

太赫兹超材料及其应用综述*

朱海亮¹, 王 开¹, 邱昱玮¹, 刘甘雨¹, 牟进超²

(1 西北工业大学电子信息学院 西安 710129

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 在太赫兹波段高效响应的天然材料较为有限, 制约了太赫兹技术的应用和发展。超材料是近年来兴起的人工合成电磁材料, 可以通过其晶格单元形状、结构以及关键尺寸的设计实现人工电磁材料宏观电磁响应的调节, 在太赫兹功能器件研制以及太赫兹波有效调控方面具有巨大潜力。总结了太赫兹超材料的最新研究成果及遇到的问题, 概括了近十年来太赫兹超材料吸波体、调制器、天线等方面的研究进展, 对太赫兹超材料的发展方向及未来热点进行了展望。

关键词: 太赫兹; 超材料; 吸波体; 调制器

中图分类号: TN604

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2021)04-0002-18

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210526002

引用格式: 朱海亮, 王开, 邱昱玮, 等. 太赫兹超材料及其应用综述[J/OL]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 18-35[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210526002>.

A review of terahertz metamaterials and applications

ZHU Hailiang¹, WANG Kai¹, QIU Yuwei¹, LIU Ganyu¹, MOU Jinchao²

(1. School of Electronics and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: With limited natural materials with high-efficiency response in terahertz band are not very common, there are many difficulties in developing terahertz functional devices and manipulating terahertz waves. As one of artificial synthetic electromagnetic materials, metamaterials can achieve anticipative frequency response by designing the shape, structure and size of the metamaterial unit cell, resulting in great potential in terahertz wave manipulation. This paper mainly summarizes the latest research achievements and challenges in terahertz metamaterials area, and the research progress of terahertz absorber and modulator enabled by metamaterials are also presented. Based on the above analysis, technical development trend and future hotspots in terahertz metamaterial area are prospected.

Key words: Terahertz; Metamaterial; Absorber; Modulator

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210526002

Citation: ZHU Hailiang, WANG Kai, QIU Yuwei, et al. A review of terahertz metamaterials and applications[J/OL]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 18-35[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210526002>.

引 言

太赫兹波段是指频率为0.1 THz~10 THz的频段, 如图1所示。由于太赫兹波具有单光子能量低、穿透性好、波长短、谱信息丰富等特征, 因此, 太赫兹技术在高速宽带通信、高分辨率分子光谱和危险化学品物质的识别、监视和安全成像、医疗应用、药物和气体检测、安全筛选、食品控制、三维断层扫描等领域具有广泛的应用空间^[1-6]。

在太赫兹频段, 大部分天然材料的响应效率较低, 导致太赫兹功能器件研制以及太赫兹波有效调控

*基金项目: 北京市科技新星计划 (Z201100006820130)

收稿日期: 2021-05-26 收修改稿日期: 2021-06-03

遇到很多困难,制约了太赫兹技术的应用和发展。作为近年来兴起的人工合成电磁材料,超材料能够更为灵活地在太赫兹波段获得最佳响应率,进而提升太赫兹功能器件性能以及太赫兹波调控效率。超材料是指人造的周期性复合物,通常由按一定规律排布的亚波长散射体或者通孔构成。通过设计超材料晶格单元的形状和尺寸,可以调节晶格单元间的电磁耦合,进而实现材料宏观电磁特性的调节。由于超材料中的晶格单元在研制过程中的每个步骤和阶段都由人工设计并生产,因此,可以通过设计和调整超材料单元的尺寸/材料参数来调整单元的电磁耦合和响应,从而调控太赫兹波在材料中的传播特性^[7,8]。

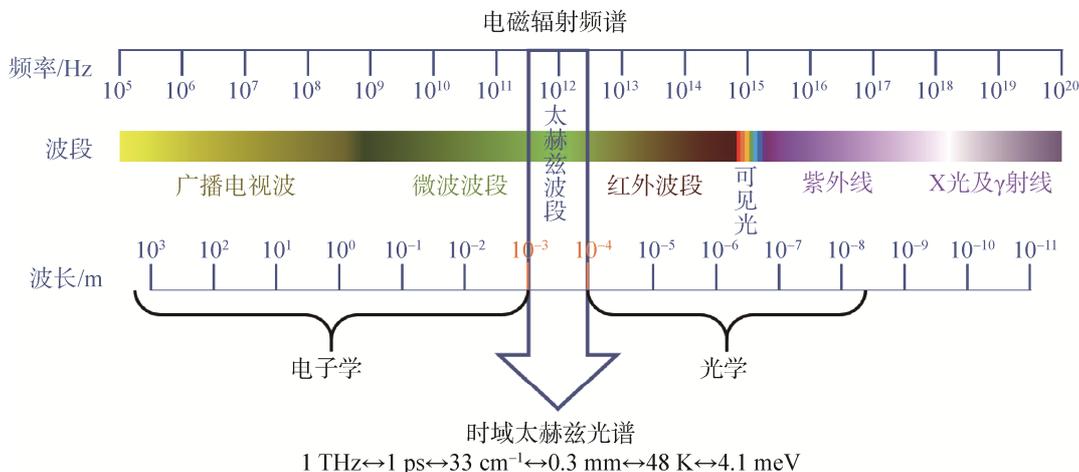


图1 太赫兹波段在电磁波谱中所处的位置^[1]

Fig. 1 Terahertz wave in electromagnetic spectrum

近年来,超材料在太赫兹吸波体、调制器、天线领域的应用受到了国内外学者的重视,并得到了一定的发展,基本实现了对太赫兹波的吸收、调制等功能。本文基于超材料独有的电磁调控特性,将超材料太赫兹功能器件的研究和制造分为吸波体、调制器、天线领域应用等方向。接下来,将分别对这些功能器件进行介绍,并总结近十年来领域内的最新研究进展及其应用。

1 基于超材料的太赫兹吸波体

吸波体用来吸收空间中某一频率的电磁波,应用于军事目标隐身、生物检测、太赫兹探测器及太赫兹成像系统等。超材料可被视为一种等效介质,其介电常数为 $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, ε_1 表示相速度, ε_2 表示损耗。通过改变 ε_2 来改变损耗,能够将超材料作为吸收频率可设计的理想吸收材料。

太赫兹超材料吸波体有多种分类方式:按照构成材料不同,可分为金属谐振型超材料^[9]吸波体与全介质超材料^[10]吸波体。金属谐振型超材料吸波体发展历程长、技术成熟、可选结构多,但在太赫兹波段面临着工艺难度大等缺点;全介质超材料吸波体是近几年的新兴研究领域,其制备工艺依赖于半导体工艺,制备精度高,且介质材料的生物惰性与化学稳定性也使其在生化领域具有广阔的应用前景。按照吸波体对入射波的极化敏感程度不同,可分为单极化吸波体与多极化吸波体^[11]。按照带宽不同,可分为窄带吸波体^[12,13]和宽带吸波体。按照吸波体的特征指标是否可以调节,太赫兹吸波体可以分为固定型太赫兹吸波体和可重构太赫兹吸波体。下文将对固定型太赫兹吸波体和可重构太赫兹吸波体的研究进展及其应用进行介绍。

1.1 固定型太赫兹超材料吸波体

固定型太赫兹超材料吸波体属于无源器件,其材料及尺寸参数确定后,吸波体的工作频率、吸收率以及极化敏感度等指标均可确定,由于其制作简单、性能稳定以及成本较低,因此,在实际工程应用中更为广泛。

固定型太赫兹超材料吸波体的技术途径基本类似,通常通过形状相似的晶格单元在空间中进行周

期排列, 实现对某个频段太赫兹波的吸收。因此, 下文主要从应用层面对固定型太赫兹超材料吸波体在军事目标隐身、生化检测、太赫兹探测器、太赫兹成像系统等领域的研究进展进行介绍^[14-16]。

1.1.1 应用于军事目标隐身的固定型太赫兹超材料吸波体

目标隐身在现代军事领域具有重要的意义: 在进攻端, 需要隐身功能来突破敌方防卫网络, 实现战术打击; 在防守端, 需要隐身技术来避免被敌方发现, 提高战场生存能力, 完成战术任务。GAO L 等人于 2014 年提出一种用于降低雷达散射截面 RCS 反射的宽带超材料吸波体^[17], 其超材料单元结构如图 2 (a) 所示, 可实现 0.8 THz~1.9 THz 范围内 RCS 小于 -10 dB。CHEN X 等人于 2018 年将窄带柔性吸波体应用于 RCS 缩减^[18], 如图 2 (b) 所示, 在 0.87 THz 处, 超材料表面的 RCS 相对于金属表面减小了 400 倍左右。

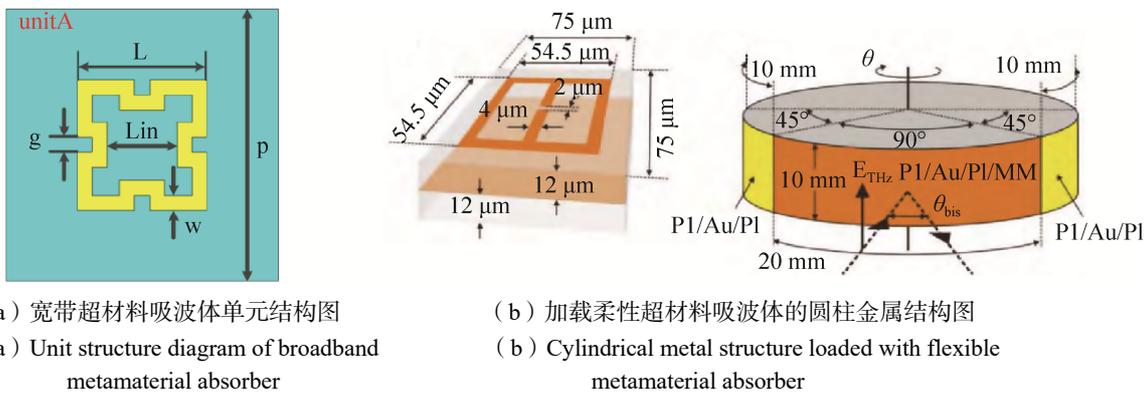


图 2 太赫兹超材料吸波体结构图
Fig. 2 THz metamaterial absorber structure diagram

1.1.2 应用于生化检测的固定型太赫兹超材料吸波体

在生化检测领域, 目前常用的物质检测技术, 如红外光谱检测、X 射线以及拉曼光谱等, 都有其不足之处^[19], 如检测信号较弱、易受外界干扰, 或辐射会对人体造成危害等^[20]。太赫兹波光子能量低, 在非极性物质中穿透能力强, 又对应于许多有机分子、生物大分子的振动和转动能级, 所以太赫兹光谱技术在材料科学、食品安全、生物医学等方面有着广泛的应用^[21-26]。2018 年, QIN B 等人利用超材料吸波体, 并结合时域光谱仪, 实现了对多菌灵的痕量检测, 检测精度达到 5 mg/L, 对比传统的壁球法提高了 10⁴ 倍^[27]。2020 年, LI D 等人利用超材料以及胰岛素的热诱变特性, 实现了 0.05 IU/μL 的胰岛素精确检测^[28]。2021 年, LI D 等人利用具有双吸收峰的超材料吸波体, 实现了对早期宫颈癌组织的检测^[29]。除此之外, 太赫兹超材料吸波体还可应用于抗体检测^[30,31]、病毒检测^[32]、维生素检测、微流体芯片^[33-35]等方面。

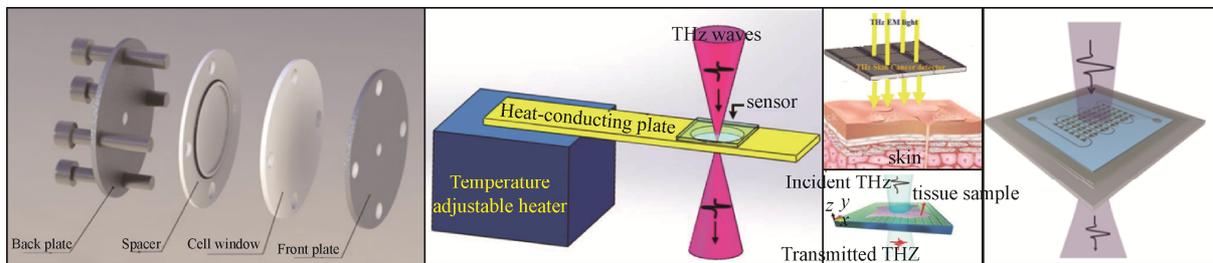


图 3 基于太赫兹超材料的各种生化检测器
Fig. 3 A variety of biochemical sensors based on terahertz metamaterial

1.1.3 应用于探测成像的固定型太赫兹超材料吸波体

利用太赫兹超材料吸波体的吸波发热特性, 可将其应用于太赫兹信号探测。目前, 采用太赫兹超材料吸波体的探测器大多基于测辐射热计的原理^[36-38], 通过直接读出吸波结构的温度上升, 反演吸波

结构所吸收的功率，从而得到被探测太赫兹波的强度。这种方法的读出精度较低，为提升读出精度，有学者对太赫兹探测器升温之后的信号转换进行了研究。ALVES F 等人于 2013 年提出了一种基于双层微悬臂梁与超材料吸波体的太赫兹探测器^[39]，单元结构如图 4 所示。吸波体吸收电磁能转化为热能，传递到由热膨胀系数相差很大的两种材料组成的双层微悬臂梁，带动吸波板位移。吸波板背面的金属背板对可见光进行反射，通过观测照射在探测器金属背板的可见光变化，即可得到太赫兹辐射强度的变化。该探测器单元在 3.8 THz 吸收率接近 100%，灵敏度达到 1.2 deg/ μ W。

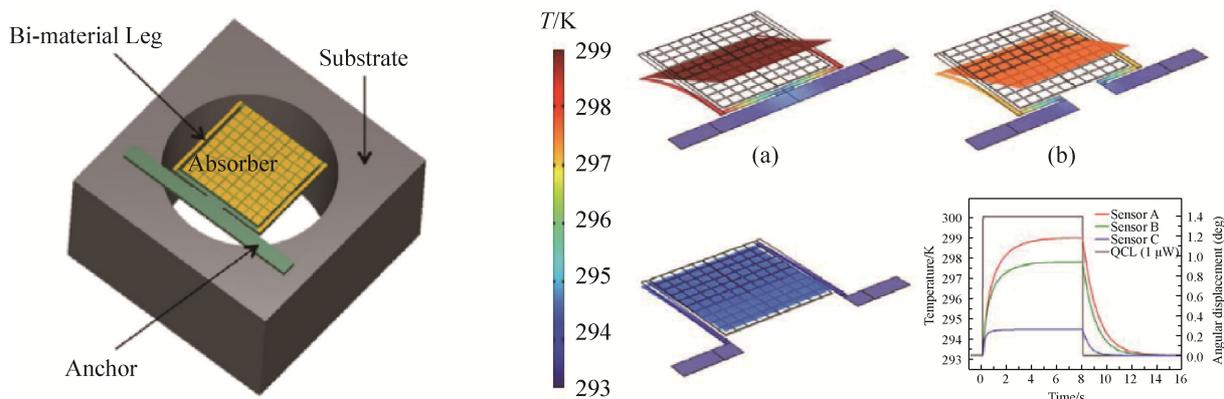
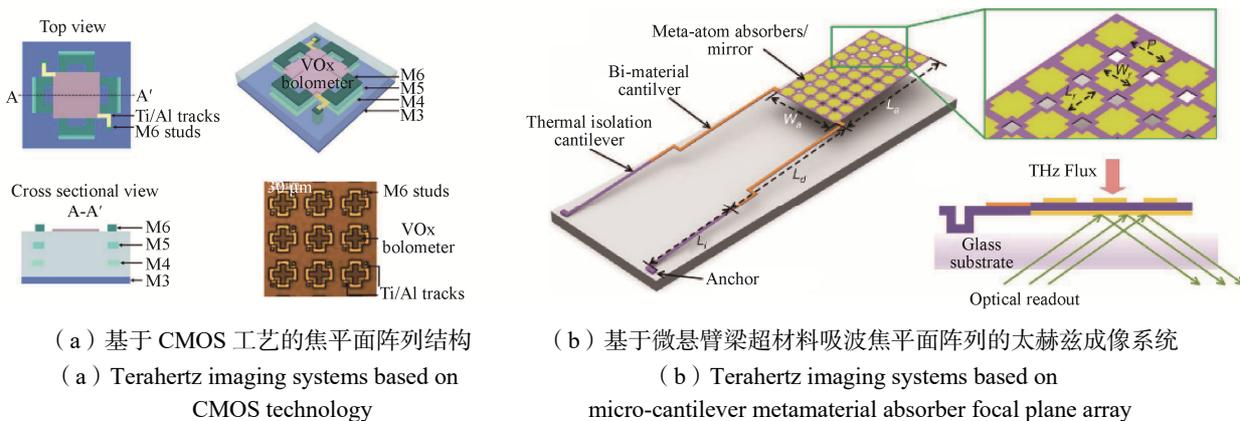


图 4 基于双层微悬臂梁与超材料吸波体的太赫兹探测器单元及其仿真结果

Fig. 4 Terahertz detector unit based on double-layer micro-cantilever absorber and simulation results

太赫兹超材料吸波体拥有远高于天然材料的吸收率，且吸收频率可灵活设计、制造工艺兼容半导体工艺、可进行大规模阵列化制备，解决了天然材料响应率低、像元尺寸及阵列规模受限、吸收频率难以调节的问题，因而可以用于目标成像领域。

目前，太赫兹成像系统的主要发展方向为焦平面阵列成像结构^[40-44]。CARRANZA E 等人于 2015 年提出了一种基于 CMOS 工艺的太赫兹成像系统^[43]，其结构如图 5 (a) 所示，使用 5×5 探测器阵列作为焦平面对信封中的金属物体形状进行了成像。后续经过改进设计^[44]，阵列规模提升至 64×64，并借助半导体工艺进行集成化的 Si-PN 结制备，最终等效噪声功率 (NEP) 达到了 10.4 nW/ \sqrt Hz。WEN Y 等人于 2017 年提出了基于微悬臂梁超材料吸波焦平面阵列的太赫兹成像系统^[41]，其焦平面单元结构如图 5 (b) 所示。该成像系统焦平面阵列规模 128×128，工作频率在 3.11 THz，NEP 达到了 2.9 nW/ \sqrt Hz。



(a) 基于 CMOS 工艺的焦平面阵列结构
(a) Terahertz imaging systems based on CMOS technology

(b) 基于微悬臂梁超材料吸波焦平面阵列的太赫兹成像系统
(b) Terahertz imaging systems based on micro-cantilever metamaterial absorber focal plane array

图 5 焦平面阵列成像结构

Fig. 5 Focal planar array imaging structure

表 1 列举了典型的固定型太赫兹超材料吸波体，分别从吸收带宽、极化敏感性、最大斜入射角、厚度、谐振结构等方面进行了对比。

表 1 固定型太赫兹超材料吸波体性能对比表
Table 1 Performances of constant terahertz metamaterial absorbers

文献	90%吸收频带 (THz)	入射波极化	最大斜入射角度	厚度 (μm)	谐振结构
[9]	1.0/1.8	TE/TM	None	350	全介质多频窄带
[10]	2.56/5.84	TE&TM	45°	3.2	多频窄带
[11]	2.8-4.8	TE&TM	None	11.4	单层宽带
[45]	0.52-3.66	TE&TM	60°	64	多层宽带
[46]	4.5-5.2	TE/TM	None	5	单层宽带
[47]	0.8-1.6	TE&TM	None	26.8	单层宽带
[48]	1.8-2.1	TE&TM	50°	23	多层宽带
[49]	1.7-2.5	TE&TM	60°	10.2	多层宽带

1.2 可重构太赫兹超材料吸波体

可重构太赫兹超材料吸波体是在固定型太赫兹超材料吸波体基础上, 集成了相变材料 (VO_2)、石墨烯、光敏半导体等可调谐材料或器件^[50], 通过环境、偏置等状态的改变实现吸波体工作频率、吸收率或极化敏感度等指标的调节, 从而更灵活地适应于多种应用需求, 是太赫兹吸波体的未来发展趋势之一。本文以调节方式作为分类标准, 分别介绍温度调节型、激光调节型、电控-费米能级调节型等可重构太赫兹超材料吸波体, 并对可重构超材料吸波体在空间滤波器方面的应用进行阐述。

1.2.1 温度调节型可重构吸波体

温度调节型材料包括 VO_2 、 InSb 等, 其相变特性随温度变化, 因而可以作为吸波结构的谐振层或介质层, 实现温度调节型可重构太赫兹超材料吸波体。 VO_2 材料的电导率随着温度上升而显著上升, 利用这一特性, SU H E 等人于 2019 年提出了一种基于温度控制的可重构宽带太赫兹超材料吸波体^[51], 其结构如图 6 (a) 所示, 该结构利用耶路撒冷十字和正方形贴片的复合结构, 实现了宽带吸波的特性。通过将 VO_2 膜集成到介质层中, 当温度从 293 K 升高至 358 K 时, 吸收频带范围可从 0.32 THz~0.56 THz 调整至 0.356 THz~0.682 THz, 实现吸收频率可重构。ZHANG Y 等人于 2020 年提出了基于 VO_2 的温控调节太赫兹超材料吸波体^[52], 其结构如图 6 (b) 所示, 该结构具有两层 VO_2 薄膜, 实验结果表明其吸收带频移范围更大, 可从 6.6 THz~8.9 THz 移动至 7.1 THz~8.8 THz。

与 VO_2 相反, InSb 的电导率随着温度上升而显著下降, 这一特性同样可以应用于可重构超材料吸波体的设计中。YANG D 等人于 2019 年提出了一种基于 InSb 的全介质太赫兹超材料吸波体^[53], 如图 6 (c) 所示, 该吸波体在全硅超材料的基础上, 引入 InSb 介质层结构, 随着温度从 300 K 上升至 400 K, 其吸收频率从 0.659 THz 升高至 0.683 THz。CHEN F 等人于 2020 年提出了类似的结构^[54], 如图 6 (d) 所示, 该超材料吸波体在温度从 295 K 上升至 320 K 的过程中, 其吸收峰对应的频率从 1.88 THz 移动至 1.93 THz, 且吸收率始终保持在 90% 以上。

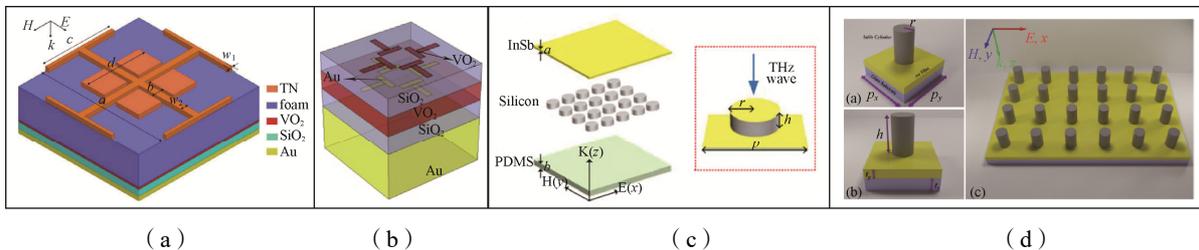


图 6 温控可重构超材料吸波体

Fig. 6 Temperature-controlled reconfigurable metamaterial absorbers

1.2.2 激光调节型可重构吸波体

激光调节型材料是一种电特性随外加激光强度变化而产生显著变化的材料, 其典型代表为光敏硅。光调控吸波体通常是在其单元结构的开口或间隙处嵌入光敏感半导体, 通过改变外加泵浦光强相应地

改变其电导率，从而实现吸收性能的可调控^[55]。杨森等人于2020年提出了一种光激发可开关单/双频带太赫兹超材料吸收体^[56]，吸波体结构如图7(a)所示，通过调节嵌入在谐振器中的光敏硅的电导率，可以实现双频吸收(0.929 THz, 1.205 THz)与单频吸收(0.689 THz)两种状态间的动态切换。2020年，袁苏等人也提出了一种光激发三频可调超材料吸波体，如图7(b)所示，通过在超材料设计中引入硅和锗两种光敏半导体材料，实现了吸收频率在0.940 8 THz、1.564 8 THz、1.389 6 THz三频之间的切换^[57]。

1.2.3 电控-费米能级调节型可重构吸波体

电控-费米能级调节型材料包括石墨烯、狄拉克半金属。当石墨烯、狄拉克半金属等的费米能级发生变化时，其介电常数的虚部会随之发生变化，随着费米能级的增加，将呈现出越来越多的“金属性”，从而改变结构的电磁特性^[58]。根据上述原理，JIANG Y N等人于2018年提出了一种基于狄拉克半金属的可重构太赫兹超材料吸波体^[59]，如图8(a)所示。该吸收体由具有周期性环槽的BDS膜、介电层和全反射金层组成，通过改变偏置电压，其吸收频率可从1.3 THz移动至3.0 THz，且吸收率保持在80%以上。同样在2018年，MISHRA R等人提出了石墨烯材料与太赫兹超材料结合的等效电路模型^[60]，如图8(b)所示，模型将石墨烯类比为金属材料，解释了其谐振原理。2019年，MISHRA R等人提出了一种基于级联石墨烯结构的宽带可重构太赫兹超材料吸波体^[61]，如图8(c)所示，该结构实现了吸收频带从0.1 THz~4.0 THz调整至0.85 THz~3.19 THz的频率可重构设计。

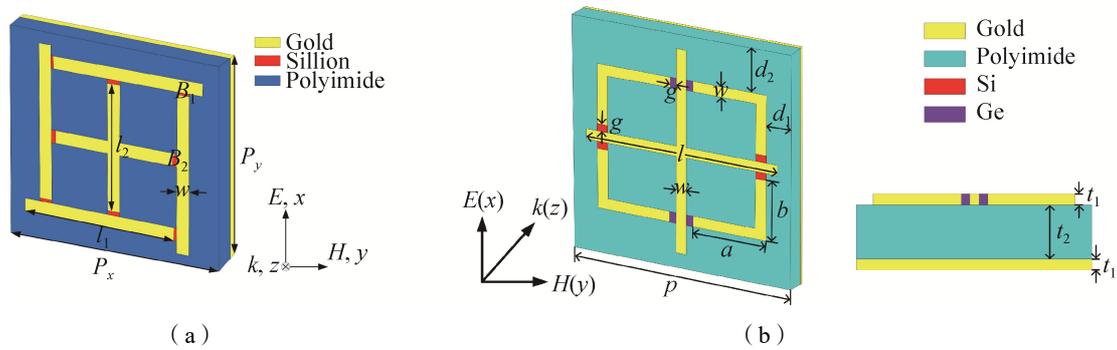


图7 光激发可重构太赫兹超材料吸波体结构

Fig. 7 Light-excited reconfigurable terahertz metamaterial absorbers

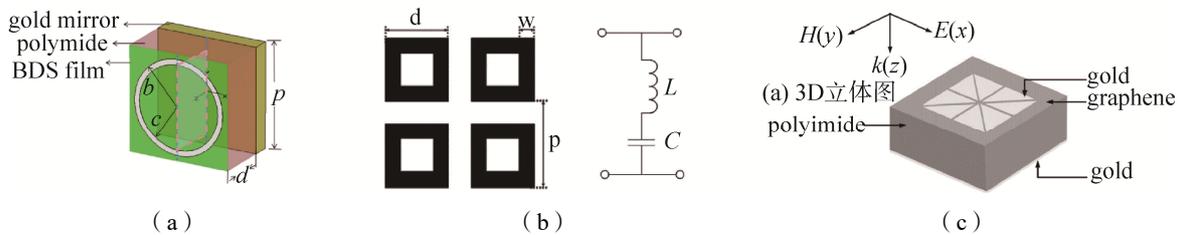


图8 基于狄拉克/石墨烯的可重构太赫兹超材料吸波体结构及其等效电路

Fig. 8 Dirac/graphene-based reconfigurable terahertz metamaterial absorbers and equivalent circuits

1.2.4 压电-形变型可重构吸波体(空间阻带滤波器)

压电-形变型材料在其偏置电压变化时，会产生对应大小的形变。可重构超材料吸波体的性能特点十分契合阻带可重构空间滤波器的应用需求^[62-69]。LIN Y S等人于2015年提出了基于压电效应的电压调节滤波器^[70]，在电压从0~12V变化时，超材料形状发生变化，其吸收频率从0.51 THz移动至0.62 THz，该超材料晶格单元如图9(a)所示；HU F等人于2019年提出了基于电控与VO₂加载的压电-形变型可重构吸波体，实现了0.44 THz的大范围吸收频带(阻带)可调^[71]；XU R等人于2020年提出的同样基于压电效应的压电-形变型可重构吸波体^[72]，在电压从0~30 V变化时，吸收频率可在0.33 THz范围内连续可调，其晶格单元结构如图9(b)所示。这些可重构滤波器在应用中只需调节电压值即可灵活改变阻带频率，实现空间太赫兹滤波。

1.3 太赫兹超材料吸波体发展方向和趋势

太赫兹超材料吸波体已广泛应用于军事目标隐身、带阻空间滤波器、太赫兹探测器、太赫兹波段成像系统、生物化学检测等领域。综合文献研究进展来看, 今后太赫兹超材料吸波体的发展方向及趋势如下:

① 在军事目标隐身应用方面, 太赫兹超材料吸波结构可使得目标的 RCS 缩减数十甚至上百倍。由于军事应用对功能器件的平台/环境适应性、稳定性要求更高, 因此, 在后续研究中需进一步开展太赫兹超材料吸波体的工程化研究, 通过基底材料的优化选择等途径实现太赫兹超材料吸波体重量、强度、韧性、结构稳定性等方面的综合优化设计。

② 在生物化学检测应用方面, 太赫兹超材料吸波体能够实现可调谐的工作频率以及多频点吸收峰检测, 因而在准确快速检测方面具有广泛的应用前景。未来, 太赫兹超材料吸波体将向着两个方向发展: 一是可重构, 工作频带灵活, 应用范围广; 二是柔性, 材料适应好, 避免对生物的伤害, 扩大检测样品的种类范围。

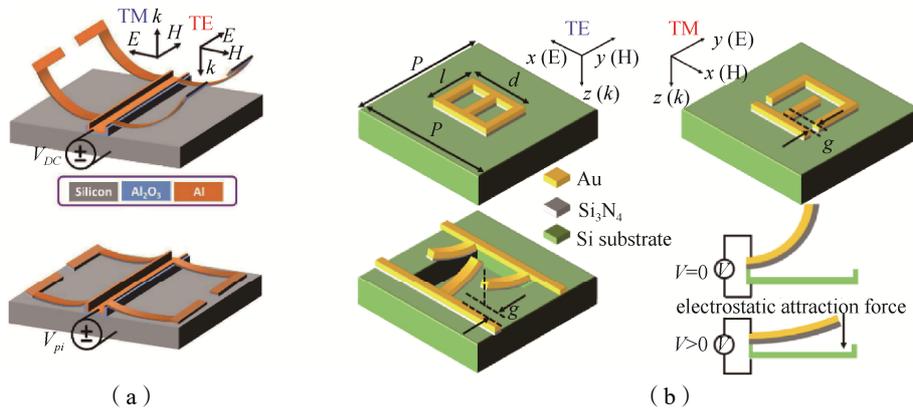


图 9 基于压电效应的可重构超材料吸波滤波器
Fig. 9 Reconfigurable metamaterial filters based on piezoelectric effect

③ 在太赫兹探测成像应用方面, 一是通过新机理探索, 获得更小的 NEP, 实现高灵敏度的探测成像; 二是多频段发展, 获取更为丰富的目标特性。在机理的探索方面, 目前已有基于压电效应、红外辐射、可见光 CMOS 相机等观测机理的成像系统被提出。未来, 超材料吸波体吸波之后的能量转化与观测方式应该被重点研究, 力求通过新机理或优化已有机制, 得到更低的 NEP, 更高灵敏度的成像系统。在多频段发展方面, 未来应该将吸收频带可重构的超材料吸波体应用于太赫兹成像系统, 开展多频段成像系统的研究, 从而获得被成像物体更多的信息。

2 太赫兹超材料调制器

调制器可对电磁波的波前进行调制, 应用于波束聚焦、波束空间分配、全息成像等方向。用传统材料如石英波片、聚乙烯透镜等器件制作的太赫兹波调制器的效率低下且体积庞大。超材料因其强大的电磁调控能力和亚波长结构^[73], 完美契合太赫兹波段调制器件的需求。近年来, 研究人员提出通过引入有源器件, 使用电控、温控、光控和机械控制等外部激励信号对超材料的功能进行动态调节^[74,75], 进一步拓展了超材料的应用范围。根据调制的电磁波参数不同, 下文分别从极化调制、幅度调制、相位调制三方面, 结合其在波束聚焦、波束空间分配、全息成像等方向的应用, 对太赫兹超材料调制器件的研究发展进行阐述。

2.1 太赫兹极化调制超材料

根据极化特征, 太赫兹超材料极化调制可分为垂直极化调制、线极化-圆极化调制、任意极化调制三类。

2.1.1 垂直极化调制类太赫兹超材料

垂直极化调制, 又称 X 极化-Y 极化调制, 即通过太赫兹超材料将入射波相位改变 90°, 最终形成与

原入射波垂直极化的太赫兹波。垂直极化的衡量标准有调制深度和极化转换效率（PCR），这里调制深度指对太赫兹波强度的调制效率。2016 年，南开大学的杨磊等人使用金属光栅与对称开口环的耦合结构^[76]，如图 10（a）所示，该结构为透射型，其实现了对 0.39 THz~1.11 THz 频段内太赫兹波的垂直极化调制，调制深度为 90%，转换效率达到 99%以上，且在 0~60°的大角度斜入射情况下保持 PCR 在 90% 以上。2021 年，杨朝晖等人提出了一种基于 VO₂ 复合超材料的频段可重构极化调制器^[77]，如图 10（b）所示，VO₂ 被镶嵌在超材料单元的中间，与铝结构相接触。该调制器为反射型，当 VO₂ 处于绝缘态时，在 1.58 THz~2.08 THz 范围内调制深度可达 80%以上，PCR 大于 95%。当通电使 VO₂ 处于金属态时，PCR 大于 95%的频段缩减为 2.04 THz~2.08 THz，该频带内调制深度保持在 80%以上。为方便性能对比，将近些年典型的太赫兹波段使用超材料实现垂直极化调制器的研究^[73,76-78]列于表 2。

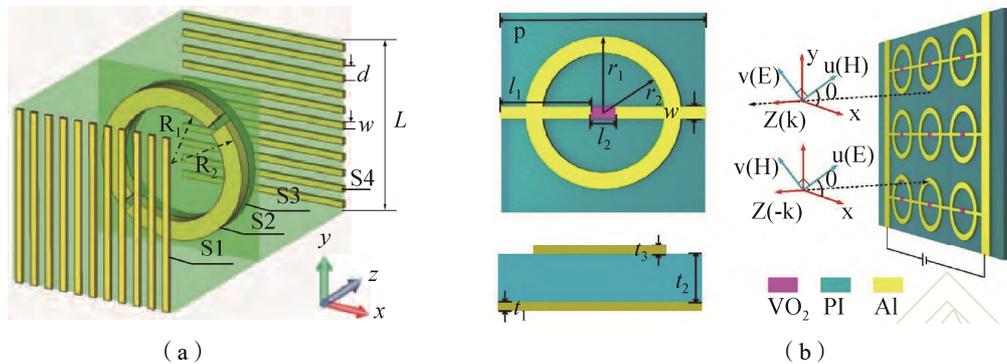


图 10 垂直极化调制超材料

Fig. 10 Vertically polarized modulated metamaterial

表 2 典型太赫兹垂直极化调制器参数对比

Table 2 Parameters of terahertz vertical polarization modulators

文献编号	工作频带 (THz)	极化转换效率 (%)	调制深度 (%)	反射/透射型
[73]	0.584~1.352	80	85	反射型
[76]	0.39~1.11	99	90	透射型
[77]	1.58~2.08&2.04~2.08	95	80	反射型
[78]	0.59~1.24	80	85	反射型

2.1.2 线极化-圆极化调制类太赫兹超材料

线极化-圆极化转换即通过太赫兹超材料将入射波由线极化波转换为圆极化波输出。2019 年，SASAKI T 等人使用液晶嵌入式网格超材料制作了太赫兹极化转换器，如图 11 所示，通过加载单层网格超材料实现太赫兹波的极化转换，相对于传统极化转换器，该设计厚度可以减少两个数量级^[79]。其他有关线极化-圆极化（LP-CP）转换的超材料研究在表 3 中列举，主要指标包含工作频段、转换效率、椭圆度以及实现途径。

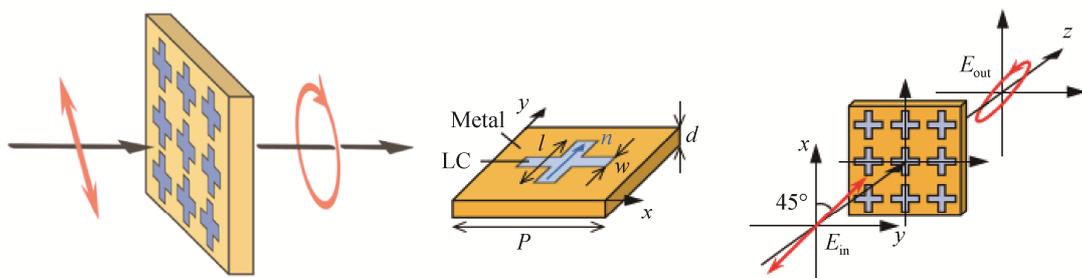


图 11 线极化-圆极化转换超材料

Fig. 11 LP-CP conversion metamaterial

表 3 部分太赫兹线-圆极化调制器参数对比
Table 3 Parameters of terahertz line-circular polarization modulators

文献编号	工作频带 (THz)	转换效率 (PCR) (%)	椭圆度	实现途径
[78]	1.58~2.08 2.04~2.08	>95	/	VO ₂ 绝缘态 VO ₂ 金属态
[79]	1.78~4.88		>0.99	全介电超材料
[80]	0.65~1.58	>80	/	硅基金属谐振超材料
[81]	16~37	90	1	石墨烯超材料
[82]	0.64~1.19	95	/	L 型超材料
[83]	0.818~0.973	50~75	>0.81	1/4 波片

2.1.3 任意极化调制类太赫兹超材料

在任意极化调制领域, JI Y 等人^[84]在 2020 年提出了基于双频液晶和介质超材料的太赫兹有源调制器, 引入了全介质超表面的各向异性来抵消双频液晶的自然双折射, 显著提高了复合超表面的有效调控范围, 实现了线极化波向任意极化波的转换。

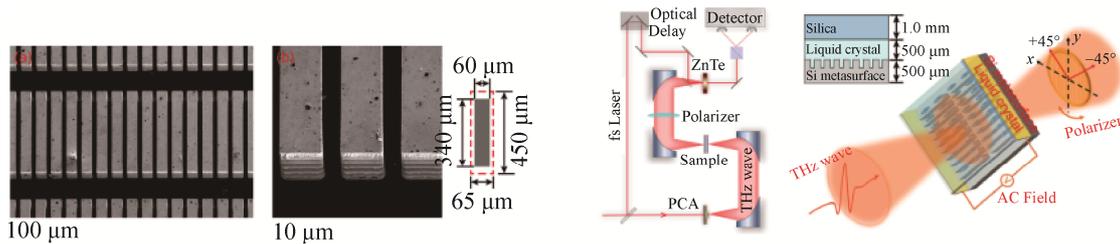


图 12 任意极化转换超材料

Fig. 12 Metamaterial with arbitrary polarization conversion

2.2 太赫兹幅度调制超材料

太赫兹幅度调制超材料可以实现对太赫兹波幅度的调控, 主要应用在太赫兹波源、太赫兹天线领域。2017 年, SHREKENHAMER D 等人将异质结场效应晶体管 (HEMT) 集成到超材料的晶格单元中, 通过电压改变二维电子气的浓度来调控超材料的谐振, 该调制器最终实现了深度为 33% 的幅度调制, 调制速率为 10 MHz^[85], 该设计理念首次将 HEMT 引入到太赫兹调制技术中。该理念促进了太赫兹调制器在集成化、低功耗和高调制速率等方面的发展^[86-90]。2015 年, WANG D C 等人设计了一种基于 Nb 薄膜的太赫兹调制器^[87], 其调制深度为 45%, 调制速率为 100 kHz。他们将 Nb 薄膜加工成开口谐振环的形式, 采用外加电流对 Nb 薄膜加热, 并利用电流产生的弱磁场来抑制 Nb 的超导性, 最终实现对太赫兹波的幅度调制。

2.3 太赫兹相位调制超材料

传统的折射型光学元件是利用材料折射率的差异或面形变化来实现特定的相位分布, 进而构建相应的功能器件^[91], 普遍存在着厚度较大、透波率低等问题。太赫兹相位调制超材料可直接利用单元间的相位差实现对入射波的相位调制, 尺寸紧凑且透波性好, 可应用于军事目标隐身、波束聚焦 (太赫兹透镜) 等领域。

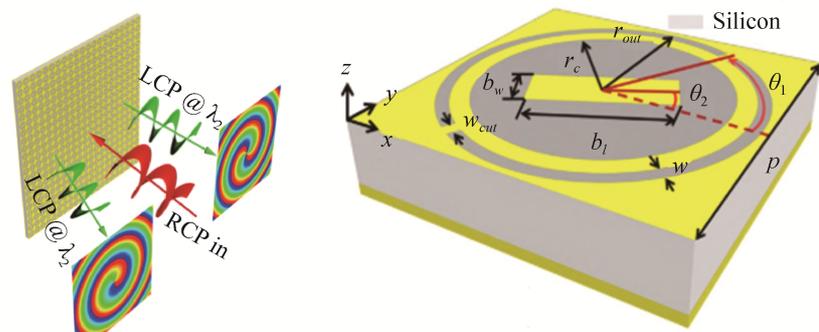


图 13 相位调控超材料

Fig. 13 Phase control metamaterial

2018 年 LI J S 等人^[92]基于 PB (Pancharatnam-Berry) 相位原理, 通过改变单元方向, 构造了多位数

字编码超表面，最终达到减小雷达散射面积的目的，其 RCS 低于-10 dB 的带宽为 0.8 THz~1.6 THz。2019 年，WANG T 等人^[93]提出了一种反射器单元结构，如图 13 所示，该单元的三明治结构顶层包括一个双 C 形槽谐振器和一个放置在圆形孔中的纳米棒谐振器。根据 PB 相位原理旋转双 C 形环和纳米棒谐振器来实现两个预设频率的 2π 相位调制。该结构可以在 0.45 THz 和 0.7 THz 两个频带上工作，且将两个频率的右旋圆极化入射波分别反射为左旋圆极化波。其他相关研究包括基于液晶、VO₂、介质超表面、人工微结构阵列等设计的相位调制器^[94,95]。

传统的透镜是通过空间相位的积累实现对入射波的聚焦，因而相位分布需要靠材料的厚度来调节，整体透镜器件非均匀且有一定厚度。相比之下，基于超材料的透镜可以在厚度忽略不计的平面上实现入射波的相位调制，从而大大减小透镜的尺寸^[96-105]。2018 年，电子科技大学的 WEI Y 等人提出基于超材料的平面透镜，如图 14 所示，实现了对 4 THz~6 THz 波束的聚焦^[98]。

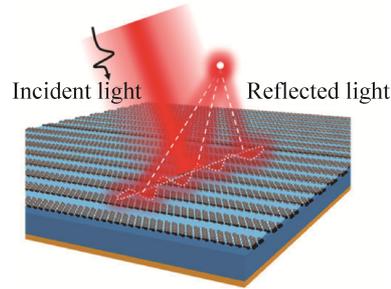


图 14 应用于太赫兹波束聚焦的太赫兹超材料
Fig.14 Terahertz metamaterial applied to terahertz beam focusing

太赫兹超材料调制器在全息成像方面的应用也吸引了研究人员的兴趣^[106,107]。2013 年，首都师范大学张岩教授的研究团队不仅利用 V 形金狭缝天线设计了多种太赫兹透镜（如图 15 所示），还提出了全息超表面的概念，利用太赫兹焦平面成像系统在预定平面上观测到了重建的字母。不仅如此，全息超表面也被用于实现三维图像重建，太赫兹波经过全息超表面后在其传播方向上的不同位置处能够清晰地再现不同字母的重建像。

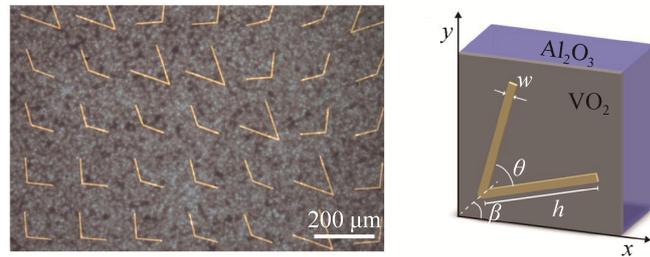


图 15 应用于全息成像的太赫兹超材料
Fig.15 Terahertz metamaterial for holographic imaging

太赫兹超材料相位调制还可以用来制作分束器，实现波束的空间分配^[108-111]。2019 年，清华大学的 LIU Zhoutian 等人^[110]提出了基于石墨烯纳米天线的可调谐的圆极化分束器，其效率高达 83%，并且具有 2 THz~5 THz 的宽频率可调范围，如图 16(a) 所示。

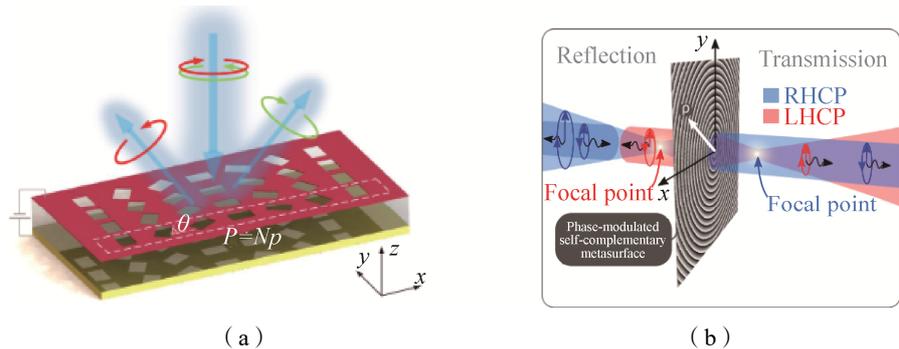


图 16 太赫兹超材料分束镜
Fig.16 Beam splitter based on terahertz metamaterial

通过使石墨烯表面等离子体激元与相位梯度超表面协同作用，可实现工作频率的电调谐以及圆极化复用。2021 年，LENETS V A 等人^[111]提出了工作在 0.345 THz 附近的基于单层自互补超表面（SCMS）的圆极化分束器。如图 16（b）所示，当圆极化波束照射时，利用 SCMS 与频率无关的特性，可得到透射系数为 1/2 的同极化透射光束，并产生具有相同大小的交叉极化光束，其透射相位可以通过构造 SCMS 在每个点处进行相位调控，以达到分束的目的。

2.4 太赫兹超材料调制器发展方向和趋势

综上, 近年来通过将各种新材料、新调制手段与超材料相结合, 太赫兹调制器件得到了长足且快速的发展, 在空间通信、全息成像等技术领域扮演着愈来愈重要的角色。太赫兹调制器在未来的发展方向如下:

① 在波束聚焦方面, 通过单元形状设计、人工材料和天然材料的组合优化等, 太赫兹超材料调制器解决了低剖面和大带宽之间的矛盾。超材料波束聚焦器件根据材料可调谐性分为两类, 第一类是静态超材料透镜, 这一类超材料基本由全介质或金属加介质构成, 其使用频段自加工之后就恒定不可调节; 第二类是动态超材料透镜, 该类超材料由有源器件或相变材料构成, 使用频段可在使用时灵活调整, 是未来的发展趋势。

② 在太赫兹波空间波束分配方面, 现有研究基本实现了单波束到双波束的分离, 未来可拓展研究多频多波束的波束分离网络、大规模面阵功率分配网络(太赫兹相控阵、相参阵列)等方面。

③ 在探测成像方面, 基于全息太赫兹超材料的调制器件可获得目标辐射相位、辐射强度等多方面信息, 未来可进一步提升全息太赫兹超材料调制器件的成像精度、调制速率等, 为其在全息成像领域的实际应用打下基础。

3 太赫兹超材料天线

超材料在微波频段被广泛应用于天线的设计中, 用来提高天线辐射效率或实现波束重构等^[112-114], 这一应用在太赫兹波段也得到了拓展。

2017年, AMANATIADIS S 等人使用超材料合成衬底来改善石墨烯等离子体激元天线的辐射效率, 天线结构如图 17 所示。加载超材料的天线辐射效率为 16.6%, 比未加载超材料的天线效率(3.9%)显著提高^[115]。

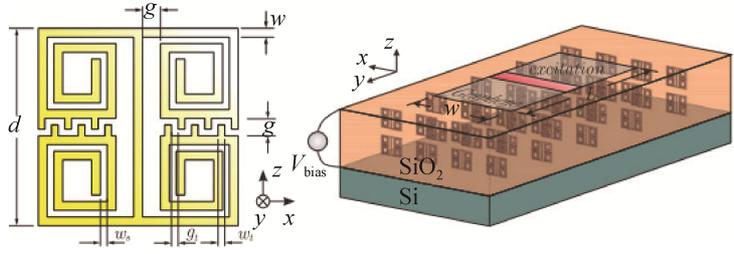


图 17 加载超材料的太赫兹天线结构

Fig. 17 Terahertz antenna structure loaded with metamaterial

2018年, 天津大学的王可萌将介质超材料与光电导天线相结合, 实现天线

对泵浦激光的高效吸收, 太赫兹辐射功率在 0.91 THz 处增强了 1.35 倍, 拓宽了天线辐射的频谱范围^[116]。

2020年, 电子科技大学的肖冰连等人将二维超材料(超表面)应用于太赫兹频段的线极化和圆极化频扫天线, 水平或垂直极化波入射到超表面阵列结构后在各个频点上的反射角度是一样的, 波束扫描范围为 34°~48°, 反射系数均在 0.6 以上, 与未加载超材料的同一频扫天线相比, 带宽和扫描角度范围均有所提升^[117]。

4 其他最新进展

4.1 基于超材料的片上通信技术

随着通信技术的发展, 信号频率越来越高, 5G 已逐步进入毫米波频段, 而下一代通信技术将有望采用太赫兹波段。为实现高速片上通信解决方案, 需要对太赫兹频率的信号链路进行研究。常规的太赫兹波导管系统无法支持急剧弯曲的传输路径, 而太赫兹超材料拥有足够的设计灵活性, 可构成特定的拓扑结构, 从而实现太赫兹集成电路与芯片内、芯片间的通信互联。YANG Y 等人于 2020 年提出了基于光拓扑相位的全硅太赫兹超材料导波系统^[118]。通过在硅基底上刻蚀尺寸不同的三角形孔, 实现了对太赫兹波的片上导行功能, 测试结果表明该结构能够实时传输未压缩的 4K 高清晰度视频, 传输数据超过 10 Gb/s。基于光拓扑结构的太赫兹超材料研究, 实现了每秒千兆位数据链路的传输, 可以进一步支持人工智能和云计算技术, 包括自动驾驶、医疗保健、精密制造和全息通信等方面。

4.2 基于编码超材料的信息技术

经典超材料体系通常采用等效媒质参数描述超材料的电磁性质, 设计超材料隐身衣、超材料透镜

时主要是设计等效电磁参数的分布。然而,等效媒质理论很难和信息技术相融合,为此,东南大学崔铁军教授提出了数字编码超材料的概念^[119-124]。数字编码超材料根据单元响应相位(或振幅)的不同进行二进制编码,如1比特编码,则相位为 0° 和 180° 的两种单元对应的数字编码为0和1;2比特编码,相位为 0° 、 90° 、 180° 和 270° 的4种单元对应的数字编码为00、01、10和11。设计超材料时只需要根据功能需求设计编码图案即可。编码超材料的提出搭建了物理世界和信息世界之间的桥梁,其在微波频段的应用已经十分广泛。太赫兹波段属于新兴研究领域,将编码超材料技术应用在太赫兹波段可进一步提高对于太赫兹波的调控能力^[125-127],具有广阔的应用前景。

4.3 基于增材工艺的太赫兹超材料

太赫兹超材料通常具有微米级的尺寸,对工艺精度要求极高,并且由工艺误差带来的频移、性能下降甚至功能改变非常明显,因此,制备工艺的提对太赫兹超材料的应用有很大的促进作用。传统的超材料中含有介质材料和金属材料,只能使用光刻、化学气相沉积、刻蚀、溅射等半导体工艺。虽然基于MEMS的太赫兹超材料得到广泛研究,但仍存在工艺精度带来的成品率问题。随着全介质超材料的提出,3D打印也可被用于制备太赫兹超材料。HAO X等人于2017年提出了基于3D打印-聚合物喷射技术的太赫兹超材料器件制备方法^[128]。3D打印制造技术为实现复杂的结构提供了前所未有的灵活性。聚合物喷射是一种新兴的3D打印制造技术,该技术利用光敏聚合物作为构建材料,能够精确地打印微米级器件,可满足太赫兹频段的电磁超材料精度要求。HAO X等人在其文章中讨论了基于聚合物喷射的3D打印设计和实现,介绍了多种3D可打印聚合物材料从GHz到THz的宽带电磁特性,阐述了专用于3D打印超材料及天线的设计方法,包括波导、喇叭天线,超材料梯度折射率透镜等。这种用于太赫兹波段超材料或其他电磁器件的聚合物喷射技术使得微米级精确制备得以实现,在未来具有广阔的应用前景。

5 结束语

本文主要总结了太赫兹超材料的最新研究成果及遇到的问题,涵括了近十年来太赫兹超材料吸波体、调制器以及天线等方面的研究进展,最后对太赫兹超材料领域的发展方向及未来热点进行了展望。通过对太赫兹超材料研究现状的综述与分析,可以看到超材料的出现为设计新型太赫兹器件提供了新的技术手段,且超材料的引入为太赫兹技术在高速宽带通信、生物医学、高分辨率光谱学、食品控制以及军事和航天等领域的应用提供了更为广阔的前景。

参考文献

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等.毫米波与太赫兹技术[J].中国科学:信息科学,2016,46(8):1086-1107.
HONG Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter waves and THz technologies[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8): 1086-1107.
- [2] RODIER J, ESTOURNEL R, COURT R, et al. Front matter-handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications[M]. Brill: Woodhead Publishing, 1986.
- [3] WILKE I, SONG Ho-jin, NAGATSUMA T. Handbook of terahertz technologies: devices and applications[J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2015, 408(3): 1-2.
- [4] SUEN J Y. Terabit-per-second satellite links: a path toward ubiquitous terahertz communication[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016, 37(1): 615-639.
- [5] BRINKMANN S, VIEWEG N, GARTNER G, et al. Towards quality control in pharmaceutical packaging: screening folded boxes for package inserts[C]// IEEE International Conference on Infrared, 2016.
- [6] DHILLON S S, VITIELLO M S, LINFIELD E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D Applied Physics: A Europhysics Journal, 2017, 50(4). DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001.
- [7] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [8] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and

- permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184.
- [9] HUANG X, LU C, RONG C, et al. Multiband ultrathin polarization-insensitive terahertz perfect absorbers with complementary metamaterial and resonator based on high-order electric and magnetic resonances[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6):1–11.
- [10] WANG Y, ZHU D Y, CUI Z J, et al. Properties and sensing performance of all-dielectric metasurface THz absorbers[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(6): 599–605.
- [11] CHEN P Y, ALU A. Terahertz metamaterial devices based on graphene nanostructures[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2013, 3(6): 748–756.
- [12] WANG B X, XIE Q, DONG G, et al. Simplified design for broadband and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(12): 1115–1118.
- [13] CHEN L, QU S W, CHEN B J, et al. Terahertz metasurfaces for absorber or reflectarray applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(1): 234–241.
- [14] 谭思宇. 太赫兹高折射率超材料及吸收体传感特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [15] 闫昕, 梁兰菊, 张雅婷, 等. 电磁超表面在微波和太赫兹波段雷达散射截面缩减中的应用研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1639–1644.
- YAN Xin, LIANG Lanju, ZHANG Yating, et al. Research progress of electromagnetic metasurface used for radar cross section reduction in microwave and terahertz wave[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1639–1644.
- [16] 梁兰菊. 基于多层柔性超材料的 THz 器件[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [17] LI H G, NAN X, JIE Z, et al. A low RCS metasurface for THz applications[C]// *IEEE 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, 2014.
- [18] CHEN X, FAN W, CHAO S. Multiple plasmonic resonance excitations on graphene metamaterial for ultrasensitive terahertz sensing[J]. *Carbon*, 2018, 133(7): 416–422.
- [19] NEU J, ASCHAFFENBURG D J, WILLIAMS M, et al. Optimization of terahertz metamaterial for near-field sensing of chiral substances[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2017, 7(6): 755–764.
- [20] 王月娥, 李东霞, 李智, 等. 基于四峰超材料 THz 传感器的 B 族维生素检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(6): 131–136.
- WANG Yue'e, LI Dongxia, LI Zhi, et al. Identification of vitamin B using a quad-peak terahertz metamaterial sensor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(6): 131–136.
- [21] 向天宇, 雷涛, 沈钊阳, 等. 基于环偶极子超材料的太赫兹波段高灵敏度传感器设计[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(12): 58–62.
- XIANG Tianyu, LEI Tao, SHEN Zhaoyang, et al. High sensitivity toroidal metamaterial sensor in THz range[J]. *Electronic Components & Materials*, 2020, 39(12): 58–62.
- [22] 段露. 基于超材料的高灵敏太赫兹生物传感器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [23] 陈淑瑜, 韦德泉. 电磁超表面高灵敏度太赫兹传感器的设计[J]. *激光杂志*, 2019(4): 18–22.
- CHEN Shuyu, WEI Dequan. Research on high sensitivity THz sensor based on electromagnetic supersurface[J]. *Laser Journal*, 2019(4): 18–22.
- [24] WANG S, XIA L, MAO H, et al. Terahertz biosensing based on a polarization-insensitive metamaterial[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 986–989.
- [25] LEE D K, KIM G, KIM C, et al. Ultrasensitive detection of residual pesticides using THz near-field enhancement[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2016, 6(3): 389–395.
- [26] 徐文道. 太赫兹-超材料-纳米材料联用的农产品安全检测机理与方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [27] QIN B, LI Z, HU F, et al. Highly sensitive detection of carbendazim by using terahertz time-domain spectroscopy combined with metamaterial[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2018, 8(2): 149–154.
- [28] LI D, LIN S, HU F, et al. Metamaterial terahertz sensor for measuring thermal-induced denaturation temperature of insulin[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(4): 1821–1828.
- [29] LI D, HU F, ZHANG H, et al. Identification of early-stage cervical cancer tissue using metamaterial terahertz biosensor with two resonant absorption frequencies[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(4):1–7.

- [30] KESHAVARZ A, VAFAPOUR Z. Water-based terahertz metamaterial for skin cancer detection application[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(4): 1519–1524.
- [31] LIN S, XU X, HU F, et al. Using antibody modified terahertz metamaterial biosensor to detect concentration of carcinoembryonic antigen[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 27(4): 1–7.
- [32] KESHAVARZ A, VAFAPOUR Z. Sensing avian influenza viruses using terahertz metamaterial reflector[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(13): 5161–5166.
- [33] RUI Z, CHEN Q, KAI L, et al. Terahertz microfluidic metamaterial biosensor for sensitive detection of small volume liquid samples[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(2): 209–214.
- [34] 谢明真, 张阳, 府伟灵, 等. 基于太赫兹超材料的微流体折射率传感器[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4): 1039–1043. XIE Mingzhen, ZHANG Yang, FU Weiling, et al. Microfluidic refractive index sensor based on terahertz metamaterial[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4): 1039–1043.
- [35] 陈涛, 黄锋宇, 钟鑫, 等. 基于电磁场作用增强的超材料吸收体太赫兹微流传感器[J]. *光子学报*, 2021, 50(1): 139–149. CHEN Tao, HUANG Fengyu, ZHONG Xin, et al. Terahertz microfluidic sensor based on metamaterial absorbers with enhanced electromagnetic field interaction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(1): 139–149.
- [36] WANG X. Uncooled CMOS integrated triple-band terahertz thermal detector comprising of metamaterial absorber and PTAT sensor[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 114501–114508.
- [37] RYU M W, LEE J S, KIM K S, et al. High-performance plasmonic THz detector based on asymmetric FET with vertically integrated antenna in CMOS technology[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 63(4): 1742–1748.
- [38] 敖天宏. 基于超材料的太赫兹微测辐射热计和滤波器的设计与制备[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [39] ALVES F, GRBOVIC D, KEARNEY B, et al. Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13256–13271.
- [40] ANH P, PETER H B. Terahertz modulator based on vertically coupled fano metamaterial[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2018, 8(5): 502–508.
- [41] WEN Y, JIA D, WEI M, et al. Photomechanical meta-molecule array for real-time terahertz imaging[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2017, 3(1): 17071.
- [42] KUZNETSOV S A, PAULISH A G, GELFAND A V, et al. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(2): 023501.1–023501.3.
- [43] CARRANZA I E, GRANT J P, GOUGH J, et al. Metamaterial-based terahertz imaging[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, 5(6): 892–901.
- [44] CARRANZA I E, GRANT J P, GOUGH J, et al. Terahertz metamaterial absorbers implemented in CMOS technology for imaging applications: scaling to large format focal plane arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 23(4): 1–8.
- [45] SHABANI M, MIR A. Design and analysis of an ultra-broadband polarization-independent wide-angle plasmonic THz absorber[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(3): 1–8.
- [46] WEN Y, MA W, BAILEY J, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber based on asymmetric resonators with perfect absorption[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, 5(3): 406–411.
- [47] PAN W, YU X, ZHANG J, et al. A broadband terahertz metamaterial absorber based on two circular split rings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(1): 1–6.
- [48] WANG B X, WANG L L, WANG G Z, et al. Theoretical investigation of broadband and wide-angle terahertz metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(2): 111–114.
- [49] WU P, XUAN Y, ZHANG J, et al. A novel design of broadband terahertz metamaterial absorber based on nested circle rings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2335–2338.
- [50] ZHANG M, ZHANG J, CHEN A, et al. Vanadium dioxide-based bifunctional metamaterial for terahertz waves[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 1–9.
- [51] SU H E, LI J L, XIA L. A novel temperature controlled broadband metamaterial absorber for THz applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 161255–161263.
- [52] ZHANG Y, WU P, ZHOU Z, et al. Study on temperature adjustable terahertz metamaterial absorber based on vanadium

- dioxide[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 85154–85161.
- [53] YANG D, ZHANG C, LI X, et al. InSb-enhanced thermally tunable terahertz silicon metasurfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 95087–95093.
- [54] CHEN F, CHENG Y, LUO H. Temperature tunable narrow-band terahertz metasurface absorber based on InSb microcylinder arrays for enhanced sensing application[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 82981–82988.
- [55] 佟艳群, 汪诗妍, 宋效先, 等. 基于超材料的多频带可调谐太赫兹吸收器[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(6): 735–741. TONG Yanqun, WANG Shiyun, SONG Xiaoxian, et al. Multi-band tunable terahertz absorber based on metamaterial[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 735–741.
- [56] 杨森, 袁苏, 王佳云. 一种光激发可切换的双频太赫兹超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 122–130. YAN Sen, YUAN Su, WANG Jiayun. Light-excited and switchable dual-band terahertz metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 122–130.
- [57] 袁苏. 光激发可开关多态太赫兹超材料吸收器的研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [58] TORABI E S, FALLAHI A, YAHAGHI A. Evolutionary optimization of graphene-metal metasurfaces for tunable broadband terahertz absorption[J]. *Antennas & Propagation IEEE Transactions on*, 2017, 65(3): 1464–1467.
- [59] JIANG Y N, WAN X, JIAO W, et al. Tunable terahertz absorber based on bulk-Dirac-semimetal metasurface[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1–7.
- [60] MISHRA R, PANWAR R, SINGH D. Equivalent circuit model for the design of frequency-selective, terahertz-band, graphene-based metamaterial absorbers[J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2018, 9: 1–5.
- [61] MISHRA R, SAHU A, PANWAR R. Cascaded graphene frequency selective surface integrated tunable broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1–10.
- [62] 王月娥. 基于超材料的太赫兹带阻滤波器及其传感应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [63] LI Z, DING Y J. Terahertz broadband-stop filters[J]. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 2013, 19(1): 1–5.
- [64] 张雅雯. 基于人工电磁材料的 THz 非对称传输器件研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [65] 张学迁. 基于超材料的太赫兹功能器件[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [66] LIU W, DAI Z, JING Y, et al. Ultrabroad and angle tunable THz filter based on multiplexed metallic bar resonators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(24): 2103–2106.
- [67] HAN Z, KOHNO K, FUJITA H, et al. Tunable terahertz filter and modulator based on electrostatic MEMS reconfigurable SRR array[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(4): 114–122.
- [68] KIM S M, LEITE C M, PARK J Y, et al. Multiband terahertz self-complementary metasurface[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 199051–199059.
- [69] ZHU Z, ZHANG X, GU J, et al. A metamaterial-based terahertz low-pass filter with low insertion loss and sharp rejection[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2013, 3(6): 832–837.
- [70] LIN Y S, HUANG C Y, LEE C. Reconfiguration of resonance characteristics for terahertz U-shape metamaterial using MEMS mechanism[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(4): 1–7.
- [71] HU F, WANG H, ZHANG X, et al. Electrically triggered tunable terahertz band-pass filter based on VO₂ hybrid metamaterial[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(3): 1–7.
- [72] XU R, LIN Y S. Reconfigurable multiband terahertz metamaterial using triple-cantilevers resonator array[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, 29(5): 1167–1172.
- [73] 潘武, 沈大俊, 闫彦君. 太赫兹超材料极化转换器设计及其特性分析[J]. *半导体光电*, 2018, 39(3): 317–321. PAN Wu, SHEN Dajun, YAN Yanjun. Design and characteristics analysis of a terahertz metamaterial polarization converter[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(3): 317–321.
- [74] 李春. 有源太赫兹超导超材料[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [75] 莫伟成. 几种太赫兹超表面器件的特性研究与实验观测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [76] 杨磊, 范飞, 陈猛, 等. 多功能太赫兹超表面偏振控制器[J]. *物理学报*, 2016, 65(8): 72–79. YANG Lei, FAN Fei, CHEN Meng, et al. Multifunctional metasurfaces for terahertz polarization controller[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(8): 72–79.

- [77] 杨朝晖, 江明珠, 刘永琛, 等. 基于二氧化钒复合超表面的太赫兹带宽可调极化转换器[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1.
YANG Zhaohui, JIANG Mingzhu, LIU Yongchen, et al. Tunable bandwidth terahertz polarization converter based on vanadium[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1.
- [78] 付亚男, 张新群, 赵国忠, 等. 基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究[J]. 物理学报, 2017, 66(18): 73–82.
FU Ya'nan, ZHANG Xinqun, ZHAO Guozhong, et al. A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(18): 73–82.
- [79] QUADER S, ZHANG J, AKRAM R, et al. Graphene-based high-efficiency broadband tunable linear-to-circular polarization converter for terahertz waves[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(5): 1–8.
- [80] ZHAO J, CHENG Y, CHENG Z. Design of a photo-excited switchable broadband reflective linear polarization conversion metasurface for terahertz waves[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1):1–10.
- [81] SASAKI T, NISHIE Y, KAMBAYASHI M, et al. Active terahertz polarization converter using a liquid crystal-embedded metal mesh[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1–7.
- [82] HAN C, PARROTT E, PICKWELL M E. Tailoring metamaterial microstructures to realize broadband polarization modulation of terahertz waves[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 23(4):1–6.
- [83] 李永花, 周璐, 赵国忠. 基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 330–334.
LI Yonghua, ZHOU Lu, ZHAO Guozhong. Terahertz broadband polarization converter based on anisotropic metasurface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 330–334.
- [84] JI Y , FAN F, ZHANG X, et al. Active terahertz anisotropy and dispersion engineering based on dual-frequency liquid crystal and dielectric metasurface[J]. Journal of lightwave technology, 2020, 38(15): 4030–4036.
- [85] SHREKENHAMER D, ROUNT S, STRIKWERDA A C, et al. High speed terahertz modulation from metamaterial with embedded high electron mobility transistors[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9968–9975.
- [86] FAN K, ZHAO X, ZHANG J, et al. Optically tunable terahertz metamaterial on highly flexible substrates[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(6): 702–708.
- [87] WANG D C, HUANG Q, QIU C W, et al. Selective excitation of resonances in gammadion metamaterial for terahertz wave manipulation[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2015, 58(8):1–6.
- [88] 张学迁, 张慧芳, 田震, 等. 利用介质超材料控制太赫兹波的振幅和相位[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 68–73.
ZHANG Xueqian, ZHANG Huifang, TIAN Zhen, et al. Simultaneous control of terahertz amplitude and phase with dielectric metamaterial[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 68–73.
- [89] 袁莹辉, 陈颢宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 186–194.
YUAN Yinghui, CHEN Xieyu, HU Fangrong, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/ graphene hybrid structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 186–194.
- [90] 汪云, 章少华, 沈云, 等. 太赫兹 V-形错位超表面异常折射振幅调控研究[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 136–141.
WANG Yun, ZHANG Shaohua, SHEN Yun, et al. Manipulation on amplitude of anomalous refraction in staggered terahertz V-shaped metasurface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 136–141.
- [91] 龙洁, 李九生. 相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器[J]. 物理学报, 2021, 70(7): 118–125.
LONG Jie, LI Jiusheng. Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(7): 118–125.
- [92] LI J S, YAO J Q. Manipulation of terahertz wave using coding pancharatnam–berry phase metasurface[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1–12.
- [93] WANG T, XIE R, ZHU S, et al. Dual-band high efficiency terahertz meta-devices based on reflective geometric metasurfaces[J]. IEEE Access, 2019, 7: 58131–58138.
- [94] MA F, LIN Y S, ZHANG X, et al. Tunable multiband terahertz metamaterial using a reconfigurable electric split-ring resonator array[J]. Light Science and Applications, 2014, 3(5): 171–178
- [95] BIBER S, HOFMANN A, SCHULZ R, et al. Design and measurement of a bandpass filter at 300 GHz based on a highly efficient binary grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(9): 2183–2189
- [96] TORRES V, SÁNCHEZ N, ETAYO D, et al. Compact dual-band terahertz quarter-wave plate metasurface[J]. IEEE

- Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1679–1682.
- [97] ZHANG X, QUAN L, WEI C, et al. Polarization-independent plasmon-induced transparency in a fourfold symmetric terahertz metamaterial[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 19(1): 8400707.
- [98] WEI Y, TANG L, WANG J, et al. Spectrally and spatially tunable terahertz metasurface lens based on graphene surface plasmons[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1–8.
- [99] 程洁嵘, 董希谱, 王娇, 等. 基于几何相位的亚太赫兹波宽带平面透镜[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(5): 53–59.
- CHENG Jierong, DONG Xipu, WANG Jiao, et al. Wideband flat lens of sub-THz beams by geometric phase[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica 2021, 51(5): 53–59.
- [100] 刘星博, 王球, 许全, 等. 太赫兹超表面计算全息[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 101–111.
- LIU Xingbo, WANG Qiu, XU Quan, et al. Metasurface-based computer generated holography at terahertz frequencies[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(5): 101–111.
- [101] 陈婷. 基于相位梯度超表面太赫兹平面透镜的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [102] 王荣尹, 潘武, 陈琦, 等. 太赫兹超材料分束器设计及其特性分析[J]. 半导体光电, 2019, 40(2): 185–188.
- WANG Xueyin, PAN Wu, CHEN Qi, et al. Design and characteristics of terahertz metamaterial beam splitter[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(2): 185–188.
- [103] 刘桐君. 石墨烯可调谐相位梯度超表面及电磁耦合惠更斯超表面的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [104] 余晴. 用于太赫兹光电导天线的全介质超表面准直透镜[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [105] 苏思思, 延凤平, 谭思宇, 等. 基于站立结构的宽带太赫兹超材料增透膜设计[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 318–323.
- SU Sisi, YAN Fengping, TAN Siyu, et al. Design of antireflection coating based on broadband terahertz metamaterial with stand-up structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 318–323.
- [106] 贺敬文. 太赫兹光场调制超表面器件的设计与表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [107] 李瑶. 基于超表面结构的太赫兹功能器件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [108] ZENG H, ZHANG Y, LAN F, et al. Terahertz dual-polarization beam splitter via an anisotropic matrix metasurface[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(5): 491–497.
- [109] 沈仕远. 基于二氧化钒超表面的动态太赫兹波束调控阵列研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [110] LIU Zhoutian, MENG Yuan, HU Futai, et al. Largely tunable terahertz circular polarization splitters based on patterned graphene nanoantenna arrays[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1–11.
- [111] LENETS V A, KUZNETSOV S A, SAYANSKIY A D, et al. A focusing circular-polarization THz beam splitter based on a self-complementary metasurface[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021, 11(2): 165–174.
- [112] DING C, ZHU H, YE J, et al. Miniaturized base-station antenna element using folded structure and meta-surface[D]// 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing(ICSPCC), Macau, 2020.
- [113] QIU Y, ZHU H, BAI J, et al. Miniaturization of base-station antenna element using non-uniform meta-surface[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, 2020.
- [114] ZHENG P, QIU Y, BAI J, et al. Broadband dual-polarized antenna with enhanced front-to-back ratio using meta-surface[C] //2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), IEEE. Singapore, 2019: 1742–1744.
- [115] AMANATIADIS S, KARAMANOS T, KANTARTZIS N. Radiation efficiency enhancement of graphene THz antennas utilizing metamaterial substrates[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2054–2057.
- [116] 王可蒙. 集成纳米超材料的太赫兹光电导天线研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [117] 肖冰连. 基于超材料反射阵列的太赫兹频扫天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [118] YANG Y, YAMAGAMI Y, YU X, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. Nature Photonics, 2020, 14(7): 446–451.
- [119] LEMIC F, HAN C, FAMAIEY J. Idling energy modeling and reduction in energy harvesting terahertz nanonetworks for controlling software-defined metamaterial[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2020, 10(1): 88–99.
- [120] 沈仕远, 王元圣, 池瑶佳, 等. 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1): 1–6.

- SHEN Shiyuan, WANG Yuansheng, CHI Yaojia, et al. Phase transition material based coding metasurface for two-way terahertz beam steering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(1): 1–6.
- [121] 唐小燕, 柯友煌, 井绪峰, 等. 基于透射型几何相位编码超表面的太赫兹波束自由操控[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 150–163.
- TANG Xiaoyan, KE Youhuang, JING Xufeng, et al. Free manipulation of terahertz wave based on the transmission type geometric phase coding metasurface[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 150–163.
- [122] 李佳辉, 张雅婷, 李吉宁, 等. 基于二氧化钒的太赫兹编码超表面[J]. 物理学报, 2020, 69(22): 385–393.
- LI Jiahui, ZHANG Yating, LI Jining, et al. Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(22): 385–393.
- [123] 傅晓建, 石磊, 崔铁军. 太赫兹超材料及其成像应用研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(6): 12–22.
- FU Xiaojian, SHI Lei, CUI Tiejun. Research progress in terahertz metamaterial and their applications in imaging[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(6): 12–22.
- [124] 王禄炆. 太赫兹快速数字波束重构超表面研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [125] 曾泓鑫. 基于可重构人工微结构太赫兹阵列器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [126] 刘峻峰, 刘硕, 傅晓建, 等. 太赫兹信息超材料与超表面[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 46–55.
- LIU Junfeng, LIU Shuo, FU Xiaojian, et al. Terahertz information metamaterial and metasurfaces[J]. Journal of Radars, 2018, 7(1): 46–55.
- [127] 闫昕, 梁兰菊, 张雅婷, 等. 基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究[J]. 物理学报, 2015, 64(15): 463–470.
- YAN Xin, LIANG Lanju, ZHANG Yating, et al. A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(15): 463–470.
- [128] HAO X, MIN L. 3-D-printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 17(4): 737–755.

[作者简介]

朱海亮 1987年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为超材料、太赫兹器件和天线设计。

王开 1999年生, 硕士生, 主要研究方向为超材料和太赫兹器件。

邱昱玮 1997年生, 硕士生, 主要研究方向为超材料。

刘甘雨 1998年生, 硕士生, 主要研究方向为超材料和天线设计。

牟进超 1985年生, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹器件及成像系统。

(本文编辑: 傅杰)