

太赫兹动态超表面

周天驰, 陈 蓝, 吴虹汝, 兰 峰, 龚 森

(电子科技大学电子科学与工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 太赫兹波段处于微波、毫米波与光波段之间, 其相关技术对下一代高速通信、高分辨成像、智能感通一体等多个信息领域的发展具有重要的意义. 发展太赫兹应用技术需要对太赫兹波束进行操控和信息加载. 动态超表面作为一种新型的实现结构和器件, 是实现该功能的重要途径之一. 本文将以太赫兹动态超表面的调控功能作为分类依据, 从相辅相成的材料、结构、机理及其最终表现的应用演示对幅度调控、相位调控、极化调控、波束调控、高阶非线性调控太赫兹动态超表面 5 个方面进行了概述, 介绍了不同类型动态超表面的相似性与独特性, 并对部分工作进行了指标对比. 最后, 展望了太赫兹动态超表面的发展趋势. 本文希望更多学者可以了解太赫兹动态超表面, 并促进此领域的发展.

关键词: 太赫兹; 动态超表面; 幅度调控; 相位调控; 极化调控; 波束调控; 高阶非线性调控

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2021YFA1401000, No.2018YFB1801503); 国家自然科学基金 (No.61931006, No.62131007, No.U20A20212, No.61901093, No.61871419, No.62101111, No.61921002, No.U1930127); 中央高校基本科研经费 (No.ZYGX2020ZB011, No.ZYGX2019J013, No.ZYGX2021YGLH205, No.ZYGX2021YGLH216); 中国博士后科学基金 (No.2020M683285, No.2021M700706)

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)10-2635-16

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221351

Terahertz Active Metasurfaces

ZHOU Tian-chi, CHEN Lan, WU Hong-ru, LAN Feng, GONG Sen

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: The terahertz band lies between the microwave-millimeter wave band and the optical band, and its related technologies are of great significance for the development of next-generation high-speed communication, high-resolution imaging, intelligent sensor-communication integration systems and other information fields. The development of terahertz application technology requires terahertz beam manipulation and information loading. As a new realization scheme and device, active metasurface is one of the important ways to realize these functions. In this paper, the terahertz dynamic metasurface is classified according to the regulation function of the metasurface, the amplitude regulation, phase regulation, polarization regulation, beam regulation and high-order nonlinear regulation of the terahertz dynamic metasurface are introduced from the complementary materials technology, structure setup, and working mechanisms and their performance in the application demonstrations. The similarity and uniqueness of different types of dynamic metasurface are introduced, and some of the performances are compared. At the end of this paper, the development trend of the terahertz dynamic metasurface is forecasted. It is hoped that this paper helps more scholars get knowledge of terahertz dynamic metasurface hence promoting the development of this field.

Key words: terahertz; metasurface; amplitude regulation; phase regulation; polarization regulation; beam regulation; high-order nonlinear regulation

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2021YFA1401000, No.2018YFB1801503); National Natural Science Foundation of China (No.61931006, No.62131007, No.U20A20212, No.61901093, No.61871419, No.62101111, No.61921002, No.U1930127); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.ZYGX2020ZB011, No.ZYGX2019J013, No.ZYGX2021YGLH205, No.ZYGX2021YGLH216); China Postdoctoral Science Foundation (No.2020M683285, No.2021M700706)

1 引言

太赫兹波段处于微波、毫米波波段与光波段的频率范围之内,其既有微波、毫米波无线传输的特点,又具有光的大带宽的特性。相比微波、毫米波频段,太赫兹的带宽更大、波长更短;相比光波段,太赫兹波的光子能量更低,且波束更容易对准;同时,大分子的振动频率和转动频率多数位于太赫兹频段。因此该频段在近年得到了广泛关注,也成为多学科交叉融合发展的重要领域,推动新一代高速通信、高分辨雷达成像、全新波谱分析技术等信息技术的发展。

太赫兹动态超表面由于具备可以直接作用于空间中的太赫兹波的能力,相比波导内或片上的器件、模块自由度更高,被认为有希望成为下一代太赫兹技术的重要组成部分。太赫兹动态超表面以强调动态可控为重要方向,因此会采用外加的物理场对二维材料、三维狄拉克材料、相变材料、半导体材料、晶体管阵列、磁控材料、微电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)开关阵列、柔性材料等进行控制,融合了偶极谐振结构、电感-电容(LC)谐振结构、电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)、电磁诱导吸收(Electromagnetic Induced Absorption, EIA)、法诺(FANO)等太赫兹超表面谐振结构,实现对材料变化性质的塑形,对太赫兹波进行更有效的调控。

基于对太赫兹波的调控能力,太赫兹动态超表面技术可用于设计各种不同的器件,如幅度、相位、极化调控等针对波前进行整体调控的器件,也包括波束扫描、波束聚焦、波束赋形等针对近、远场波束空间分布特性进行调控的器件等。这些器件主要覆盖了变频与天线等系统中的重要功能单元,因此可以用于太赫兹通信、雷达、成像、传感系统中的直接调制、信道复用、波束扫描、近距离成像、平面透镜、传感探头等具体功能器件的构建。

近年来,受太赫兹动态超表面丰富功能的吸引,国内外研究者展开了广泛的研究活动,包括太赫兹频段的动态材料开发、高灵敏度探头设计、高速率幅度调制、大角度相位调制、宽视野波束扫描、高自由度焦点控制、全息成像等,对应功能的器件与系统也不断涌现在人们的视野中^[1-3]。为了方便理解,本文将以太赫兹动态超表面最终表现的功能为分类依据,对目前为止学者们提出的超表面功能按照幅度调控、相位调控、极化调控、波束调控与高阶非线性的顺序依次进行具体介绍。从相辅相成的材料、结构、机理,到前者最后统一于的应用演示等方面进行叙述,并对这些不同功能的动态超表面的关联性与独特性进行分析和对比。

2 不同功能的太赫兹动态超表面

2.1 太赫兹幅度调控超表面

太赫兹幅度调控超表面通常采用外加物理场的方

式调谐超表面的谐振,改变单元的散射或吸收特性,从而实现透射或反射场强的变化^[4-13]。早在2006年,第一篇发表在Nature上太赫兹动态超表面的工作涉及的就是幅度调制^[14]。由于其功能简单,该方向存在大量的研究成果,是太赫兹动态超表面调控的基础^[15-24],而且也是各种材料、结构、机理的试验场,可以揭示某些体制的应用潜力。

对于散射式的幅度调控动态超表面,当超表面处于截止态时,大部分太赫兹波的能量被反射或透射,耗散在自由空间内。这类动态超表面一般可以等效为无耗网络,可以较为容易地分析反射、透射波性质,在调制器、多掷开关等应用中较有潜力。

2019年,Zhao等人^[25]提出了一种多态切换的太赫兹动态超表面。该表面采用二维电子气作为核心动态器件,在340 GHz波段实测观察到了93%的开关比,支持3 GHz的调制速率,并且通过对动态单元列编码控制的方式可以观察到显著的谢振峰偏移,丰富了太赫兹动态超表面的编码调控理论。2021年,Zhao等人^[26]提出了一种EIT太赫兹动态超表面,他们通过使用激光激发硅改变其能级,影响电导率,消除了EIT谐振侧面的两个LC谐振,改变了人造原子的等效结构,从而实现调控。这种调控体制仅需要5 ps响应,恢复也只需要200 ps。该超表面在0.7~1.2 THz范围内传输特性产生了明显的变化,而0.2~0.7 THz的传输特性变化并不大。这种快速响应、快速回复的特征与频率特异性强的特点表明了这种调控体制有应用到太赫兹窄带调制的潜质,成为频分复用系统的组成部分。2021年,Tan等人^[27]提出了一种利用锗覆盖半个劈裂方形金属环的超结构,在0.66 THz附近实现了准连续域束缚态谐振。他们利用这种谐振并激发锗,在实验中实现了准连续域束缚态谐振到光栅的转变,实验中可以显著地改变谐振频率处的传输系数约50%,并且这种响应的弛豫时间仅有7 ps,具有高速率调控的潜力。这种利用动态材料的某一状态构建物理机制,并用另一种状态破坏或调整这种物理机制的表现形式,为学者们设计太赫兹动态超表面提供了更加丰富的思路。

He等人^[28]使用了三维狄拉克准金属作为动态材料,通过调谐表面三维狄拉克材料层的费米能级,实现透射强度与反射强度的同时调节。在不同的能级仿真中,超表面的响应曲线呈现出谐振峰频移的趋势,谐振中心频率可以覆盖1 THz上下最大80%相对带宽的范围,对应的幅度调制效果最高可达99%。他们使用了不同的表面结构,且均能呈现出明显的谐振峰频移与幅度调控性能,也进一步说明了动态材料对太赫兹动态超表面的决定性作用。除此以外,特定厚度下相同能级

的三维狄拉克材料与石墨烯材料会引发不同的谐振模式,谐振的品质因数也有较大差异,这也反映了这两种材料应用到太赫兹动态超表面本质上的不同。

为了满足应用层面的需求,太赫兹动态超表面的响应速率一直是一个热门话题,而电子迁移率较高的石墨烯在太赫兹频段有着较大发展的潜力. 2015年, Liu 等人^[29]提出了一种互补工字形 LC 谐振器与带状石墨烯相结合的结构,通过电压控制石墨烯的能级,从而实现对超结构电导率的改变,可以在 7~11 THz 范围内调控谐振峰的数量与频率,实验中 4.5 THz 附近调制深度可达 40%. 并且实验中提供了动态测试的结果,可以满足 40 MHz 驱动信号的控制. 其覆盖太赫兹波段频率高端,且能够实现有效的动态调制,这种基于石墨烯的太赫兹动态超表面为以后的太赫兹频率高速动态超表面调制器打下了基础,提供了可靠的解决思路. Wang 等人^[30]于 2022 年提出了一种基于石墨烯的内外双环结构,通过将激光泵浦加载在环间的石墨烯结构上,于 0.5 THz 处实现了 46.2% 的谐振强度提升,总透射强度超过 62%,此外其响应时间低于 10 ps,非常有潜力作为下一代太赫兹高速调控核心器件。

太赫兹散射幅度调控超表面典型参数对比如表 1 所示。

表 1 太赫兹散射幅度调控超表面典型参数对比

年份	频点/THz	调制深度	研究类型	动态材料	对比文献
2015	4.50	40%	实验研究	石墨烯	文献[29]
2019	~0.34	93%	实验研究	二维电子气	文献[25]
2021	~0.80	~28%	实验研究	硅	文献[26]
2021	~1.40	99%	理论研究	三维狄拉克材料	文献[28]
2021	~0.66	~50%	实验研究	锗	文献[27]

除了上文所述的散射式超表面外,当超表面处于截至状态时,部分入射的太赫兹波能量无法达到出射的方向,转而被超表面吸收转化为热能. 因此,还有一种吸收幅度调控动态超表面^[31-43]. 这种形式的动态超表面由于针对吸收做了特异性设计,在特定的频段内可以达到极高的吸收率,散射太赫兹波能量较低,在隐身等方面也有着潜在应用可能。

一般而言,人们认为控制信号是被均匀加载在人工原子上的,但是如果稍作设计,就可以脱离这种局限性. Zhao 等人^[44]提出了一种基于工字形凸起硅结构的吸收超表面. 该表面的硅结构凸起于衬底平面,且上有内部深槽. 随着正上方投射的泵浦能量的变化,斜入射的太赫兹波在 2 THz 频率的实验内可以表现出明显的吸收率变化. 无泵浦时,准完美吸收发生在 1 THz 附近,且 90% 吸收率区间有 913 GHz 之多. 激发时最佳吸

收峰也表现出了 500 GHz 的频率移动. 他们还额外考虑了泵浦能量随深槽衰减,导致硅结构被不均匀激发的情况,很好地拟合了实验结果. 这种不局限于二维结构的超表面通过引入深度变量,结合合适的调控物理机制,进一步增加了太赫兹动态超表面调控的自由度,使人们在三维高低差结构的设计中看到了进一步发展的希望。

对一种特定的动态材料的控制也具有局限性. 为了拓展太赫兹动态超表面的灵活性, Shen 等人^[45]提出了一种使用两种动态材料协同调控的吸收超表面,通过调整费米能级与温度,在数值计算中其最大吸收率可以在 89%~100% 范围内调谐,点频吸收率更是可以实现超过 90% 的调制深度;特别地,在 0.69 THz 处,器件展现出来对太赫兹波的完美吸收. 动态超表面的完美吸收与调谐过程中的频移特性可以由耦合模理论与微扰理论被良好地解释. 这种基于双动态材料协同调谐的模式进一步提升了超表面的调控性能,给予设计人员更大的想象空间。

超表面结构结合分形理论也是研究热点之一. Badri 等人^[46]利用金属构成十字形结构,并利用二氧化钒在金属结构周围形成三阶分形结构,在模拟中使得二氧化钒相变前后从多个窄带的谐振吸收峰变化带宽可达 6.17 THz 的宽带吸收带. 窄带谐振时,6.05 THz 处的吸收最高可达 99%. 这种十字星双对称轴的分形结构也保证了其对极化的不敏感性. 由于分形结构的整数倍关系,人们可以根据其几何特性构建多波长的谐振系统,从而更有效地利用寄生谐振模式,实现对太赫兹波更自由的调控。

Wang 等人^[47]利用工字形结构在仿真中于 0.5~3.5 THz 范围内实现了 3 个吸收率较高的谐振峰,且 3 个谐振峰的特性与工字形的开口尺寸有着密切关系. 他们通过对结构的设计,使用相变材料填平工字形开口,在相变材料处于金属态时有效地消除一个谐振峰,且对其余两个谐振峰的影响并不显著. 通过这种对结构尺寸的细致研究,人们可以此建立结构尺寸与谐振特性之间的关系. 一方面可以加深对结构谐振机理的理解,从而优化结构设计;另一方面,也可以对不同尺寸下的结构实现简单的预测,加速设计过程。

太赫兹吸收幅度调控超表面典型参数对比如表 2 所示。

虽然太赫兹幅度调控动态超表面得到了较早的发展,但是受限于自由空间阻抗与衬底阻抗巨大的差异的同时,太赫兹与结构、器件的弱相互作用难以得到完全的改善,只有极少的工作可以同时兼顾开启时的高效率传输与关断时的良好隔离. 局限于一个维度的幅

表 2 太赫兹吸收幅度调控超表面典型参数对比

年份	频点/THz	最佳调制深度	研究类型	动态材料	对比文献
2019	1.00	>58%	实验研究	硅	文献[44]
2022	0.69	~96%	理论研究	三维狄拉克材料、钛酸锶	文献[45]
2022	6.05	>70%	理论研究	二氧化钒	文献[46]
2022	2.00	>94%	理论研究	二氧化钒	文献[47]

度调控与较差的抗噪声性能也限制了这类动态超表面的应用. 但是作为太赫兹动态超表面的排头兵, 太赫兹幅度调控动态超表面基于其材料、结构、机理的研究也

为后续其他功能的动态超表面的发展提供了不可或缺的助力.

图 1 为部分上文所提及的太赫兹幅度调控超表面.

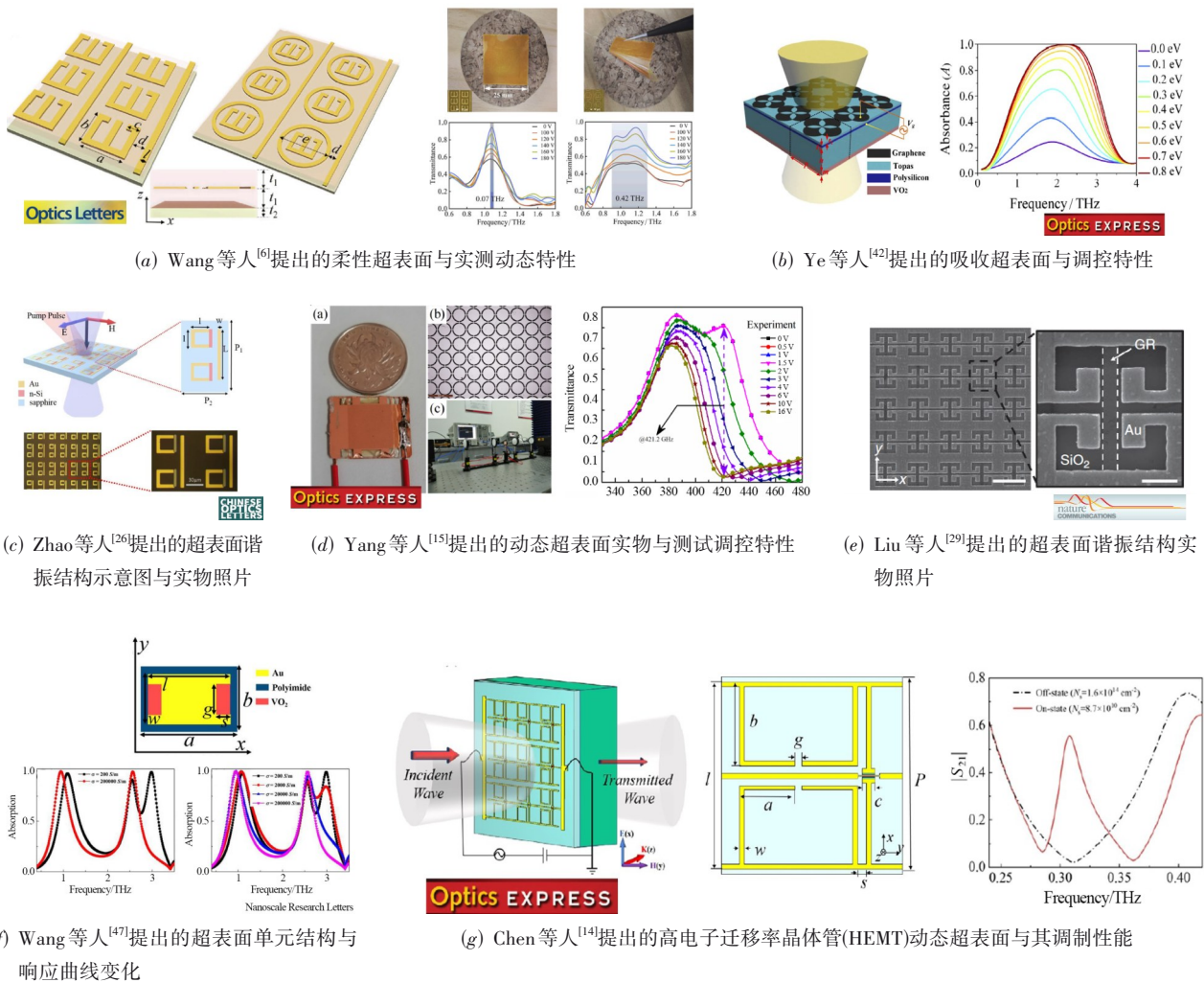


图 1 部分上文所提及的太赫兹幅度调控超表面

2.2 太赫兹相位调控超表面

与太赫兹幅度调控超表面类似, 太赫兹相位调控超表面也利用了谐振的改变实现对应的调控^[48-50]. 除了直接对相位的改变, 相位调制的结果还会表现为各种群特性, 如对群时延、群指数的调控等. 受幅度调控太赫兹动态超表面发展的启发, 太赫兹相位调控超表面也得到了快速的发展.

虽然存在关联, 但是相位调控动态超表面的机制与幅度调控的最优模型仍有区别. 2015 年 Miao 等人^[3]报道了一种基于石墨烯的太赫兹动态超表面. 他们发现如果关闭传输通道, 令超表面在单端口形式下工作将更容易获得较大的相移. 通过调整石墨烯的能级, 其损耗也会发生相应改变, 从而改变了结构的阻尼谐振态. 最终, 该表面在 0.3~0.9 THz 范围内产生强烈的相

位调制效果,其相移超过了 $\pm 180^\circ$ 。

目前,有很多报道可以实现大角度相移,但是其幅度也会随相位的改变剧烈变化,使该体制难以应用在复平面调制的通信与相控体制上。2018年,Zhang等人^[51]提出了一种基于HEMT的太赫兹动态超表面。该表面通过将偶极谐振和LC谐振结合,利用HEMT的通断特性,在0.35 THz处实现了 137° 的相移。通过对通断两态双谐振的构建与合理的频率选择,其在实现大相移的同时兼顾了幅度特性,波动在6 dB以内。该超表面动态区域集中,且电导率变化较大,可以轻松地通过谐振方向上拆分、合并的方式构建不同的耦合状态,从而实现多种不同机理谐振态之间的切换。Huang等人^[52]则采用石墨烯双层结构在模拟中实现了 180° 的相移。其上下层结构类似,均为方形金属谐振环与内部的十字型金属构成,石墨烯则分为4块布置在十字形金属末端,连接内外层结构。这种结构通过费米能级的改变可以将内外层的结构实现电连接与分离,从而实现谐振态的改变,在4.3 THz处实现了较为良好的调制效果,传输系数也仅在22%~32%变化,相对差值较稳定。

复合动态材料协同控制单一调控指标的方案在太赫兹动态超表面上也有理论研究。2021年,龙洁等人^[53]报道了一种基于相变材料的太赫兹动态超表面,在仿真中可以在0.736 THz处实现超过 355° 的相移,且超过 350° 相移的频率范围达到20 GHz以上。他们采用了双层金属结合二氧化钒的结构,金属间采用液晶填充,通过同时对双层结构的调谐实现大角度相移的功能,对大角度相移的实现方案进行了补充。

由于K-K关系的存在,相位与幅度之间存在关联性,涌现了一批多功能太赫兹调控超表面,其在不同的配置下(主要是频率)可以实现不同的调控功能^[54-66]。早在2012年,Gu等人^[67]就发现EIT谐振峰的消除可以显著改变群时延差值。他们提出了一种基于EIT的太赫兹动态超表面,其于0.75 THz附近产生了EIT峰。EIT结构内的LC谐振器缺口处被填入了硅,从而在激发态可以破坏EIT峰。实验也证实了该现象的存在,并实现了峰值处幅度调制。除此以外,他们还研究了结构的群时延效应,也在EIT峰附近观察到了明显的群时延变化,从EIT的双峰群时延样式转变成了单谐振群时延样式。这种幅度调控驱动的群时延调控为未来的相位调控可重构超表面提供了解决方案。通过动态材料的布置,把部分原有人工原子超结构蒙蔽是一种常用的谐振切换手法。Xiao等人^[68]于2018年提出了一种基于石墨烯的EIT太赫兹动态超表面。同样是控制子谐振的

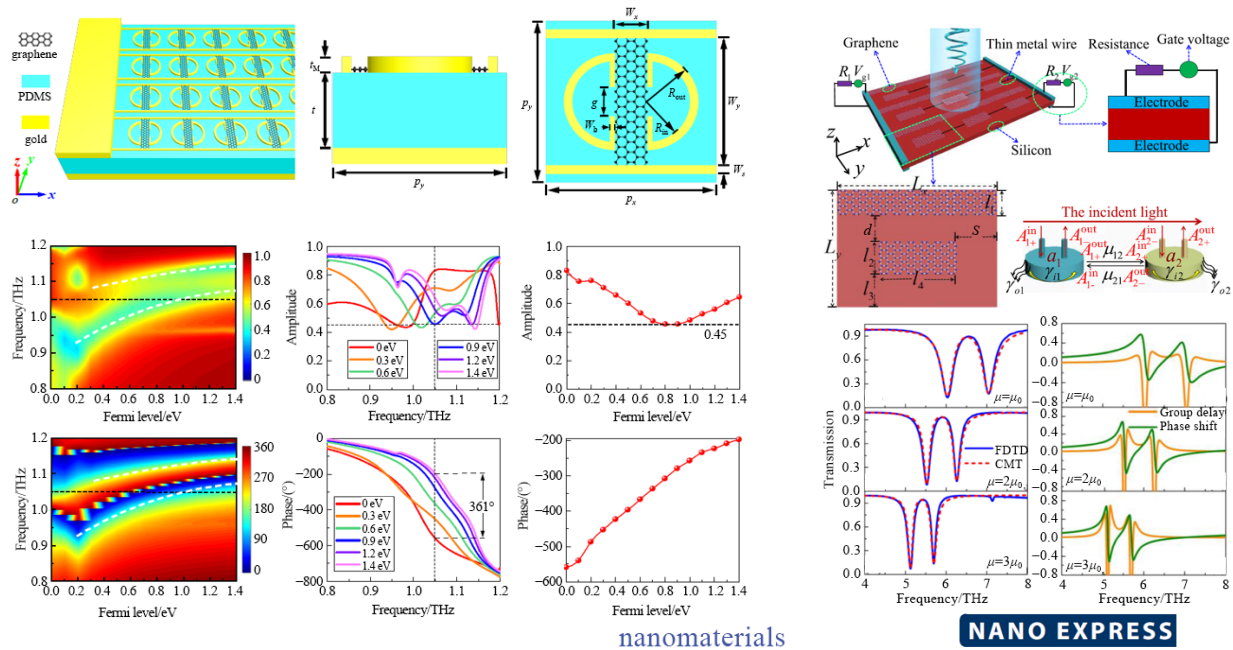
消失与存在,石墨烯作为动态部分位置处于EIT超表面下方,由两个电极控制。在0.7 THz附近,通过对费米能级的改变,EIT现象会逐渐消失,最终表现为单谐振特性,实现透明到隔离的变化现象。与此同时,表面的相位与群时延也会发生剧烈改变。这种动态材料作为衬底,通过衬底改变覆盖原有结构特性的方案可以有效地控制子谐振的出现与消失,适合未来潜在频率选择性强的应用场景。

为了实现透射特性与反射特性的相互转换,互补结构也被广泛地应用在太赫兹动态超表面中。Yang等人^[69]则是利用了传统EIT谐振的互补结构,并使用石墨烯填充偶极谐振结构部分,实现了多功能的太赫兹动态调控超表面。模拟中其反射系数在0.7 THz处产生了明显的改变,群时延波动也在该频点附近达到了1.5 ps。他们向人们表明了互补原理在太赫兹动态超表面的设计上依然生效,可以使用该原理构建各种新型的动态超表面结构,实现透射、反射调制的结构转换与设计复用。他们还发现,通过部分遮蔽石墨烯层,可以实现光、电控制的差异化响应,这也进一步丰富了太赫兹动态超表面的调控理论厚度。

强磁场作为控制信号,利用洛伦兹力对超表面进行动态调控也具有理论可行性。Lu等人^[70]报道了一种石墨烯动态超表面。其基本结构为石墨烯块,在外加强磁场的情况下,由太赫兹波激发的表面电流会受洛伦兹力影响,从而产生调制效果。仿真中,结构在0.2 THz附近,在最大6 THz的磁场下可以产生较为明显的幅度传输率改变,在100 GHz处相移也达到了接近0.6 rad,频率更低时相移更加显著。这研究向人们展示了一种基于磁场调控的机理,为后续研究提供了新的思路。

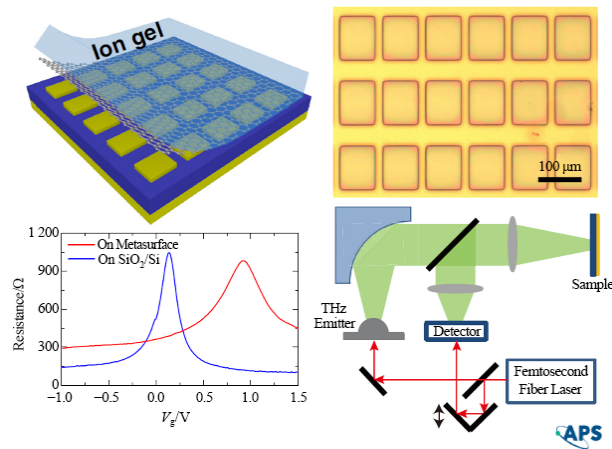
太赫兹相位调控动态超表面虽然可以作为延时器对太赫兹波的群效应实现调制,但是更多的研究关注点在于直接移相。原因之一是除了服务于相位的调制功能的通信、雷达等信号的产生外,相位调控的另一个重要潜在应用就是利用不同的相位实现对太赫兹波束的调控。对于满布相控线阵体制而言,在阵列足够长时,为了实现波束的精细扫描,每个单元的相移需要覆盖 360° 的范围,因此众多学者不断在最大相移上寻求突破,希望能够找到可以实现满角度、高位数相移的方案。因此,在不同频段发展出具有低损耗、高幅度均一性与大相移等的太赫兹动态超表面一直是相关领域学者们不懈努力的目标。

部分上文提及的太赫兹相位调控超表面如图2所示,典型参数对比如表3所示。

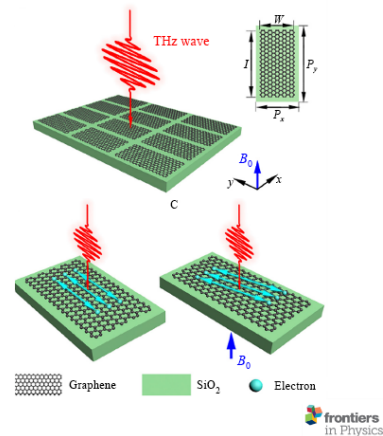


(a) Wang 等人^[49]提出的动态超表面与其在不同费米能级下的幅相特性,以及在特定频点的幅相变化

(b) Liu 等人^[58]提出的动态超表面在不同石墨烯特性下的相位特征



(c) Miao 等人^[3]提出的超表面结构与实验光路



(d) Lu 等人^[70]提出的超表面结构与原理示意图

图2 部分上文所提及的太赫兹相位调控超表面

表3 太赫兹相位调控超表面典型参数对比

年份	功能频率范围/THz	相位改变	群时延	研究类型	动态材料	对比文献
2022	~0.60~0.85	—	>5.9 ps	实验研究	硅	文献[66]
2015	~0.31	360	—	实验研究	石墨烯	文献[3]
2012	~0.65~0.75	>1 rad	>6 ps	理论研究	石墨烯	文献[67]
2018	~0.29~0.43	137	—	实验研究	HEMT	文献[51]
2018	~0.60~0.90	—	>1.5 ps	理论研究	石墨烯	文献[68]
2020	~0.04~0.27	~0.6 rad	—	理论研究	石墨烯	文献[69]
2021	~0.74	355	—	理论研究	液晶、二氧化钒	文献[53]

注:由于K-K关系,超表面功能多样,此处使用功能频率范围代替最优频率点指标。

2.3 太赫兹极化调控超表面

除了在复平面上的对于幅度与相位的调控,由于人工原子可以自由地设计形状,各向异性很容易被实现,结合极化光栅的应用,准光的太赫兹波作用方式使极化调控成为可能^[71-76]。除了极化调控功能,极化转换也常作为一个中间桥梁用于其他的太赫兹动态功能。

Zhang 等人^[77]提出了一种基于石墨烯的动态超表面,每个单元包含相互正交的两个分布于不同层的金属条与两对石墨烯条。通过对石墨烯施加不同的控制电压,在仿真中可以展现出 1.2 THz 内反射波的幅度、相位与极化调控效果。施加 45° 垂直入射的线极化波的情况下,仿真中在 0.87 THz 处可以实现极化角从 0~90° 的调控。值得注意的是,两对石墨烯条可以独立施加控制信号,因此可以引入不同的反射相位,最终实现线极化到椭圆极化波的转化,轴比优于 10 dB。这种双控制信号的太赫兹动态超表面更好地发掘了太赫兹动态超表面的潜力,实现了更加丰富的太赫兹波调控功能。Cong 等人^[78]提出了一种偏振态调制太赫兹动态超表面,通过斜向布置缺口金属环阵列,并利用硅填充环的缺口实现调制性能,以实现各向异性的响应。在 0.7 THz 附近,该表面可以实现 85% 的极化调制性能且在 0.84 THz 处可以实现输出为线极化与椭圆极化的动态控制。除此以外,他们还研究了金属环缺口尺寸呈梯度分布的情况:这样可以控制对太赫兹波作用的相位,最终实现静态的对波束方向的偏转。这种偏振调控结合梯度结构的方式为后续的波束调控打下了基础。

除了简单的单物理场控制,也有学者思考在超表面上实现物理场转化的可行性。2018 年, Nouman 等人^[79]提出了一种基于二氧化钒的太赫兹动态超表面。该超表面通过将二氧化钒接入控制电路,调谐通过的电流来对超表面进行局部加热,让电流场转化成热场,从而使二氧化钒在金属态与介质态之间切换。该表面在 0.47 THz 处实现了 86° 的相移。除此以外,输出极化也可以在材料相变前后从圆极化转换到线极化。这种局部加热的方式相比整体加热更容易散热,能够在有效增加器件功率容量的同时实现快速的状态回复,增加调制速率。

由于远场 TEM 波的正交极化的数量有限,相比幅度、相位调控,人们对于极化调控的响应速率的需求并不迫切,因此衍生出了一系列新型的机械式太赫兹极化调控动态超表面。Zhao 等人^[80]于 2018 年提出了一种基于微机械悬臂的太赫兹动态超表面,可以用于对于幅度、相位于极化的调控。通过直流电压的控制,静电力可以有效地改变悬臂的形态、位置,从而在不同控制电压下形成不同的超单元物理结构,进而在 0.82 THz

处实现了输出电磁波从线极化到圆极化的转换。与此同时,由于人工原子的各向异性与悬臂的特殊方向设置,其可以固定 y 极化的响应,仅对 x 极化进行调谐。最终,实验观察到通过悬臂的运动,可以实现谐振点从 1.04 THz 移动到 0.81 THz,从而实现各种超表面的动态功能。这种微观物理结构上的改变能够有效地改变超表面的电磁响应,可控性强。2019 年, Lee 等人^[81]提出了一种可以拉伸的 PDMS 为衬底的太赫兹动态超表面薄膜,可以在线极化输入的情况下通过拉伸改变超表面的形状,实现对超表面等效于半波片与 1/4 波片的切换。值得注意的是,该结构于 0.89 THz 处等效于一个半波片。这是首次太赫兹单层结构半波片的报道。这种依靠外力实现物理结构改变的太赫兹动态超表面由于没有增加额外的有耗材料,对太赫兹波的吸收较小,能量利用率潜力较高。

法拉第旋转的存在使极化和互易性一直是相互关联很紧密的话题,学者们也在思考增强这种效应的方法。Mu 等人^[82]提出了一种非互易材料结合表层方框型金属超表面的结构,模拟中在 0.91 THz 处实现了明显的磁控吸收率调控,在该频点也可以显著地观察到随着磁感应强度从 0 Gs 到 7000 Gs 的变化中接近 120° 的输出波束极化偏转现象。该动态超表面可以在 0~75° 入射角的范围内基本保持合理的性能表现。相比没有超结构的纯非互易材料,其法拉第旋转可达 5.3 倍。这一研究表明即便有磁控法拉第旋转的存在,人们仍然需要设计合理的表面结构,以最大限度地利用材料的旋转效应。

至此,本文对波前整体调控的太赫兹动态超表面已经介绍完毕。这些超表面给予了人们构建复杂太赫兹准光系统的理论可能,包括复平面调制、简单极化复用与切换等功能。然而随着需求的升级,这类太赫兹动态超表面不是研究的终点,其所应用的材料、结构、机理构成了后文波束调控太赫兹动态超表面的基础。

部分上述太赫兹极化调控超表面如图 3 所示,典型参数对比如表 4 所示。

2.4 太赫兹波束调控超表面

不同于上述 3 种对入射太赫兹波进行整体调控的动态超表面,由于动态超表面可以对每个区域进行异化控制,仍有一类动态超表面可以实现对太赫兹波的波束的调控。这种调控基于惠更斯原理,通过对不同动态超表面不同位置的作用相位进行调整,可以使作用后的太赫兹波传播方向异于均匀介质反射时 Snell 定理所指示的方向。

波束扫描太赫兹波束调控超表面一般会将会将相位分布设置为等差数列,合成的波束指向由公差与单元间距决定。如果将动态超表面视为天线,则对波束方向的

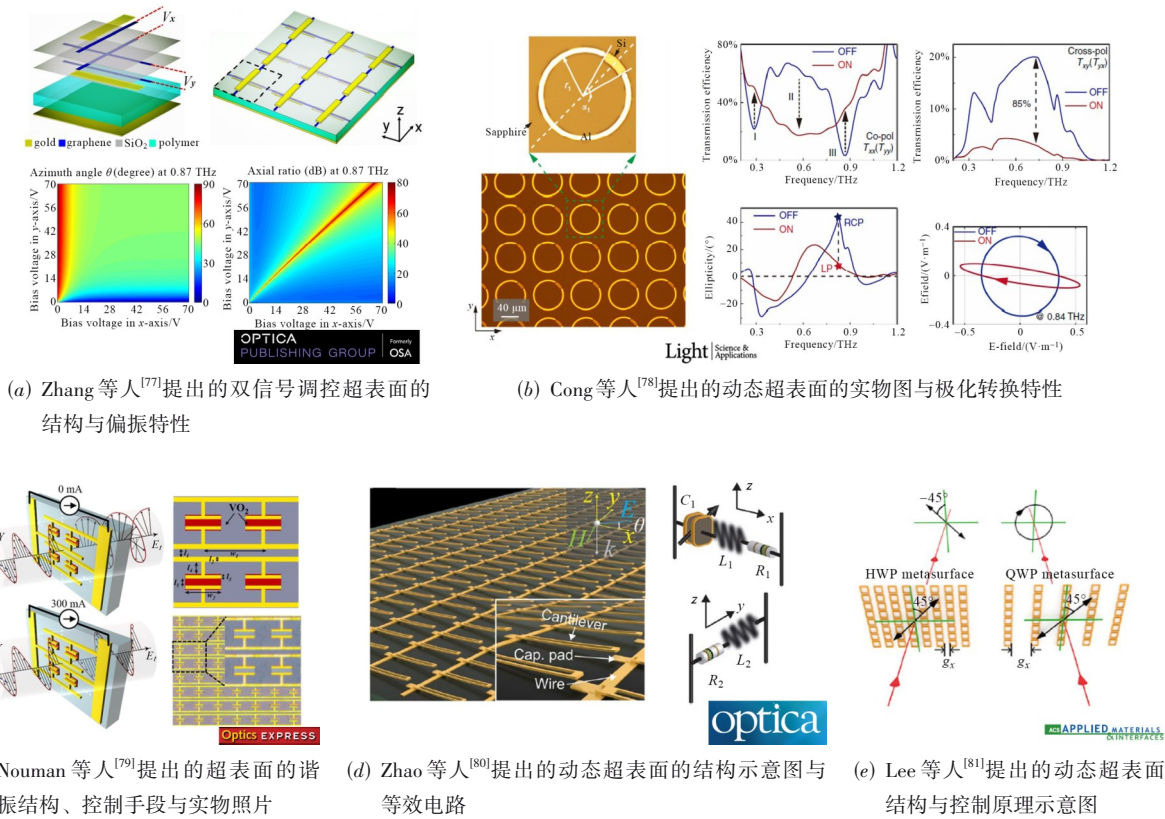


图3 部分上文所提及的太赫兹极化调控超表面

表4 太赫兹极化调控超表面典型参数对比

年份	频点/THz	极化转化类型	研究类型	动态材料	对比文献
2014	0.87	线极化	理论研究	石墨烯	文献[77]
2018	0.46	线-圆	实验研究	二氧化钒	文献[79]
2018	0.84	线-圆	实验研究	硅	文献[78]
2018	0.82	线-圆	实验研究	MEMS开关	文献[80]
2019	0.89	线-圆	实验研究	柔性衬底	文献[81]
2020	0.91	线极化	理论研究	磁控非互易材料	文献[82]

控制等效于改变天线的指向,相比机械式的天线旋转方案,动态超表面响应速度较快,其应用背景更广^[83].

受限于太赫兹相位调控超表面的精度,作为光学中常用的光栅式结构,这种限制可以被很好地解决.2020年,Wu等人^[84]提出了一种类光栅的编码太赫兹动态超表面,其利用超结构底部液晶的偏转态来控制超表面对太赫兹波的反射特征,形成了“0”“1”单元.通过设置不同的编码周期,其实现了在672 GHz处最高31.5°的波束偏转实测结果.这种类光栅式的分块太赫兹动态超表面可以在有限的两态变化状态下通过光栅的编码理论支持,实现在一个维度上对波

束的方向特异性操控与基础调制.基于不同的人造原子通过协同作用的机理可以实现对波束的调控,同时也给了人造原子之间耦合、编码的空间.Liu等人^[85]于2022年提出了一种双单元编码的太赫兹动态超表面.该超表面通过将人工单元两两合成一组,并控制单元底部的液晶电磁特性,通过合理的控制信号编码,在利用了表面单元耦合的情况下,该表面在0.323 THz处实现了最大±21°的波束扫描角度.这一研究表明编码式动态超表面单元间的耦合不一定需要被消除,如果利用好其耦合并定向优化也可以获得良好的电磁特性.

随着相移超表面的不断发展,更大的梯度相位调控被引入,波束扫描的角度范围被大大提高.Wang等人^[86]于2022年提出了一种单元结构相同、梯度调控的太赫兹动态超表面,其基本超单元(META单元)为可调相位的石墨烯表面.在3.4~6.7 THz内,通过调整石墨烯的费米能级可以实现超过350°的相移变化,该相移足以实现大角度扫描的相位梯度分布.借助合理设计控制信号的梯度分布调整相位,该设计在模拟中可以实现最大单边79.11°的波束指向移动.除此以外,该动态超表面可以对最小20°的入射角仍然产生波束扫描的响应.这种全角度变化、高相位调制精度的梯度单元

为大角度波束扫描提供了解决思路。

由于互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)这类高一致性、高集成度的工艺被拓展到太赫兹频段,其在波束控制太赫兹动态超表面上的优势被迅速发现。Monroe 等人^[87]于 2022 年提出了一种基于 CMOS 编码式太赫兹动态超表面的主动式相控雷达系统,通过设计 CMOS 反射移相单元并对其及进行编码,可以将馈源发射的电磁波以特定窄角度发射,并接受反射的电磁波,实现雷达的功能。在 265 GHz 处,其波束宽度小于 1° ,且可以实现 60° 以上的波束偏转角度,可以对 6 m 内的物体进行有效识别。这种太赫兹动态超表面的窄波束雷达系统应用给了人们信心,相信未来将出现越来越多的太赫兹动态超表面的应用系统。

聚焦太赫兹波束调控超表面则会使用相邻单元相位差值渐变的相位分布构建出一个聚焦光斑。这种有可调焦点潜力的太赫兹透镜也吸引了诸多学者的关注^[88-90]。Kim 等人^[91]提出了一种物理结构梯度分布的太赫兹动态超表面,每个单元结构受统一的信号控制。其单元结构为金属面上的 U 型缝隙,通过调整其放置角度可以控制反射的相位。石墨烯作为动态材料可以调控作用后的太赫兹波的反射效率。通过合理的结构梯度设置,可以在实测中于 1.15 THz 处实现 20° 的偏转波束的强度动态调控,也通过排列单元,调整其相位梯度分布,在模拟中使整个超表面化身成聚焦强度可调的太赫兹透镜。这种仅仅需要旋转单元结构角度就可以实现梯度的方案,极大地简化了设计流程,方便了后续更复杂功能超表面的设计。Shen 等人^[92]提出了一种底部液晶、顶部梯度硅柱的太赫兹动态超表面,通过对底部液晶添加偏置,在 0.9~1.4 THz 的范围内,实测焦距变化高于 33%。他们还使用该超表面搭建了成像系统,通过偏置的变化可以有效地观测到对镂空样本探测的差异。Cong 等人^[93]则通过二氧化钒结合内外缺口环结构实现不同极化的调控与转换,在 0.34 THz 处实现了太赫兹波聚焦的同时,通过使用不同的动态超单元排布实现焦点位置的轴向-法向不同功能调控,焦点位置既可以在 11 mm、13 mm 处切换,也可以实现聚焦波束 60° 的偏转。此外,还可以通过卷积理论进一步丰富该类太赫兹动态超表面的调控能力。

波束赋形太赫兹波束调控超表面则不拘泥于单波束或单焦点,根据对有限位置或无穷远点不同位置的聚焦需求可以反向推算超表面上的相位分布,从而实现太赫兹波波束的任意调控,实现多波束、近场单平面多点聚焦、近场多距离多焦点聚焦等功能^[94,95]。为了实现复杂的波形,除了传统的直接对相位实现改变的

方法,太赫兹动态超表面理论也借鉴了低频段的频控阵理论^[96],发展出了太赫兹时空编码调制动态超表面。这一类超表面通过时间、空间的共同编码调控,利用不同频率产生的空间谐波引入的单频点相移来实现波束控制的目的。但是由于这类调控体制复杂,受限于太赫兹频段的工艺水平,实际的实现较为困难,目前主要集中在理论研究中^[97]。

Zheng 等人^[98]提出了一种石墨烯结合金属双半圆的结构,模拟中通过控制石墨烯的能级来使其在 0-1 编码单元间切换,这两个结构对 4.4 THz 太赫兹波的作用相位差可以达到 180° 。通过合理地排布 0-1 单元,可以实现对称的波束分裂效果。他们还分析了基于 4 种不同结构编码表面的二维波束控制特性,虽然不涉及动态调制,但是也充分展示了这种结构的潜力。Wang 等人^[99]提出了一种缺口环阵列与底部二氧化钒薄膜构成的动态超表面,实验中通过温度的控制可以在 0.8 THz 实现单个大光斑(20°C)与 4 个小光斑(70°C)之间的切换。通过改变缺口阵列的排布,该超表面还可以在 70°C 下产生艾利光束。这种动态梯度超结构阵列产生多种性质波束的实际应用给了太赫兹动态器件研发人员更强的信心。

为了解决工艺不稳定、功能自由度低的问题,CMOS 工艺同样被引入到波束赋形太赫兹波束调控超表面领域。2020 年, Venkatesh 等人^[100]提出了一种 CMOS 编码式太赫兹动态超表面,其采用背馈方式,在每个环形 META 单元上使用了 8 个独立控制的开关,可以实现最多 84 种不同的裂环谐振状态。单元整体变化时,其可以对高于 1 GHz 的控制信号实现约 25 dB 调制深度的响应。通过让单元处于其中 3 种不同的谐振状态,其可以控制 5 mm 处的波束形状在 P 型与 U 型之间切换。这种高自由度的波束赋形能力给太赫兹成像系统提供了新的潜在解决方案。

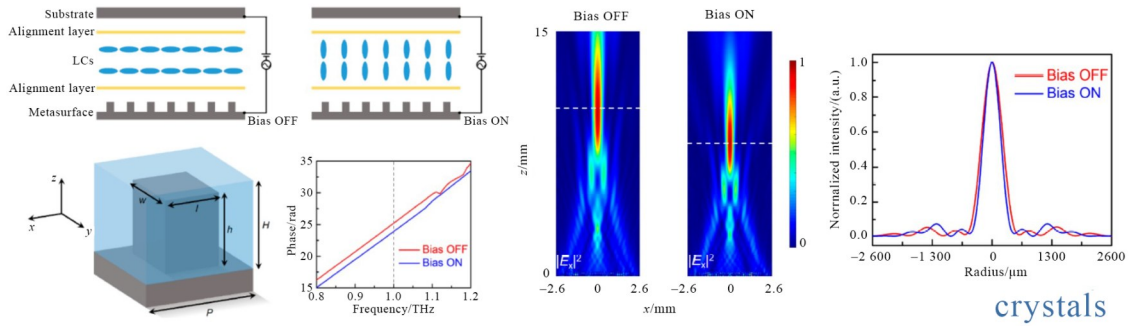
针对近场波形,除了对焦点的控制,还有一种可以用于涡旋波束产生的超表面。同样通过对太赫兹波相位的控制,涡旋波调控超表面可以在同一近场指向下生成相互正交的不同阶数涡旋波信道,实现从均匀平面波到高阶涡旋波信道之间的切换。Wang 等人^[101]于 2022 年提出了一种梯度式太赫兹动态超表面,其基本结构是由石墨烯与金属合并而成的“禁止标志”型结构,不同的石墨烯与金属的比例可以获得不同的反射相位。通过合适的相位梯度设置,一方面可以在 1.2 THz 处产生 1 阶太赫兹涡旋波,另一方面可以通过调节超表面上石墨烯的费米能级实现反射涡旋波的幅度控制。通过对相位梯度的合理布置,其也可构成在 1.2 THz 处的聚焦于 $918\ \mu\text{m}$ 的可调强度透镜。本文通过合适的相位梯度布置证明了只要单元结

构可以实现可调的相位梯度,并具有一定的幅度调制能力,其调幅能力有可能扩展到各种以该单元为基础的超表面上,并展现出各异的波束形状。

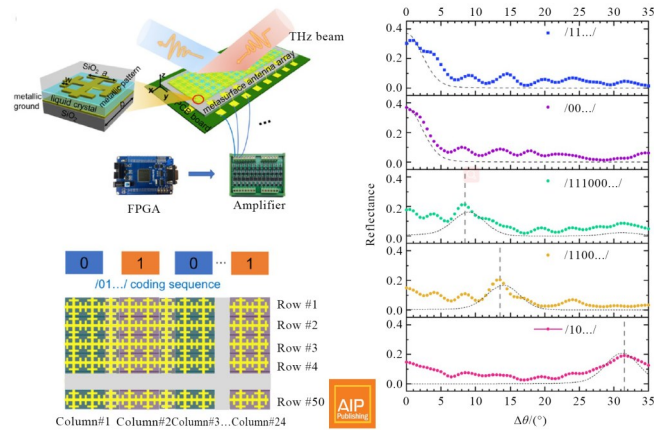
虽然控制理论充足,波束控制太赫兹动态超表面受限于该频段的硬件发展进度,报道并不如微波、毫米波一般,但是2022年以来几份振奋人心的研究成果与

应用给了全世界研究者更充足的信心.随着材料的迭代、结构的创新,低频段的控制机理终将能够在太赫兹频段被应用,甚至基于太赫兹频段的特点开发出自己独特的运行规则与方案。

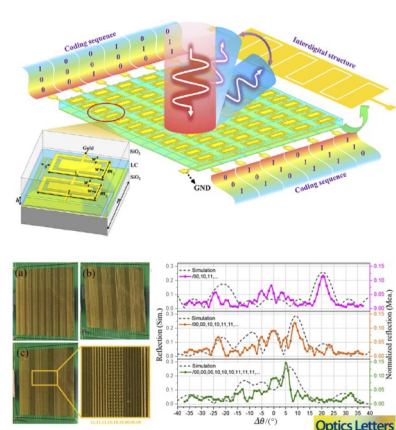
部分上述太赫兹极化调控超表面如图4所示,典型参数对比如表5所示。



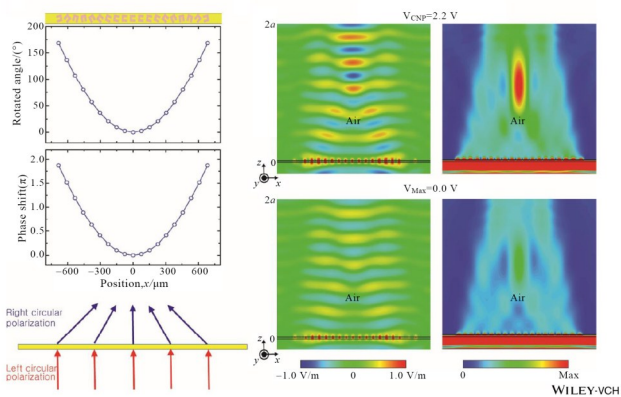
(a) Shen 等人^[89]提出的液晶动态超表面原理图与焦点调控性能



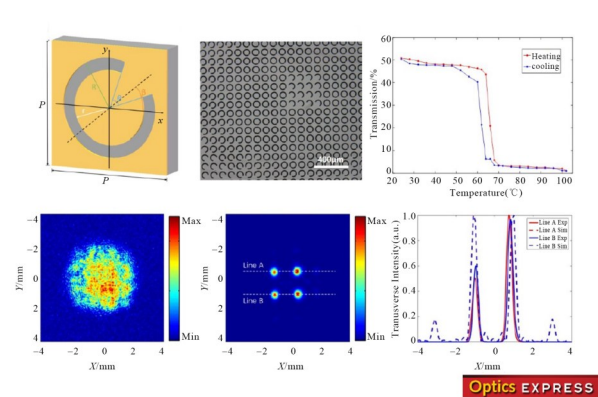
(b) Lynch 等人^[83]提出的超表面单元结构、调控原理与实测波束偏转结果



(c) Liu 等人^[85]提出的超表面双单元谐振结构、实物照片与实测波束偏转结果



(d) Kim 等人^[91]提出的超表面单元排布方式、相位梯度与模拟聚焦强度控制结果



(e) Wang 等人^[99]提出的超表面单元结构示意图、排布实物图、动态材料参考薄膜性质变化曲线与光斑形式调控实测结果

图4 部分上文所提及的太赫兹波束扫描超表面

表5 太赫兹波束扫描超表面典型参数对比

年份	频点/THz	扫描范围	研究类型	对比文献
2017	0.672	32°	实验研究	文献[83]
2022	0.323	21°	实验研究	文献[85]
2022	4.640	79.11°	理论研究	文献[86]
2022	0.265	>60°	实验研究	文献[87]

2.5 太赫兹幅高阶非线性超表面

上述太赫兹波动态超表面均是在控制信号下对太赫兹波的基波分量实现的低阶非线性调控. 受限于每个动态调控单元的接收功率, 太赫兹波的高阶非线性很难表现出来. 但是由于能量较为分散, 太赫兹高阶非线性动态超表面具有功率容量大的潜力, 因此也吸引了研究人员的注意^[102]. Keiser 等人^[103]提出了一种以在N型砷化镓衬底上的裂环谐振器为超单元的太赫兹动态超表面. 该结构可以通过调整外加电势实现0.1~0.6 THz范围内的幅度调制. 除此以外, 当施加的太赫兹波强度不同时, 超表面的幅度调制响应出现了显著的变化. 这种结果暗示了太赫兹波的强度变化也可以引起高阶非线性. 一方面可以丰富基础调制的理论, 另一方面经过非线性转化的能量可能在更高的频率出现, 为未来的大功率容量空间倍频、功率合成网络提供了理论上的可能性.

3 总结与展望

虽然太赫兹动态超表面近年来发展迅速, 根据功能已经囊括对于太赫兹波幅度、相位、极化等太赫兹波整体参量的调控、太赫兹波近远场波束控制与太赫兹波高阶非线性调控, 但是其仍然需要依托新材料、新结构与新机理的进步来实现不断发展, 结合应用背景, 以多种多样的形式展现给世人(图5).

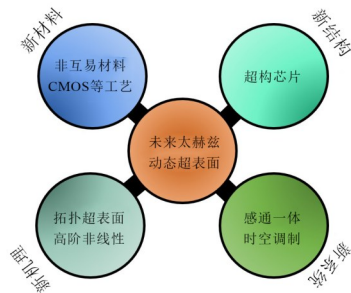


图5 未来太赫兹动态超表面需要从新材料、新结构、新机理、新系统多角度全方位发展

太赫兹动态超表面的发展离不开材料科学的进步. 随着太赫兹频段非互易材料的不断发展, 目前的非互易材料已经不局限于由微波、毫米波波段的和光波段直接搬到太赫兹频段使用的传统材料. 铁氧体、铋

酸锂、InSb、YIG 等材料的不断发现与应用迭代也在一步步地降低材料的损耗, 实现更显著的非互异性. 动态超表面应当与太赫兹频段新型非互易材料相结合, 通过设计合理的人工结构, 在实现更显著的法拉第旋转效应的同时缩减损耗, 从而构建太赫兹波段的准光隔离、准光环形器等新型功能器件, 进一步扩大太赫兹动态超表面的应用场景, 从而衍生出更高自由度的太赫兹准光系统.

阵列的发展带来了对动态超表面一致性的高需求, 因此需要结合微波、毫米波波段较为成熟的 CMOS 等工艺的性质, 结合此种静态材料与动态器件在太赫兹频段的特点, 进一步提高这类工艺所涉及材料的截止频率. 借助这一类超大规模多层动态器件工艺的优势开发动态超表面功能模块, 促使未来太赫兹动态超表面阵列的成本逐步降低、一致性逐步提升, 从而逐步从实验室过渡到更加广泛的应用场景.

结构是链接物理世界变换特性与人们需求变换特性之间的桥梁. 如果不局限于正入射, 太赫兹动态超表面就可以和现今的芯片技术结合, 结合电路结构与超结单元结构的优点, 实现新型的超构芯片. 一方面, 这种超构芯片的引入不仅仅可以等效为特定的电路单元匹配, 也可以同时从场的角度增加芯片电路的设计自由度, 提升芯片的性能极限; 另一方面, 由于动态超结构的引入, 这类芯片可以很容易引入片上天线等结构, 实现紧凑的多功能芯片, 实现发射或接收机的一体化集成系统.

太赫兹动态超表面的发展也需要机理上的借鉴与不断创新. 近年来, 拓扑光子学在理论上获得了不断的发展, 其利用周期结构的特征进行光子调控的机制与太赫兹超表面的基本原理有异曲同工之妙. 因此, 太赫兹动态超表面可以借鉴这一概念, 通过建立受保护的拓扑边界态提升太赫兹波与传统材料的相互作用效应, 优化太赫兹波与动态结构之间的耦合效率, 提升太赫兹波在超表面上的利用率, 或实现内容更丰富的功能器件.

太赫兹高阶非线性动态超表面依然处于发展初期, 人们仍然需要进一步结合材料属性研究非线性产生的其他频率能量的分布、流向、效率等. 可以在充分利用太赫兹波高阶非线性能量的同时缩减系统单元模块数量, 也可以利用动态超表面的阻抗变换特性, 在有限空间传播的功率的情况下产生足够的电压信号激发超表面的高阶非线性, 为未来的高效率倍频、调制一体化的紧凑型太赫兹动态超表面系统做准备.

太赫兹动态超表面也应该注重发展其系统应用. 其可以整合多种不同的功能结构为基础功能单元, 实

现多种不同功能之间的倾向性,在对基础功能单元间的合理独立配置的同时建立合适的耦合渠道,可以为未来的感通一体系统提供解决方案,实现太赫兹动态超表面的自校正、自感知通信体制。除此以外,针对太赫兹波波长较短的特点,太赫兹时空调制可以利用调制的时域特点构建特定波形,对太赫兹频段尤为显著的多普勒频移进行探测或补偿,从而利用动态超表面实现太赫兹频段目标位置、速度的更快速、更准确探测。

参考文献

- [1] VENKATESH S, LU X Y, SAEIDI H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12): 785-793.
- [2] WANG D C, ZHANG L C, GU Y H, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15020.
- [3] MIAO Z Q, WU Q, LI X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041027.
- [4] XU S T, FAN F, WANG Y H, et al. Intensity-tunable terahertz bandpass filters based on liquid crystal integrated metamaterials[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(30): 9530-9534.
- [5] ZHONG Y J, DU L H, LIU Q, et al. All-silicon terahertz metasurface with sharp fano resonance and its sensing applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 1-10.
- [6] WANG G C, TIAN H, WANG J, et al. Electronically controlled flexible terahertz metasurface based on the loss modulation of strontium titanate[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(1): 94-97.
- [7] JUNG H, JO H, LEE W, et al. Reconfigurable molecularization of terahertz meta-atoms[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(5): 1814-1820.
- [8] KUMAR D, JAIN R, SHAHJAHAN, et al. Bandwidth enhancement of planar terahertz metasurfaces via overlapping of dipolar modes[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(6): 1925-1934.
- [9] WANG S Q, CONG X, ZENG H X, et al. Broadband THz amplitude modulator based on multiple metasurfaces embedded with VO₂[C]//2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2021: 1-2.
- [10] ZHONG M. Design and verify an electrically modulated metasurface[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 111: 103508.
- [11] SARAEREH O A. Design of a novel THz modulator for B5G communication[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2022, 73(1): 1055-1066.
- [12] WANG J, TIAN H, LI S A, et al. Dual-band terahertz switch with stretchable bloch-mode metasurface[J]. *New Journal of Physics*, 2020, 22(11): 113008.
- [13] RAN J A, CHEN T, HAO H G, et al. Electrically controlled terahertz modulator with deep modulation and slow wave effect via a HEMT integrated metasurface[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16134.
- [14] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [15] YANG J, WANG P, SHI T A, et al. Electrically tunable liquid crystal terahertz device based on double-layer plasmonic metamaterial[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27039.
- [16] HU F R, WANG H, ZHANG X W, 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.
- [17] CUI W, LI C J, MA H Q, et al. Excellent sensing based on dual-plasmon induced transparency in graphene metasurface[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, 134: 114850.
- [18] YAO H Y, YAN X, YANG M S, et al. Frequency-dependent ultrasensitive terahertz dynamic modulation at the Dirac point on graphene-based metal and all-dielectric metamaterials[J]. *Carbon*, 2021, 184: 400-408.
- [19] LI G B, WANG G C, YANG T T, et al. Graphene-based terahertz bias-driven negative-conductivity metasurface[J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(16): 3342-3352.
- [20] JIANG M Z, XU X L, HU F R, et al. Low-voltage triggered VO₂ hybrid metasurface used for amplitude modulation of terahertz orthogonal modes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(1): 156-162.
- [21] FAN X Q, LI Y H, CHEN S H, et al. Stretchable metasurfaces: Mechanical terahertz modulation by skin-like ultrathin stretchable metasurface (small 37/2020) [J]. *Small*, 2020, 16(37): 2070200.
- [22] LI F Y, TANG T T, MAO Y H, et al. Metal-graphene hybrid chiral metamaterials for tunable circular dichroism [J]. *Annalen Der Physik*, 2020, 532(7): 2000065.
- [23] XIA L P, ZOU Y X, ZHANG M, et al. Multi-mode graphene based terahertz amplitude modulation enhanced by

- hollow cross H-structured metasurface[J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(12): 125701.
- [24] SHIH Y H, SILALAH H M, TSAI T I, et al. Optically tunable and thermally erasable terahertz intensity modulators using dye-doped liquid crystal cells with metasurfaces[J]. *Crystals*, 2021, 11(12): 1580.
- [25] ZHAO Y C, WANG L, ZHANG Y X, et al. High-speed efficient terahertz modulation based on tunable collective-individual state conversion within an active 3 nm two-dimensional electron gas metasurface[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(11): 7588-7597.
- [26] ZHAO Y, HUANG Q P, CAI H L, et al. Ultrafast control of slow light in THz electromagnetically induced transparency metasurfaces[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(7): 073602.
- [27] TAN T C, SRIVASTAVA Y K, AKO R T, et al. Active control of nanodielectric-induced THz quasi-BIC in flexible metasurfaces: A platform for modulation and sensing[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(27): e2100836.
- [28] HE X Y, LIU F, LIN F T, et al. Tunable terahertz Dirac semimetal metamaterials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(23): 235103.
- [29] LIU P Q, LUXMOORE I J, MIKHAILOV S A, et al. Highly tunable hybrid metamaterials employing split-ring resonators strongly coupled to graphene surface plasmons[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8969.
- [30] WANG L, AN N, GONG S, et al. Ultrafast terahertz transparency boosting in graphene meta-cavities[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(21): 4899-4907.
- [31] LIU L L, CHEN C, JIANG Y C, et al. Active modulation of absorption in terahertz hybrid metal-vanadium dioxide metasurface[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 906: 163913.
- [32] ZHENG C L, LI J E, LIU L H, et al. Optically tunable terahertz metasurface absorber[J]. *Annalen Der Physik*, 2022, 534(5): 2200007.
- [33] MOU N L, TANG B, LI J Z, et al. Switchable ultra-broadband terahertz wave absorption with VO₂-based metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 2501.
- [34] ZHONG M. Design and verify a dual modulated metasurface in terahertz range[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 19845.
- [35] PATEL S K, SORATHIYA V, NGUYEN T K, et al. Numerical investigation of tunable metasurface of graphene split-ring resonator for terahertz frequency with reflection controlling property[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, 118: 113910.
- [36] TANG K Z, SU Y, QIN M, et al. Dynamically tunable coherent perfect absorption and transparency in Dirac semimetal metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(9): 3649.
- [37] ZHOU T, WANG S, MENG Y Z, et al. Dynamically tunable multi-band coherent perfect absorption based on InSb metasurfaces[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(43): 435103.
- [38] WANG X, TRETYAKOV S A. Graphene-based perfect absorbers: Systematic design and high tunability: IEEE, 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608749[P]. 2019.
- [39] ZHOU S H, SHEN Z X, KANG R Y, et al. Liquid crystal tunable dielectric metamaterial absorber in the terahertz range[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2211.
- [40] GE J H, ZHANG Y Q, DONG H X, et al. Nanolayered VO₂-based switchable terahertz metasurfaces as near-perfect absorbers and antireflection coatings[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(4): 5569-5577.
- [41] LIU Y P, DONG L, ZHENG J S, et al. Switchable absorbing, reflecting, and transmitting metasurface by employing vanadium dioxide on the same frequency[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2022, 162: 107109.
- [42] YE L F, CHEN X E, ZHU C H, et al. Switchable broadband terahertz spatial modulators based on patterned graphene and vanadium dioxide[J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 33948.
- [43] ZHANG H, ZHANG H F. Thermally switchable and tunable metasurface with polarization independence based on VO₂ phase transition[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, 139: 115121.
- [44] ZHAO X G, WANG Y E, SCHALCH J, et al. Optically modulated ultra-broadband all-silicon metamaterial terahertz absorbers[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 830-837.
- [45] SHEN Q, XIONG H. An amplitude and frequency tunable terahertz absorber[J]. *Results in Physics*, 2022, 34: 105263.
- [46] BADRI S H, GILARLUE M M, SAEIDNAHAEI S, et al. Narrowband-to-broadband switchable and polarization-insensitive terahertz metasurface absorber enabled by phase-change material[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(2): 025101.
- [47] WANG B X, XU C Y, DUAN G Y, et al. Miniaturized and actively tunable triple-band terahertz metamaterial absorber using an analogy I-typed resonator[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2022, 17(1): 35.

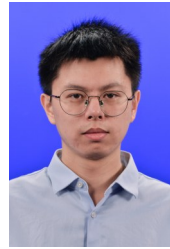
- [48] DEVI K M, JANA A, PUNJAL A, et al. Polarization-independent tunable terahertz slow light with electromagnetically induced transparency metasurface[J]. *New Journal of Physics*, 2022, 24(9): 093004.
- [49] WANG B X, LOU X Q, LU Y L, et al. Full 360° terahertz dynamic phase modulation based on doubly resonant graphene-metal hybrid metasurfaces[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11, 3157.
- [50] YANG J, CHU X J, GAO H Y, et al. Fully electronically phase modulation of millimeter-wave via comb electrodes and liquid crystal[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(3): 342-345.
- [51] ZHANG Y X, ZHAO Y C, LIANG S X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(1): 153-170.
- [52] HUANG W L, LUO X Q, HU F R, et al. Terahertz dynamic π -phase modulation with high transmittance using graphene-metal metamaterials[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(4): 044007.
- [53] 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): 074201.
LONG J, LI J S. Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(7): 074201. (in Chinese)
- [54] KUMAR D, DEVI K M, KUMAR R, et al. Dynamically tunable slow light characteristics in graphene based terahertz metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2021, 491: 126949.
- [55] CHEN T, REN Y, MA Y, et al. Electric control of electromagnetically induced transparency-like at terahertz frequency[C]//2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2021: 1-2.
- [56] FAN C Z, JIANG W Y, YIN H Y, et al. Highly tunable and sensitive plasmon induced transparency modulator with graphene metasurface[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, 143: 115389.
- [57] CUI W, WANG Y X, MA H Q, et al. A quad-frequency on-off modulator based on a simple graphene metasurface in terahertz[J]. *Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 2021, 15(7): 2100036.
- [58] LIU Z M, GAO E D, ZHANG Z B, et al. Dual-mode on-to-off modulation of plasmon-induced transparency and coupling effect in patterned graphene-based terahertz metasurface[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2020, 15(1): 1-9.
- [59] FAN K B, ZHANG J D, LIU X Y, et al. Phototunable dielectric Huygens' metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(22): 1800278.
- [60] CHEN T, REN Y, HAO H G, et al. An electrically controlled terahertz modulator with slow wave based on high electron mobility transistor[C]//2021 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). Piscataway: IEEE, 2021: 329-331.
- [61] 姚海云, 闫昕, 梁兰菊, 等. 图案化石墨烯/氮化镓复合超表面对太赫兹波在狄拉克点的动态多维调制[J]. *物理学报*, 2022, 71(6): 068101.
YAO H Y, YAN X, LIANG L J, et al. Terahertz dynamic multidimensional modulation at Dirac point based on patterned graphene/gallium nitride hybridized with metasurfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(6): 068101. (in Chinese)
- [62] LEPESHOV S, GORODETSKY A. All-dielectric optically tunable metasurface for terahertz phase and amplitude modulation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1461(1): 012203.
- [63] CAO P F, LI Y A, DENG Y B, et al. Constant frequency reconfigurable terahertz metasurface based on tunable electromagnetically induced transparency-like approach [J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(40): 405206.
- [64] YANG M S, LI T T, YAN X, et al. Dual-stimulus control for ultra-wideband and multidimensional modulation in terahertz metasurfaces comprising graphene and metal halide perovskites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(1): 2155-2165.
- [65] SAHOO A K, YEN C L, LU Y C, et al. Liquid crystal based terahertz spatial light modulator for imaging application[C]//2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [66] GONG Y M, QUAN B G, HU F R, et al. Active control of terahertz amplitude and phase based on graphene metasurface[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, 143: 115334.
- [67] GU J Q, SINGH R, LIU X J, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [68] XIAO S Y, WANG T, LIU T T, et al. Active modulation of electromagnetically induced transparency analogue in

- terahertz hybrid metal-graphene metamaterials[J]. Carbon, 2018, 126: 271-278.
- [69] YANG Y, LI J, LI J N, et al. Plasmon-induced reflection metasurface with dual-mode modulation for multi-functional THz devices[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105969.
- [70] LU Y F, WANG C, ZHAO S Q, et al. Magnetically tunable graphene-based terahertz metasurface[J]. Frontiers in Physics, 2021, 8: 622839.
- [71] JI Y 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.
- [72] CHEN X Q, LI K D, ZHANG R, et al. Highly efficient ultra-broadband terahertz modulation using bidirectional switching of liquid crystals[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(24): 1901321.
- [73] XU S T, FAN F, CAO H Z, et al. Liquid crystal integrated metamaterial for multi-band terahertz linear polarization conversion[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 093701.
- [74] SUN Y, XU Y, LI H L, et al. Flexible control of broadband polarization in a spintronic terahertz emitter integrated with liquid crystal and metasurface[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(28): 32646-32656.
- [75] HOU Y Z, ZHANG C, WANG C R. High-efficiency and tunable terahertz linear-to-circular polarization converters based on all-dielectric metasurfaces[J]. IEEE Access, 2020, 8: 140303-140309.
- [76] WANG Y X, YANG R C, ZHAO Y J, et al. Independently tunable bifunctional terahertz metasurface based on double-layer graphene[J]. Optical Materials, 2022, 132: 112793.
- [77] ZHANG Y, FENG Y J, ZHU B, et al. Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22743.
- [78] CONG L Q, SRIVASTAVA Y K, ZHANG H F, et al. All-optical active THz metasurfaces for ultrafast polarization switching and dynamic beam splitting[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 28.
- [79] NOUMAN M T, HWANG J H, FAIYAZ M, et al. Vanadium dioxide based frequency tunable metasurface filters for realizing reconfigurable terahertz optical phase and polarization control[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12922.
- [80] ZHAO X G, SCHALCH J, ZHANG J D, et al. Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies[J]. Optica, 2018, 5(3): 303.
- [81] LEE S, KIM W T, KANG J H, et al. Single-layer metasurfaces as spectrally tunable terahertz half- and quarter-waveplates[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(8): 7655-7660.
- [82] MU Q Y, FAN F, JI Y Y, et al. Enhanced terahertz magneto-optical Kerr rotation based on metasurface structure [J]. Optics Communications, 2020, 460: 125163.
- [83] LYNCH J J, HERRAULT F, KONA K, et al. Coded aperture subreflector array for high resolution radar imaging [C]//Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XX. SPIE, 2017: 124-133.
- [84] WU J B, SHEN Z, GE S J, et al. Liquid crystal programmable metasurface for terahertz beam steering[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(13): 131104.
- [85] LIU S, XU F, ZHAN J L, et al. Terahertz liquid crystal programmable metasurface based on resonance switching [J]. Optics Letters, 2022, 47(7): 1891-1894.
- [86] WANG Y, CUI D J, WANG Y, et al. All-solid-state terahertz phased array based on graphene metasurface for ultra-wide-angle beam steering[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12): 3814-3822.
- [87] MONROE N M, DOGIAMIS G C, STINGEL R, et al. Electronic THz pencil beam forming and 2D steering for high angular-resolution operation: A 98×98 -unit 265-GHz CMOS reflectarray with In-unit digital beam shaping and squint correction[C]//2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.
- [88] YAO W, TANG L 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.
- [89] SHEN Y C, SHEN Z X, WANG Y Y, et al. Electrically tunable terahertz focusing modulator enabled by liquid crystal integrated dielectric metasurface[J]. Crystals, 2021, 11(5): 514.
- [90] SHANG X J, XU L A, YANG H, et al. Graphene-enabled reconfigurable terahertz wavefront modulator based on complete Fermi level modulated phase[J]. New Journal of Physics, 2020, 22(6): 063054.
- [91] KIM T T, KIM H, KENNEY M, et al. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated-graphene metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials,

2018, 6(1): 1700507.

- [92] SHEN Z X, ZHOU S H, LI X N, et al. Liquid crystal integrated metalens with tunable chromatic aberration[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036002.
- [93] CONG X A, ZENG H X, WANG S Q, et al. Dynamic bi-functional THz metasurface via dual-mode decoupling[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(9): 2008.
- [94] RAJABALIPANAH H, ABDOLALI A, ROUHI K. Re-programmable spatiotemporally modulated graphene-based functional metasurfaces[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2020, 10(1): 75-87.
- [95] LIU C X, YANG F, FU X J, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by graphene-based metasurface with both amplitude and phase modulations[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 932773.
- [96] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Frequency diverse array radars[C]//2006 IEEE Conference on Radar. Piscataway: IEEE, 2006: 8977091.
- [97] BARATI S H, MAHDI S M, HOSSEIN M. Adaptive multichannel terahertz communication by space-time shared aperture metasurfaces[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 185919-185937.
- [98] ZHANG Z, YAN X, LIANG L J, et al. The novel hybrid metal-graphene metasurfaces for broadband focusing and beam-steering in farfield at the terahertz frequencies[J]. *Carbon*, 2018, 132: 529-538.
- [99] WANG T, HE J W, GUO J Y, et al. Thermally switchable terahertz wavefront metasurface modulators based on the insulator-to-metal transition of vanadium dioxide [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20347.
- [100] VENKATESH S, LU X Y, SAEIDI H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12): 785-793.
- [101] WANG D J, HE X J, YANG B W, et al. Active wavefronts control with graphene-functionalized terahertz metasurfaces[J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 124: 108919.
- [102] KEISER G R, KARL N, HAQUE S R UL, et al. Structural tuning of nonlinear terahertz metamaterials using broadside coupled split ring resonators[J]. *AIP Advances*, 2021, 11(9): 095103.
- [103] KEISER G R, KARL N, LIU P Q, et al. Nonlinear terahertz metamaterials with active electrical control[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(12): 121101.

作者简介



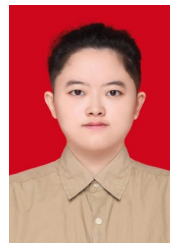
周天驰 男, 2023年获电子科技大学电磁场与微波技术专业博士学位. 现工作于电子科技大学电子科学与工程学院. 主要研究方向为太赫兹多路IQ调控与太赫兹高速通信系统等. 在国内外学术刊物及会议发表论文10余篇, 申报专利1项.

E-mail: zhou_tian_chi@163.com



陈蓝 女, 2020年获成都信息工程大学学士学位. 现为电子科技大学电子科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为太赫兹智能可重构超表面.

E-mail: 1481790504@qq.com



吴虹汝 女, 2020年获电子科技大学成都学院学士学位. 现为电子科技大学电子科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为毫米波可重构相控阵天线.

E-mail: 271146986@qq.com



兰峰 男, 2014年获电子科技大学光学专业博士学位. 现工作于电子科技大学电子科学与工程学院. 2000年至今主持/参与国家自然科学基金、中国博士后基金和国家863等科研项目20余项. 主要研究方向为太赫兹传输器件、数字超材料、太赫兹电控扫描阵列天线、太赫兹生物/化学传感等. 在国内外学术刊物及会议发表论文50余篇, 其中SCI收录20余篇, 申报专利13项.

E-mail: lanfeng@uestc.edu.cn



龚森(通讯作者) 男, 2015年获电子科技大学物理电子学专业博士学位. 现工作于电子科技大学电子科学与工程学院. 成功研制140 GHz、220 GHz、340 GHz直接调制器, 单通道调制速率突破30 Gbps, 成功研制40 Gbps以上传输速率、公里级传输距离的上下行太赫兹无线通信系统. 在 *Nature Photonics*, *Nanophotonics*, *Optica*, *Photonics Research*, *Applied Physics Letters*, *Optics Express* 等知名期刊发表多篇论文, 获2021年度“中国光学十大进展”应用研究类提名奖. 主持国家自然科学基金创新特区、H863子课题等多项相关项目, 以主研参与自然科学基金重点项目、国家重点研发项目等多项国家级重点重大项目. 中国电子学会会员编号: E190035294M.

E-mail: gongsen@uestc.edu.cn