

文章编号: 1671-7449(2024)05-0455-12

## 微结构太赫兹调制技术研究进展

李腾腾, 朱璞, 郝亚峰, 武慧嘉, 李子唯, 马富鹏, 杨建军,  
余建刚, 李丰超, 雷程\*, 梁庭

(中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 太赫兹调制技术凭借其独特的功能特性, 在安全检测、医疗成像和下一代6G通信等多个领域展现出巨大的应用潜力和价值。其核心在于对太赫兹波的振幅、相位、偏振等关键参数的精准调制并按照目标领域对波形进行赋形, 以满足多样化应用需求。本文全面梳理了基于人工电磁微结构的太赫兹调制技术最新研究进展, 深入剖析了调制机理, 并阐明了关键设计策略与方法。特别地, 重点介绍了微加工工艺与THz功能材料(如相变材料、石墨烯、钙钛矿和液晶等)相结合的太赫兹调制器件在调制深度、响应速度和稳定性方面取得的最新研究成果与突破, 为太赫兹调制技术走向实际应用提供一定的技术支撑。最后, 客观分析了微结构太赫兹调制器件所面临的主要挑战与限制因素, 并基于当前研究趋势, 对太赫兹调制技术未来发展方向做出了展望, 旨在为未来研究与实践提供方向性参考。

**关键词:** 太赫兹; 人工微结构; 调制器; 表面等离子体共振; 相位

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024068

**引用格式:** 李腾腾, 朱璞, 郝亚峰, 等. 微结构太赫兹调制技术研究进展[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 455-466.

LI Tengpeng, ZHU Pu, HAO Yafeng, et al. Advances in microstructured terahertz modulation techniques[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 455-466.

## Advances in Microstructured Terahertz Modulation Techniques

LI Tengpeng, ZHU Pu, HAO Yafeng, WU Huijia, LI Ziwei, MA Fupeng, YANG Jianjun,  
YU Jianguang, LI Fengchao, LEI Cheng\*, LIANG Ting

(State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Terahertz modulation technology, by virtue of its unique functional characteristics, has shown great potential and value for applications in various fields such as security detection, medical imaging and next-generation 6G communications. Its core lies in the accurate modulation of key parameters such as amplitude, phase, polarization and other key parameters of terahertz waves and the assignment of waveforms according to the target domains to meet diversified application requirements. In this paper, the latest research progress of terahertz modulation technology based on artificial electromagnetic microstructures is comprehensively reviewed, the modulation mechanism is deeply analyzed, and the key design strategies

**收稿日期:** 2024-06-04

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(62301509, 62304209); 山西省重点研发计划资助项目(202302030201001); 山西省基础研究计划资助项目(202203021222079, 20210302123203, 202103021223185)

**作者简介:** 李腾腾(1993-), 男, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹功能器件、微纳光电材料与器件(探测传感方向)及基于第三代半导体材料的功率半导体器件研究。E-mail: litengteng@nuc.edu.cn.

\* **通信作者:** 雷程(1987-), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事微机电系统(MEMS)、集成电路先进封装技术、宽禁带半导体传感器研究。E-mail: leicheng@nuc.edu.cn.

and methods are elucidated. In particular, it focuses on the latest research results and breakthroughs in modulation depth, response speed and stability of terahertz modulation devices combining micromachining process and THz functional materials (such as phase change materials, graphene, chalcogenides, liquid crystals, etc.), which will provide certain technical support for the terahertz modulation technology to be applied in practice. Finally, the main challenges and limitations of microstructured terahertz modulation devices are objectively analyzed, and based on the current research trends, the future development direction of terahertz modulation technology is outlooked, aiming to provide a directional reference for future research and practice.

**Key words:** Terahertz; artificial microstructure; modulators; surface plasmon resonance; phase

## 0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波在电磁波谱中位于红外和微波之间, 频率介于  $0.1 \sim 10$  THz, 波长跨度在  $30 \sim 3\,000 \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>, 频谱位置如图 1 所示。与其他频率的电磁波相比, THz 波具有指纹谱性、低光子能量、高穿透性、宽带性等一系列特殊性质<sup>[2]</sup>, 因此, THz 技术在缉毒反恐<sup>[3]</sup>、生物医疗<sup>[4-5]</sup>、无损检测<sup>[6-7]</sup>、高速 6G 通信<sup>[8]</sup>等领域具有广泛的应用。相较于红外光子学和微波电子学领域, THz 技术起步较晚, 尤其在 THz 调制领域中其功能器件还较为缺乏<sup>[9]</sup>。THz 调制技术可分为主动调制和被动调制, 被动调制的功能单一, 限制了 THz 技术的应用范围<sup>[10-11]</sup>。此外, THz 调制

技术目前还面临着高频调制与材料响应弱、调制带宽与深度不足、工艺复杂以及系统集成难与标准化进程滞后等多方面的瓶颈<sup>[12-13]</sup>。因此, 能够对 THz 波实现动态主动调制的研究有着重要的价值<sup>[14]</sup>。近年来, 为克服自然材料响应弱的缺点, 人工电磁微结构材料得以飞速发展, 通过设计其单元微结构的几何形状、尺寸、排列方式、嵌入物等, 使得微结构拥有负介电常数、负折射率、负磁导率等非寻常媒质参数<sup>[15]</sup>, 进而实现器件的灵活主动调制<sup>[16]</sup>。同时, THz 调制器可以按照实际需求对波形进行赋形, 实现 THz 波振幅和相位的高速转换<sup>[17]</sup>。人工微结构种类繁多、功能丰富, 因此, 微结构 THz 调制器件有极大的设计自由度来满足特定的电磁波调制需求, 有效拓宽了器件调制能力与应用范围。

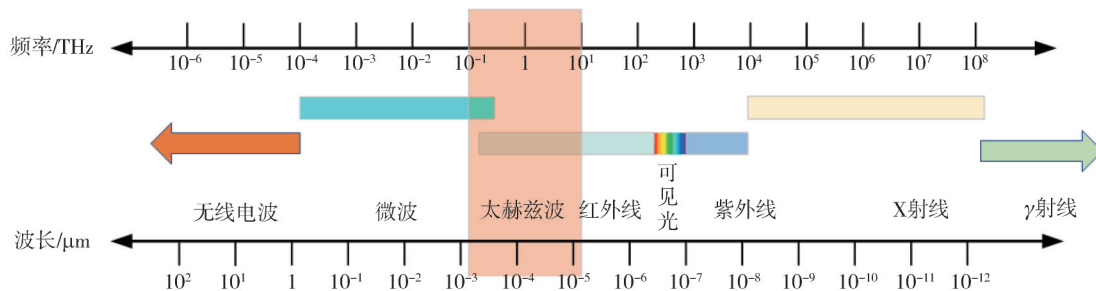


图 1 太赫兹波在电磁波频谱中的位置

Fig. 1 Location of terahertz waves in the electromagnetic spectrum

目前, 在 THz 调制技术领域的研究已经取得显著成就与进展。本文将对 THz 调制器件的基本原理和相关研究进展进行综述, 重点讨论 THz 波前调制的主要调制机理与设计方法。同时, 结合发展迅速的机电系统 (MEMS) 等人工微结构加工手段与各类 THz 功能材料, 介绍了相变材料、石墨烯、钙钛矿和液晶等多种 THz 调制功能器件的最新研究成果, 并对其在调制深度、响应速度和稳定性等方面的性能进行总结。最后, 讨论了当前 THz 调制器件所面临的技术瓶颈与挑战, 并

对未来的发展方向进行展望。

## 1 THz 波前调制机理与设计方法

THz 波前调制技术是指对 THz 波振幅、相位、偏振态空间分布的调控, 从而实现提升信息安全、增强抗干扰能力、延长传输距离、达到多路复用和分集、提高频谱利用率等技术目标<sup>[18]</sup>。基于人工微结构的 THz 调制技术可以分为三种类型: 相位调制、振幅调制和功能复用波前调制技

术。在人工微结构调制器件中,功能复用的概念常被引入到设计中,即指同一微结构调制器件具有两种或两种以上的波前调制功能,其相互作用模型如图 2 所示。

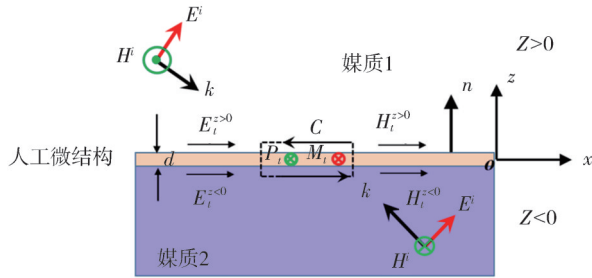


图 2 相互作用模型

Fig. 2 Interaction modelling

根据广义斯涅耳定律,即式(1)可知,电磁波在自由空间中任意表面上的分布可以看作单个次级小波的叠加,人工微结构单元可被看作次波源,通过独立控制这些小波,可以实现电磁波的任意波前调制。

$$n_{(t,r)} \sin \theta_{(t,r)} - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}, \quad (1)$$

式中:  $n_{(t,r)}$ 为透射/反射端折射率;  $n_i$ 为入射端折射率;  $\theta_{(t,r)}$ 为透射/反射角;  $\theta_i$ 为入射角;  $\lambda_0$ 为真空波长;  $d\Phi/dx$ 为相位梯度,  $x$ 为长度。

根据相互作用机制的不同,人工微结构 THz 调制单元可分为:基于局域表面等离子体共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)<sup>[19-20]</sup>、基于几何(Pancharatnam-Berry, PB)相位<sup>[21-22]</sup>和基于Mie共振<sup>[23-24]</sup>的THz调制器件。

如图 3(a) 所示,基于类似偶极子振荡的 LSPR 人工微结构单元仅能够在单一频率处实现  $0 \sim \pi$  范围内的相位、振幅调制。为提高调制范围,基于 PB 相位的调制方法可以实现  $0 \sim 2\pi$  的大范围相位调控(见图 3(b)),且不依赖于入射波的频率,但这两种调制机制都会存在引入较高金属损耗的问题。如图 3(c) 所示,基于 Mie 共振的 THz 调制机制在实现  $0 \sim 2\pi$  范围调控的同时不会引入金属损耗并具有较强的磁共振,因此特别适合用于宽带波前调制人工微结构的设计中。此外,还可以通过采用 Fano 共振<sup>[25-26]</sup>、反射型的 MIM(Metal-Insulator-Metal)结构<sup>[27-28]</sup>或透射型的惠更斯人工微结构<sup>[29-30]</sup>来实现器件更高效率、更大带宽的设计。

除上述人工微结构调制外,器件所采用的功能材料在 THz 波段下的电磁与光学特性对 THz 调制器件的设计同样至关重要。金属或良导体材料

在模拟计算中一般采用 Drude<sup>[31]</sup>模型进行设计分析,如式(2)所示。

$$\epsilon = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (2)$$

式中:  $\gamma$ 为电子碰撞频率,  $\gamma=1/\tau$ ,  $\tau$ 为弛豫时间;  $\epsilon_\infty$ 为无限频率处的介电常数;  $\omega_p$ 为等离子频率;  $\omega$ 为入射光频率。

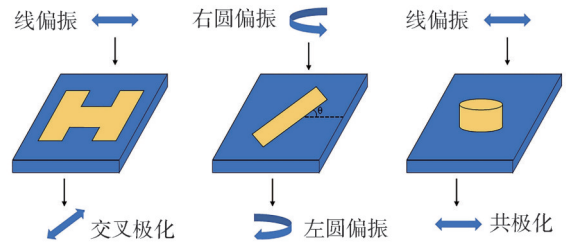


图 3 典型人工微结构调制机理

Fig. 3 Typical artificial microstructure modulation mechanism

在实际操作过程中由于水蒸气等物质的强介电弛豫特性,需要利用 Debye<sup>[32]</sup>模型或 Lorentz<sup>[33-34]</sup>模型对这类材料加以修正描述。而对于如石墨烯等二维 THz 功能材料,在 THz 波段往往利用 Kubo<sup>[35]</sup>模型进行表示,THz 功能材料带内电子-空穴散射过程如式(3)所示。

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{ie^2 K_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\Gamma)} \left[ \frac{E_F}{K_B T} + 2 \ln \left( \exp - \frac{E_F}{K_B T} + 1 \right) \right], \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\text{intra}}$ 为带内电导率;  $\hbar$ 为约化普朗克常数;  $K_B$ 为玻尔兹曼常数;  $T$ 为环境温度;  $\omega$ 为角频率;  $e$ 为电子的基本电荷量;  $\Gamma$ 为载流子散射率,大小为弛豫时间的倒数;  $E_F$ 为费米能级。

$\sigma_{\text{intra}}$ 的实部跟弛豫时间  $\tau$  有关,影响着能量的吸收和耗散过程。对于直接带间电子跃迁过程,在满足条件  $|E_F| \gg K_B T$  时,可以近似表示为式(4)。

$$\sigma_{\text{inter}} = i \frac{e^2}{4\pi \hbar} \ln \left[ \frac{2|E_F| - \hbar(\omega + i\Gamma)}{2|E_F| + \hbar(\omega + i\Gamma)} \right], \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\text{inter}}$ 为带内电导率。可以看出,在 THz 波段,THz 功能材料的电导率主要由带内跃迁部分决定。

## 2 微结构太赫兹调制器件研究进展

调制速度和调制深度是调制器的关键性能指标。因此,许多杰出的研究都集中在提高调制速度、调制深度和调制相位上。实现微结构 THz 主动调控器件的另一大核心是器件所选择的功能材

料,它决定了器件的工作方式和性能。多样化的THz功能材料展现出丰富的调制潜力,根据应用需求选择不同的功能材料,能够精准地操控THz波频谱特性和空间分布,从而构建出高效且定制化的调制器件。因此,本文将重点介绍各类具有

代表性的微结构THz调制器件,器件通过结合如二氧化钒、石墨烯、钙钛矿、液晶等一系列功能材料实现THz波调制,可为开展后续相关研究提供参考。四种典型的THz功能材料调制器件工作原理如图4所示<sup>[36]</sup>。

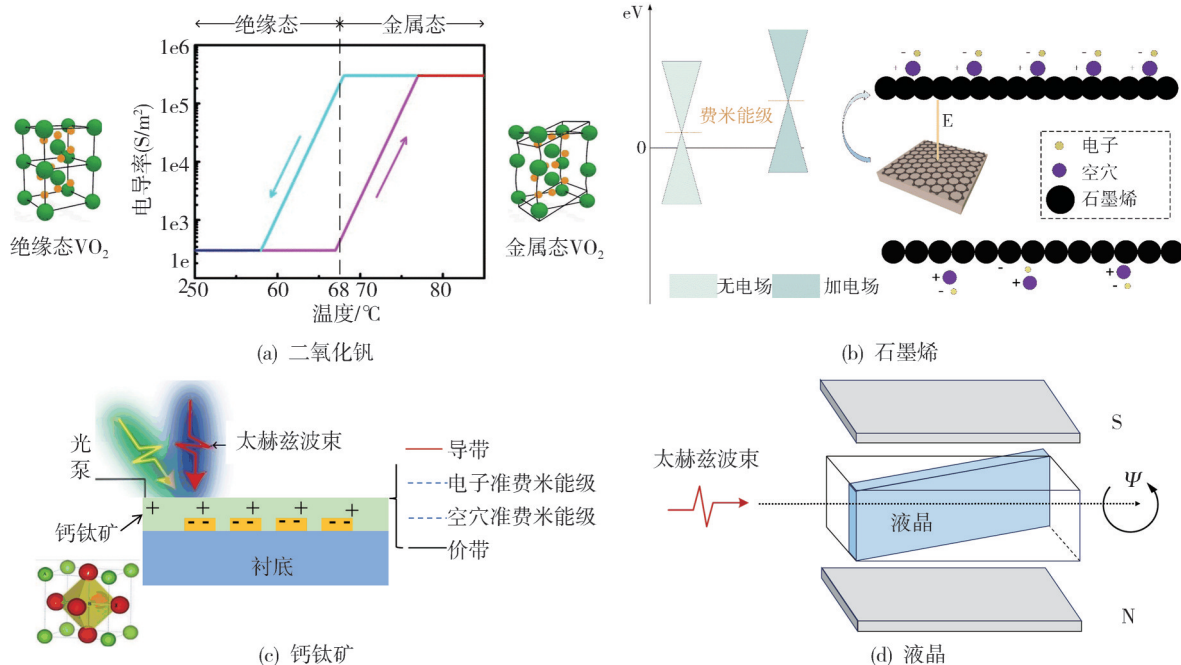


图4 THz功能材料调制器件工作原理

Fig. 4 Working principle of THz functional material modulation devices

## 2.1 基于相变材料的微结构调制器件

相变材料是指能够在外场(如光场、电场等)激励下,结构或属性发生变化的材料。典型的相变材料有二氧化钒( $\text{VO}_2$ )、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)、铁电材料、超导体等。2008年,Driscoll等<sup>[37]</sup>首次将人工微结构与 $\text{VO}_2$ 相结合,设计并实现了基于 $\text{VO}_2$ 的金属分裂开口环结构器件,成功实现了20%的THz共振频率偏移,标志着相变材料开始应用于THz波动态调控领域。为提高 $\text{VO}_2$ 调制器件性能,人们通过改善器件结构,又分别设计出切割线形调制器<sup>[38]</sup>和环形哑铃调制器<sup>[39]</sup>(见图5),环形哑铃调制器在0.575~0.63 THz带宽范围内,实现了138°的相移,调制速度小于100 fs。除了相位调制,THz波的偏振转换对于实际应用也十分重要<sup>[40-43]</sup>。

2018年,Ding等<sup>[44]</sup>提出一种极化不敏感且功能可切换的 $\text{VO}_2$ 超表面功能器件,在结构参数固定的条件下,该器件可在室温环境下吸收0.562~1.232 THz范围内的垂直THz波,吸收率超过90%,

待达到 $\text{VO}_2$ 相变温度后,器件功能由吸波器转为半波片,在0.49 THz的带宽内线性极化转换效率超过95%。除了温度控制外,电流也能够实现对相变材料的主动调控。2021年,Jiang等<sup>[45]</sup>通过在金属铝中嵌入 $\text{VO}_2$ ,并将电流从0 mA增加到290 mA,实现了在0.8 THz处20%的调制深度变化。

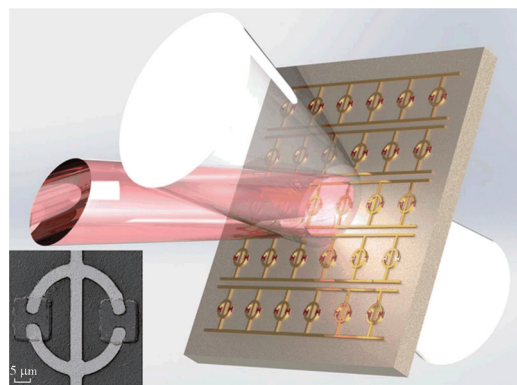


图5 基于超材料与二氧化钒结构的环形哑铃THz调制器

Fig. 5 Ring dumbbell terahertz modulator based on metamaterials with vanadium dioxide structure

然而, $\text{VO}_2$ 材料存在温度迟滞特性,其加热与冷却过程中发生相变的阈值有所不同,该特性虽

然限制了该类器件快速调制的能力,但是可利用该特性制备 VO<sub>2</sub> 温度记忆器件<sup>[46]</sup>。

为克服 VO<sub>2</sub> 温度迟滞的缺点,研究人员引入了 GST 材料并广泛用于磁盘存储和电记忆体<sup>[47]</sup>, 该材料具有良好的热稳定性和快速调制速率。2024 年, Lai 等<sup>[48]</sup> 提出了一种基于 GST 和薄云母基底的光学可调超快 THz 宽带偏振器件 (THz-PoD), 该器件具有多个优点: 宽频带 (0.1~2.5 THz)、纳秒级响应时间以及宽范围极化角度 (0~180°)。作为相变材料的重要分支, 铁电材料也是主动调控 THz 调制器件的重要发展方向<sup>[49-50]</sup>, 在光通信与波导器件领域<sup>[51]</sup> 常用的铁电材料以铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 晶体为主。2016 年, Wu 等<sup>[52]</sup> 利用铁电材料的介电特性设计了一种方形裂环谐振器/BaSrTiO<sub>3</sub> 薄膜/硅三层结构的调制器件, 器件实现了 79% 的传输对比度。此外, 超导体材料以其超低阻抗, 电导率随温度变化明显的特性同样广泛应用于 THz 调制领域, 超导体材料的研究中以钇钡铜氧化物<sup>[53]</sup> 和氮化铌<sup>[54]</sup> 为主流趋势。2024 年, Miyamoto 等<sup>[55]</sup> 基于铜氧化物超导体设计了一种高性能 THz 调制器, 器件实现了 0.84~0.89 THz 载波频率上 3 GHz 正弦波的调制, 调制速率高达 130 Gbit/s。尽管相变材料具有可调谐、轻量化的优点, 但其加工工艺难度较大、相变条件不够稳定是限制该类器件发展的主要因素, 低功耗、快响应且稳定的相变材料微结构 THz 调制器件是未来研究的重要方向<sup>[56]</sup>。

## 2.2 石墨烯微结构主动调制器件

石墨烯因其高载流子迁移率、在常温下即可实现半整数量子霍尔效应<sup>[57-58]</sup> 等优异特性, 广泛应用于 THz 波前主动调制器件中。该类 THz 主动调制器件通过引入外部激励来改变石墨烯载流子浓度和费米能级, 从而实现精准、有效的 THz 波调制<sup>[59-61]</sup>。2012 年, Berardi 等<sup>[62]</sup> 首次设计出石墨烯/绝缘介质/半导体结构的 THz 调制器, 开创性地结合了石墨烯的优异性能与半导体技术, 但该调制器工作带宽仅为 0.1 THz, 调制深度也只有 15%, 留下了进一步优化与提升的空间。在此结构基础上, 后续科研人员通过增添一层金属光栅<sup>[63]</sup> 或将石墨烯薄层直接转移到 n 型硅基底<sup>[64]</sup> 上来提升器件工作带宽与调制深度<sup>[65]</sup>。2015 年, Jiang 等<sup>[66]</sup> 提出了石墨烯/超薄 Si: HfO<sub>2</sub>/Si 的堆叠结构, 该结构器件能在不依赖于光照射功率的限

制下, 达到 74% 的调制深度。2016 年, Liu 等<sup>[67]</sup> 制备了一种基于离子凝胶的石墨烯 THz 主动调制器, 该器件在 -1~1 V 范围内实现了 99% 的调制深度, 器件调制性能显著增加。同年, Yu 等<sup>[68]</sup> 提出了一种基于 I 形金属谐振器和双层石墨烯的功能复用 THz 偏振转换器, 成功实现了线-线、线-圆、线-椭圆偏振功能间的动态切换, 器件可被用作 0.4~0.95 THz 波段内的半波片和 0.47~0.67 THz 内的四分之一波片。2018 年, Chen 等<sup>[69]</sup> 设计了一种基于石墨烯/石英的布鲁斯特角可调 THz 调制器, 结构如图 6 所示。通过改变石墨烯的电导率调节器件的布鲁斯特角, 该调制器能实现 99% 以上的调制深度, 同时将工作带宽拓展至 0.5~1.6 THz, 相位可调性提升至 140°, 实现了 THz 波的超宽带、高深度调制。

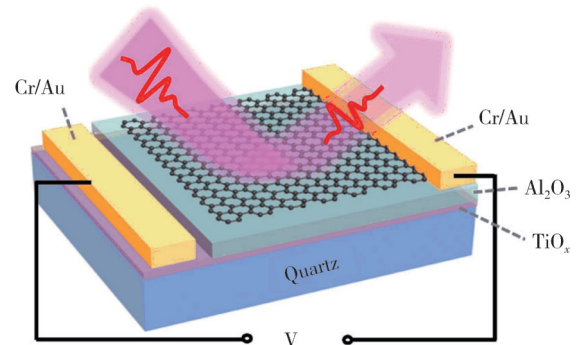


图 6 基于可调布鲁斯特角的石墨烯/石英调制器件结构  
Fig. 6 Schematic structure of graphene/quartz modulation device based on tunable Brewster angle

2024 年, Yoon 等<sup>[70]</sup> 利用少层石墨烯/六方氮化硼/二硒化钨结构组成范德华异质结, 实现了 THz 波声子的生成、检测和调制, 该器件利用石墨烯作为超宽带声子传感器生成了频率为 3 THz, 全宽半高为 1.2 THz 的声子脉冲, 在 2 THz 频率处, 达到了 500 的高品质因子。尽管基于石墨烯的 THz 调制器件已达到近乎 100% 的调制深度, 但仍然面临一些问题和挑战: 多层石墨烯、掺杂石墨烯及其衍生材料在 THz 波段的超快载流子动力学机理目前尚不明确; 如何实现器件室温工作、高功率发射、频率可宽带调谐等问题亟待解决; 器件阻抗匹配研究也是未来石墨烯 THz 调制器件面临的挑战<sup>[71-72]</sup>。

## 2.3 钙钛矿微结构主动调制器件

近年来, 钙钛矿以其高光吸收系数、高载流子迁移率及带隙可调等特性而受到光电、THz 等多个领域的广泛关注<sup>[73]</sup>。利用钙钛矿优异的光电

响应特性与人工微结构的电磁调制能力,能够实现高效且灵活的THz波主动调制<sup>[74]</sup>。钙钛矿材料应用于THz波调制器件时,若直接将钙钛矿旋涂在衬底上,器件的响应时间与调制深度往往十分受限<sup>[75]</sup>,因此,钙钛矿一般与人工微结构或波导相结合以实现目标性能。如图7所示,人工微结构有双开口金属环、双C人工微结构、 $\Omega$ 型人工微结构<sup>[76]</sup>等。2017年,Ashish等<sup>[77]</sup>设计了一种基于有机无机杂化钙钛矿薄膜和金属人工微结构交叉的THz调制器,器件实现了颜色选择性THz波调制。2022年,Huang等<sup>[78]</sup>设计了一种基于钙钛矿

的多维THz主动调制器,该器件在1.17 THz频率下可以达到45.4%的调制深度与168°的相位差。2024年,Xu等<sup>[79]</sup>设计了一种基于石英基底的 $\text{FA}_{0.4}\text{MA}_{0.6}\text{PbI}_3$ 人工微结构THz调制器,器件的光泵浦阈值低至 $12.77 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,开关时间低至3.5 ps。目前,基于钙钛矿材料的THz调制器展现出优异的THz波调制性能<sup>[80]</sup>,但仍存在载流子运动机理不明确、环境稳定性差的问题,钙钛矿材料的理论研究及提高材料稳定性是未来钙钛矿微结构主动调制器面向应用待解决的关键问题<sup>[81]</sup>。

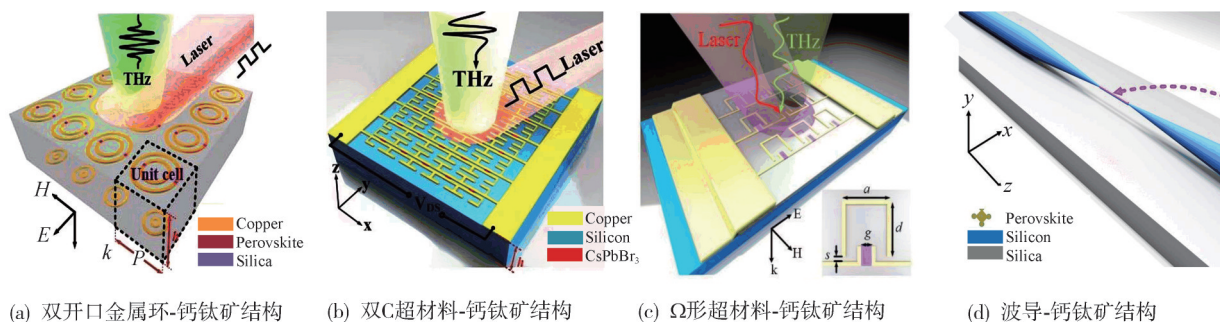


图7 典型钙钛矿THz调制器件结构

Fig. 7 Typical chalcogenide THz modulation device structure

## 2.4 液晶微结构器件

在THz波调制器件中,液晶材料被广泛应用于相位调制,其调制原理为通过外部激励控制液晶各向异性来实现THz波的调制。但是液晶材料本身所需的调制电压较高,限制了液晶调制器件的发展,因此,科研人员将液晶与人工微结构相结合,显著降低了其调制所需的电压。2003年,Chen等<sup>[82]</sup>设计了第一个在室温下工作的液晶可调谐THz移相器,通过磁控方式使器件于1 THz处实现141°的相移。2015年,Wang等<sup>[83]</sup>设计出一种基于多孔石墨烯电极驱动的宽带可调谐液晶THz波片,器件采用多孔石墨烯和金属亚波长光栅作为电极,在50 V的偏置电压下实现了180°相移。2018年,冀允允<sup>[84]</sup>设计了一种液晶THz波移相器,器件于0.7 THz处获得60°的相移,继而又将该器件与双层石墨烯光栅结构相结合,在0.7~1.6 THz范围内形成电控液晶-石墨烯光栅的宽带可调四分之一波片,拓宽了液晶微结构器件的工作带宽。2024年,Hao等<sup>[85]</sup>提出了一种基于人工微结构、液晶和摩擦纳米发电机的自供电THz调制器。如图8所示,该调制器利用旋转式摩擦纳米发电机产生的高压交流电来驱动液晶单元,形

成一个动态光谱可重构的THz液晶人工微结构系统,实现在0.1 THz频率下的相位调制及在0.117 THz和0.161 THz频率下13%和11%的调制深度。尽管该器件的调制深度与其他同类器件相比较低,但该调制系统的自供电功能展现出卓越的环保价值与集成创新。液晶人工微结构THz调制器目前仍面临器件稳定性与可靠性有待进一步提高的问题,长期使用过程中器件的性能衰减问题也需要解决,同时液晶盒过厚导致器件响应速度慢<sup>[83]</sup>的性能局限也一直存在。未来,应进一步探索新的人工微结构、液晶材料、液晶与超材料或2D材料的组合驱动模式,从而拓展液晶THz调制器的功能和应用范围<sup>[86]</sup>。

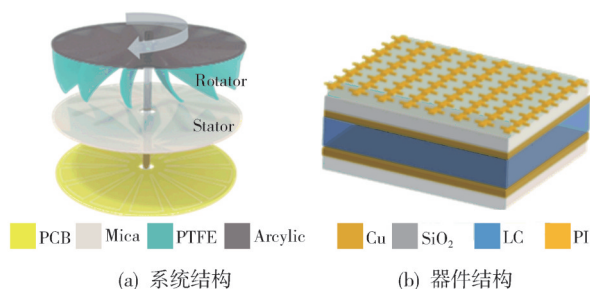


图8 自供电THz调制器。

Fig. 8 Self-powered terahertz modulator

### 2.5 其它类型微结构器件

2006年,Chen等<sup>[87]</sup>首次在GaAs基底上使用分裂开口谐振环构建肖特基二极管进行THz波调制。如图9(a)所示,该结构实现了0.3 THz的工作带宽与2 MHz的调制频率,且无需低温环境,同时,在16 V反向栅极偏压下,器件在0.72 THz处实现了50%的调制深度与3 dB的消光比。2009年,Chen等<sup>[88]</sup>在原有结构基础上,首次提出了THz准光相位调制器,实现了28.65°的相移和2 MHz的调制速率。

基于高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)结构的THz调制器件

因其二维电子气而拥有极高的电子迁移率和响应速度<sup>[89]</sup>。2011年,Padilla等<sup>[90]</sup>将HEMT与人工微结构结合,通过在分裂开口谐振环内开口缝隙中嵌套HEMT,实现了30%的调制深度和10 MHz的调制速度。2015年,Zhang等<sup>[91]</sup>设计了一种基于“工”字型嵌套HEMT的THz调制器。如图9(b)所示,该调制器将等效集体偶极子阵列与双通道异质结构结合,在动态测试中,得到了1 GHz的调制速度和85%的调制深度,基于该器件的THz通信系统实现了0.2 Gb/s的传输速率。2019年,该团队在此基础上又提出一种基于HEMT的错位网状THz调制器,在0.352 THz处达到93%的调制深度,动态测试下实现3 GHz的调制速率<sup>[92]</sup>。

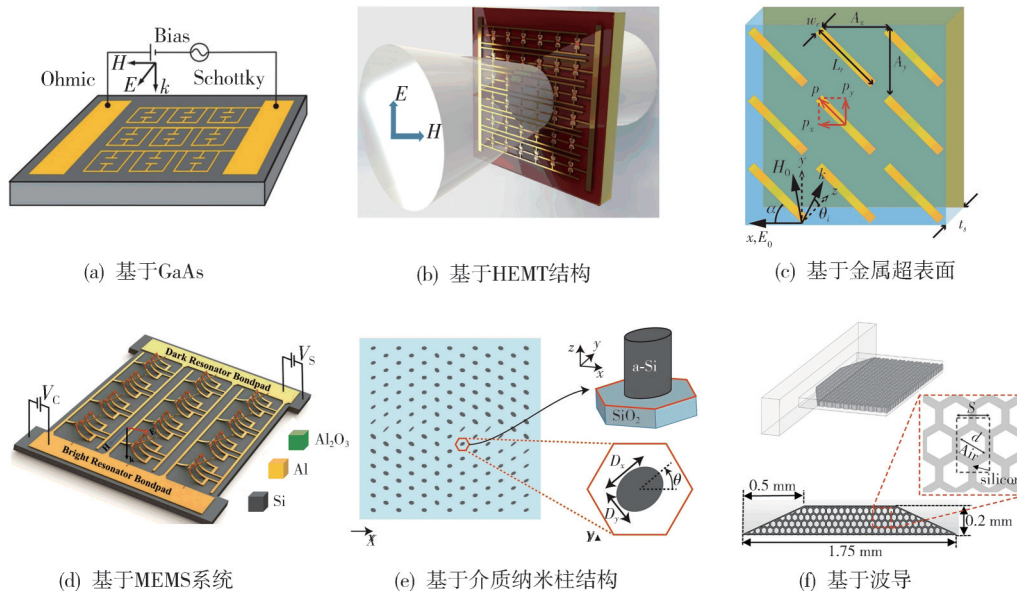


图9 其它类型微结构器件

Fig. 9 Other types of microstructured devices

金属由于自身结构是中心对称的,一般不展现出明显的非线性特性,通过对金属的表面进行特殊的图案化、结构化处理,可打破这种中心对称性。当金属的中心对称性被破坏后,其内部的电子分布和运动状态会发生改变,进而产生非线性特性。利用这种特性,当THz波入射到具有非线性特性的金属表面时,会引起波的振幅、相位、频率等特性的变化,从而实现对THz波的调制<sup>[93]</sup>。基于此原理,2013年,Grady等<sup>[94]</sup>首先设计出两种基于金属人工微结构的偏振转换器。图9(c)为反射型偏振转换器,上层为45°倾斜金属短线人工微结构,下层为金属底板,中间为介质层,与金属层形成Fabry-Pérot腔,该结构器件在0.8~1.36 THz范围内实现了超过80%的转换效

率。另一种为透射型偏振转换器,该器件两侧为金属线栅,金属线栅的方向互相正交,中间层由亚波长金属短线阵列结构的THz调制器,短线的方向与金属线栅的方向成45°夹角,金属层之间为绝缘介质层,器件在0.52~1.82 THz波段正交线偏振转化率可达50%。

此外,还可通过MEMS工艺制备的悬臂梁在受到应力变化后产生微结构区域变化来实现THz波的动态调制<sup>[95]</sup>。2012年,Zhu等<sup>[96]</sup>设计出十字形和T形相互切换的微结构THz调制器件,实现了THz波的动态偏振调制。2016年,Pitchappa等<sup>[97]</sup>提出了一种基于MEMS的可重构人工微结构,结构由周期性排列的切割线谐振器(CWR)和分裂环谐振器(SRR)组成。结构如图9(d)所示,

该器件能够独立重构近场耦合的亮模和暗模谐振器,并在THz波段内实现电磁诱导透明(EIT)模拟的有源调制和频率调谐,这将增强基于MEMS的人工微结构调制器件在未来THz电信网络中的使用。

为提高THz偏振转化的高透射效率与多功能性,研究人员设计出全介质人工微结构结构<sup>[98-99]</sup>。2015年,Arbabi等<sup>[98]</sup>提出了一种基于高对比度椭圆形介质纳米柱的介质人工微结构。结构如图9(e)所示,该器件在72%~97%的高传输效率下,可将高斯光束转换为贝塞尔-高斯光束。2022年,Xu等<sup>[100]</sup>提出了一种基于全金属立体U形元胞的三维人工微结构,可分别作为半波片和四分之一波片,器件偏振转换比超过90%,相对带宽达到69%,入射角容差超过85°。

波导能将THz波限制在其内部传播,而非自由空间,与人工微结构进行结合,可有效减少THz波在传输过程中的能量损失,同时也能避免不同部件间因不匹配而产生的反射和散射<sup>[101]</sup>。2009年,Pinaki等<sup>[102]</sup>通过周期性排列金属结构,同时在金属结构中填充液晶材料,设计出THz人工微结构等离子波导结构,在1.6 THz频率下实现了10.51 dB的消光比。2015年,Andrea等<sup>[103]</sup>在波导内部加载石墨烯材料,通过外加电压的激励方式,在10 V的偏压下实现了62%的调制深度,4 V偏压下实现了82%的调制深度。2024年,Khanal等<sup>[104]</sup>通过将涂有钛金属薄层的低电阻率硅板插入波导内,制备了一种基于波导的THz波衰减器(图9(f)),该器件在0.5~0.75 THz波段内,实现了40 dB的信号衰减。

### 3 总结与展望

近年来,微结构THz调制器件已从多种不同的材料和技术结合中取得了重要进展,包括相变材料、石墨烯、钙钛矿、液晶、GaAs等THz功能材料与微加工技术,所涉及的驱动方式有热、电、光、磁、机械等多种调控手段。这些研究极大地推动了微结构THz调制器件向实用化方向的迈进。尽管THz调制器件取得了显著进展与成就,但在调制深度、调制速度和稳定性等方面仍面临挑战。为了克服这些问题,未来需继续探索新物理机制与新型THz功能材料的开发,相信具备高调制效率、高调制深度、新颖功能、高度集成、与

MEMS量产工艺兼容的高性能THz主动调制器在6G通信、成像、探测等多种应用领域中将发挥越来越重要的作用,为进一步推动THz应用系统的集成化和小型化开辟广阔路径。

#### 参考文献:

- [1] 张真真,符张龙,王长,等. 太赫兹量子阱探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 103-109.  
ZHANG Zhenzhen, FU Zhanglong, WANG Chang, et al. Research on terahertz quantum well photodetector [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 103-109. (in Chinese)
- [2] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(6): 703-707.  
YAO Jianquan. Introduction of THz-wave and its applications [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(6): 703-707. (in Chinese)
- [3] 栾东,詹新宇,靳伟东. 太赫兹无损检测技术在毒品检测中的研究进展及应用价值[J]. 国际检验医学杂志, 2020, 41(11): 1387-1390.  
LUAN Yi, ZHAN Xinyu, JIN Weidong. Research progress and application value of terahertz nondestructive testing in drug detection [J]. International Journal of Laboratory Medicine, 2020, 41(11): 1387-1390. (in Chinese)
- [4] ZOU Y, LIU Q, YANG X, et al. Label-free monitoring of cell death induced by oxidative stress in living human cells using terahertz ATR spectroscopy [J]. Biomedical Optics Express, 2017, 9(1): 14-24.
- [5] MENG K, CHEN T N, CHEN T, et al. Terahertz pulsed spectroscopy of paraffin-embedded brain glioma [J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(7): 077001.
- [6] LIU X, LIU G, QIN J. Feasibility of using terahertz toroidal metasurface sensor for detection and quantification of chlorothalonil in water [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(24): 30360-30367.
- [7] HLOSTA P, NITA M, POWALA D, et al. Terahertz radiation in non-destructive testing of composite pyrotechnic materials [J]. Composite Structures, 2022, 279: 114770.
- [8] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics [J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 371-379.

- [9] 贺敬文,董涛,张岩. 太赫兹波前调制超表面器件研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 69-79.  
HE Jingwen, DONG Tao, ZHANG Yan. Development of metasurfaces for wavefront modulation in terahertz waveband [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49 (9): 69-79. (in Chinese)
- [10] YUN-SHIKLEE, 李允植, 崔万照. 太赫兹科学与技术原理[M]. 北京: 国防工业出版社出版, 2012.
- [11] 曹俊诚. 半导体太赫兹源、探测器与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [12] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature Photonics, 2007, 1: 97-105.
- [13] SENGUPTA K, NAGATSUMA T, MITTLEMAN D M. Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonics systems [J]. Nature Electronics, 2018, 1(12): 622-635.
- [14] WANG L, ZHANG Y, GUO X, et al. A review of THz modulators with dynamic tunable metasurfaces [J]. Nanomaterials, 2019, 9(7): 965.
- [15] 武小栋. 基于超材料电磁波调控的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [16] 陈懿宇, 田震. 石墨烯太赫兹波动态调制研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 86-97.  
CHEN Xieyu, TIAN Zhen. Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene [J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 86-97. (in Chinese)
- [17] 陈涛. 基于类电磁感应透明超表面的太赫兹调制器研究与设计[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- [18] BAO Y, NI J, QIU C W. A minimalist single-layer metasurface for arbitrary and full control of vector vortex beams [J]. Advanced Materials, 2020, 32 (6): 1905659.
- [19] MAYER K M, HAFNER J H. Localized surface plasmon resonance sensors [J]. Chemical Reviews, 2011, 111(6): 3828-3857.
- [20] COMIN A, MANNA L. New materials for tunable plasmonic colloidal nanocrystals [J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43(11): 3957-3975.
- [21] DING X, MONTICONE F, ZHANG K, et al. Ultra-thin pancharatanam-berry metasurface with maximal cross-polarization efficiency [J]. Advanced Materials, 2015, 27(7): 1195-1200.
- [22] ZHENG G, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [23] ZHAO Q, ZHOU J, ZHANG F, et al. Mie resonance-based dielectric metamaterials [J]. Materials Today, 2009, 12(12): 60-69.
- [24] KUZNETSOV A I, MIROSHNICHENKO A E, BRONGERSMA M L, et al. Optically resonant dielectric nanostructures [J]. Science, 2016, 354 (6314): 2472.
- [25] SUN L J, SU H W, LIU Q Q, et al. A review on photocatalytic systems capable of synchronously utilizing photogenerated electrons and holes [J]. Rare Metals, 2022, 41(7): 2387-2404.
- [26] GU J, SINGH R, LIU X, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. Nature Communications, 2012, 3: 1151.
- [27] AYDIN K, FERRY V E, BRIGGS R M, et al. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers [J]. Nature Communications, 2011, 2: 517.
- [28] LIN K T, CHEN H, LAI Y S, et al. Loading effect - induced broadband perfect absorber based on single-layer structured metal film [J]. Nano Energy, 2017, 37: 61-73.
- [29] PFEIFFER C, GRBIC A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets [J]. Physical Review Letters, 2013, 110 (19): 197401.
- [30] FAN K, ZHANG J, LIU X, et al. Phototunable dielectric Huygens' metasurfaces [J]. Advanced Materials, 2018, 30(22): e1800278.
- [31] LEMKUL J A, HUANG J, ROUX B, et al. An empirical polarizable force field based on the classical Drude oscillator model: development history and recent applications [J]. Chemical Reviews, 2016, 116 (9): 4983-5013.
- [32] ZHOU J, RAO X, LIU X, et al. Temperature dependent optical and dielectric properties of liquid water studied by terahertz time-domain spectroscopy [J]. AIP Advances, 2019, 9(3): 035346.
- [33] ULBRICHT R, HENDRY E, SHAN J, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy [J]. Reviews of Modern Physics, 2011, 83(2): 543-586.
- [34] KIM T T, OH S S, KIM H D, et al. Electrical access to critical coupling of circularly polarized waves in graphene chiral metamaterials [J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1701377.
- [35] HANSON G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 64302-64302-8.
- [36] 丛龙庆. 主动式太赫兹超材料器件综述 [J]. 中国激

- 光, 2021, 48(19): 157-173.  
CONG Longqing. Active terahertz metadevices [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 157-173. (in Chinese)
- [37] DRISCOLL T, PALIT S, QAZILBASH M M, et al. Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(2): 024101.
- [38] WEN Q Y, ZHANG H W, YANG Q H, et al. Terahertz metamaterials with VO<sub>2</sub> cut-wires for thermal tunability [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(2): 021111.
- [39] ZHAO Y, ZHANG Y, SHI Q, et al. Dynamic photo-induced controlling of the large phase shift of terahertz waves via vanadium dioxide coupling nanostructures [J]. ACS Photonics, 2018, 5(8): 3040-3050.
- [40] SHADRIVOV I V, MORRISON S K, KIVSHAR Y S. Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials [J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9344.
- [41] WU T, ZHANG H. Piezoelectricity in two-dimensional materials [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 54(15): 4432-4434.
- [42] KHATUA S, CHANG W S, SWANGLAP P, et al. Active modulation of nanorod plasmons[J]. Nano Letters, 2011, 11(9): 3797-3802.
- [43] KOSHELEV K, BOGDANOV A. Temperature-tunable semiconductor metamaterial [J]. Physical Review B, 2015, 92(8): 085305.
- [44] DING F, ZHONG S, BOZHEVOLNYI S I. Vanadium dioxide integrated metasurfaces with switchable functionalities at terahertz frequencies [J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(9): 1701204.
- [45] JIANG M, HU F, ZHANG L, et al. Electrically triggered VO<sub>2</sub> reconfigurable metasurface for amplitude and phase modulation of terahertz wave[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3488-3494.
- [46] DRISCOLL T, KIM H T, CHAE B G, et al. Memory metamaterials [J]. Science, 2009, 325(5947): 1518-1521.
- [47] WANG Q, ROGERS E T F, GHOLIPOUR B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials [J]. Nature Photonics, 2016, 10: 60-65.
- [48] LAI W, GOU H, WU H, et al. Optically tunable ultrafast broadband terahertz polarimetric device using nonvolatile phase-change material[J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 18(8): 2301265.
- [49] SKOROBOGATIY M, DUPUIS A. Ferroelectric all-polymer hollow Bragg fibers for terahertz guidance [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(11): 113514.
- [50] MIYAMOTO T, YADA H, YAMAKAWA H, et al. Ultrafast modulation of polarization amplitude by terahertz fields in electronic-type organic ferroelectrics [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2586.
- [51] BOES A, CHANG L, LANGROCK C, et al. Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum[J]. Science, 2023, 379(6627): 4396.
- [52] WU L, DU T, XU N, et al. A new Ba<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>TiO<sub>3</sub>-silicon hybrid metamaterial device in terahertz regime [J]. Small, 2016, 12(19): 2610-2615.
- [53] SRIVASTAVA Y K, MANJAPPA M, CONG L, et al. A superconducting dual-channel photonic switch [J]. Advanced Materials, 2018: e1801257.
- [54] LI C, WU J, JIANG S, et al. Electrical dynamic modulation of THz radiation based on superconducting metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(9): 092601.
- [55] MIYAMOTO M, KOBAYASHI R, KUWANO G, et al. Wide-band frequency modulation of a terahertz intrinsic Josephson junction emitter of a cuprate superconductor[J]. Nature Photonics, 2024, 18: 267-275.
- [56] 高敏, 罗毅恒, 路畅, 等. 二氧化钒在太赫兹超材料中的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(7): 2371-2380.  
GAO Min, LUO Yiheng, LU Chang, et al. Research progress on vanadium dioxide in terahertz metamaterials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(7): 2371-2380. (in Chinese)
- [57] LI H, WU J, YIN Z, et al. Preparation and applications of mechanically exfoliated single-layer and multi-layer MoS<sub>2</sub> and WSe<sub>2</sub> Nanosheets [J]. Accounts of Chemical Research, 2014, 47(4): 1067-1075.
- [58] SINGH V, JOUNG D, ZHAI L, et al. Graphene based materials: past, present and future[J]. Progress in Materials Science, 2011, 56(8): 1178-1271.
- [59] JESSOP D S, KINDNESS S J, XIAO L, et al. Graphene based plasmonic terahertz amplitude modulator operating above 100 MHz [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(17): 171101.
- [60] 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.
- [61] GRAYDON O. Terahertz modulator[J]. Nature Pho-

- tonics, 2015, 9: 780.
- [62] SENSALÉ-RODRIGUEZ B, YAN R, KELLY M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 780.
- [63] SHI S F, ZENG B, HAN H L, et al. Optimizing broadband terahertz modulation with hybrid graphene/metasurface structures [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 372-377.
- [64] LI Q, TIAN Z, ZHANG X, et al. Active graphene-silicon hybrid diode for terahertz waves [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7082.
- [65] GAO W, SHU J, REICHEL K, et al. High-contrast terahertz wave modulation by gated graphene enhanced by extraordinary transmission through ring apertures [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1242-1248.
- [66] JIANG R, HAN Z, SUN W, et al. Ferroelectric modulation of terahertz waves with graphene/ultrathin-Si: HfO<sub>2</sub>/Si structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(15): 151105.
- [67] LIU X, CHEN Z, PARROTT E P J, et al. Graphene based terahertz light modulator in total internal reflection geometry [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(3): 1600697.
- [68] YU X, GAO X, QIAO W, et al. Broadband tunable polarization converter realized by graphene-based metamaterial [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2399-2402.
- [69] CHEN Z, CHEN X, TAO L, et al. Graphene controlled Brewster angle device for ultra broadband terahertz modulation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4909.
- [70] YOON Y, LU Z, UZUNDAL C, et al. Terahertz phonon engineering with van der Waals heterostructures [J]. *Nature*, 2024, 631: 771-776.
- [71] 冯伟, 张戎, 曹俊诚. 基于石墨烯的太赫兹器件研究进展 [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 43-51.  
FENG Wei, ZHANG Rong, CAO Juncheng. Progress of terahertz devices based on graphene [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 43-51. (in Chinese)
- [72] 周译玄, 黄媛媛, 靳延平, 等. 石墨烯太赫兹波段性质及石墨烯基太赫兹器件 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 138-157.  
ZHOU Yixuan, HUANG Yuanyuan, JIN Yanping, et al. Terahertz properties of graphene and graphene-based terahertz devices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 138-157. (in Chinese)
- [73] SOURABH S, WHITESIDE V R, SELLERS I R, et al. Hot carrier redistribution, electron-phonon interaction, and their role in carrier relaxation in thin film metal-halide perovskites [J]. *Physical Review Materials*, 2021, 5(9): 095402.
- [74] DI VIRGILIO L, GEUCHIES J J, KIM H, et al. Controlling the electro-optic response of a semiconducting perovskite coupled to a phonon-resonant cavity [J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1): 183.
- [75] LIU H, HE X, REN J, et al. Terahertz modulation and ultrafast characteristic of two-dimensional lead halide perovskites [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(20): 3559.
- [76] 汪镡宏. 钙钛矿量子点太赫兹调制器 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2020.
- [77] CHANANA A, ZHAI Y, BANIIYA S, et al. Colour selective control of terahertz radiation using two-dimensional hybrid organic inorganic lead-trihalide perovskites [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1328.
- [78] HUANG C C, ZHANG Y G, LIANG L J, et al. Perovskite-based multi-dimension THz modulation of EIT-like metamaterials [J]. *Optik*, 2022, 262: 169348.
- [79] XU Z, ZENG Y, ZHAO X, et al. High photoelectric conversion efficiency and fast relaxation time of FA<sub>0.4</sub>MA<sub>0.6</sub>PbI<sub>3</sub> applied in ultrafast modulation of terahertz waves [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 91: 299-305.
- [80] BRINKMANN K O, WANG P, LANG F, et al. Perovskite-organic tandem solar cells [J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9: 202-217.
- [81] 贺训军, 任婕, 孙晨光, 等. 基于有机无机杂化钙钛矿材料的太赫兹调制研究进展 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2020, 25(6): 10-16.  
HE Xunjun, REN Jie, SUN Chengguang, et al. Research progress of terahertz modulation based on organic and inorganic hybrid perovskite materials [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2020, 25(6): 10-16. (in Chinese)
- [82] CHEN C Y, TSAI T R, PAN C L, et al. Room temperature terahertz phase shifter based on magnetically controlled birefringence in liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(22): 4497-4499.
- [83] WANG L, LIN X W, HU W, et al. Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(2): e253.
- [84] 冀允允. 太赫兹液晶相位调制器件研究 [D]. 天津:

- 南开大学, 2018.
- [85] HAO Y, NIU Z, YANG J, et al. Self-powered terahertz modulators based on metamaterials, liquid crystals, and triboelectric nanogenerators [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16 (25): 32249-32258.
- [86] 王磊, 肖芮文, 葛士军, 等. 太赫兹液晶材料与器件研究进展[J]. *物理学报*, 2019, 68(8): 95-108. WANG Lei, XIAO Ruiwen, GE Shijun, et al. Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(8): 95-108. (in Chinese)
- [87] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [88] CHEN H T, PADILLA W J, CICH M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3: 148-151.
- [89] ZHANG Y, ZHAO Y, LIANG S, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(1): 116.
- [90] SHREKENHAMER D, ROUT S, STRIKWERDA A C, et al. High speed terahertz modulation from metamaterials with embedded high electron mobility transistors[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9968-9975.
- [91] ZHANG Y, QIAO S, LIANG S, et al. Gbps terahertz external modulator based on a composite metamaterial with a double-channel heterostructure[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3501-3506.
- [92] ZHAO Y, WANG L, ZHANG Y, 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.
- [93] PAL P K, CHAKRABORTY S, MITRA R K, et al. Optimizing the polarization and antireflection characteristics of metallic wire grid structures in the Terahertz frequency range [J]. *Optical Materials*, 2023, 146: 114553.
- [94] GRADY N K, HEYES J E, CHOWDHURY D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [95] KAN T, ISOZAKI A, KANDA N, et al. Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8422.
- [96] ZHU W M, LIU A Q, BOUROUINA T, et al. Microelectromechanical maltese-cross metamaterial with tunable terahertz anisotropy [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1274.
- [97] PITCHAPPA P, MANJAPPA M, HO C P, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analog in terahertz MEMS metamaterial [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(4): 541-547.
- [98] ARBABI A, HORIE Y, BAGHERI M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937.
- [99] LIU W, JIANG X, XU Q, et al. All-dielectric terahertz metasurfaces for multi-dimensional multiplexing and demultiplexing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(8): 2301061.
- [100] XU Y, XU Q, ZHANG X, et al. Stereo metasurfaces for efficient and broadband terahertz polarization conversion [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(44): 2207269.
- [101] ATAKARAMIANS S, AFSHAR V S, MONRO T M, et al. Terahertz dielectric waveguides [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(2): 169-215.
- [102] SONG K, MAZUMDER P. Active terahertz spoof surface plasmon polariton switch comprising the perfect conductor metamaterial [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2792-2799.
- [103] LOCATELLI A, TOWN G E, ANGELIS C D. Graphene-based Terahertz waveguide modulators [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(3): 351-357.
- [104] KHANAL S, RAHIMINEJAD S, LEE C, et al. A waveguide-based variable attenuator for Terahertz applications [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2024, 14(2): 178-187.