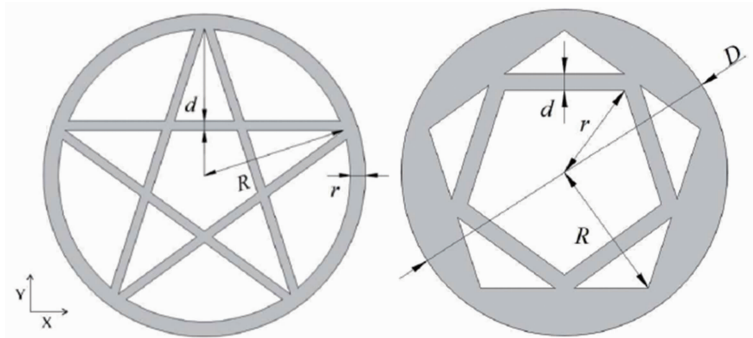


图 19 太赫兹空芯波导结构图<sup>[64]</sup>: (a)五角星形波导横截面; (b)双五边形波导横截面

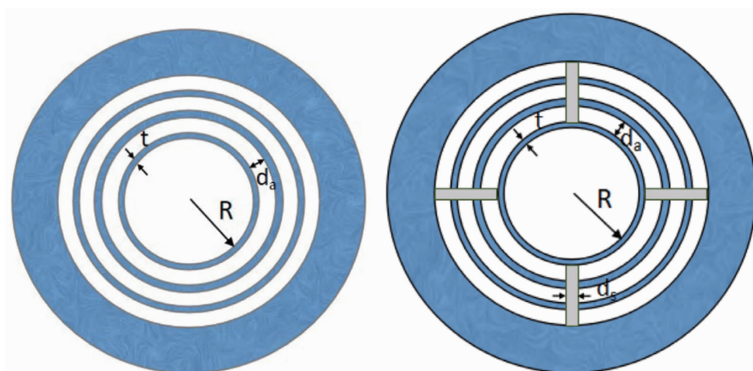


图 20 反谐振空心波导的横截面<sup>[66]</sup>: (a)无支撑空芯波导; (b)具有支撑桥的空芯波导

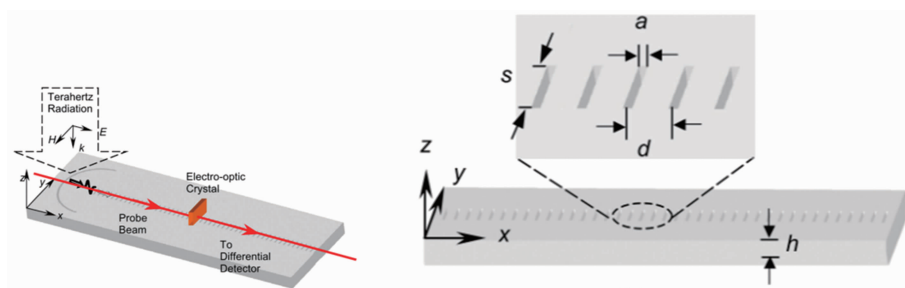


图 21 基于周期间隔盲孔阵列的太赫兹波导<sup>[70]</sup>: (a)波导结构图; (b)几何参数

等<sup>[71]</sup>设计了一种带有矩形槽、哑铃槽、弯曲槽的等离子体太赫兹波导(见图 22)。与传统矩形槽波导相比,该慢波系统的尺寸减小了 43.2%。结果表明,基于弯曲槽的 CSPs 波导将在太赫兹传输与处理系统中被广泛应用。Wang Z H 等<sup>[72]</sup>提出一种新的基于风车形单元的欺骗表面等离子体激元(Spoof Surface Plasmon Polariton, SSPP)太赫兹波导(见图 23)。与传统的梳形和 T 形 SSPP 波导单元相比,该波导在基本 SSPP 模式下表现出较低的渐近频率和较强的场约束特性。从 0 THz 到 5.68 THz,整个波导具有良好的传输性能( $S_{11} <$

$-10$  dB,  $S_{21} > -1$  dB),并具有较强的带外抑制响应( $S_{21} < -80$  dB)。Kazuisao T 等<sup>[73]</sup>追求极低的传输损耗,研究了图 24 所示的片上波导。在 0.326~0.331 THz 频段,传输损耗小于 0.1 dB/cm;在 0.323~0.331 THz 频段,弯曲损耗小于 0.2 dB/cm。

2020 年,许艳霞等<sup>[74]</sup>设计了带隙宽度为 0.2262 THz、0.2728 THz 和 0.3166 THz 的直线型、直角型和 T 型二氧化钛太赫兹光子晶体波导。图 25 所示为直线型  $\text{TiO}_2$  光子晶体波导仿真模型。研究结果表明,直线路径以及直角路径的二维光子晶体波导比传统波导具有更

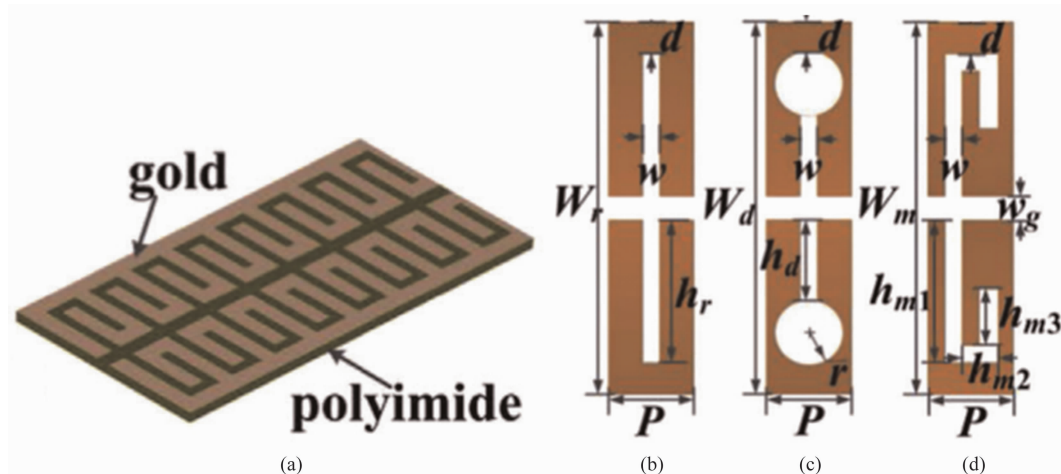


图 22 弯曲槽的双光栅等离子体波导<sup>[71]</sup>: (a)弯曲槽的欺骗等离子体波导结构; (b)矩形槽; (c)哑铃槽; (d)弯曲槽

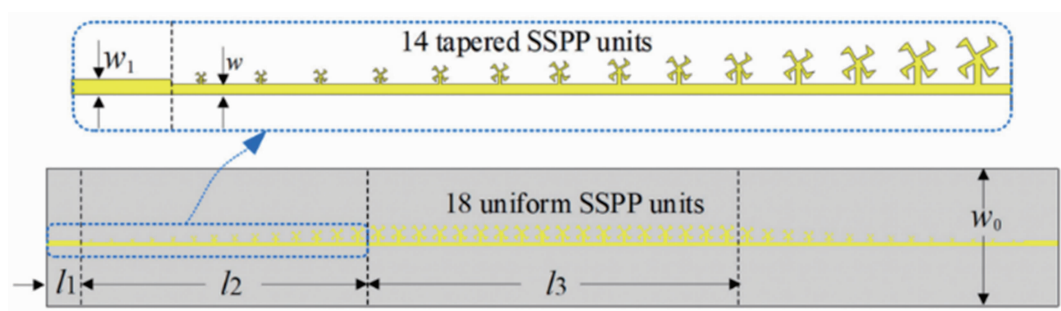


图 23 风车转换形 SSPP 波导<sup>[73]</sup>

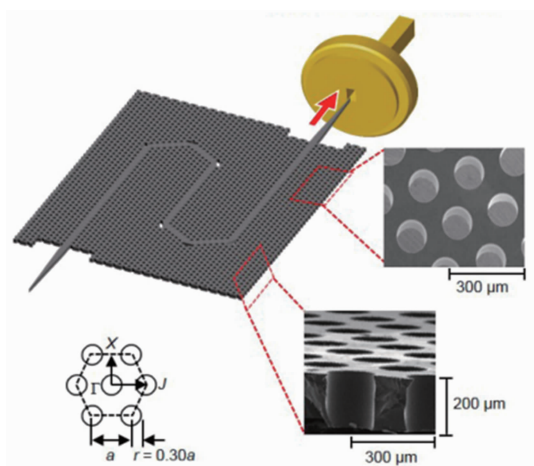


图 24 PC 波导系统<sup>[73]</sup>

高的传输效率。2023 年, 贺雪晴等<sup>[75]</sup>研究图 26 所示的石墨烯-V 型槽混杂等离激元波导。通过增加凹槽尺寸和减小石墨烯化学势可以将有效模场面积降低 2 个数量级, 使品质因子提高 34.5%~88.5%。当 2 个石墨烯-V 型槽混杂等离激元波导并排放置时, 通过优化几何尺

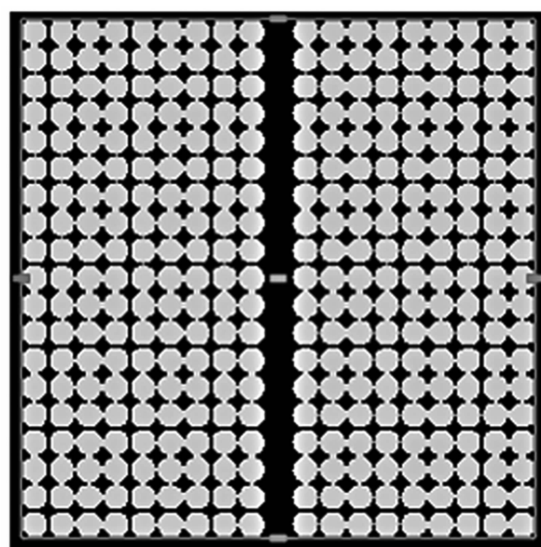
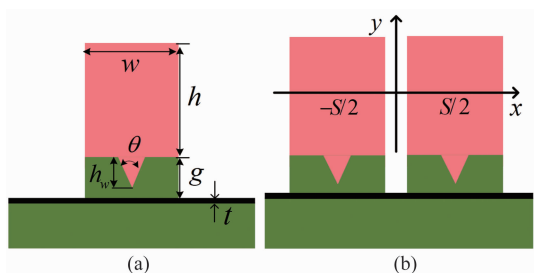


图 25 直线型 TiO<sub>2</sub> 光子晶体波导模型<sup>[74]</sup>

寸和调节石墨烯化学势, 可以使波导之间无串扰最小距离减至 2 μm。该研究为动态可调的太赫兹亚波长波导的研制和性能优化提供了理论参考。

表 1 不同类型太赫兹波导的优缺点对比

| 太赫兹波导类别 | 优势                           | 不足                                |
|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| 裸金属线波导  | 色散低、损耗低、灵活度高                 | 抗干扰性差                             |
| 空芯波导    | 损耗低、弯曲损耗低, 传输性能优于固体实芯光纤, 色散低 | 制备工艺水平有待提升, 内壁平整性以及均匀性较难保证        |
| 平板波导    | 结构简单、衰减小、传输损耗低               | 辐射损耗较大(可能会影响系统的正常工作), 仅适用于短距离信号传输 |
| 光子晶体波导  | 损耗低、色散低、体积小, 适用于集成太赫兹波导器件    | 成本高, 制备工艺复杂, 较难大规模生产              |
| 等离子体波导  | 模场约束能力强, 弯曲损耗低               | 基底材料较为单一, 制备技术有待提高                |

图 26 石墨烯-V 型槽混杂等离激元波导<sup>[75]</sup>:

(a) 单个 V 型槽; (b) 2 个 V 型槽

太赫兹波导能够有效地限制传输信号的色散, 有望实现远距离、低损耗的传输, 在太赫兹领域具有广阔的研究前景。经过历年众多研究者的探索, 发展出各种各样的太赫兹波导。但这些太赫兹波导也存在着抗干扰性、弯曲性差等各种各样的问题。不同类型的太赫兹波导特性对比如表 1 所示。

### 3 总结与展望

随着太赫兹科学的发展, 追求高效的太赫兹传输波导是当前十分热门的研究方向, 研究人员从结构、材料等方面开展深入研究, 进而形成高效的太赫兹传输系统。为了提高波导的传输性能, 研究者朝着低损耗、小模场、宽频带、灵活性好的方向不断前进。目前关于太赫兹波导的研究还可以针对以下三个方面进行深入研究:

(1) 现有常用的太赫兹波导材料多为金属材料与聚合物, 具有加工便捷、价格低廉等优势。但仍然有一些材料在太赫兹波段所表现出的独特性质以及太赫兹波对其产生的影响并不十分明确, 需作进一步探索并开展深入的理论

分析研究。

(2) 当前研究的太赫兹波导较难同时具备损耗低、频带宽、弯曲性好三个性能, 通过结构优化和材料改进有望实现低损耗、宽频带的太赫兹传输。

(3) 在太赫兹波导测试实验中, 太赫兹波与传输波导的耦合多是通过自由空间直接耦合到波导中。该方法存在操作难度高、耦合效率低的问题, 因此对太赫兹波导耦合器的研究也至关重要。

太赫兹技术的发展日新月异, 提高太赫兹波导的传输性能, 研究更加灵活的太赫兹波传输器件, 能够加快太赫兹系统的集成化与小型化进程, 推动太赫兹技术在无损检测、智能通信等各个领域的发展。

### 参考文献

- [1] 赵航, 赵跃进, 张亮亮, 等. 强场宽带太赫兹波辐射的研究进展 [J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1532001.
- [2] Nazeer U, Madhavi T, Kaleem F, et al. Intelligent Deep Learning-aided Future Beam and Proactive Handoff Prediction Model in Unmanned Aerial Vehicle-assisted Anti-jamming Terahertz Communication System [J]. International Journal of Communication Systems, 2023, 36(13): e5504.
- [3] Shiva M, Andreas K, Michael L K, et al. Extreme Ultra-Wideband Optoelectronic Frequency-Modulated Continuous-Wave Terahertz Radar [J]. Laser Photonics Reviews, 2023, 17(11): 2300396.

- [4] 孔令雄, 李跃华, 陈秀琴. 太赫兹雷达杂波背景中小目标检测研究 [J]. *微波学报*, 2023, **39** (S1): 248–252.
- [5] Nie H, Hao F, Wang L, et al. Application of Terahertz Nondestructive Testing Technology in the Detection of Polyethylene Pipe Defects [J]. *ACS Omega*, 2023, **8** (30): 27323–27332.
- [6] Xi Y, Tan W, Lei Z, et al. CNN with Spatio-temporal Information for Fast Suspicious Object Detection and Recognition in THz Security Images [J]. *Signal Processing*, 2019, **160**: 202–214.
- [7] 王与桦, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续太赫兹波生物组织成像技术研究 [J]. *光学学报*, 2021, **41**(7): 74–81.
- [8] Wang J, Sato K, Yoshida Y, et al. A Versatile Terahertz Chemical Microscope and Its Application for the Detection of Histamine [J]. *Photonics*, 2022, **9**(1): 26.
- [9] Gunbina A, Tarasov M, Lemzyakov S, et al. Arrays of Electrically Small Antennas with SINIS Detectors for SubTHz Astronomy and Atmosphere Propagation Research [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, **2015** (1): 012054.
- [10] 王与桦, 李海滨, 葛梅兰, 等. 太赫兹成像技术及其应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(18): 46–61.
- [11] 武丽敏. 连续太赫兹成像技术及其在肿瘤检测中的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [12] 尤柱, 秦华, 孙建东, 等. 一种波导耦合的 Al-GaN/GaN HEMT 太赫兹探测器 [J]. *微波学报*, 2023, **39**(4): 1–5.
- [13] 谢国兴. 基于聚合物管的低损耗太赫兹空芯波导的研制 [D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [14] Wang K L, Mittleman D. Metal Wires for Terahertz Wave Guiding [J]. *Nature*, 2004, **432** (7015): 376–379.
- [15] Wang K L, Mittleman D. Guided Propagation of Terahertz Pulses on Metal Wires [J]. *JOSA B*, 2005, **22**(9): 2001–2008.
- [16] Wang K L, Mittleman D. Dispersionless Terahertz Waveguides [C]. Montreal: 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2006.
- [17] Jeon T I, Zhang J Q, Grischkowsky D. THz Sommerfeld Wave Propagation on a Single Metal Wire [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(16): 161904.
- [18] Zhu Z, Natsuki K, Kuniaki K, et al. Efficient Coupling of Propagating Broadband Terahertz Radial Beams to Metal Wires [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 10642–10650.
- [19] 李爽, 高华, 舒秀英, 等. 单椭圆太赫兹金属线表面等离激元的特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(7): 071601.
- [20] 董章华, 赵佳宇. 太赫兹金属弹簧波导的研究 [J]. *光学仪器*, 2022, **44**(1): 29–34.
- [21] Petrov N I. Dispersive Propagation of Terahertz Pulses in a Plasmonic Fiber [J]. *Fibers*, 2023, **11**(7): 62.
- [22] Maier S A, Andrews S R, Martin M L, et al. Terahertz Surface Plasmon Polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires [J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(17): 176805.
- [23] 张许丰. 基于金属或介质薄膜上周期结构的太赫兹波的传输 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [24] Zhou Z, Gan Z L, Cao L. Enhanced Polarization Conversion and Giant Faraday Rotation in Patterned Terahertz Graphene Metamaterials with Combined Electrical and Magnetic Tuning [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023.
- [25] Yang D R, Cheng Y Z, Chen F, et al. Efficiency Tunable Broadband Terahertz Graphene Metasurface for Circular Polarization Anomalous Reflection and Plane Focusing Effect [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, **131**: 109605.
- [26] Mikhail Y M, Vyacheslav V P. Concept of Terahertz Waveguide Plasmon Amplifier Based on a Metal Groove with Active Graphene [J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1): 22209.
- [27] Huang C C. Terahertz Waveguides by Coupling

- Plasmon Polaritons of Cylindrical Metal Wires and a Graphene-Embedded Slot Waveguide [J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, **4**(3): 2200287.
- [28] 陆东梅, 姚建铨, 郑义, 等. 太赫兹波在金属镀层空芯圆波导中的传输特性 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(12): 1287-1289.
- [29] Bradley B, James A H, Odualeg M. Low-loss Modes in Hollow Metallic Terahertz Waveguides with Dielectric Coatings [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(18): 181104.
- [30] 李怡卿, 谭智勇, 曹俊诚, 等. 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.
- [31] Marko G, Rene B, Marco R. Comparative Terahertz Study of Rectangular Metal Waveguides with and Without a Ridge [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, **36**(4): 327-334.
- [32] Xing L J, Cao Q, Zhang H F, et al. Terahertz Multichannel Notch Filter Consisting of Four T Shaped Cavities Based on Parallel Plate Waveguide [J]. *AIP Advances*, 2018, **8**(12): 125306.
- [33] 陈颖, 许扬眉, 高新贝, 等. 含矩形腔的 MIM 波导耦合 T 型腔结构 Fano 共振传感特性研究 [J]. *中国激光*, 2019, **46**(1): 0113001.
- [34] 肖功利, 窦婉, 杨宏艳, 等. 基于非对称圆形谐振腔金属-介质-金属波导结构的带阻滤波器 [J]. *光学学报*, 2019, **39**(5): 0513001.
- [35] Hui Z, Rajind M, Daniel M M. Characterization of the Terahertz Near-field Output of Parallel-plate Waveguides [J]. *Josa B*, 2011, **28**(3): 558-566.
- [36] Gerhard M, Theuer M, Beigang R. Coupling into Tapered Metal Parallel Plate Waveguides Using a Focused Terahertz Beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(4): 041109.
- [37] 王凯. 太赫兹金属波导的传输与耦合 [D]. 上海: 上海大学, 2018.
- [38] 吴琼, 张惠芳, 曹清, 等. 太赫兹平行平板金属波导 T 型腔中消逝模共振频率的理论分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(15): 152301.
- [39] 李哲, 滕达, 白丽华, 等. 太赫兹金属平行平板波导 TE1 模式有效折射率的近似表达式 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(19): 192302.
- [40] 吴经纬, 牛力, 王庆伟, 等. 太赫兹平行平板波导中等离子诱导透明效应的调控 [J]. *中国激光*, 2021, **48**(19): 1914005.
- [41] Ma J, Liu H, Zhang S Y, et al. Antisymmetric Localization of Terahertz Defect Modes in a Planar Waveguide with Undulated Walls [J]. *Physica Scripta*, 2022, **98**(1): 015515.
- [42] Daru C, Haibin C. A Novel Low-loss Terahertz Waveguide: Polymer Tube [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(4): 3762-3767.
- [43] Li H, Atakaramians S, Kuhlmeier B T. Low Loss and Single Mode Metal Dielectric Hybrid-clad Waveguides for Terahertz Radiation [C]. *SPIE*, 2015, **9668**: 19-26.
- [44] 梅森. 悬浮多孔芯太赫兹光纤的传输与模场调控特性研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2022.
- [45] 惠战强, 张甜甜, 韩冬冬, 等. 2~5 THz 宽频段多孔纤芯高双折射太赫兹光子晶体光纤 [J]. *红外与毫米波学报*, 2021, **40**(5): 616-626.
- [46] John S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [47] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-state Physics and Electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2059-2062.
- [48] Mustafa Z, Islam R M, Islam A M, et al. Topas-based Octa-circular Cladding and Rectangular Porous Core Photonic Crystal Fibre for Terahertz Waveguide [J]. *IET Optoelectronics*, 2023, **17**(5): 202-213.
- [49] 胡婕, 陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 567-572.
- [50] 陈海滨. 光子晶体波导型器件及其在太赫兹技术中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [51] 潘武, 徐政珂, 张红林, 等. 矩形缺陷光子晶

- 体太赫兹波导的慢波特性 [J]. *激光与红外*, 2014, **44**(11): 1263–1267.
- [52] Yang J, Zhao J Y, Gong C, et al. 3D Printed Low-loss THz Waveguide Based on Kagome Photonic Crystal Structure [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(20): 22454–22460.
- [53] Sen S, Islam M S, Paul B K, et al. Ultra-low Loss with Single Mode Polymer-based Photonic Crystal Fiber for THz Waveguide [J]. *Journal of Optical Communications*, 2019, **40**(4): 411–417.
- [54] Paul B K, Ahmed K. Analysis of Terahertz Waveguide Properties of Q-PCF Based on FEM Scheme [J]. *Optical Materials*, 2020, **100**: 109634.
- [55] Rahman M H, Rana M M, Hossain M S, et al. Analytical Approach for Modeling and Simulation of Photonic Crystal Fiber Based on Low Effective Material Loss [J]. *SN Applied Sciences*, 2023, **5**(3): 71.
- [56] 赵本磊, 裴鑫, 蒋佳辰, 等. 柔性介质金属膜太赫兹波导的传输特性与应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(18): 108–118.
- [57] Habib M A, Reza M S, Abdulrazak L F, et al. Extremely High Birefringent and Low Loss Microstructure Analysis [J]. *Optics Optical Waveguide: Design and Communications*, 2019, **446**: 93–99.
- [58] Hossain M S, Kamruzzaman M M, Sen S, et al. Hexahedron Core with Sensor Based Photonic Crystal Fiber: an Approach of Design and Performance Analysis [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2021, **32**: 100426.
- [59] Ahmed K, Chowdhury S, Paul B K, et al. Ultrahigh Birefringence, Ultralow Material Loss Porous Coresingle-mode Fiber for Terahertz Wave Guidance [J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(12): 3477–3483.
- [60] Li S B, Wang Z J, Qi Z G, et al. A 0.1 THz Low-loss 3D Printed Hollow Waveguide [J]. *Optik*, 2019, **176**: 611–616.
- [61] Yang S, Sheng X, Zhao G, et al. Anti-deformation Low Loss Double Pentagon Nested Terahertz Hollow Core Fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, **56**: 102199.
- [62] 章玉卓, 肖庆生. 基于包层管正曲率调控的新型太赫兹反谐振光纤 [J]. *光通信技术*, 2023, **47**(6): 21–28.
- [63] Yan D X, Li J S. Design and Analysis of the Influence of Cladding Tubes on Novel THz Waveguide [J]. *Optik*, 2019, **180**: 824–831.
- [64] 杨帅. 新型空芯反谐振 THz 波导研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [65] 惠战强, 杨雪, 韩冬冬, 等. 超低损耗高双折射空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(3): 563–572.
- [66] Dong Z Y, Zhang X, Bai T T, et al. Research on Anti-resonant Terahertz Hollow Waveguides with Cascaded Bridges [J]. *Optics Communications*, 2023, **546**: 129747.
- [67] Xu G F, Skorobogatiy M. Continuous Fabrication of Polarization Maintaining Fibers via an Annealing Improved Infinity Additive Manufacturing Technique for THz Communications [J]. *Optics Express*, 2023, **31**(8): 1289412911.
- [68] Yang S, Sheng X Z, Zhao G Z, et al. Novel Pentagon THz Hollow Core Anti-resonant Fiber Using a 3D Printer [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, **40**(7): 720–730.
- [69] Atsushi I, Zhang S, Dentcho A G, et al. Deep Subwavelength Terahertz Waveguides Using Gap Magnetic Plasmon [J]. *Physical Review Letters*, 2009, **102**(4): 043904.
- [70] Gagan K, Shashank P, Albert C, et al. Planar Plasmonic Terahertz Waveguides Based on Periodically Corrugated Metal Films [J]. *New Journal of Physics*, 2011, **13**(3): 033024.
- [71] Yang B J, Zhou Y J. Compact Broadband Slow Wave System Based on Spoof Plasmonic THz Waveguide with Meander Grooves [J]. *Optics Communications*, 2015, **356**: 336–342.

(下转第 34 页)

像素级数字化读出电路技术极大发挥了长波器件光电流大的优势,为长波探测器的广泛应用提供可能,为集成数字信号处理提供实施途径,同时也为后续高帧频数字化读出电路发展提供一种方案。

### 参考文献

- [1] Kayahan H, Yazici M, Omer C, et al. A new digital readout integrated circuit (DROIC) with pixel parallel A/D conversion and reduced quantization noise [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **63**(2): 125–132.
- [2] 陈楠, 张济清, 毛文彪, 等. 大动态范围、高灵敏度红外焦平面数字像元读出电路技术 [J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(3): 21–31.
- [3] 李敏增, 李福乐, 张春. 采用电荷复位技术的像素级 ADC [J]. *半导体技术*, 2014, **39**(9): 656–660.
- [4] 于艳, 李敬国, 刘泽巍. 红外焦平面像素级数字化技术最新进展 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(8): 951–957.
- [5] 叶联华, 刘煦, 李云铎, 等. 大规模高帧频读出电路高速数据传输模型研究 [J]. *红外技术*, 2022, **44**(1): 66–72.
- [6] 蒋冬初. 高速数字电路的信号传输及其噪声抑制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- (上接第 15 页)
- [72] Wang Z H, Feng H, Yang X F, et al. A Windmill-Shaped SSPP Waveguide for High-Efficiency Microwave and Terahertz Propagation [J]. *Electronics*, 2022, **11**(9): 1293.
- [73] Kazuisao T, Masayuki F, Tadao N. Extremely Low-loss Terahertz Waveguide Based on Silicon Photonic-crystal Slab [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(25): 31977–31990.
- [74] 许艳霞, 李高芳, 刘荣青, 等. 二氧化钛光子晶体波导的太赫兹波传输特性 [J]. *光电子·激光*, 2020, **31**(9): 965–972.
- [75] 贺雪晴, 翟远博, 李鹏飞. 深亚波长束缚的石墨烯混杂等离激元波导 [J]. *光学学报*, 2023, **43**(10): 1013001.