

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514701

太赫兹可调谐超表面研究发展及应用*

周恩泽¹, 姜明月², 王 静², 王舒扬², 赵晓光¹

(1. 清华大学精密仪器系 北京 100084; 2. 山东省创新发展研究院科技战略与政策研究中心 济南 250101)

摘 要:太赫兹 (THz) 波段具有大带宽、高分辨率和强穿透力等潜在优势, 弥补了微波与红外技术之间的空白, 在下一代传感、成像、通信、生物医疗和安全检查等领域展露出了巨大的应用潜力。超表面作为能够有效调控太赫兹波的传播方向、相位和振幅等有效参数的重要技术, 克服了天然材料在太赫兹频段下固有的弱相互作用特性, 成为近年来研究人员关注的热点。随着信息技术的不断发展, 传统静态超表面难以适应动态环境变化, 需要增加器件的动态调控性能。太赫兹可调谐超表面通过引入可调谐材料或施加额外激励, 实现对太赫兹波的动态实时调节, 使其在更多的应用领域受到关注。首先, 该综述关注可调谐超表面技术的最新进展, 主要梳理太赫兹可调谐超表面的调控方法、响应机制, 介绍了液晶、半导体、相变材料以及机械结构等等可调谐材料或可调结构, 整理了各类太赫兹可调谐超表面的研究工作。其次, 聚焦于太赫兹可调谐超表面在光学成像、无线通信以及生物传感等各大领域中的应用进展, 结合优秀的工作展示了太赫兹可调谐超表面在各大应用领域巨大的发展潜力。最后, 总结了太赫兹可调谐超表面发掘高效调控机制、高集成度多功能化以及降低成本、提升制造工艺稳定性上面临的挑战, 对未来太赫兹可调谐超表面的研究发展做出了展望。

关键词: 太赫兹; 可调谐超表面; 传感成像; 无线通信; 生物检测

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Progress and applications of terahertz tunable metasurfaces

Zhou Enze¹, Jiang Mingyue², Wang Jing², Wang Shuyang², Zhao Xiaoguang¹

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Center for Science and Technology Strategy and Policy Research, Shandong Institute of Innovation and Development Research, Jinan 250101, China)

Abstract: The terahertz (THz) band offers potential advantages, such as large bandwidth, high resolution, and strong penetration capability. It fills the gap between microwave and infrared technologies, and exhibits tremendous application potential in fields such as next-generation sensing, imaging, communications, biomedical engineering, and security inspection. As an important technology capable of effectively regulating key parameters of terahertz waves, including propagation direction, phase, and amplitude, metasurfaces overcome the inherent weak interactions of materials in the terahertz band, thus becoming a focus of research in recent years. With the continuous development of information technology, traditional static metasurfaces struggle to adapt to dynamic environments, making it necessary to enhance their dynamic regulation performance. By incorporating tunable materials or applying additional stimuli, terahertz-tunable metasurfaces achieve dynamic, real-time regulation of terahertz waves, attracting attention across a wider range of applications. This review focuses on the latest advancements in tunable metasurface technologies. It systematically reviews the regulation methods and response mechanisms of terahertz tunable metasurfaces, introduces tunable materials or structures, such as liquid crystals, semiconductors, phase-change materials, and mechanical structures, and summarizes research work on various types of terahertz-tunable metasurfaces. Secondly, it focuses on the application progress of terahertz tunable metasurfaces in major fields including optical imaging, wireless communication, and biosensing, and demonstrates the tremendous development potential of terahertz tunable metasurfaces in these applications by highlighting outstanding research. Finally, it summarizes the challenges faced by terahertz tunable metasurfaces in

收稿日期: 2025-11-21 Received Date: 2025-11-21

* 基金项目: 山东省创新发展研究院智库(2024CFYZK013)项目资助

developing efficient regulation mechanisms, achieving high integration and multifunctionality, reducing costs, and improving manufacturing stability, and presents an outlook on future research and development.

Keywords: terahertz (THz); tunable metasurfaces; imaging; wireless communication; biological detection

0 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波指频率范围在 0.1 ~ 10 THz 内的电磁波,介于微波与红外线之间。随着研究的深入,太赫兹波段的优势不断被发掘,如大带宽、高分辨率、非破坏性和强穿透力等^[1-7],弥补了微波与红外技术之间的空白区域。因其特殊的性质,太赫兹技术在下一代传感、成像及通信^[8-10]、生物医疗^[11-12]、安全检查^[13-15]等领域展现出很大的应用潜力。但是,天然材料在太赫兹频段下固有的弱相互作用特性,对太赫兹技术的发展提出了挑战。超材料是一种具有特殊电磁、声学或机械性能的合成结构材料。通过设计超材料单元,改变单元结构或方向,进而调控太赫兹波^[16-17]。为解决超材料厚度大、损耗和成本高等问题,研究人员提出了将三维超材料转化为二维形态的方案,将波的传播方向压缩至近乎零厚度,从而形成了被称为超表面^[18-19]的新型器件,具有厚度薄、易于集成和灵活性高等优势。

近年来,随着对太赫兹技术逐渐深入的研究,为实现动态功能与频率调制,研究人员提出了可调谐超表面的概念。与静态超表面相比,研究人员进一步将液晶^[20]、石墨烯^[21]等可调谐材料与超表面复合,实现可调谐超表面的构建。通过电控^[22]、温控^[23]和光控^[24]等控制方案改变材料特性,实现对电磁波的动态调控。此外,超表面结构还可以通过机械方式调节电磁波特性。该方法与其他将超表面单元与可调谐材料结合的方法不同,而是将微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 的设计思路与超表面单元设计相结合。当机械结构发生形变时,单元结构与周期的变化改变了超表面单元间的相互作用,从而实现对太赫兹波的调制^[25]。

本文综述了太赫兹可调谐超表面技术的最新进展,主要梳理太赫兹可调谐超表面的调控方法、响应机制及在光学成像、生物传感以及无线通信等各大领域中的应用进展,总结不同类型太赫兹超表面的优缺点,最后讨论当前太赫兹可调谐超表面主要面临的问题与挑战,展望未来的研究方向。

1 太赫兹可调谐超表面

1.1 基于液晶的太赫兹可调谐超表面

液晶材料 (liquid crystal, LC) 在电场、磁场、压力、温度等外部激励下可产生多种相位响应,可以调节入射光

束的偏振态和相位,从而在毫秒级响应时间内完成太赫兹波调制。结合相对成熟的制造工艺和低成本优势,液晶被认为是理想的太赫兹超表面的可调谐材料。Wu 等^[20]展示了基于液晶的太赫兹可调谐超表面。超表面的动态控制方法如图 1(a) 所示,该可编程超表面可通过现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 实时动态调控各元件的“0”和“1”状态。利用预设编码序列对太赫兹光束进行偏转控制,可使超表面实现最大偏转角度达 32°。Liu 等^[26]提出了一种基于液晶的 1-bit 传输型数字编码超表面,通过电控实现可编程太赫兹光束操控。该非对称超表面元件在激发法诺共振时,可在保持透射率的同时实现更大的相位变化。这种数字超表面通过改变编码模式,能有效实现双光束转向、多光束控制及轨道角动量光束等多种功能。2022 年 Fu 等^[27]提出了一种基于液晶的反射式 1-bit 超表面,开发了采用 1-bit 可编程太赫兹超表面的广角光束扫描系统,并设计了编码序列。通过将可调谐液晶层嵌入由金属谐振结构组成的超表面中,每行超表面单元可精确实现 180°相位偏移,如图 1(b) 所示。将广义斯涅尔反射定律应用于 1-bit 编码超表面时,可通过为反射阵列分配角度相关的编码序列来改变阵列的相位分布,从而实现太赫兹光束在特定角度的反射。

Shih 等^[28]提出一种由嵌入超表面的 LC 单元实现的光学可调太赫兹滤波器,其中 LC 单元被涂覆有光取向层,通过泵浦光束可调谐超表面的共振频率。研究人员利用含银超表面的染料掺杂液晶单元^[29],成功实现了光学可调且热擦除的太赫兹强度调制器。此外, Ji 等^[30]展示了基于液晶增强腔模转换的相位梯度超表面实现的磁调谐太赫兹光束偏转技术,如图 1(c) 所示。实验数据显示,在 0.69 THz 下实现了 47.5°的光束偏转和 50% 的衍射强度,其调制深度高达 99.6%。此外,通过液晶弹性体薄膜 (liquid crystalline elastomer, LCE) 的光致机械响应,沉积在 LCE 基底上的太赫兹超表面可在共振频率处实现透射率^[31],该值从 0.003 6 单调递增至 1.000 0,达到 277 的高开关对比度。图 1(d) 展示了一种以 LCE 为基底的 C 形分环相位不连续超表面^[32],用于太赫兹波前红外调制。LCE 基底的偏转可被精准调控,最大输出角度变化可达 22°,工作频率为 0.68 THz。

1.2 基于半导体的太赫兹可调谐超表面

通过整合半导体元件,超表面单元的电磁响应可实现精准调控。从有效电路模型的角度来看,负载半导体的超表面单元相当于由电阻、电感和电容 (resistance-

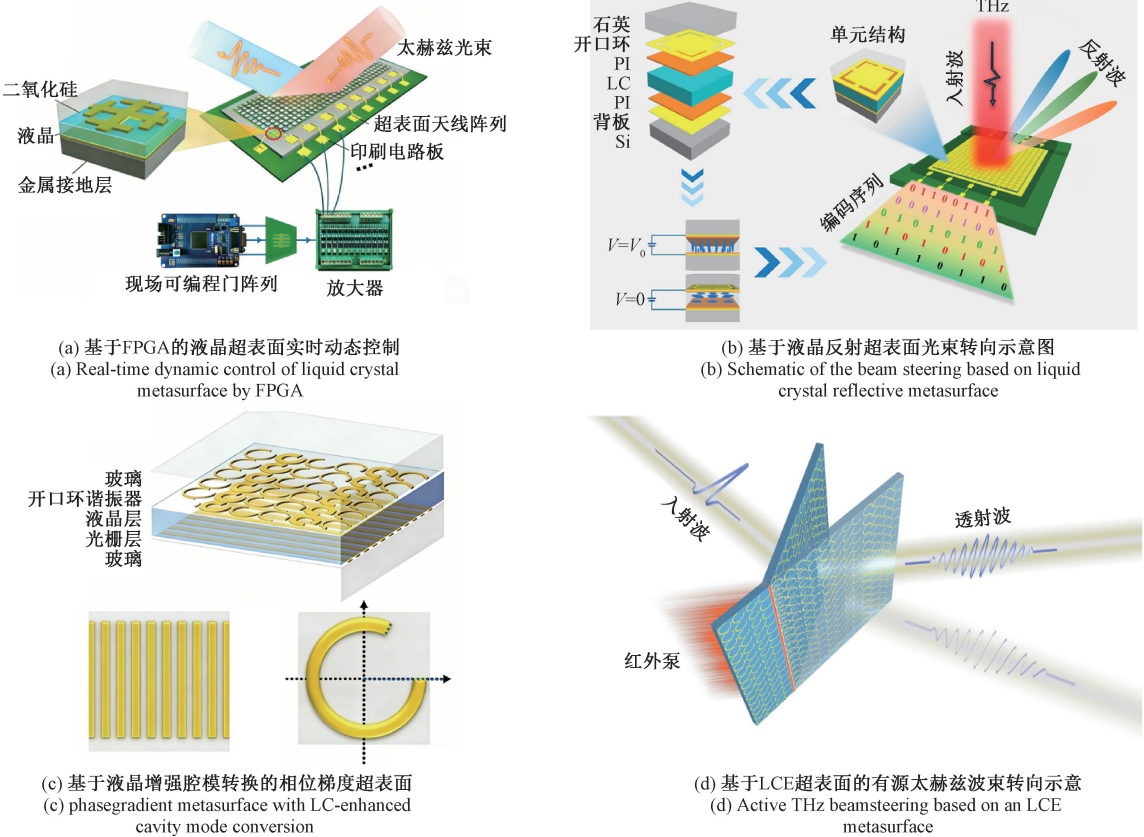


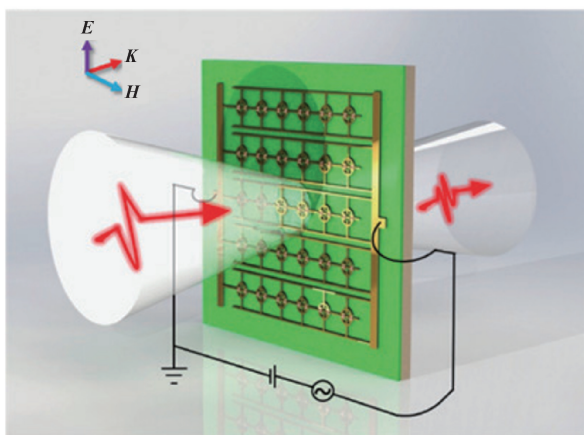
图 1 基于液晶的太赫兹可调谐超表面

Fig. 1 Terahertz tunable metasurface based on liquid crystal

inductance-capacitance, RLC) 组成的串并联电路。通过调节半导体元件上的偏置电压,可以改变等效电路的 RLC 参数,从而构建可调谐超表面。常见的可应用半导体元件包括 PIN 二极管、变容二极管、晶体管等。受限于工作频率,大多数封装的 PIN 二极管和变容二极管的工作频率低于 100 GHz,而场效应晶体管 (field effect transistor, FET),尤其是高电子迁移率晶体管 (high-electron-mobility transistor, HEMT) 在太赫兹频段已获得广泛关注。晶体管是具有检测、整流、放大和开关等功能的固态半导体器件。相较于二极管,晶体管的制造工艺更为先进,具备更高的精度和集成度。在超表面的主动调制应用中,通常采用 HEMT,其栅极偏置作为控制触发信号。Zhang 等^[33]提出了一种增强型谐振超材料,该材料嵌入了由氮化镓 HEMT 构成的纳米结构二维电子气层,并实现了高速相位调制。透射太赫兹波在 0.35 THz 下发生了 137° 的显著相位变化,如图 2(a) 所示。另外, Pan 等^[34]提出了一种集成超材料结构的 HEMT 器件的太赫兹双通道调制器。通过该设计,他们成功实现了对两个频段内太赫兹波振幅和相位的独立调控。

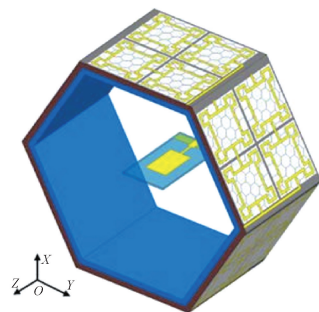
此外,石墨烯作为一种具有独特光学、电学和热学

特性的二维碳结构,近年来因其在太赫兹可调超表面中的潜在应用而备受关注。Wu 等^[35]提出了一种基于活性频率选择表面 (active frequency-selective surface, AFSS) 与石墨烯-金混合结构的 360° 波束控制太赫兹天线。如图 2(b) 所示,该天线由涂覆六边形 AFSS 屏蔽层的全向太赫兹单极天线构成。通过将石墨烯化学势从 0 调节至 0.5 eV, AFSS 单元可在太赫兹波段实现从开启状态 (高透射) 到关闭状态 (全反射) 的切换,从而在单极天线被不同状态的六边形 AFSS 屏蔽层包围时精准调控波束方向。这种设计使天线实现了覆盖 360° 的太赫兹波束扫描能力。Xiao 等^[36]提出了一种基于石墨烯超材料的偏振分束器。该超材料由两层石墨烯纳米材料和 4 个石墨烯块构成 3 层结构。当处于 Y 偏振光照射时,通过改变超表面石墨烯的费米能级,这种超表面可在太赫兹波段的 6 个不同频率下充当光学开关。后续研究发现,在 6 个测试频率中,部分频率下的反射现象对偏振状态表现出敏感性。当频率达到 6.143 THz 时,超表面会反射大部分 X 偏振入射光,同时透射大部分 Y 偏振入射光。当线偏振光入射时,其在空间上可分解为两个正交偏振分量,从而实现偏振分束器的功能。



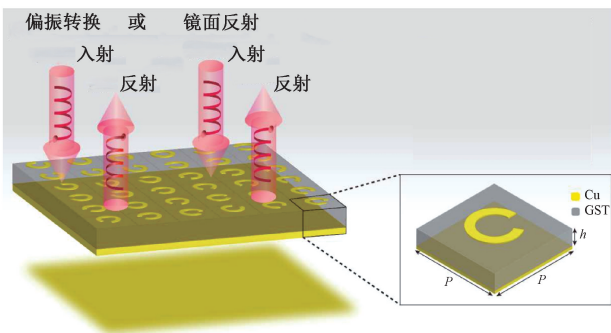
(a) 基于氮化镓的太赫兹相位调制器

(a) The terahertz phase modulator based on the GaN HEMT technique



(b) 基于石墨烯-金混合结构的大角度波束转向太赫兹天线

(b) Large angle beam steering THz antenna based on hybrid graphene-gold structure



(c) 嵌入在GST中用于可调谐波前操作的超表面

(c) The metasurface embedded in the GST for tunable wavefront manipulation



加热前

加热后

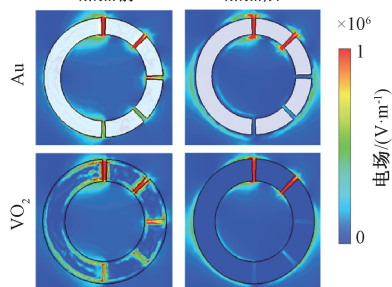
(d) 基于VO₂材料的太赫兹超表面(d) Terahertz metasurface based on VO₂

图 2 基于半导体和相变材料的太赫兹可调谐超表面

Fig. 2 Terahertz tunable metasurface based on semiconductors and phase-change materials

1.3 基于相变材料的太赫兹可调谐超表面

相变材料是可调谐超表面中应用广泛的材料之一, 锗碲 (GST)、锗碲硒碲 (GSST)、二氧化钒 (VO₂) 等相变材料可以通过施加电压、调节温度等方式诱导其在结晶态与非晶态之间发生相变, 利用材料在两种状态下光学特性上的差异进行超表面不同功能的设计^[37]。在这类应用中, 相变材料大多作为金属超表面的电介质环境, 利用其介电常数的变化来调控金属产生的等离子体共振。

GST 材料的相变通常发生在晶态与非晶态之间, 可通过光、热、电等多种因素触发。该材料在高温下呈现非晶态, 在低温时则形成晶态。这种相变特性使其在光学、电子和存储等领域具有广泛应用前景, 因此被广泛应用于可调谐超表面领域。Zhang 等^[38]通过在 GST 中嵌入超表面, 实现了太赫兹波前操控。如图 2(c) 所示, 该器件

采用金属-GST-金属结构, 其中 C 形开环谐振器嵌入 GST 层, 金属接地层位于 GST 层背面。通过遗传算法优化器件几何参数, 在 GST 非晶态下可获得高偏振转换效率, 而在晶态下则转换效率较低。此外, 在非晶态下, C 形谐振器会根据潘查拉特南-贝里 (Pancharatnam-Berry, PB) 相位原理旋转到不同角度, 形成特定的相位分布以实现异常偏转和聚焦。这两种设计的结合形成了一种新型组件, 可以通过偏振切换或普通镜面反射来实现异常偏转和聚焦功能。

此外, 在太赫兹频段 VO₂ 也常被用作相变材料。当样品温度超过 68℃ 时, 其晶格结构会从非导电的单调结构 (绝缘相) 转变为四方晶格结构 (金属相), 从而实现绝缘体-金属相变。在太赫兹频段中, 当 VO₂ 处于绝缘相时, 太赫兹波可穿透材料; 而当处于金属相时, 太赫兹波则无法穿透。因此, 将 VO₂ 集成到超表面中, 能使器件

在两种不同状态间切换,从而拓展更多应用场景。Yang 等^[39]提出了一种可在太赫兹频段工作的可调谐 VO_2 超表面,其内部的绝缘态与金属态可通过外部电刺激实现切换,从而动态调控电磁响应特性。通过 FPGA 控制超表面各列电压,可生成相位梯度以实现太赫兹光束转向。如图 2(d)所示,Dong 等^[40]在 2025 年提出了一种动态太赫兹超表面,由 Au/VO_2 双层混合天线组成。通过改变单元格的有效光学取向,基于光子布里渊相位原理实现了对太赫兹波局部相位的动态控制。该相位分布覆盖了混合天线中 VO_2 半导体和金属态的 2π 范围,使得利用这种异质集成设计可以方便地定制可切换功能。

将相变材料与可调谐超表面相结合,已在太赫兹光子学领域引发革命性突破,实现了对 THz 波的精准动态调控。其中,GST 则展现出非易失性非晶-晶相变特性,堪称可编程光子学与光存储解决方案的理想选择。而 VO_2 则凭借其超快绝缘体-金属相变特性脱颖而出,可实现可调谐 THz 吸收与偏振调控。基于相变材料的太赫兹可调谐超表面广泛应用于 THz 波前调制、自适应控制以及多功能系统无缝集成等应用领域。

1.4 基于机械结构的太赫兹可调谐超表面

机械可调谐超表面作为可调谐超表面的一个分支,近年来备受学界关注^[41]。MEMS 集成了电驱动可移动部件,在机械调控可调谐超表面的应用中展现了巨大的潜力。该种技术通过微小的电机驱动,精确地调节纳米单元的结构特征,能够实现高精度的动态光学调制。利用微小的位移,MEMS 系统能够调节超表面的几何形态或空间排列方式,如单元间距、周期或表面曲率,改变结构单元的电磁响应特性,从而对入射光波的相位、振幅、偏振等光学性质进行精确控制。2019 年 Cong 等^[42]

基于 MEMS 技术开发出电控太赫兹超分子器件,这项突破性进展为相关研究奠定了重要基础。在低偏置驱动下,这些超材料展现出左旋、右旋、非手性及外消旋构型之间显著的可调谐特性。这种基于手性构型切换光学活性的能力,为太赫兹成像领域实现透射式双工空间光调制器提供了可能。该原型器件为芯片级可编程手性装置的开发铺平了道路,有望在生物学和光子学领域取得重大突破(图 3(a))。Meng 等^[43]成功研制出反射式 MEMS-OMS 动态波片,其偏振转换效率高达约 75%,在 800 nm 工作波长附近实现约 100 nm 的宽带运行,响应速度小于 0.4 ms,并具备全范围双折射调控能力。通过将等离子体光学显微镜(optical measurement system, OMS)与各向异性超表面单元及薄膜压电 MEMS 镜片集成,施加驱动电压 V_m ,可精确控制金镜片与 OMS 之间的间距,其各向异性参数可连续调节,能够实现 $0 \sim 2\pi$ 全范围双折射可调性及超过 0.9 的高反射振幅。如图 3(b)所示,Deng 等^[44]在 2024 年提出了一种基于 MEMS 的动态超表面线偏振器,通过可移动 MEMS 镜片精准调控等离子体与自由光子共振间的偏振耦合,实现了 1.04~13.30 范围的双线偏振激发实时可调消光比,在光学显示与防伪领域揭示了未被探索的创新方向。

2023 年 Sun 等^[45]展示了一种机械可调超表面(mechanically tunable metasurface, MTM),它可以通过改变具有相位不连续性的金属谐振器(metallic resonator, MR)阵列与 Au 接地层之间的间隙来实现太赫兹束偏转并改变异常反射太赫兹波的强度,如图 3(c)所示。最大偏转系数在 0.61 THz 处达到 0.60,偏转角约为 44.5° 。展示了所提出的 MTM 作为高效太赫兹波束纵平台的潜力。2025 年 Wang 等^[46]提出了一种用于动态涡旋波

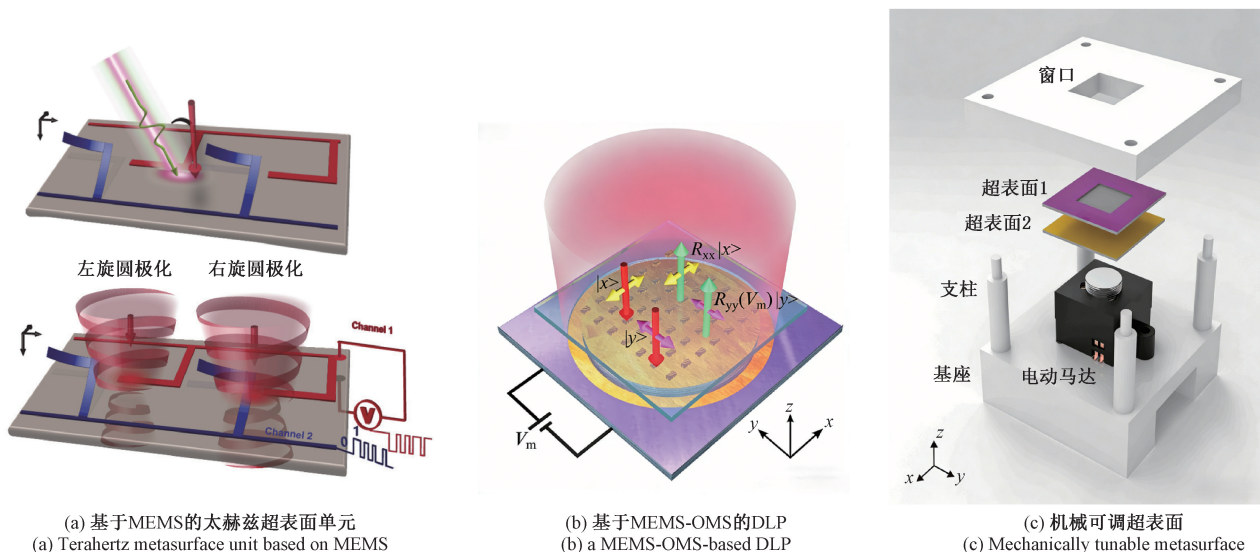


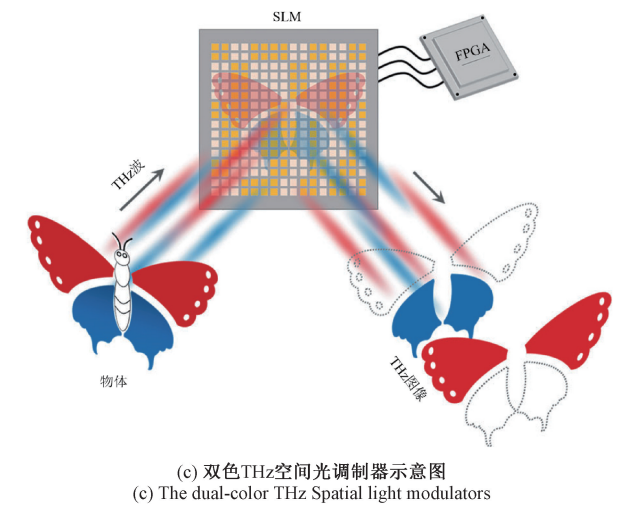
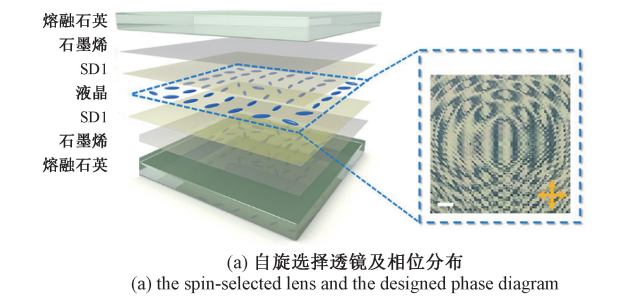
图3 基于机械结构的太赫兹可调谐超表面

Fig. 3 Terahertz tunable metasurface based on mechanical structure

片 (vortex wave plates, VWP) 的 MEMS 可调双层动态超表面 (bilayer metasurface, BMS), 通过将薄膜压电 MEMS 反射镜与双层等离子体纳米结构集成, 电驱动 MEMS 反射镜来精确调整 MEMS-BMS 分离, 可以在两个不同的分离距离上实现独立的二维相位控制, 从而允许在圆偏振光激发下在不同涡流模式之间动态切换反射光束。开发的 MEMS-BMS VWP 具有高效率、快速响应和偏振保存的特点, 在高分辨率成像、动态全息术、光镊、光学加工等先进应用中具有强大的潜力。总的来说, 4 种调制方式各有优势, 如表 1 所示, 需要进一步开展相关研究。

表 1 太赫兹可调谐超表面的总结

Table 1 A summary of terahertz tunable metasurface				
调制方式	响应速度	工作范围	驱动电压/功耗	加工难度
液晶	快	大	较高	高
半导体	超快	较大	较低	高
相变材料	快	较大	较高	较高
机械结构	较快	大	较低	较高



2 太赫兹可调谐超表面的应用

2.1 太赫兹可调谐超表面在传感成像中的应用

可调谐超表面因其能够动态调控电磁波的功能, 能够在需要实时调节光学性能的动态成像系统中应用。具体来说, 在光束转向装置、动态金属透镜、虚拟现实与增强现实等等领域具有广泛的前景^[47]。Shen 等^[48]通过引入几何相位技术, 成功研制出如图 4(a) 所示的棋盘式空间复用透镜。他们利用液晶光排列技术, 在宽频太赫兹波段实现了具有自旋选择聚焦特性的平面透镜。Ge 等^[49]采用数字偏振曝光系统, 制备出具有梯度光轴分布的液晶微结构, 成功制备出梯度光轴分布的液晶太赫兹波片, 并生成不同拓扑荷的太赫兹涡旋, 如图 4(b) 所示。这是首次在液晶平面光学中实现太赫兹涡旋的突破性成果。基于此技术, 研究者进一步开发了偏振光栅和叉状偏振光栅^[50], 为太赫兹涡旋的生成与分离提供了简便实用的方法。Shen 等^[51]还设计并制造了液晶太赫兹贝塞尔涡旋光束发生器。这些液晶超表面在太赫兹通信、传感及成像领域展现出广阔的应用前景。

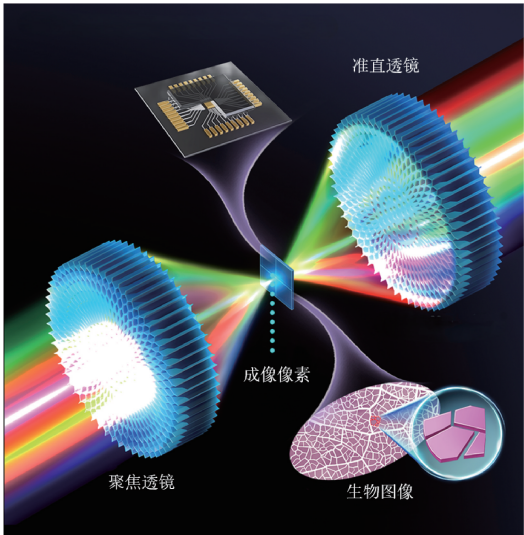
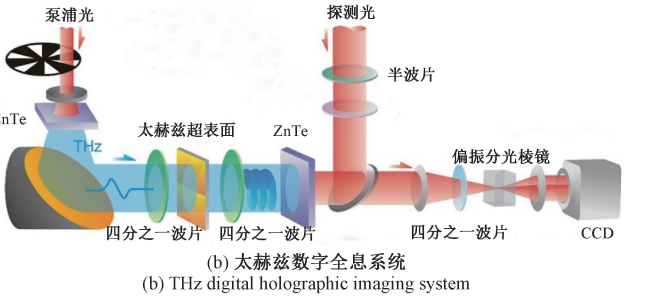


图 4 太赫兹可调谐超表面在传感成像中的应用

Fig. 4 Application of terahertz tunable metasurfaces in sensing and imaging

为了实现太赫兹波束转向。Li 等^[52]提出了一种基于超表面的透射式主动光束控制 (spatial light modulator, SLM) 技术,通过调制液晶引起相位突变效应,实现像素尺寸的微型化。实验结果表明该器件可实现超过 35% 的光束转向效率和 11° 的大偏转角。这种高分辨率与大转向角的特性,为下一代激光雷达和显示技术的研发提供了新机遇。Gerardo 等^[53]采用 LC 层多谐振单元,在 100 GHz 频段成功研制出电子扫描反射阵列天线。Tao 等^[54]则设计了一种集成 LC 结构的金属超器件,通过透反射模式实现太赫兹波调制,这种创新方案借助编码像素化电极实现了空间灰度强度调制。如图 4(c) 所示, Li 等^[55]展示了液晶太赫兹空间光调制器,并开发了自校准成像算法以实现双色太赫兹单像素成像,这为低成本、实用化的太赫兹多光谱成像技术开辟了新途径。

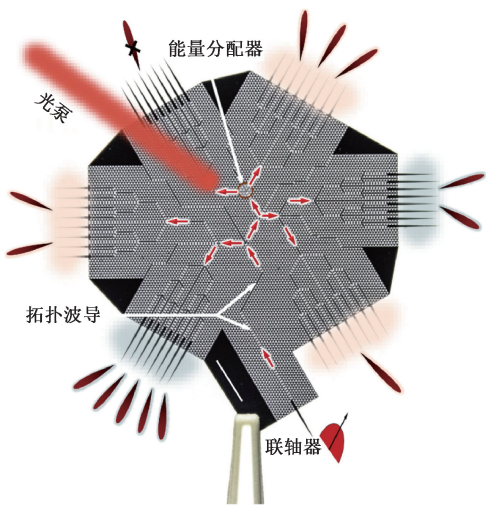
Chen 等^[56]通过将所需相位分布转化为特定厚度的折射率 (refractive index, RI) 分布,提出并实现了基于介电梯度超材料的创新设计方法。采用 3D 打印技术制备的样品可在 0.2~0.9 THz 实现数值孔径 (numerical aperture, NA) 0.555 的无色差超聚焦,分辨率达亚毫米级特征 (如 FR4 基板上的玻璃织物图案和叶片纤维组织),视场角 (field of view, FOV) 达 90°,如图 4(d) 所示,该方案为实现太赫兹超分辨率成像提供了经济可行的解决方案。

2.2 太赫兹可调谐超表面在无线通信中的应用

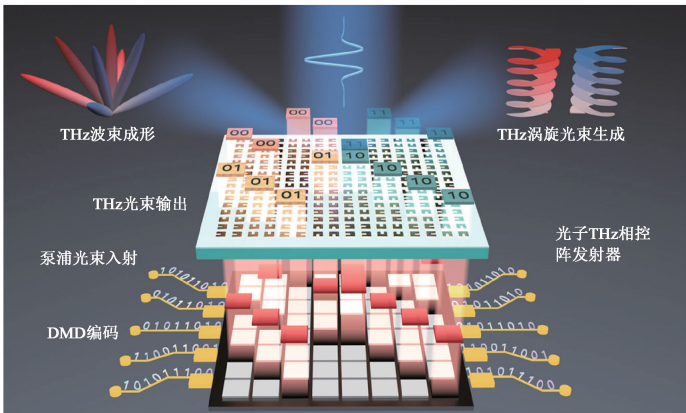
太赫兹无线技术为第 6 代感知网络在传感、成像和通信领域提供了前所未有的能力。最近研发的可调谐太赫兹超表面能够实现自适应波束操控,支持频率、极化、空间和时间等多维度调节,从而实现快速通信与目标追踪等多样化功能。在通信领域,可调谐芯片级太赫兹拓扑器件的提出标志着向 6G 的重要进展,一项突破性研究利用互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-

semiconductor, CMOS) 兼容平台实现了超高 Q 值 (0.2×10^6) 太赫兹拓扑腔的芯片级集成,该技术通过光控调制实现高效信号传输^[57]。另一项创新成果是光可调谐太赫兹拓扑器件,其集成 160 Gbps 波导与解复用器^[58],展现出卓越的信道隔离性能和实时数据传输能力。此外,基于谷涡旋原理的片上可调谐拓扑器件在 300 mm 晶圆上实现了 72 Gbps 无线传输速率,并支持多通道 40 Gbps 运行^[59]。这表明其与基于大规模多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 架构的太比特级 6G/XG 系统具有良好的兼容性,如图 5(a) 所示。这些研究凸显了硅基拓扑光子晶体在提升器件性能、减少串扰以及实现主动调谐方面的潜力,从而推动太赫兹集成电路和第 6 代移动通信技术的发展。

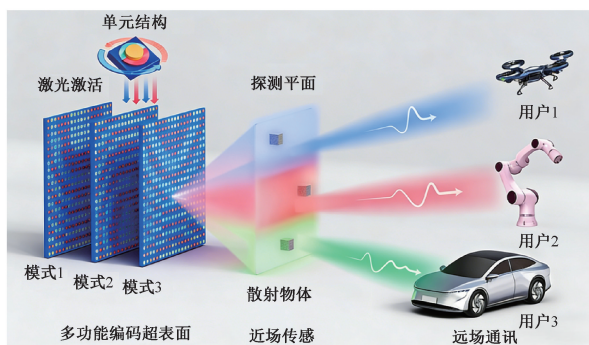
Niu 等^[60]提出了一种太赫兹相控阵超表面,采用空间调制飞秒激光驱动的像素化非线性 PB 超表面,如图 5(b) 所示,通过选择性激发特定 PB 元件,实现对发射太赫兹信号的精准相位与波前控制,实现了 0.8~1.4 THz 宽频段的二维相位编码技术。To 等^[61]通过在二氧化硅基底上集成金属与锗碲 (GeTe) 图案,利用光照射可引发超原子结构表面导电特性的变化,从而在 100~120 GHz 范围以 0.8 dB 的高反射系数, $180^\circ \pm 20^\circ$ 的 1-bit 相位差有效调控入射波相位。通过线偏振喇叭馈源驱动,该超表面可生成 $0^\circ \sim \pm 45^\circ$ 范围的指定编码模式,实现宽角度波束成形,在传感与通信领域展现出巨大潜力,为亚太赫兹集成传感与通信 (integrated sensing and communication, ISAC) 应用提供了创新解决方案,如图 5(c) 所示。Taghvaei 等^[62]则提出一种创新架构方案:采用毫米波频段运行的全息超表面进行通信,并整合太赫兹石墨烯天线实现传感功能。与微波器件相比,太赫兹超表面器件具有更宽的带宽、更好的方向性以及更紧凑的体积。



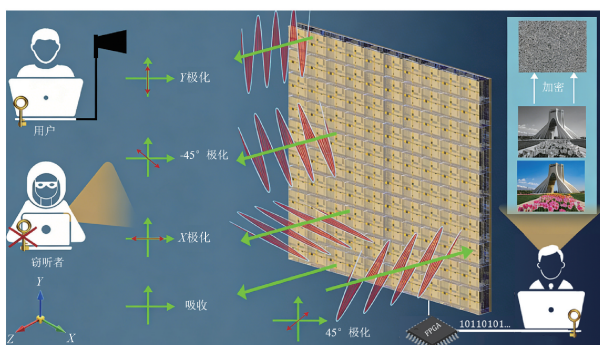
(a) 芯片级拓扑波束成形器
(a) On-chip topological beamformer



(b) 基于非线性PB单元的光子太赫兹相控阵
(b) Photonic terahertz phased array based on nonlinear PB elements



(c) 用于亚太赫兹近场传感与远场通信的多功能编码超表面
(c) Multifunctional coding metasurface for sub-terahertz near-field sensing and far-field communication



(d) 水平和垂直偏振的振幅-频率调制超表面
(d) The amplitude-frequency modulation metasurface for both horizontal and vertical polarizations

图5 太赫兹可调谐超表面在无线通信中的应用

Fig. 5 Application of terahertz tunable metasurfaces in wireless communication

Ozgoi 等^[63]的研究则提出一种可调控双频振幅调制的超表面。针对 X 和 Y 轴极化方向的振幅-频率调制特性,开发了基于混沌算法的加密无线通信协议,有效保障目标数据安全,防止窃听器获取信息,场景如图 5(d) 所示。通过采用两种独立控制的石墨烯层结构,并结合外部偏置条件实现,该方案可在不同频率下对线性极化方向进行振幅调制。这种同时调节振幅、频率与极化的创新设计,使信息能够通过多通道传输,显著提升加密信息的安全性。这种水平/垂直极化双模振幅-频率调制技术,为太赫兹通信、防伪识别、数据存储及传输等应用场景提供了广阔的发展前景。

然而,下一代无线通信系统对超高速率与超低延迟的需求给超表面的调制响应速率提出了挑战,而目前常见的以液晶、相变材料以及机械结构为可调材料的工作普遍响应速率在毫秒级,有待进一步的提高。而基于半导体的太赫兹可调谐器件在响应速率方面能够满足要求,但往往难以同时实现较低工作电压和较低功耗,也需要进一步的研究使其更广泛的应用到下一代无线通信系统中去^[64]。

2.3 太赫兹可调谐超表面在生物检测中的应用

2022 年 Sun 等^[65]成功研发出基于像素化频率响应超表面的宽带 THz 超表面传感器,实现了分子指纹光谱的高灵敏度检测与高分辨率解析,如图 6(a) 所示。通过对称金属 C 形谐振器与功能化石墨烯微带线相结合,该传感器在 1.82~2.27 THz 范围实现了谐振频率的线性调节,并展现出小于 20 GHz 的高光谱分辨率。研究发现,通过改变石墨烯的费米能级,可实现 120 GHz/0.1 eV 的频率变化速率,为宽带太赫兹光谱检测提供了强大的调谐能力。实验结果表明,该传感器在宽频范围内对葡萄糖分子的多重增强吸收光谱展现出超高灵敏度读取能

力,吸收增强效果提升近 5 倍。此外,通过利用超表面天然可调谐特性,实现了动态重建与慢光传输技术。通过异步电压调节方案实现了电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 共振的调制,展现出在超宽带范围内进行频率调节的能力,并实现了 GHz 级别的调制速度。该超表面不仅在指纹增强和手性分子识别方面表现出色,还证明了其在检测疾病标志物 (如 γ -氨基丁酸分子) 方面的通用性。

Liu 等^[66]提出了一种基于单像素可调谐石墨烯超表面的超宽带太赫兹指纹增强传感技术,如图 6(b) 所示,该技术实现了对手性光学异构体等痕量分析物的超高灵敏检测,检测限低至 0.64 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ 。通过同步电压调节,超表面在约 1.5 THz 的超宽频带范围内显著增强了指纹信号,增益效果可达 17.4 dB。研究还开发了通用指纹光谱反演模型,有效解决了石墨烯超表面非线性增强机制导致的吸收包络畸变问题。该技术成功将分析物的指纹信号还原至标准谱线形态,相关系数 (R_2) 达到 0.99。这项创新突破为太赫兹指纹传感、主动空间光调制器、慢光器件及动态成像设备领域开辟了全新技术平台。

在生物传感、环境监测和医疗诊断等应用中,基于碳纳米管薄膜的太赫兹超表面传感器具有诸多优势,包括高灵敏度、结构可调性、机械与热稳定性、低功耗以及灵活的制备工艺^[67]。Wang 等^[68]设计并实验制备了一种基于各向异性多壁碳纳米管 (multi-walled carbon nanotube, MWCNT) 薄膜的太赫兹等离子体超表面传感器 (plasmonic metasurface sensor, PMS),用于农药残留检测,如图 6(c) 所示。该传感器有效利用了碳纳米管的独特性质,尤其是其各向异性特性,在太赫兹频段实现了对 2,4-二氯苯氧乙酸 (2,4-D) 和毒死蜱溶液等农药残留的高灵敏度检测。实验中,在 0.87 和 1.62 THz 处观测到显著的共振传输峰。本研究进一步验证了碳纳米管/硅界面表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR)

技术的可行性。该 PMS 传感器对不同浓度梯度的农药残留展现出卓越灵敏度,最低检测限可达 10 ng。其中对 2,4-D 和毒死蜱溶液的检测灵敏度分别为 $1.38\times10^2/\text{ppm}$ 和 $2.0\times10^3/\text{ppm}$,透射振幅与农药浓度呈现显著线性相关性。实验结果表明该技术具有良好的可靠性和稳定性。此外,Xu 等^[69] 通过将各向异性碳纳米管薄膜与金

属基太赫兹超材料相结合,提出一种基于复合超材料的 THz 正交偏振控制技术。该技术通过在碳纳米管层与两层金属光栅之间夹层设计实现偏振调控。由于碳纳米管薄膜层数和取向可调,能实现对超材料的高灵敏度偏振转换,这项研究为利用具有光学微结构的纳米材料进行太赫兹偏振控制提供了全新解决方案。

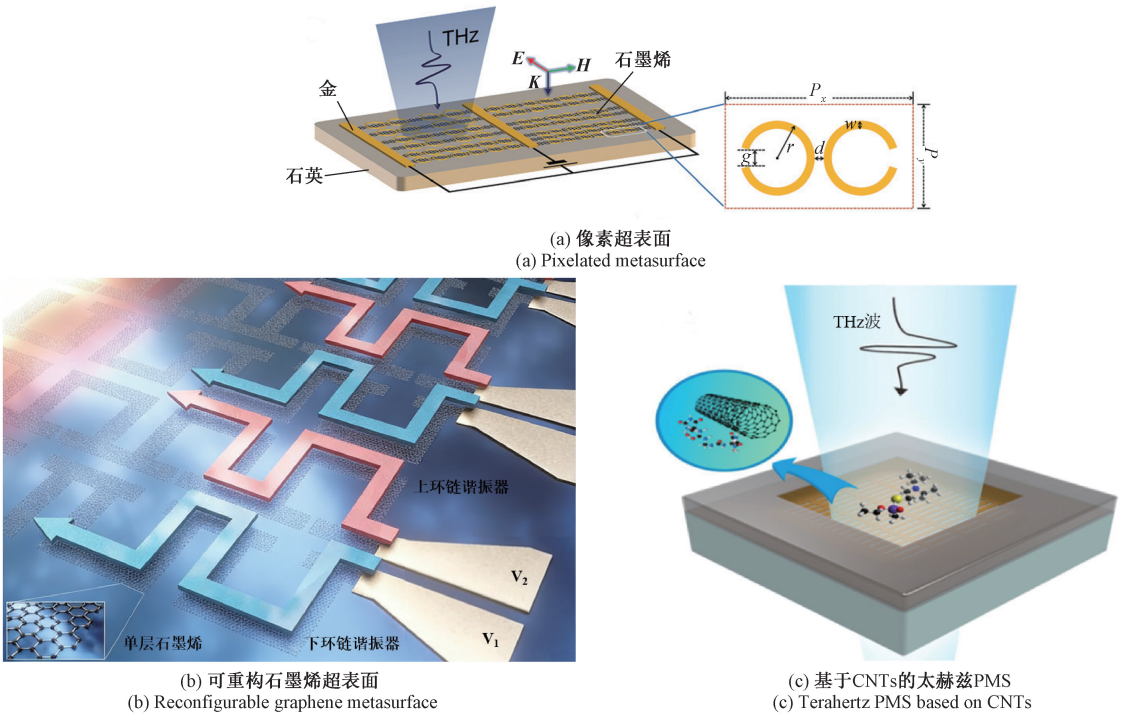


图 6 太赫兹可调谐超表面在生物检测中的应用
Fig. 6 Application of terahertz tunable metasurfaces in biological detection

3 结 论

太赫兹可调谐超材料在传感、成像、通信及生物检测等前沿应用领域中展现出巨大的潜力。其核心价值在于通过灵活的动态调控能力,显著提升器件在复杂环境中的实用性能与适应性。然而,当前该领域的技术发展仍面临诸多挑战,制约着太赫兹可调谐超表面向实际应用的转化。在动态调控性能方面,现有调控机制普遍存在调制范围有限、调控深度不足、调制方式难以解耦等问题,导致器件性能受限。现有的功能材料或可动结构往往无法提供足够的调控能力,难以实现高效、宽带的动态响应。此外,当前研究多集中于理想条件下的功能验证阶段,部分调谐方式尚未经过实际应用场景中复杂物理场作用的充分考验。在制造工

艺方面,集成主动调谐结构的超表面通常依赖高精度微纳加工技术,成本高昂且效率低下,难以满足大面积器件的批量化制备需求。在规模化制造过程中,调谐机构易出现结构缺陷,从而引发性能不稳定甚至退化的问题。此外,调谐机构与驱动模块之间缺乏标准化兼容方案。上述因素共同构成了太赫兹可调谐超材料从理论研究迈向产业化应用的主要障碍。因此,在未来太赫兹可调谐超材料的发展中应聚焦于调谐方式的优化与革新,通过发展新型功能材料、探索新共振机制,扩大器件自身的可调性性能,发展高可靠性、高稳定性的高精度制备方案,并借助“AI 驱动设计”方法实现覆盖共振机理与结构设计到调谐机制与工艺制备的全流程优化方案,从而系统性构建“调控方式-结构设计-应用需求”全链路技术体系,突破现有技术瓶颈,推动太赫兹可调谐超材料技术的实际应用与产业化进程。

参考文献

- [1] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R, et al. Ultra-fast, high-bandwidth coherent cw THz spectrometer for nondestructive testing [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(3): 288-296.
- [2] LI X R, LI J X, LI Y H, et al. High-throughput terahertz imaging: Progress and challenges [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 233.
- [3] 曹丙花, 孙凤山, 范孟豹, 等. 基于异常主导损失的残差跨域网络热障涂层太赫兹测厚方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(11): 287-299.
CAO B H, SUN F SH, FAN M B, et al. Terahertz based thickness measurement of thermal barrier coatings using the cross-domain residual network with an anomaly-dominant loss [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(11): 287-299.
- [4] 龚云丽, 曹丙花, 孙凤山, 等. 新型窗函数适配的热障涂层太赫兹盲反卷积方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(9): 270-279.
GONG Y L, CAO B H, SUN F SH, et al. A blind deconvolution method for terahertz thermal barrier coating adapted by novel window function [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(9): 270-279.
- [5] 周子悦, 年夫顺, 孙超, 等. 基于多频段拼接的高分辨率太赫兹成像技术[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 138-146.
ZHOU Z Y, NIAN F SH, SUN CH, et al. High-resolution terahertz imaging technology based on multi-band stitching [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 138-146.
- [6] 孙凤山, 范孟豹, 曹丙花, 等. 基于混沌映射与差分进化自适应教与学优化算法的太赫兹图像增强模型[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 92-101.
SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. The terahertz image enhancement model based on adaptive teaching-learning based optimization algorithm with chaotic mapping and differential evolution [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 92-101.
- [7] 闫孝姮, 王治仁, 赵一澄, 等. 结合多尺度熵的 SVM-D-CPO-RF-AdaBoost 均压电极结垢智能识别方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(10): 243-254.
YAN X H, WANG ZH R, ZHAO Y CH, et al. Intelligent identification method of grading electrodes sediments based on SVM-D-CPO-RF-AdaBoost combining multiscale entropies [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(10): 243-254.
- [8] ZHAO T, XIE P Y, WAN H J, et al. Ultrathin MXene assemblies approach the intrinsic absorption limit in the 0.5 ~ 10 THz band [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(7): 622-628.
- [9] BURGHOFF D, KAO T Y, HAN N, et al. Terahertz laser frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(6): 462-467.
- [10] SENGUPTA K, NAGATSUMA T, MITTLEMAN D M. Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonic systems [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(12): 622-635.
- [11] SON J H. Terahertz bio-imaging for medical applications [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2013, DOI: 10.1109/CLEOPR.2013.6600101.
- [12] LIU Y, LIU H, TANG M Q, et al. The medical application of terahertz technology in non-invasive detection of cells and tissues: Opportunities and challenges [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(17): 9354-9363.
- [13] FU X J, LIU Y J, CHEN Q, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 869537.
- [14] TRIBE W R, NEWNHAM D A, TADAY P F, et al. Hidden object detection: Security applications of terahertz technology [C]. *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III*. SPIE, 2004, 5354: 168-176.
- [15] KEMP M C, TADAY P F, COLE B E, et al. Security applications of terahertz technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5070: 44-52.
- [16] 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.
- [17] GAO L H, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e324.
- [18] HOLLOWAY C L, DIENSTFREY A, KUESTER E F, et al. A discussion on the interpretation and characterization of metafilms/metaspurfaces: The two-dimensional

- equivalent of metamaterials [J]. *Metamaterials*, 2009, 3(2): 100-112.
- [19] WANG P F, HE F Y, LIU J J, et al. Ultra-high- Q resonances in terahertz all-silicon metasurfaces based on bound states in the continuum[J]. *Photonics Research*, 2022, 10 (12): 2743-2750.
- [20] WU J B, SHEN Z, GE SH J, et al. Liquid crystal programmable metasurface for terahertz beam steering[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(13): 131104.
- [21] WANG X F, HE X J, JIANG J X, et al. Programmable manipulation of terahertz beams by hybrid graphene-metal coding metasurfaces[J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 129: 109378.
- [22] ZHANG X G, YU Q, JIANG W X, et al. Polarization-controlled dual-programmable metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(11): 1903382.
- [23] LU X G, DONG B W, ZHU H F, et al. Two-channel VO₂ memory meta-device for terahertz waves [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12): 3409.
- [24] ZHANG X G, JIANG W X, JIANG H L, et al. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(3): 165-171.
- [25] GUTRUF P, ZOU CH J, WITHAYACHUMNANKUL W, et al. Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 133-141.
- [26] LIU CH X, YANG F, FU X J, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(22): 2100932.
- [27] FU X J, SHI L, YANG J, et al. Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(18): 22287-22294.
- [28] SHIH Y H, LIN X Y, SILALAH H M, et al. Optically tunable terahertz metasurfaces using liquid crystal cells coated with photoalignment layers [J]. *Crystals*, 2021, 11(9): 1100.
- [29] 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.
- [30] JI Y Y, JIANG X H, FAN F, et al. Active terahertz beam deflection based on a phase gradient metasurface with liquid crystal-enhanced cavity mode conversion[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1269-1281.
- [31] CHIANG W F, SILALAH H M, CHIANG Y C, et al. Continuously tunable intensity modulators with large switching contrasts using liquid crystal elastomer films that are deposited with terahertz metamaterials [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27676-27687.
- [32] ZHUANG X L, ZHANG W, WANG K M, et al. Active terahertz beam steering based on mechanical deformation of liquid crystal elastomer metasurface [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 14.
- [33] ZHANG Y X, ZHAO Y CH, LIANG SH X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(1): 153-170.
- [34] PAN W, YANG L L, MA Y, et al. Design of a terahertz dual-channel modulator based on metamaterials [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(30): 9519-9524.
- [35] WU B, HU Y, ZHAO Y T, et al. Large angle beam steering THz antenna using active frequency selective surface based on hybrid graphene-gold structure [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15353-15361.
- [36] XIAO G L, ZHOU S T, YANG H Y, et al. Dynamically tunable and multifunctional polarization beam splitters based on graphene metasurfaces [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(17): 3022.
- [37] 杨蕾,熊浩然,吴翰铭,等. 可重构超表面研究进展及应用(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(3): 23-43.
- YANG L, XIONG H R, WU H M, et al. Progress and applications of reconfigurable metasurfaces (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(3): 23-43.
- [38] ZHANG M, DONG P, WANG Y, et al. Tunable terahertz wavefront modulation based on phase change materials embedded in metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12 (20): 3592.
- [39] YANG D Q, WANG W G, LYU ER P, et al. Programmable VO₂ metasurface for terahertz wave beam steering[J]. *iScience*, 2022, 25(8): 104824.
- [40] DONG B W, ZHU SH Q, GUO G X, et al. Switchable pancharatnam-berry phases in heterogeneously integrated THz metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(6): 2417183.
- [41] HE SH W, YANG H M, JIANG Y H, et al. Recent advances in MEMS metasurfaces and their applications on

- tunable lens[J]. *Micromachines*, 2019, 10(8): 505.
- [42] CONG L Q, PITCHAPPA P, WANG N, et al. Electrically programmable terahertz diatomic metamolecules for chiral optical control[J]. *Research*, 2019; 7084251.
- [43] MENG CH, THRANE P C V, DING F, et al. Full-range birefringence control with piezoelectric MEMS-based metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2071.
- [44] DENG Y D, MENG CH, THRANE P C V, et al. MEMS-integrated metasurfaces for dynamic linear polarizers[J]. *Optica*, 2024, 11(3): 326-332.
- [45] SUN Z C, LIANG CH, CHEN CH, et al. High-efficiency dynamic terahertz deflector utilizing a mechanically tunable metasurface[J]. *Research*, 2023, 6: 0274.
- [46] WANG CH SH, GUI L L, LI H N, et al. MEMS-tunable bilayer plasmonic metasurfaces for dynamic vortex wave plates[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 20(1): e01406.
- [47] KARST J, LEE Y, FLOESS M, et al. Electro-active metaobjective from metalenses-on-demand [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7183.
- [48] SHEN ZH X, ZHOU SH H, GE SH J, et al. Liquid crystal tunable terahertz lens with spin-selected focusing property[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8800-8807.
- [49] GE SH J, CHEN P, SHEN ZH X, et al. Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12349-12356.
- [50] GE SH J, SHEN ZH X, CHEN P, et al. Generating, separating and polarizing terahertz vortex beams via liquid crystals with gradient-rotation directors [J]. *Crystals*, 2017, 7(10): 314.
- [51] SHEN Y CH, SHEN ZH X, ZHAO G ZH, et al. Photopatterned liquid crystal mediated terahertz Bessel vortex beam generator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(8): 080003.
- [52] LI SH Q, XU X W, VEETIL R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [53] GERARDO P P, MARIANO B, JOSE A E, et al. Design and demonstration of an electronically scanned reflectarray antenna at 100 GHz using multiresonant cells based on liquid crystals [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8): 3722-3727.
- [54] TAO SH N, SHEN ZH X, YU H G, et al. Transflective spatial terahertz wave modulator [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1650-1653.
- [55] LI W L, HU X M, WU J B, et al. Dual-color terahertz spatial light modulator for single-pixel imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 191.
- [56] CHEN J, HUANG SH X, CHAN K F, et al. 3D-printed aberration-free terahertz metalens for ultra-broadband achromatic super-resolution wide-angle imaging with high numerical aperture[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 363.
- [57] KUMAR A, GUPTA M, PITCHAPPA P, et al. Active ultrahigh- Q (0.2×10^6) THz topological cavities on a chip[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(27): 6833-6834.
- [58] KUMAR A, GUPTA M, PITCHAPPA P, et al. Phototunable chip-scale topological photonics: 160 Gbps waveguide and demultiplexer for THz 6G communication[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5404.
- [59] WANG W H, TAN Y J, TAN T C W, et al. On-chip topological beamformer for multi-link terahertz 6G to XG wireless[J]. *Nature*, 2024, 632(8025): 522-527.
- [60] NIU L, FENG X, ZHANG X Q, et al. Photonic terahertz phased array via selective excitation of nonlinear Pancharatnam-Berry elements[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 8159.
- [61] TO Y S, DU J CH, DECROZE C, et al. Phase change material-driven tunable metasurface for adaptive terahertz sensing and communication in 6G perceptive networks[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 36(12): e15085.
- [62] TAGHVAEE H, PITILAKIS A, KHODADADI M, et al. Holographic mmWave metasurface integrating THz sensing for 6G wireless networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, 32(4): 54-62.
- [63] OZGOLI A, FARZIN P, SOLEIMANI M, et al. Multichannel joint-polarization-frequency-modulation encrypted metasurface in secure THz communication [J]. *Optics Express*, 2025, 33(16): 33515-33529.
- [64] FU X J, WANG P, LIU Y J, et al. Fundamentals and application of millimeter-wave and terahertz programmable metasurfaces [J]. *Journal of Materiomics*, 2025, 11(1): 100904.

[65] SUN L, XU L, WANG J Y, et al. A pixelated frequency-agile metasurface for broadband terahertz molecular fingerprint sensing[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(27): 9681-9685.

[66] LIU B W, PENG Y, HAO Y F, et al. Ultra-wideband terahertz fingerprint enhancement sensing and inversion model supported by single-pixel reconfigurable graphene metasurface[J]. *PhotonX*, 2024, 5(1): 10.

[67] WANG Y, ZHANG X, WANG Y X, et al. Recent advances in metasurfaces: From THz biosensing to microwave wireless communications [J]. *Research*, 2025, 8: 0820.

[68] WANG Y, CUI Z J, ZHANG X J, et al. Excitation of surface plasmon resonance on multiwalled carbon nanotube metasurfaces for pesticide sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(46): 52082-52088.

[69] XU SH T, FAN F, JI Y Y, Et al. Multi-band terahertz linear polarization converter based on carbon nanotube integrated metamaterial [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8824-8833.

作者简介



周恩泽, 2023 年于清华大学获得学士学位, 现为清华大学博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超表面技术。
E-mail: zez23@mails.tsinghua.edu.cn

Zhou Enze received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2023, and he is currently pursuing his Ph. D. degree at Tsinghua University. His

main research interests include terahertz metasurface technology.



姜明月, 2017 年于聊城大学获得学士学位, 2021 年于中国石油大学(华东)获得硕士学位, 现为山东省创新发展研究院助理研究员, 主要研究方向为科技战略与科技政策。
E-mail: 354361037@qq.com

Jiang Mingyue received her B. Sc. degree from Liaocheng University in 2017, and her M. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2021. She is currently an assistant researcher at the Shandong Institute of Innovation and Development Research. Her main research interests include science and technology strategy and science and technology policy.



赵晓光(通信作者), 2008 年于清华大学获得学士学位, 2011 年于清华大学获得硕士学位, 2016 年于波士顿大学获得博士学位, 现为清华大学副教授, 主要研究方向为超材料/超表面、微机电系统、太赫兹技术和医学影像技术。
E-mail: zhaoxg@mail.tsinghua.edu.cn

Zhao Xiaoguang (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Tsinghua University in 2008 and 2011, respectively, and his Ph. D. degree from Boston University in 2016. He is currently an associate professor at Tsinghua University. His main research interests include metamaterials/metasurfaces, MEMS, THz technology, and medical imaging technology.