

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展

张寿俊, 曹曦, 田震

引用本文:

张寿俊, 曹曦, 田震. 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230142.

Zhang S J, Cao T, Tian Z. Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230142.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230142>

收稿日期: 2023-06-20; 修改日期: 2023-07-31; 录用日期: 2023-08-08

相关论文

Multi-cycle reconfigurable THz extraordinary optical transmission using chalcogenide metamaterials

Tun Cao, Meng Lian, Xieyu Chen, Libang Mao, Kuan Liu, Jingyuan Jia, Ying Su, Haonan Ren, Shoujun Zhang, Yihan Xu, Jiajia Chen, Zhen Tian, Dongming Guo

Opto-Electronic Science 2022, **1**(1): 210010 doi: [10.29026/oes.2022.210010](https://doi.org/10.29026/oes.2022.210010)

Dynamic phase assembled terahertz metalens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization

Jitao Li, Guocui Wang, Zhen Yue, Jingyu Liu, Jie Li, Chenglong Zheng, Yating Zhang, Yan Zhang, Jianquan Yao

Opto-Electronic Advances 2022, **5**(1): 210062 doi: [10.29026/oea.2022.210062](https://doi.org/10.29026/oea.2022.210062)

Hybrid bound states in the continuum in terahertz metasurfaces

Junxing Fan, Zuolong Li, Zhanqiang Xue, Hongyang Xing, Dan Lu, Guizhen Xu, Jianqiang Gu, Jianguang Han, Longqing Cong

Opto-Electronic Science 2023, **2**(4): 230006 doi: [10.29026/oes.2023.230006](https://doi.org/10.29026/oes.2023.230006)

基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 的可切换边缘检测与聚焦成像超表面

胡杰, 唐紫依, 蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 黄奕嘉, 李玲

光电工程 2023, **50**(8): 220284 doi: [10.12086/oe.2023.220284](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220284)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



DOI: 10.12086/oe.2023.230142

基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展

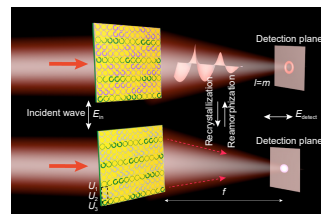
张寿俊^{1,2}, 曹 瞰^{3*}, 田 震^{1,2,4*}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院太赫兹波研究中心, 天津 300072;²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;³大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116081;⁴天津大学佐治亚理工深圳学院, 广东 深圳 518067

摘要: 超表面在控制电磁波的强度、相位、偏振和复杂波前等方面发挥了重要的作用, 通过与各种主动调控手段结合可实现动态可调谐器件。本文分析总结了近期基于 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) 的太赫兹超表面器件的研究进展, 介绍了 GST 在太赫兹波段的光谱特性和可逆相变条件, 重点回顾了 GST 与超表面设计相结合用于实现对太赫兹波的振幅、偏振以及波前的非易失、可重构、和多级操纵的前沿研究工作, 并讨论展望了未来的发展前景和需要解决的问题。

关键词: 相变材料; 超表面; 太赫兹; 可重构

中图分类号: O441.4

文献标志码: A



张寿俊, 曹瞰, 田震. 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展 [J]. 光电工程, 2023, 50(9): 230142
Zhang S J, Cao T, Tian Z. Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230142

Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials

Zhang Shoujun^{1,2}, Cao Tun^{3*}, Tian Zhen^{1,2,4*}¹Center for Terahertz Waves and School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education of China), Tianjin University, Tianjin 300072, China;³School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;⁴Georgia Tech Shenzhen Institute (GTSI), Tianjin University, Shenzhen, Guangdong 518067, China

Abstract: Metasurfaces play an important role in controlling the amplitude, phase, polarization, and complex wavefront of electromagnetic waves. Dynamic tunable devices can be realized by combining various active modulation means. However, most of the existing reconfigurable devices have volatile properties that require a constant stimulus to maintain. The chalcogenide phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) has the characteristics of

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-07-31; 录用日期: 2023-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62235013); 天津市杰出青年基金项目 (20JCJQJC00190); 深圳市自然科学基金重点基金项目 (JCYJ20200109150212515); 深圳市国际合作研究项目 (GJHZ20210705142401004)

*通信作者: 曹瞰, caotun1806@dlut.edu.cn; 田震, tianzhen@tju.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

non-volatility, reconfigurability, and large optical contrast, which can be used to achieve tunable metasurface devices. In this review, we review the recent research progress of GST-based terahertz (THz) metasurface devices and introduce the spectral characteristics and reversible phase transition conditions of GST in the THz band. Furthermore, we systematically summarize the relevant works on non-volatile, reconfigurable, and multi-level manipulation of THz amplitude, polarization, and wavefront by combining GST with metasurfaces. Finally, the future development prospects and challenges are discussed. The non-volatile nature of GST provides a new path to achieve non-volatile reconfigurable THz devices with low energy consumption, while its ultra-fast volatility can be used for next-generation high-speed communication.

Keywords: phase change material; metasurface; terahertz; reconfigurable

1 引言

太赫兹波, 频谱在 0.1~10 THz 范围, 位于微波和红外波段之间。由于其具有的独特性质, 包括非电离性、穿透性、独特的光谱指纹性以及高的可用带宽, 太赫兹波在光谱、传感、成像、安检和高速通信等领域有着大量的应用潜力^[1-5]。这些应用的发展和技术的进步, 不仅需要高效的太赫兹波源及探测器, 也需要高质量的太赫兹波功能器件, 包括用于调制太赫兹波振幅、相位和偏振的波片、分束器、透镜和吸收器等。然而目前在实验室使用的传统光学器件体积庞大且种类匮乏, 无法满足光学系统集成化和多功能的发展需求^[6-7]。

超表面, 是由亚波长人工微结构组成的超薄平面, 克服了超材料复杂的设计和大体积的缺点, 一经提出便受到了广泛的关注。超表面在控制电磁波的透射/反射振幅^[8-9]、相位^[10-11]、偏振^[12-14]以及实现复杂的光场分布^[14-19]等方面表现出了杰出的能力。亚波长的厚度使其适用于发展集成化器件。目前, 大量的太赫兹波超表面器件已经被提出, 包括平面超透镜^[20-21]、异常偏折器件^[22-23]、全息板^[24]等。然而尽管这些器件在操纵太赫兹波方面发挥了巨大的作用, 但它们的性质是静态的, 光学性能难以改变, 这限制了它们的进一步应用。因此有必要发展可调谐的动态超表面器件来实现对电磁波的主动操纵。近几年, 各种各样的主动调控方式已经被提出, 包括利用相变材料 VO_2 ^[25-26]、液晶^[27-28]、石墨烯^[29-30]、半导体材料^[31-32]和 MEMS^[33-34]等, 其光学性质可通过光、电和热等外界激励来改变。这些主动调制方法已经被用于实现多种动态功能器件, 例如太赫兹波空间光调制器、波片、全息和电磁诱导透明等。然而, 以上提及的大多数调制手段都有着易失性的属性, 即当外界激励撤去后其功能也会随之发生改变, 需要恒定的能量去维持性能, 不利于实际的

使用和节能环保。因此, 有必要发展一种具有非易失属性的主动调制方法。

硫属化物相变材料通常是由锗 (Ge)、碲 (Te) 和锑 (Sb) 三种原子按照不同比例掺杂而成的合金, 在不同的掺杂比例下, 相变材料在相变速度、相变温度、稳定性等方面表现出不同的性质^[35]。 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) 由于具有的快的相变速度、长期的稳定性和良好的可重复性, 已发展成为目前应用最广泛的硫属化物相变材料之一, 很早便被应用于商业化可擦写光盘以及电子存储器件等^[36-37]。同时, 近些年来, 研究者们发现 GST 在非晶态和结晶态下表现出的巨大的光学对比度在光子学方面也有着应用潜力。在可见光和红外波段, GST 已经被用于实现集成全光记忆器件^[38-39]、片上光子突触^[40-41]、颜色显示器件^[42]、热发射器^[43]、以及各种金属和介质超表面器件等^[44-48], 通过利用光、电和热激励等实现了 GST 在非晶态、结晶态以及中间态间的反复切换。GST 在可见光和红外波段已经开展了很多研究, 相关综述也已经对此做了介绍^[35,49-50], 然而在占据重要光谱位置的太赫兹波段, 最近几年才得以发展和应用^[51-52], 本文将重点介绍 GST 在太赫兹波段的研究进展。

本文首先介绍了 GST 在太赫兹波段的光谱特性, 利用光、热等激励实现了大面积 GST 的多级可逆相变, 演示了非易失的太赫兹多级记忆器件, 为实现可重构太赫兹波器件奠定了基础^[53]。其次, 我们从 GST 对太赫兹波的不同操控维度对太赫兹波调制器件展开介绍, 包括对太赫兹波的振幅、相位和偏振中的一维或多维的非易失调控^[54-62], 以及实现器件功能的切换^[58,63]。除了利用 GST 的非易失属性外, 其超快易失性也受到了关注^[64], 我们也回顾了相关工作。最后我们讨论了目前的挑战以及对未来更多的应用进行了展望。

2 GST 的太赫兹光谱特性

GST 存在三种稳定状态, 包括非晶态、亚稳态面心立方态 (face-centered cubic phase, FCC) 以及六角密堆积态 (hexagonal closed packed phase, HCP), 通过利用合适的外界激励可实现三种状态之间的可逆切换。如图 1(a) 所示, 对于非晶态 GST, 其原子排布缺乏长程有序性, 通过应用长周期、适当能量的外界激励, 使其温度升高, 超过 FCC 态的相变温度, 非晶态相变为亚稳态 FCC 态, 当继续升高温度超过 HCP 相的结晶温度时, FCC 相变为 HCP 态, 完成整个相变过程^[57]。反过来, GST 的非晶化也可以被实现, 通过应用高能短周期的脉冲使其温度升高到玻璃熔化温度, 晶态 GST 融化为液态, 然后快速冷却 (在几十 °C/ns 量级) 防止出现结晶化, 最终实现了 GST 的非晶化。因此, 通过利用热、光激励等可实现对 GST 的可逆相变。利用热板对生长在 1 mm 厚的硅基底上的 80 nm GST 进行了加热相变测试, 从 120 °C 到 300 °C, 每隔 10 °C 升温, 每个温度下加热两分钟, 图 1(b)

展示了 0.8 THz 频率下的透过率和利用薄膜近似公式计算得到的电导率实部, 可以看到随着温度的升高, 透过率逐渐下降, 对应的电导率从接近 0 增大到 3×10^5 S/m, 可以看出透过率的下降是由于 GST 电导率的增大引起的。升温过程中, GST 在 150 °C 和 260 °C 附近经历了两次结晶化, 分别实现了非晶态向 FCC 态和 HCP 态的转变, 因此利用热退火的方式可实现 GST 的结晶化。GST 的反相变过程是实现太赫兹可重构光子学器件的关键, 借助高能短脉宽的激光器可实现这一目标。激光器波长为 1064 nm, 单脉冲最高能量 300 mJ, 扩束后的光斑直径为 1 cm。如图 1(c) 所示为不同能量诱导的 0.8 THz 频率下的透过率, 随着泵浦能量的增大, 更多的晶态 GST 转变为非晶态, 太赫兹透过率逐渐增大, 最终达到饱和状态。另外, 利用热退火和光脉冲可实现对 GST 的循环可逆相变, 如图 1(d) 所示, GST 相变具有良好的可重复性。

由于 GST 的多级相变特性、非易失性、可重复擦写特性以及长期稳定性等优良的性质, 可被用于实

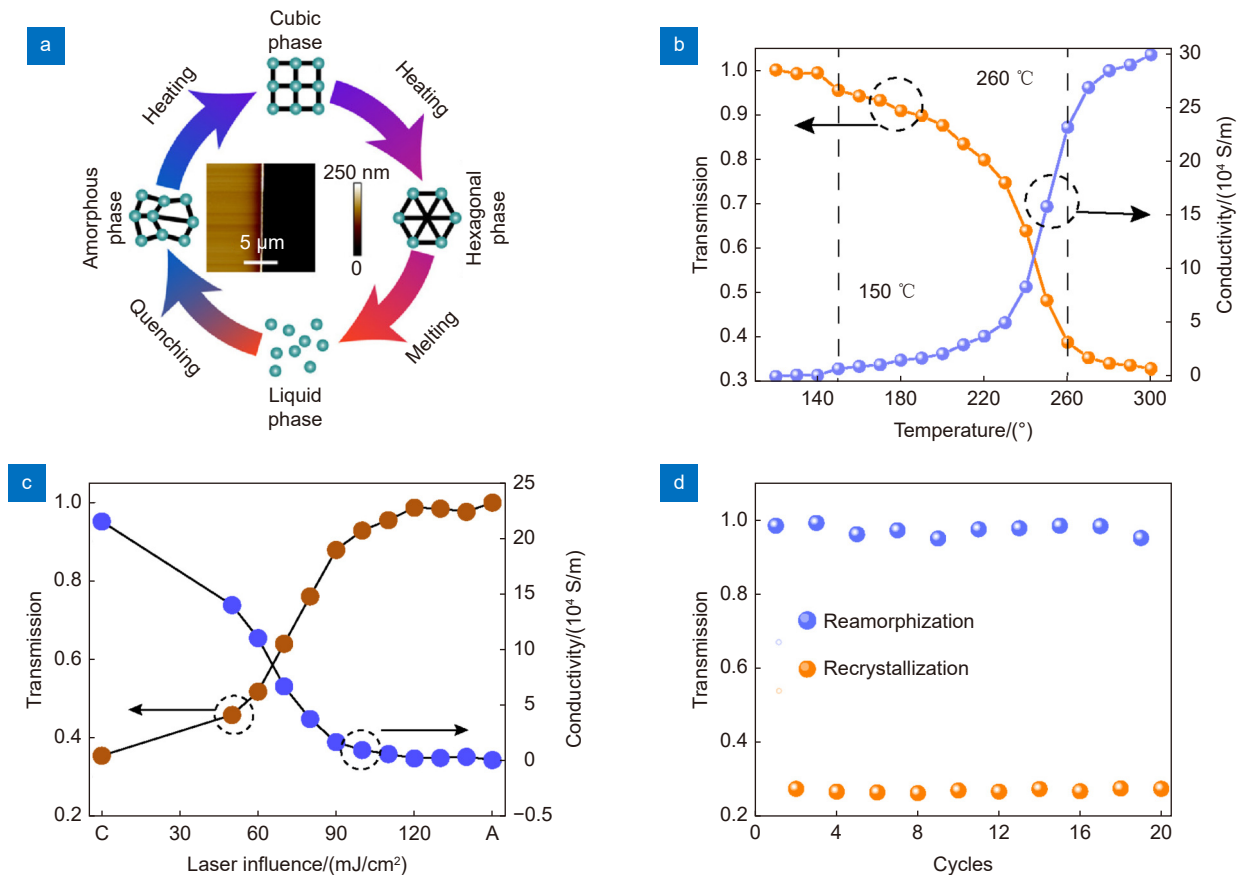
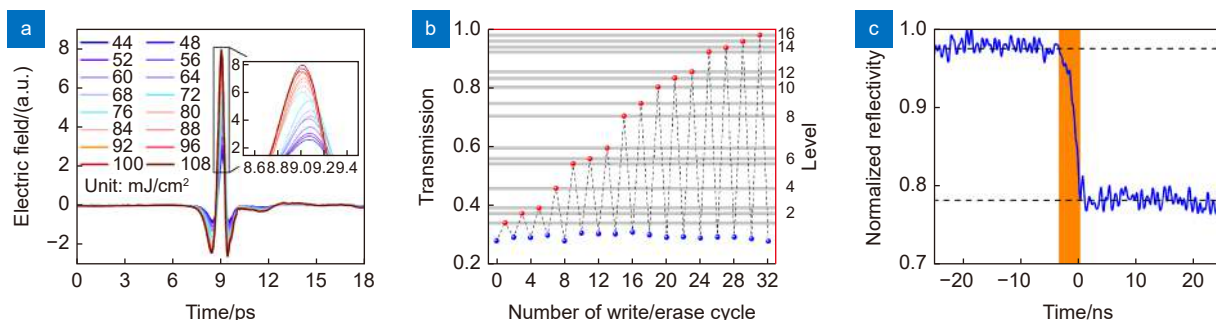


图 1 GST 的太赫兹光谱特性和可逆相变^[57]

Fig. 1 Terahertz spectral properties and reversible phase transition of GST^[57]

图 2 十六进制存储记忆^[53]Fig. 2 Hexadecimal storage memory devices^[53]

现太赫兹记忆器件^[53], 如图 2 所示, 通过采用十六个逐渐增大的激光脉冲能量诱导 GST 非晶化, 实现了对太赫兹波的十六进制编码, 图 2(a) 为对应的太赫兹透过率时域信号。十六进制编码存储如图 2(b) 所示, 通过采用更小的能量间隔可实现更多的存储级次。同时, 利用泵浦-探测系统进行了写入过程的实时反射率测量, 如图 2(c) 所示, 写入时间在 4 ns 左右, 对应的写入速度在 0.25 GHz。随后对太赫兹十六进制编码存储进行了演示, 将存储信息进行十六进制编码, 每个字母用两位十六进制数字表示, 采用不同的激光能量进行信息的写入。利用基于光纤的太赫兹光谱成像系统对同一区域不同信息进行写入、读取和擦除测试, 验证了方案的可行性。

3 太赫兹波调制器件

在过去的十年中, 利用超材料/超表面实现对太赫兹波的振幅、相位和偏振的一维或多维调制是一个非常重要且基础的研究领域。在上一章节中我们介绍了 GST 的太赫兹光谱特性以及热退火和光脉冲激励诱导 GST 可逆相变的条件, 由于其具有的可逆相变特性和对太赫兹波的调制能力, 可将 GST 薄膜结合到超表面结构的设计中实现对太赫兹波的一维或多维的非易失可重构操纵。在这一章节中, 我们对最近几年的研究进展进行了总结。

3.1 非易失可重构的太赫兹波振幅调制器件

对太赫兹波透过率振幅的调制是最基本的光学应用, GST 薄膜在相变前后对太赫兹波强度有大的调制深度, 通过与金属等离子谐振结构结合, 具有调制谐振响应的潜力。不对称开口环谐振器 (Asymmetric split ring resonator, ASRR) 在太赫兹波段具有强的谐振响应, 能够激发 Fano 谐振和偶极子谐振, 高 Q 的

Fano 谐振对外界环境的变化具有高的灵敏度^[54]。如图 3(a) 所示, Pitchappa 等人将 GST 与 ASRR 结合, 实现了对谐振强度的动态调制。通过升温加热诱导 GST 相变, 提高了其电导率进而实现了对 Fano 谐振强度的调制, 折射率的提高引起了偶极子谐振频率的红移。进一步改变加热时间可实现对 Fano 谐振强度的多级调制, 如图 3(b) 所示, Fano 谐振调制对加热时间成指数型依赖。另外通过电激励诱导 GST 相变实现了 2×2 像素的空间光调制器, 每个像素可被单独调制。通过控制激励电压大小和时间, 实现了对谐振的精确调制, 如图 3(c) 所示为 Fano 谐振强度的多级次及单像素调制效果。

电磁诱导透明 (Electromagnetically induced transparency, EIT) 是一种量子现象, 描述了在相干驱动的三能级原子系统中对窄光谱上光吸收的相干相消。由于实现传统的 EIT 现象条件苛刻, 近年来, 利用超表面实现 EIT 效应引起了广泛的关注^[55]。Liu 等人通过在超表面 EIT 结构中引入相变材料 GST 实现了对透过率的可重构调制。单元结构如图 3(d) 所示, 由双开口谐振环 (double split-ring resonator, DSRR) 和金属线 (cut wire, CW) 组成, GST 置于 DSRR 的两个开口处。这种单元结构可以通过耦合激发模式和自由空间的辐射模式来创造窄的透明窗口。在结构中, CW 表现为明模, 可以与 y 偏振太赫兹辐射高效耦合; DSRR 表现为暗模, 与 y 偏振太赫兹辐射弱耦合, 但可被近场电感电容耦合实现强激励。如图 3(e)、3(f) 所示, 在 GST 非晶态下, 电导率低, 间隙不导通, 亮模和暗模通过近场耦合引起 EIT 效应, 在 0.92 THz 处出现透明窗口, 透过率为 0.72, DSRR 间隙中表现为强电场分布。当温度升高到 300 °C, GST 结晶化, 电导率增大, DSRR 间隙导通, 降低了其电容效应, 抑制了暗模谐振, 从而阻止了暗模和亮模间的相

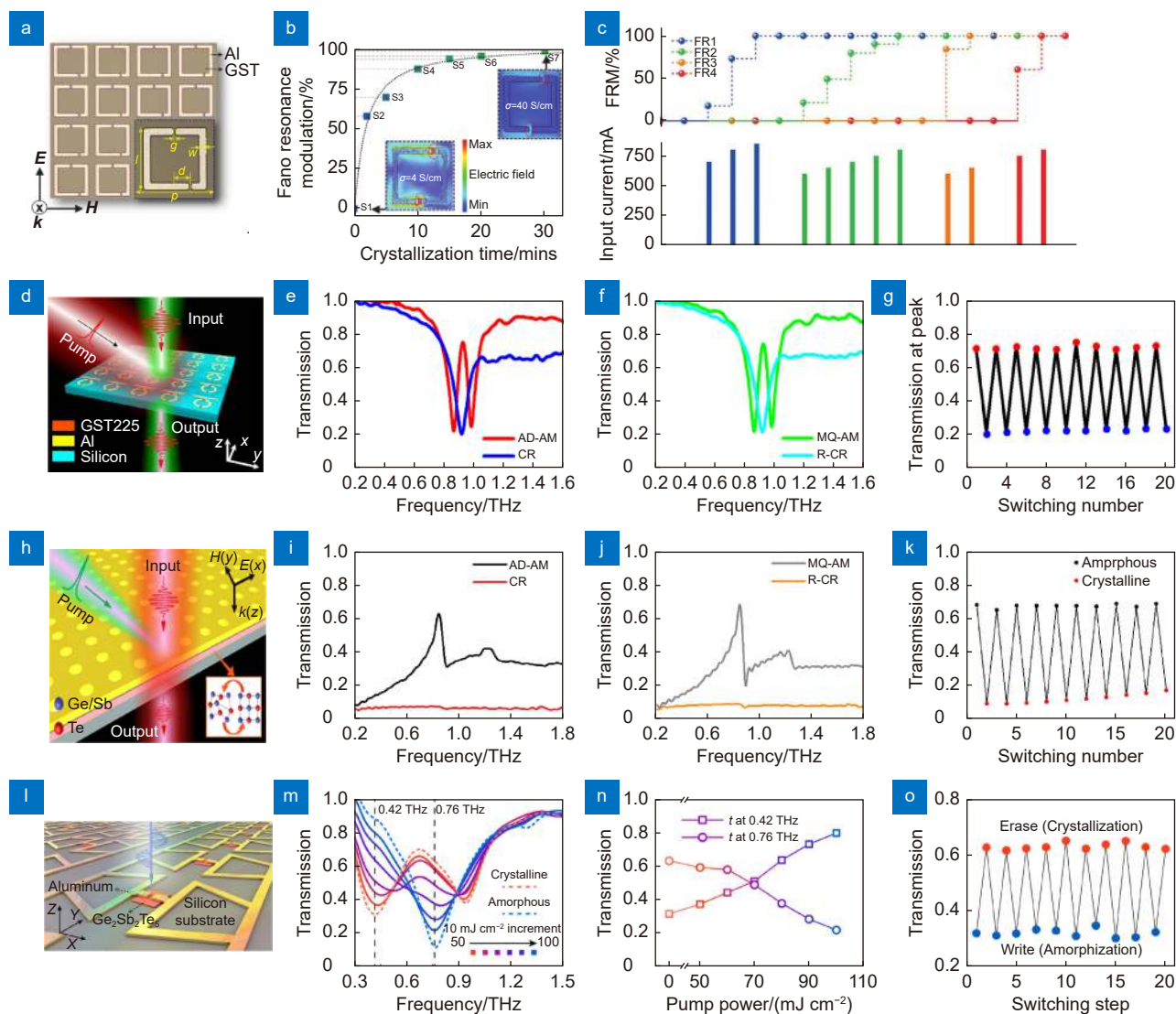


图3 非易失可重构的太赫兹波振幅调制器件。(a-c) Fano 调制器件^[54];

(d-g) EIT 器件^[55]; (h-k) EOT 器件^[56]; (l-o) 二聚体器件^[57]

Fig. 3 Nonvolatile and reconfigurable terahertz wave amplitude modulation devices. (a-c) Fano modulation devices^[54];

(d-g) EIT devices^[55]; (h-k) EOT devices^[56]; (l-o) Dimer devices^[57]

消干涉, 透明窗口消失, 透过率降为 0.2。除了能够实现开关效果, 还能通过梯度升温实现对透明窗口强度的多级调制。利用纳秒激光脉冲和热退火还可实现 EIT 效应的重复切换, 如图 3(g) 所示, 20 次重复切换展现出了对透过振幅的良好可重构性。

超表面异常光透射 (Extraordinary optical transmission, EOT) 是控制太赫兹波振幅的一个重要研究领域。如图 1(h) 所示, Cao 等人设计了基于 GST 的太赫兹波 EOT 振幅调制器^[56], EOT 由硅基底、GST 和金属孔阵列组成。EOT 来源于表面布洛赫模式的激发, 能够增强金属表面的电磁场, 从而使透射到亚波长金属孔阵列的太赫兹波得到增强。入射

光被 Au 亚波长孔阵列散射为 Au 上表面的等离子体激元, 随后, 表面等离子体激元穿过金孔阵列并激发金底面的表面等离子体激元。底部 Au 表面的等离子体激元向自由空间重新发射, 在 EOT 共振频率处产生峰值强度较高的透射衍射峰。亚波长金孔阵列在金上下表面等离子体激元耦合中发挥了重要作用, 通过将 GST 薄膜沉积在孔下方可以控制 EOT 的谐振耦合。在非晶态下, GST 电导率低, 对 EOT 影响很小; 在结晶态下, GST 表现为高电导率, 降低了太赫兹波透过率。如图 3(i) 和 3(j) 所示, 在沉积的非晶态和纳秒激光诱导的非晶态下, 器件在谐振频率处表现出高透过率。在热退火诱导的结晶态下, 实现了对

透过窗口的关闭。此外, EOT 器件的可重构调制也被验证了, 如图 3(k) 所示, 通过热退火和激光泵浦实现了器件的反复切换。

Chen 等通过结合 GST 提出了可调谐二聚体结构^[57], 如图 3(l) 所示, 由 GST 岛连接的两个梯形金属环组成, 两个金属环之间会产生近场耦合, 通过改变 GST 岛的电导率可实现谐振模式的主动调制。在 GST 低电导率时, 二聚体间绝缘, 以电容耦合为主, 存在偶极子键合等离子体模式 (dipolar bonding dimer plasmonic, BDP); 当电导率增大, 二聚体连接成一个整体时, 以电导耦合为主, 出现新的模式, 电荷转移等离子体模式 (charge transfer plasmonic, CTP) 和屏蔽后的偶极子键合等离子体模式 (screened dipolar bonding dimer plasmonic, sBDP), 因此诱导 GST 的相变可实现对谐振模式的调谐。如图 3(m) 所示, 通过逐渐提高激光脉冲的泵浦能量, 非晶态 GST 比例增大, CTP 和 sBDP 模式逐渐转变为 BDP 模式。图 3(n) 展示了 0.42 THz 和 0.76 THz 处的透过率与泵浦功率的关系, 在 0.42 THz 处实现了透过率从 0.32 到 0.8 的调制, 在 0.76 THz 处透过率从 0.63 调制到 0.22。通过结合热退火和光泵浦实现了对谐振模式的重复调制。此外, 通过设计电极, 还验证了电激励诱导 GST 相变对谐振模式的调制。

3.2 非易失可重构的太赫兹波偏振调制器件

利用超表面实现对太赫兹波偏振的调制具有重要的应用前景。通过控制太赫兹波在两个垂直方向上电和磁分量的相位和强度, 可以改变其偏振态。手性, 指的是没有任何镜像对称面的结构, 手性超材料可用于调整手性响应, 应用于波片和圆偏振器件中。此外, 具有极性元素的大分子由于集体振动模式和生物聚合物的存在会对太赫兹波产生强烈的吸收, 即由手性结构组成的 DNA、蛋白质和 RNA 在太赫兹波段会选择性地吸收圆偏振光, 因此在太赫兹波段, 实现对手性的动态调控具有重要的应用前景^[59]。Bao 等人利用 GST 实现了对手性的可重构调制, 如图 4(a) 所示为双层超表面结构, 金和 GST 组成的 H 型谐振器结构位于聚酰亚胺 (polyimide, PI) 层的上方, 两个平行金属带位于 PI 层的下方。当 GST 为非晶态时, 对结构响应无影响, 双层谐振器表现为螺旋 G 形金属结构, 太赫兹响应表现为本征手性。当 GST 为金属态时, 谐振器表现为“日”形结构, 由于结构具有轴对称, 从而不产生本征手性。因此通过控制

GST 的相态可实现对手性的开关切换。如图 4(b) 和 4(c) 所示, 在 GST 非晶态下, 结构对左旋圆偏振光 (left-handed circularly polarized, LCP) 和右旋圆偏振光 (right-handed circularly polarized, RCP) 有不同的振幅和相位响应, 谐振频率分别在 0.73 和 0.85 THz 处。当 GST 结晶化时, LCP 和 RCP 的谐振关闭, 表现为无特征透过谱。圆二色性是表征手性光学活性的最常用方法, 描述了两个圆偏振透射谱之间的变化, 计算公式为: $\theta = \arctan[(E_{LCP} - E_{RCP}) / (E_{LCP} + E_{RCP})]$, E_{LCP} 和 E_{RCP} 分别为 LCP 和 RCP 入射时的透过强度。如图 4(d) 所示为 GST 在两种相态下的圆二色性, 可以看到通过热退火诱导 GST 的相变实现了器件在 0.6~0.9 THz 范围内的手性开关切换。另外, 通过梯度升高温度实现了手性的多级调制。除了圆偏振, 实现对线偏振的偏振转换对于太赫兹偏振片等应用也具有的重要意义, Chen 等人结合 GST 的相变特性进一步实现了双功能的切换^[58]。如图 4(e) 所示, 结构由金属-PI 介质-金属棒及不完整 GST 圆盘构成。如图 4(f) 所示, 在 GST 非晶态下, 器件在 0.53~1.22 THz 范围内表现为宽带的偏振转换功能, 入射的 x 偏振转换为 y 偏振。 x 偏振的太赫兹波入射到器件表面, 当沿 v 轴和 u 轴反射的强度几乎相同, 相位接近 180° 时, 满足了交叉偏振转换的要求, 从而实现了 y 偏振出射。计算的偏振转换率 (polarization conversion ratio, PCR) 如图 4(g) 所示, 在 0.6~1.15 THz 范围内实现了 90% 以上的 PCR。当热退火诱导 GST 相变为结晶态时, GST 与金属棒组合成一个整体共同发挥作用从而引起宽带的太赫兹波吸收。如图 4(h) 所示, 在 0.44~1.34 THz 范围内实现了 75% 以上的吸收, 结构的高吸收主要来自 GST 对入射波的高损耗。如图 4(i) 所示, 将结构制作在 PI 基底上可进一步实现非易失柔性偏振转换器件^[61]。如图 4(j), 在 GST 非晶态下实现了 0.53~1.25 THz 范围内宽带的线偏振转换, 在正入射下偏振转换率大于 0.7。通过逐渐升高温度诱导 GST 的多级相变还可实现对 PCR 的多级次调制。另外, 器件具有较好的角度不敏感性, 如图 4(k) 所示, 在 0° 到 50° 宽带角度斜入射下表现出 0.7 的 PCR 值。

3.3 非易失可重构的太赫兹波前调制器件

利用超表面结构实现对太赫兹波前的调制是实现太赫兹波异常偏折器、聚焦透镜、和涡旋器件等必不可少的。金属等离子体结构可实现对太赫兹波相位的调制, 结合 GST 的相变特性可实现对太赫兹波的可

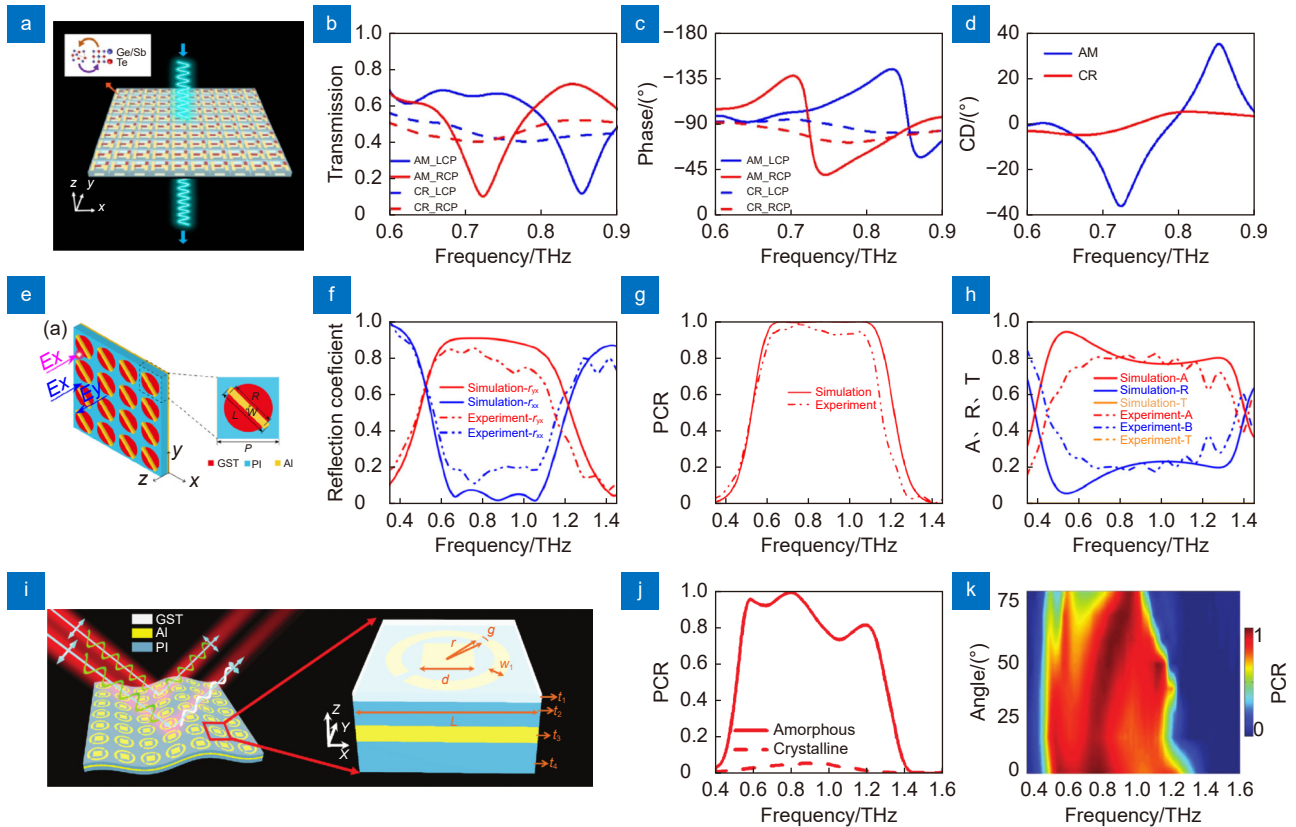


图 4 非易失可重构的太赫兹波偏振调制器件。(a-d) 手性调制器件^[59];
(e-h) 偏振转换双功能器件^[58]; (i-k) 柔性线偏振转换器件^[61]

Fig. 4 Nonvolatile reconfigurable terahertz wave polarization modulation devices. (a-d) Chiral modulation devices^[59];
(e-h) Polarization conversion bifunctional devices^[58]; (i-k) Flexible linear polarization conversion devices^[61]

重构波前调制, 包括强度和相位的二维调制^[60]。C型开口环谐振器 (C-shaped split-ring resonators, CSRR), 对太赫兹波辐射有强的谐振响应。根据巴比涅原理, 互补C环也具有同样的谐振响应, 如图5(a)所示为45°开口C型槽谐振器 (C-shaped slit resonators, CRs) 结构, 当线偏振光入射时, 对称和不对称模式同时被激励, 两种模式都会对输出波的垂直偏振分量有贡献, 通过调整天线的几何参数, 包括线宽、半径、和开口等, 可实现对输出光垂直偏振分量的强度和相位调制。为了实现对太赫兹波的波前控制, 实现 2π 的相位调制和几乎相同的振幅调制是必要的。如图5(a)所示, 通过改变CRs的几何结构, 实现了8阶相位调制, 覆盖了 2π 范围的相位分布。进一步在CRs结构与硅基底之间生长一层GST薄膜, 利用其在晶态和非晶态之间的可逆相变可实现对器件的开关控制。首先将结构按照周期性排布, 实现了异常偏折器件, 如图5(b)所示, 利用基于光纤的角度分辨太赫兹时域光谱系统对器件的性能进行了表征, 在0.5 THz到1 THz范围内实现了宽带的异常偏折功能, 在0.8 THz

处偏折角度为 35.6° , 与广义斯涅耳定律吻合 $\theta = \arcsin[\lambda/8P] = 35.87^\circ$, 其中 P 为结构周期, 通过诱导GST的相变实现了偏折器的关闭。此外, 根据透镜成像原理, 设计超表面的相位分布使得结构的散射光在焦点处发生相长干涉, 可实现聚焦功能。相位计算公式为: $\phi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f)$, f 为设计的焦距。根据计算的相位分布, 在相应的位置选择对应相位的CRs。利用近场扫描太赫兹时域光谱系统对器件进行表征, 在0.4到0.8 THz范围内实现了宽带聚焦效果。利用 120 mJ/cm^2 的纳秒激光脉冲和 300°C 热退火可实现透镜的反复开关, 进一步调整脉冲能量, 改变GST的结晶比实现了对聚焦强度的多级调制, 如图5(c)所示。通过将聚焦和螺旋相位板结合可实现太赫兹波聚焦涡旋器件, 相位分布为: $\phi(\rho, \theta) = -\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{\rho^2 + f^2} - f) + l \times \rho$, $\phi(\rho, \theta)$ 为超表面上任一点极坐标, f 为焦距, l 为拓扑荷。器件在0.4 THz到0.8 THz范围内实现了+1阶的宽带聚焦涡旋, 为了验证可重构性, 执行了多次擦写循环, 如图5(d)

所示, 器件表现出了良好的可重复性。利用 CRs 结合 GST 实现了多种非易失可重构的波前调制器件, 同时具有多级调制和可重复使用的特性。除了能够实现单功能的太赫兹波前调制器件外, 利用单个单元中的多个结构复用方案还可以实现功能切换器件^[63]。将 GST 与金属 CRs 结合的主动单元与金属 CRs 被动单元相结合, 利用 GST 在非晶态和结晶态下不同的电导率从而实现功能单元的切换。如图 5(e), 在结晶态和非晶态下, 实现了太赫兹波在宽带范围内向相反的方向偏折, 通过纳秒激光脉冲和热退火激励, 实现了器件功能的重复切换。另外, 如图 5(f) 和 5(g) 通过

合理设计相位分布, 还可以实现变焦透镜、变拓扑荷涡旋器件等。除了单个功能的切换, 同时也实现了双功能切换, 如图 5(h), 实现了涡旋和透镜功能的切换, 器件都表现出了良好的可重构性和非易失性。以上器件的实现仍然是通过光刻制作金属谐振结构来实现对太赫兹波的调制, 制作过程仍较为繁琐复杂。Chen 等提出了一种非易失可重构的光打印太赫兹波调制器件^[62], 如图 5(i) 所示, 借助掩模版和激光打印的方式可实现多种调制器件。如图 5(j) 和 5(k) 所示, 利用非晶态和结晶态 GST 的交替排布实现了光栅器件, 通过改变泵浦激光脉冲能量实现了对透过率的多级调制,

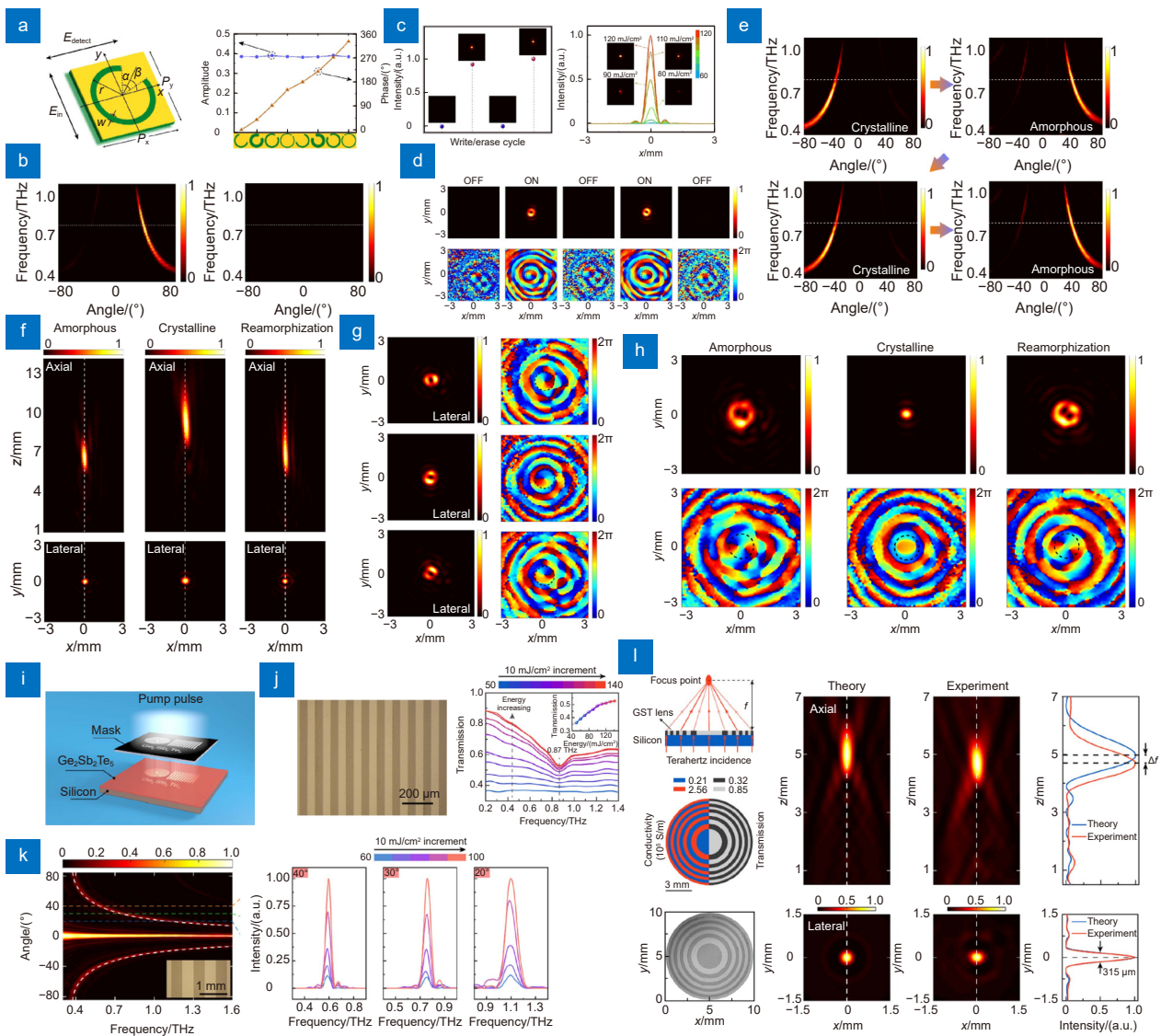


图 5 非易失可重构的太赫兹波前调制器件。(a-d) 太赫兹波多级开关调制器件^[60];
 (e-h) 太赫兹波功能切换器件^[63]; (i-l) 太赫兹波无光刻调制器件^[62]

Fig. 5 Nonvolatile reconfigurable terahertz wavefront modulation devices. (a-d) Terahertz wave multi-level switching modulation devices^[60];
 (e-h) Terahertz wave function switching devices^[63]; (i-l) Terahertz wave non-lithographic modulation devices^[62]

此外还改变光栅周期探究了瑞利异常频率的变化。通过进一步增大光栅周期实现了太赫兹波异常偏折功能, 改变脉冲能量还可实现对偏折强度的多级调制。同时, 也提出了一种光打印超薄宽带透镜, 如图 5(I) 所示, 基于振幅型菲涅尔波带片原理, 利用衍射作用实现了太赫兹光束向焦点的偏折。通过将 GST 薄膜设计计划分为一组交替排布的不透明和透明的径向对称区域, 可以在设计的焦点处实现正入射太赫兹波的相长干涉。进一步通过利用光脉冲和加热的方式实现了不同焦距透镜的切换, 验证了器件的可重构性。

3.4 易失性太赫兹波调制器件

以上总结的相关研究工作都是利用 GST 的非易失性来实现各种非易失太赫兹波调制器件, 器件同时具备可重构性和多级调制等特性。在 GST 相变过程中, 利用光激励可达到纳秒量级的切换速度, 但同时注意到利用热和电激励诱导 GST 的相态切换仍然需要分钟量级的时间尺度, 这对于实现太赫兹波超快调制器件来说是远远不够的。Pitchappa 等人利用不同相态下的 GST 的半导体特性结合光激励实现了超快易失性切换器件^[54]。GST 在非晶态和结晶态下带隙分别为 0.8 eV 和 0.5 eV, 当使用 1.55 eV 的光子能量泵浦 GST 薄膜时, 光激发载流子会提高 GST 电导率, 降低其太赫兹波透过率。如图 6(a) 所示, 将 GST 与

ASRR 结合, 光泵浦 GST 实现了对 Fano 谐振的超快调制。采用不同的泵浦能量对沉积态和 180 °C 退火后的 GST 进行光调制, 随着泵浦能量的增大, GST 光电导率增大, Fano 谐振调制也随之增大, 在 500 $\mu\text{J cm}^{-2}$ 时达到饱和。180 °C 退火的 GST 可在更低的能量下实现完全调制, 且调制效应可在 ps 内恢复, 如图 6(c) 所示为光泵浦-太赫兹探测时间延迟测试结果, 在 4 ps 时调制效果最大, 在 19 ps 时完全恢复, 验证了 GST 超快易失性调制的可行性。此外, 将 ASRR 制作在 PI 基底上还可实现柔性超快太赫兹调制器件^[64], 如图 6(d) 所示, 实现了对 Fano 谐振的超快调制。易失性调制的功率阈值为 0.4 W, 如图 6(e) 所示, 在沉积态 NVS1, 0.4 W 的泵浦功率下, Fano 谐振调制最大达到了 59%, 在关闭泵浦后, 调制效果消失。通过应用 0.5 W 光激励 2 min 将 GST 切换到新的非易失态 NVS2, 应用 0~0.4 W 光泵浦 NVS2 下的 GST, 实现了最大 47% 的调制。进一步切换到 NVS3 非易失态, 实现了最大 46% 的调制, 从而实现了在不同 GST 非易失态下的易失性调制。通过调节曲率还可实现对透过率的调制, 图 6(f) 展示了在不同曲率下的光泵透过率调制效果, 曲率越大透过率调制越小。因此利用 GST 的半导体特性, 采用不同能量光泵浦可实现 GST 的多级易失性超快调制。

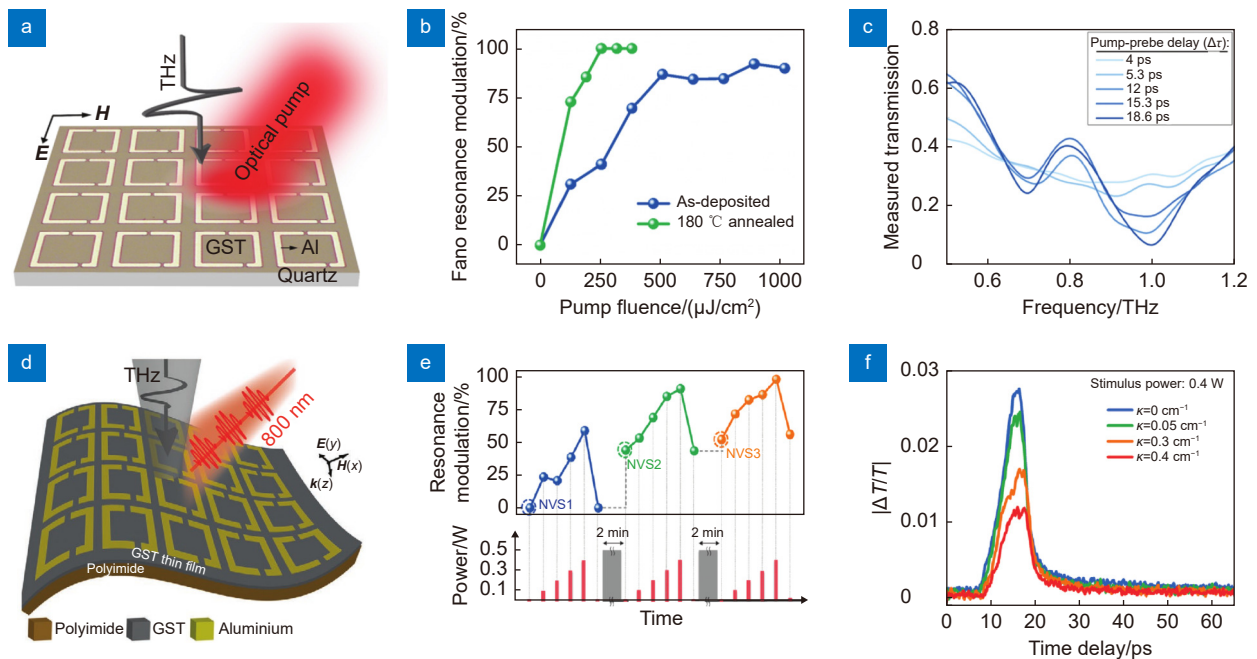


图 6 易失性太赫兹波调制器件。(a-c) 光泵浦 Fano 调制器件^[54]; (d-f) 柔性超快太赫兹波调制器件^[64]

Fig. 6 Volatile terahertz wave modulation devices. (a-c) Optically pumped Fano modulation devices^[54];

(d-f) Flexible ultrafast terahertz wave modulation devices^[64]

4 总结

本文系统回顾了近年来基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展。首先介绍了 GST 在太赫兹波段的光谱特性以及利用光脉冲和热退火实现 GST 的可逆相变条件。GST 在非晶态和结晶态下表现出不同的电导率, 在非晶态下, GST 的电导率接近 0, 在结晶态下, GST 的电导率在 3×10^5 S/m 量级。当 GST 以薄膜形式存在于器件中时会对器件的整体透过率以及入射的太赫兹波和器件的耦合作用产生调制; 当 GST 以连接岛的形式存在于结构间隙位置时会对器件的谐振响应产生调制。因此通过将 GST 与超表面设计相结合可实现多种非易失可重构的太赫兹波调制器件。本文详细阐述了基于 GST 的超表面器件用于实现对太赫兹波振幅、偏振和波前调制的原理和应用, 利用光、热和电激励实现了器件的开关、多级调制以及功能的切换, 相比于 VO_2 等相变材料, 无需外界激励来维持器件的光学性能, 更有利于实际应用。此外, 本文也介绍了利用 GST 的半导体特性来实现超快易失性太赫兹波调制的相关工作, 实现了 ps 量级的调制速度。

基于 GST 的非易失和超快易失性调制器件进一步丰富和发展了太赫兹波调制器件, 有望应用于太赫兹波成像、传感和通信等领域。但同时注意到目前仍然存在一些亟待解决的问题。首先, 在实现 GST 的可逆相变调控方式上, 在太赫兹波段, 目前主要应用激光脉冲来诱导 GST 的非晶化, 以及热退火诱导 GST 的结晶化。尽管诱导 GST 实现非晶态达到了 ns 量级, 但结晶化至少需要两分钟以上的热退火, 这不利于实际的应用。在红外波段, 全光激励和全电激励的可逆相变已经实现, 光激励可诱导非晶态 GST 相变为 FCC 态, 对于红外波段, FCC 态与非晶态 GST 的光学对比度足够大, 但对于太赫兹波段仍然较小, 需要进一步诱导 GST 相变到 HCP 态。受限于 GST 材料本身性质, 其相变温度随着加热速率的上升而升高, 在 ns 量级的激光脉冲激励下其 HCP 相变温度超过了非晶化临界点温度, 因此限制了超短激光脉冲诱导 GST 相变到 HCP 态。在红外波段, 利用电激励焦耳加热的方式实现了 GST 的可逆相变, 但扩展到太赫兹波段其器件尺寸也相应扩大到了厘米量级, 这对电压源提出了更高的要求。因此在太赫兹波段实现 GST 的全光/全电可逆相变是目前亟待解决的问题,

通过改变 GST 的掺杂比、更加巧妙的结构设计以及使用更长脉宽的脉冲等有望解决上述难题。其次, 目前大部分的器件仍然是基于金属结构的等离激元谐振效应, 由于固有的金属损耗以及低的偏振转换效率等, 导致器件整体效率较低, 如何实现更加高效的动态可调谐器件也是目前需要解决的, 金属反射式结构设计以及利用介质单元结构是较为可行的途径。此外, 目前实现的对动态器件的调制仍然局限于整体效应的调控, 实现的功能仍然受限, 如何实现可编程调制即对不同像素施加不同激励值得进一步的深入研究。总之, 在近几年, 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件得到了长足的发展, 但目前仍然面临着诸多挑战; 同时 6G 技术的推进以及人工智能的发展也给这一领域带来了更多机遇。

参考文献

- [1] Dragoman D, Dragoman M. Terahertz fields and applications[J]. *Progr Quant Electron*, 2004, **28**(1): 1-66.
- [2] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging—Modern techniques and applications[J]. *Laser Photon Rev*, 2011, **5**(1): 124-166.
- [3] Mittleman D M. Twenty years of terahertz imaging [Invited][J]. *Opt Express*, 2018, **26**(8): 9417-9431.
- [4] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nat Photon*, 2016, **10**(6): 371-379.
- [5] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nat Photon*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [6] He J W, Dong T, Chi B H, et al. Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review[J]. *J Infrared Millit Terahertz Waves*, 2020, **41**(6): 607-631.
- [7] Zang X F, Yao B S, Chen L, et al. Metasurfaces for manipulating terahertz waves[J]. *Light Adv Manuf*, 2021, **2**(2): 148-172.
- [8] Liu L X, Zhang X Q, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. *Adv Mater*, 2014, **26**(29): 5031-5036.
- [9] Wang P F, He F Y, Liu J J, et al. High-Q terahertz all-dielectric metasurface based on bound states in the continuum[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(5): 630-635.
王鹏飞, 贺风艳, 刘建军, 等. 基于连续谱束缚态的高Q太赫兹全介质超表面[J]. *激光技术*, 2022, **46**(5): 630-635.
- [10] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333-337.
- [11] Zhang X Q, Tian Z, Yue W S, et al. Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. *Adv Mater*, 2013, **25**(33): 4567-4572.
- [12] Papakostas A, Potts A, Bagnall D, et al. Optical manifestations of planar chirality[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**(10): 107404.
- [13] 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.
- [14] Zhao H, Wang X K, Liu S T, et al. Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(2): 220012.
- [15] Wang Q, Plum E, Yang Q L, et al. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**(1): 25.
- [16] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**(1): 11930.
- [17] Xu M F, He Q, Pu M B, et al. Emerging long - range order from a freeform disordered metasurface[J]. *Adv Mater*, 2022, **34**(12): 2108709.
- [18] Li Z Y, Pestourie R, Park J S, et al. Inverse design enables large-scale high-performance meta-optics reshaping virtual reality[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 2409.
- [19] Sang D, Xu M F, Pu M B, et al. Toward high - efficiency ultrahigh numerical aperture freeform metalens: from vector diffraction theory to topology optimization[J]. *Laser Photon Rev*, 2022, **16**(10): 2200265.
- [20] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, et al. A broadband metasurface - based terahertz flat - lens array[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, **3**(6): 779–785.
- [21] Li J T, Wang G C, Yue Z, et al. Dynamic phase assembled terahertz metalens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(1): 210062.
- [22] Xu Y H, Li Q, Zhang X Q, et al. Spin-decoupled multifunctional metasurface for asymmetric polarization generation[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(11): 2933–2941.
- [23] 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 Sci Appl*, 2018, **7**(1): 28.
- [24] Ni X J, Kildishev A V, Shalaei V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2807.
- [25] Liu M, Plum E, Li H, et al. Switchable chiral mirrors[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(15): 2000247.
- [26] Chen B W, Wu J B, Li W L, et al. Programmable terahertz metamaterials with non - volatile memory[J]. *Laser Photon Rev*, 2022, **16**(4): 2100472.
- [27] Wang L, Lin X W, Hu W, et al. Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes[J]. *Light Sci Appl*, 2015, **4**(2): e253.
- [28] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J. Liquid crystal tunable metamaterial absorber[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **110**(17): 177403.
- [29] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials[J]. *Nat Mater*, 2012, **11**(11): 936–941.
- [30] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, et al. Active graphene–silicon hybrid diode for terahertz waves[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 7082.
- [31] Chen H T, Padilla W J, Zide J M, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, **444**(7119): 597–600.
- [32] Zhou J F, Chowdhury D R, Zhao R K, et al. Terahertz chiral metamaterials with giant and dynamically tunable optical activity[J]. *Phys Rev B*, 2012, **86**(3): 035448.
- [33] Pitchappa P, Manjappa M, Ho C P, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analog in terahertz MEMS metamaterial[J]. *Adv Opt Mater*, 2016, **4**(4): 541–547.
- [34] Cong L Q, Pitchappa P, Lee C, et al. Active phase transition via loss engineering in a terahertz MEMS metamaterial[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(26): 1700733.
- [35] Abdollahramezani S, Hemmatyar O, Taghinejad H, et al. Tunable nanophotonics enabled by chalcogenide phase-change materials[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(5): 1189–1241.
- [36] Wang J M, Wang L, Liu J. Overview of phase-change materials based photonic devices[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 121211–121245.
- [37] Guo P F, Sarangan A M, Agha I. A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators[J]. *Appl Sci*, 2019, **9**(3): 530.
- [38] Ríos C, Stegmaier M, Hosseini P, et al. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory[J]. *Nat Photon*, 2015, **9**(11): 725–732.
- [39] Farmakidis N, Youngblood N, Li X, et al. Plasmonic nanogap enhanced phase-change devices with dual electrical-optical functionality[J]. *Sci Adv*, 2019, **5**(11): eaaw2687.
- [40] Tuma T, Pantazi A, Le Gallo M, et al. Stochastic phase-change neurons[J]. *Nat Nanotechnol*, 2016, **11**(8): 693–699.
- [41] Feldmann J, Stegmaier M, Gruhler N, et al. Calculating with light using a chip-scale all-optical abacus[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 1256.
- [42] Hosseini P, Wright C D, Bhaskaran H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films[J]. *Nature*, 2014, **511**(7508): 206–211.
- [43] Du K K, Li Q, Lyu Y B, et al. Control over emissivity of zero-static-power thermal emitters based on phase-changing material GST[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(1): e16194.
- [44] De Galarreta C R, Sinev I, Alexeev A M, et al. Reconfigurable multilevel control of hybrid all-dielectric phase-change metasurfaces[J]. *Optica*, 2020, **7**(5): 476–484.
- [45] Julian M N, Williams C, Borg S, et al. Reversible optical tuning of GeSbTe phase-change metasurface spectral filters for mid-wave infrared imaging[J]. *Optica*, 2020, **7**(7): 746–754.
- [46] Zhang M, Pu M B, Zhang F, et al. Plasmonic metasurfaces for switchable photonic spin–orbit interactions based on phase change materials[J]. *Adv Sci*, 2018, **5**(10): 1800835.
- [47] Zhang F, Xie X, Pu M B, et al. Multistate switching of photonic angular momentum coupling in phase - change metadevices[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(39): 1908194.
- [48] Huang Y J, Xiao T X, Xie Z W, et al. Multistate nonvolatile metamirrors with tunable optical chirality[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(38): 45890–45897.
- [49] Wuttig M, Bhaskaran H, Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications[J]. *Nat Photon*, 2017, **11**(8): 465–476.
- [50] Raeis-Hosseini N, Rho J. Metasurfaces based on phase-change material as a reconfigurable platform for multifunctional devices[J]. *Materials (Basel)*, 2017, **10**(9): 1046.
- [51] Makino K, Kuromiya S, Takano K, et al. THz pulse detection by multilayered GeTe/Sb₂Te₃[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, **8**(47): 32408–32413.
- [52] Zhou K, Nan J Y, Shen J B, et al. Phase change of Ge₂Sb₂Te₅ under terahertz laser illumination[J]. *APL Mater*, 2021, **9**(10): 101113.

- [53] Zhang S J, Chen X Y, Liu K, et al. Terahertz multi-level nonvolatile optically rewritable encryption memory based on chalcogenide phase-change materials[J]. *Iscience*, 2022, **25**(8): 104866.
- [54] Pitchappa P, Kumar A, Prakash S, et al. Chalcogenide phase change material for active terahertz photonics[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(12): 1808157.
- [55] Liu K, Chen X Y, Lian M, et al. Nonvolatile reconfigurable electromagnetically induced transparency with terahertz chalcogenide metasurfaces[J]. *Laser Photon Rev*, 2022, **16**(4): 2100393.
- [56] Cao T, Lian M, Chen X Y, et al. Multi-cycle reconfigurable THz extraordinary optical transmission using chalcogenide metamaterials[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(1): 210010.
- [57] Chen X Y, Zhang S J, Liu K, et al. Reconfigurable and nonvolatile terahertz metadevices based on a phase-change material[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(5): 1638–1646.
- [58] Chen J J, Chen X Y, Liu K, et al. A thermally switchable bifunctional metasurface for broadband polarization conversion and absorption based on phase - change material[J]. *Adv Photonics Res*, 2022, **3**(9): 2100369.
- [59] Bao J X, Chen X Y, Liu K, et al. Nonvolatile chirality switching in terahertz chalcogenide metasurfaces[J]. *Microsyst Nanoeng*, 2022, **8**(1): 112.
- [60] Zhang S J, Chen X Y, Liu K, et al. Nonvolatile reconfigurable terahertz wave modulator[J]. *PhotonIX*, 2022, **3**(1): 7.
- [61] Lian M, Su Y, Liu K, et al. Nonvolatile switchable broadband polarization conversion with wearable terahertz chalcogenide metamaterials[J]. *Adv Opt Mater*, 2023, **11**(9): 2202439.
- [62] Chen X Y, Zhang S J, Liu K, et al. Reconfigurable and nonvolatile terahertz lithography-free photonic devices based on phase change films[J]. *Photonics Res*, 2023, **11**(4): 669–681.
- [63] Zhang S J, Chen X Y, Liu K, et al. Nonvolatile reconfigurable dynamic Janus metasurfaces in the terahertz regime[J]. *Photonics Res*, 2022, **10**(7): 1731–1743.
- [64] Pitchappa P, Kumar A, Prakash S, et al. Volatile ultrafast switching at multilevel nonvolatile states of phase change material for active flexible terahertz metadevices[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, **31**(17): 2100200.

作者简介



张寿俊(1996-), 男, 博士研究生, 主要从事可重构太赫兹超表面的研究。

E-mail: felix_jun@tju.edu.cn



【通信作者】曹墩(1979-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳光学与技术、表面等离子体光学、光场调控及应用等研究。

E-mail: caotun1806@dlut.edu.cn



【通信作者】田震(1981-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹光子学、微纳光子学、太赫兹光声等研究。

E-mail: tianzhen@tju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

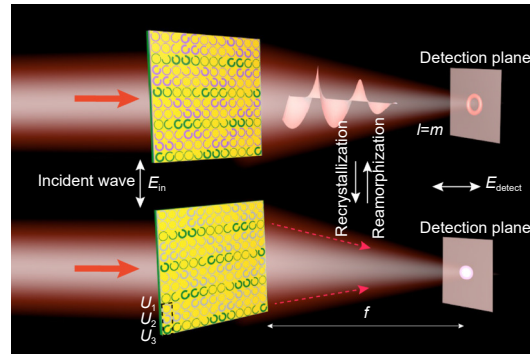
团队介绍

天津大学太赫兹研究中心依托“光学工程重点学科”、“光电信息技术教育部重点实验室”，以及“超快光子学基础前沿与应用教育部创新团队”，中心现有研究生导师 12 人，在学硕士、博士研究生 50 余人。近年来，中心在国家 973 计划、863 计划、国家重大科学仪器专项，以及国家自然科学基金委重大科研仪器项目、杰出青年项目、重点项目等的支持下，建设成为了国际一流的太赫兹光子学研究平台。团队在新型太赫兹功能器件、太赫兹近场光子学、太赫兹时域光谱技术等研究方向取得了多项具有国际重要影响的原创性研究成果，在 *Nature Physics*, *Nature Communications*, *Science Advances*, *Light: Science & Applications*, *Advanced Materials*, *Optica* 等国际顶级学术刊物发表 SCI 论文百余篇。中心将坚持面向国家重大战略需求，致力于太赫兹光子学领域的基础科学研究以及应用技术推广。团队 2013 年获得国家“教育部创新团队”，2018 年获“教育部自然科学奖一等奖”。



Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials

Zhang Shoujun^{1,2}, Cao Tun^{3*}, Tian Zhen^{1,2,4*}



Switchable dynamic metasurface

Overview: We review the process on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase-change materials. Currently, most existing reconfigurable metasurfaces are limited by their volatile properties and single functionality, which hinder their applications in advanced photonics. The chalcogenide phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) exhibits non-volatility, reconfigurability, and large optical contrast, which can be used to realize tunable metasurface devices.

Firstly, the reversible phase transition of GST was realized in the terahertz band, its terahertz spectral characteristics were tested, and a multi-level memory device was realized.

One-dimensional or multi-dimensional dynamic modulation of the amplitude, phase, and polarization of terahertz waves can be achieved by combining GST with metasurfaces. Multilevel modulation of Fano resonances can be achieved by combining GST with asymmetric split-ring resonators and inducing phase transitions of GST. Using electrical excitation, a spatial light modulator with 2×2 pixels can be realized. The use of metasurfaces to achieve electromagnetically induced transparency (EIT) has attracted widespread attention, and placing GST at the openings can achieve multi-level modulation of the transmission amplitude. Extraordinary optical transmission (EOT) on metasurfaces is an important research area for controlling the amplitude of terahertz waves. The subwavelength gold hole array plays an important role in the coupling of surface plasmons on the gold surface, and the resonant coupling of EOT can be controlled by placing the GST under the gold hole. In the amorphous state, the conductivity is low, which has little effect on EOT. In the crystalline state, the conductivity is high, which reduces the transmission. By incorporating GST, tunable plasmonic dimers are proposed. The structure consists of two trapezoidal metal rings connected by GST islands. Near-field coupling occurs between the two metal rings, and the active modulation of the resonant mode can be achieved by changing the conductivity of the GST islands.

The use of metasurfaces to realize the modulation of the polarization of terahertz waves has important application fields. Chiral switching can be achieved by combining GST with a bilayer structure. Realizing the polarization conversion of linear polarization is of great significance for the realization of applications such as terahertz polarizers. Combining the phase-change characteristics of GST can further realize the switching of dual functions. Combined with flexible substrates, flexible polarization conversion devices can also be realized.

The modulation of terahertz wavefront by metasurface structures is of great significance for the realization of terahertz wave anomalous deflectors, focusing lenses, and vortex devices. The phase modulation of the terahertz wave can be realized by using the metal structure, and the wavefront modulation of the terahertz wave can be realized by combining the phase-change characteristics of GST, including two-dimensional modulation of intensity and phase.

Furthermore, utilizing the semiconductor properties of GST in different transition states enables ultrafast volatile switching under light excitation.

Zhang S J, Cao T, Tian Z. Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230142; DOI: 10.12086/oe.2023.230142

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (62235013), Tianjin Municipal Fund for Distinguished Young Scholars (20JCJQJC00190), Key Fund of Shenzhen Natural Science Foundation (JCYJ20200109150212515), and International Science and Technology Independent Cooperation Project of Shenzhen (GJHZ20210705142401004)

¹Center for Terahertz Waves and School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education of China), Tianjin University, Tianjin 300072, China; ³School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; ⁴Georgia Tech Shenzhen Institute (GTSI), Tianjin University, Shenzhen, Guangdong 518067, China

* E-mail: caotun1806@dlut.edu.cn; tianzhen@tju.edu.cn