基于相变材料超表面的多功能切换研究进展

韩卓轩^{1,2} 胡莎¹ 顾长志² 樊志琴^{1*}

(1.河南工业大学理学院郑州 450001; 2.北京凝聚态物理国家研究中心中国科学院物理研究所北京 100190)

Research Progress for Multifunctional Switching Based on Phase Change Material Metasurfaces

HAN Zhuoxuan^{1,2}, HU Sha¹, GU Changzhi², FAN Zhiqin^{1*}

(1. Faculty of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Metasurfaces, artificially engineered with periodic subwavelength meta-atoms, can flexibly and effectively manipulate the inherent properties of electromagnetic waves, such as amplitude, polarization, phase and propagation mode. Thus, metasurfaces have attracted great attention in recent years. However, the optical functions of most metasurfaces are static, which cannot realize the dynamic control of electromagnetic waves. Compared with static metasurfaces, reconfigurable metasurfaces can realize the active switching of optical functions by introducing different external excitations without changing the metasurface design. In this paper, we present a few research achievements to review the research progress of phase change material metasurfaces in multifunctional switching. The design principles and applications of multifunctional switching metasurfaces are introduced in detail from four configurations, in which the GST material operates as the unit cell, film, embedded gap and programmable structure. Finally, the future direction and applications of phase change material metasurfaces are presented.

Keywords Metasurface, Phase change materials, Dynamic modulation, Multi-functional switching

摘要 超表面是一种由亚波长单元结构组成的人工材料,可实现对电磁波的振幅、偏振、相位、传播模式等属性的灵活、 有效调控,因此近年来备受关注。但大多数超表面的功能是静态的,无法实现对电磁波的动态调控。相对于静态超表面,可 重构超表面可在不改变超表面结构设计的前提下,通过不同的外部激励,实现光学功能的主动切换。文章综述了基于相变材 料的可重构超表面在多功能切换方面的研究进展,分别从相变材料作为超表面的单元结构、薄膜、嵌入结构间隙以及可编程 这四种超表面构型,详细介绍了多功能切换超表面的设计原理及应用,最后总结并且展望了相变材料超表面未来的发展方向 和应用前景。

关键词 超表面 相变材料 动态调控 多功能切换 中图分类号: O436.2 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202401007

超材料是一种人造材料,其尺寸小于外界激励 的波长。众所周知,自然材料的电磁特性由特定的 原子或分子的性质决定,而超材料作为一种由亚波 长单元组成的人工材料,其单元结构可人工设计^[1]。 因此,超材料可对电磁波的振幅、偏振、相位等属性 进行灵活调控,从而实现自然界材料所不具备的奇 异特性,如隐身^[2]、异常偏折^[3]、完美吸收等^[4]。与传 统的光学元件相比,超材料的提出为器件小型化与 集成化开辟的新的途径^[5]。而超表面 (Metasurfaces) 作为一种二维形式的超材料,在实现对振幅、相位、 偏振、频率等调控的基础上,具有设计灵活、尺寸小、 易集成等优势。在超表面研究中,通过选择合适的 材料,灵活地调整单元结构的几何尺寸,从而对各 种光学参量进行调控。例如,利用各向异性的单元 结构,可实现线偏振器、四分之一波片等偏振器件^[68]; 再结合单元结构的方向角、位移量等自由度,可以 实现许多具有独特功能的新型超表面光学元件,如 消色差透镜^[9]、变焦透镜^[10]、彩色全息等^[11]。另外,

^{*}联系人: E-mail: lihd@haut.edu.cn

得益于现代微纳米制造技术的发展,超表面在成像、 传感、通信等多个领域正逐步走向实际应用,具有 广阔的发展前景^[12]。

大多数超表面一旦被制造出来,其功能就会固 定,缺乏动态调谐的能力,限制了其在实际应用中 的突破[13]。目前,研究和报道的超表面动态调控手 段主要有机械拉伸、场效应调控、引入活性材料等。 其中,相变材料 (Phase Change Materials,简记为 PCMs)作为一种常见的活性材料,其相变前后的折 射率具有明显差异,可实现超表面光学响应的主动 调控[14]。相变描述了一个均匀材料系统的晶体或电 子结构转变为一个新的物理状态的过程,其有序参 数和对称性与原始状态不同[15]。由于外界温度的变 化, PCM 的相态以及晶格结构会发生变化。以 GST 为例,当非晶态 GST 温度超过结晶温度 (约 160℃) 时,非晶态会首先相变为面心立方晶体结构;如果 温度继续升高,GST 会变为稳态的六方结构;当温 度超过 GST 的熔点 (约 640℃) 并液化后, 经急速冷 却可形成非晶态 GST。而相变前后的 PCM 折射率、 电阻率等性质都发生改变。因为相变材料具有长 期稳定性以及高开关速度,并可以通过施加外部激 励来对其进行主动调控,成为了实现可重构器件的 主要途径之一。例如 GST 已被用于可重写光盘技 术几十年,其在外界激发下可提供快速且可重复的 光学性质变化。因此,将相变材料引入到超表面是 一种实现动态超表面的有效手段。相变材料可以 通过高温退火,外加电流或激光脉冲等方式进行调 控。但由于其相变温度高,可能会导致金属层发生 融化或破损。此外,相变材料与金属结合性较差, 通常在介质中选择具有较高导热性的 Al₂O₃ 沉积在 PCM 和金属加热器之间作为扩散屏障,以防止它们 直接接触破损^[16-17]。此外, SiO₂, Si₃N₄和 ITO 是其他 可选的介电材料^[18-19]。

在本报告中,作者首先简单概述了可重构超表 面的研究现状。其次,重点总结了相变材料。作为 超表面的单元结构、薄膜、嵌入间隙以及可编程这 四种超表面构型在多功能切换方面的主要进展。 最后,总结并展望了相变材料超表面的未来发展方 向和应用前景。

1 可重构超表面的研究现状

超表面的可重构性是基于其状态和性质的改

变来实现的^[20]。相对于功能固定的静态超表面,可 重构超表面可以在不改变单元结构设计的前提下, 通过引入激光、外加电场等外部激励,实现不同光 学功能的主动切换。常见的实现可重构超表面的 途径有以下几种。第一种是机械调控,机械调控主 要是借助柔性基底或微机电系统来实现超表面的 整体形变或局域应变,从而达到光学响应的主动调 控。如图 1(a) 所示, Ho-Seok Ee 等^[21] 设计了一种基 于聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 柔性衬底上的机械可调 谐超表面。通过对 PDMS 衬底的拉伸,可改变纳米 棒阵列的周期,从而在可见波长实现了一种可连续 调控的机械可重构超表面。第二种是液晶调控,液 晶 (Liquid crystal,简记为 LC) 作为一种光学双折射 材料,其内部的液晶分子在电场或热场的刺激下 呈现不同的排列,因此可实现对电磁波的有效调控。 此外,液晶在宽波段内有着极低的光学损耗,有助 于实现可见光、近红外波段的可重构超表面。 Shumin Xiao 等^[22]利用向列相液晶 (nematic liquid crystals)覆盖金属纳米阵列,通过控制环境温度, LC的折射率得到改变,磁响应波长被有效地调控, 从而实现磁共振的可逆控制。另外, Komar 等设计 了一种覆盖有液晶层的透射硅基可重构超表面,实 现了透射光束的不同偏转。如图 1(b) 所示,在低温 下,液晶平行取向;当温度升高时,液晶呈现各向同 性和无序,液晶层的折射率发生变化^[23]。因此,在高 温状态时,基于硅基单元结构的相位梯度设计实现 了透射光束的偏转。第三种是场效应调控,场效应 调控是通过场效应调控材料中的载流子浓度,从而 有效地改变材料的折射率。场效应调控方法一般 比其他调制方法的功耗更低、调制速度快,而且与 Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) 工艺兼容,适合大规模生产。Junghyun Park 等^[24]展 示了一种基于 ITO 材料的可重构超表面, 通过调 节ITO的载流子密度,其介电常数可由正变为负, 从而实现有效的光吸收调制。在不同的偏置条件 下,该超表面可观测到幅度为15%的调制深度。 Shirmanesh G K 等^[25] 设计了一种双门控反射超表面 架构,由一个Al背反射器、一个栅极介电质/ITO/栅 极介电质结构和一个周期性阵列的纳米天线组成, 如图 1(c) 所示。在 6.5 V 的施加偏置电压下, 相移 范围可以从 0°到 303°, 相对反射率调制为 89%。第 四种是全光调控,全光调控是通过超快脉冲激光激



- 图1 基于不同调控方式的可重构超表面。(a)可拉伸衬底上的可连续调控的机械可重构超表面^[21],(b)一种覆盖有液晶层的纳 米硅可重构超表面及其受热时的两种状态^[23],(c)双栅极超表面,反射相位达到了从 0°到 303°的调制幅度^[25],(d)基于非晶 Si 纳米盘结构的可重构超表面,其透过率在 65 fs 内实现高效的调制^[26]
- Fig. 1 Reconfigurable metasurface based on different control methods. (a) A mechanically reconfigurable metasurface which can continuously tune the wavefront based on a stretchable substrate^[21], (b) a silicon-nanodisks dielectric metasurface infiltrated with liquid crystals and its two states when heated^[23], (c) a prototype dual-gated metasurface with a continuous phase shift from 0°to 303° ^[25], (d) reconfigurable metasurface based on amorphous silicon nanodisk structure achieves efficient modulation of transmittance within 65 fs^[26]

发超表面的非线性响应,极大地增强电场强度,从 而实现超快调控。Maxim R. Shcherbakov等^[26]采用 非晶硅纳米盘,在强度为60%的泵浦能量下,实现 了飞秒脉冲的强大的自调制能力。图1(d)展示了 在泵浦探针测量中,纳米磁盘组成的全光开关可以 由65 fs长的脉冲来控制双光子吸收,相比于非晶硅 薄膜增强了80倍。

近年来,相变材料由于其显著的光学参数差异 被广泛集成到超表面中。相比于液晶材料,相变材 料调制速度更快,并且具有高且稳定的开关次数。 可以应用于光开关,全光储存中。相比于二维材料, 大多数二维材料只有单波段的光响应,而相变材料 相变前后不同相态以及中间态可以实现多级的光 响应调控。有望应用于光调制和全光逻辑器件中。 柔性电介质的机械控制存在响应速度慢和体积大 的问题,并且可重构柔性基底不能解决金属疲劳引 起的反复形状变化等问题。场效应调控一般常用 ITO 和石墨烯, 但是由于其载流子浓度较低导致其 在近红外和可见光的调谐能力有限。相比于全光 调控,其波前相位控制依然存在困难,并且非线性 效应的激发需要昂贵、复杂的超快泵浦激光和探测 装备,因此其集成与应用面临挑战。因此,本文将 对基于相变材料的可重构超表面的研究进展进一 步的介绍。

相变材料超表面实现多功能切换的设计 方法

2.1 相变材料作为单元结构的超表面构型

通过调节超表面单元结构的尺寸、旋转角度、 材料等,超表面可以实现对光场的振幅、相位、偏振 等属性的调控。因此,设计相变材料的单元结构, 是实现单功能动态调控、多功能切换的超表面构型 之一。相变材料作为单元结构的超表面构型大多 应用于全介质超表面。全介质超表面中的电场增 强主要发生在介质谐振腔内部,虽然电场增强幅度 通常不及等离激元谐振,但其谐振模式的工作空间 大、热损耗低。普通的全介质超表面通过改变单元 结构的高深宽比从而改变其有效折射率。而将相变 材料引入后,直接通过相变前后来改变有效折射率。

在单功能调控方面,以相变材料为单元结构的 超表面构型可在不改变结构的前提下实现 Fano 共 振、滤波、完美吸收等功能的动态调制。例如, Zhou C 等^[27]设计了一种由连续谱中的准束缚态控 制的 Fano 共振超表面,研究了 GST 辅助的超表面 成像功能。除此之外,他们通过对 GST-Si 基单元结 构的选择性修改,使得 Fano 共振超表面实现了高效

的成像和空间调制功能。Konnikova M R 等^[28] 通过 热控制或光诱导 GeTe, 单元结构, 由于相变前后电 导率和光学特性的巨大差异, 尤其是电导率相差 7 个数量级,实现了基于太赫兹超表面的可调谐滤波 器。图 2(a) 展示了当 VO, 制备成亚波长光栅结构 时,不同相态对不同偏振光表现为高透过率或部分 透过,实现可调偏振分辨的 VO,超表面^[29]。此外, 通过控制相变材料的相变程度,相变超表面可以实 现对电磁波的连续调控。例如, Ruiz de Galarreta C 等^[30] 将 Si 纳米柱和 GST 相结合,利用激光诱导 GST 状态之间的多级切换,实现了对光频的多级控 制。混合 Si/GST 的超表面可以作为一个可重构的 双波段到单波段光谱滤波器。张艺琼等[31]设计了 基于 GST 的平面圆孔阵列, 通过调节 GST 的结晶 比例实现了可连续协调的吸收光谱。该超表面的 单元结构从上到下依次是 GST 圆孔、Si 层、SiO, 绝 缘层和反射金属层,当GST处于完全晶化的状态时, 超表面具有超过 99% 的吸收率,实现了与偏振无关 的可擦写近红外吸收器。

此外,以相变材料为单元结构的超表面可实现 光学功能之间的主动切换。例如,通过在超透镜单 元结构中引入相变材料,可实现超透镜焦点的连续 调节。LiS等^[32]采用由GST/Si杂化纳米柱组成的 单元阵列,通过顶部GST层在相变前后的折射率差 异,在近红外波段实现了动态可调谐的双焦超透镜, 如图2(b)所示。DingF等^[33]利用VO₂中的绝缘态 到金属态的转变,在不同频率下实现不同的吸收率, 可以从宽带吸收器转换为反射宽带半波片(HWP), 如图2(c)所示。在光学隐身方面,大多数隐身技术 都集中在太赫兹和微波波长上^[35]。在近红外和可见 光波段,动态的自由空间光谱调制是一项具有挑战 性的任务。ZhuZ等^[34]将相变材料VO₂的热质量最 小化,在近红外波段的调谐范围可达360 nm,调控 不同相态的反射对比度,可以实现图像的隐藏与显 示,如图2(d)所示。该器件可用于集成和局部加热, 从而实现更快的开关和更精确的空间控制。

2.2 相变材料作为薄膜的超表面构型

通过改变超表面中的介质层材料,可以实现超 表面对光场的有效调控。因此,相变材料以薄膜形 式应用在超表面中是另一种常见的构型设计,具体 包含两种:一种是作为介质层插入超表面中,另一 种是以薄膜的形式覆盖在超表面上。相变材料作



- 图2 相变材料作为单元结构的超表面构型。(a)可调偏振分辨 VO₂ 超表面器件示意图^[29],(b) GST 处于不同相态时,实现不同 焦距的超透镜^[32],(c)可切换的太赫兹超表面,实现从宽带吸收体转换为反射宽带半波片 (HWP)^[33],(d)将领结形 VO₂ 纳米 晶体阵列制成字母"V"和"U"的图案,实现更快的开关和更精确的空间控制^[34]
- Fig. 2 Metasurface configuration of phase change materials as unit structures. (a) Schematic diagram of VO₂ metasurfaces device with adjustable polarization resolution^[29], (b) by changing the crystallization ratios of GST, dynamically tunable bifocal metalens are achieved^[32], (c) a switchable terahertz metasurface can be switched from a broadband absorber to a reflecting broadband half-wave plate (HWP)^[33], (d) make a collar shaped VO₂ nanocrystal array into patterns with the letters "V" and "U" to achieve faster switching and more precise spatial control^[34]

为薄膜的超表面大多数为 MIM 构型, 是通过等离 子谐振能引发金属结构表面的电场增强, 该谐振对 周围材料的折射率变化十分敏感, 因此将相变材料 以薄膜的形式引入, 通过巨大的折射率差异实现光 响应的调制。

以相变材料为介质层的超表面构型可实现对 偏振、振幅、响应频率等的主动调控。例如,史卓琳 等^[36] 通过在 MIM(metal-insulator-metal) 结构中引入 GST 薄膜作为介质层 (如图 3(a) 所示), 对超表面的 手征特性进行调控,在相变前后实现了70 THz 左右 的频率调谐。这项研究在光频段高效偏振调制器 件、圆偏振器和偏振滤光器等方面具有潜在的应用 价值。图 3(b) 展示了一种基于 Al 圆盘阵列的超表 面结构色^[37],实现了具有不同色相、饱和度的结构 色显示。通过在介质层中插入 GST 薄膜, 该超表面 在相变前后可以改变光学响应的频率和幅值,从而 实现了结构色的动态调控。相变材料除了具有相 变前后两种状态外,通过控制外加激励,可处于不 同相变程度的中间态。例如, Zhou C 等^[38] 设计了一 种双纳米磁盘阵列的硅基超表面,并在硅纳米片下 添加 GST 薄膜, 通过控制 GST 层的结晶比例, 可以

灵活地、连续地控制光学响应的振幅和频率,从而 实现对透射谱的主动操纵。

此外,以相变材料为介质层结构的超表面可实 现光学功能之间的主动切换。通过超表面和 GST 薄膜的组合,可以实现一种创新的、非易失性的、可 重构的多功能器件。如图 3(c)所示,Galarreta C R 等^[39]利用非原位激光器对基于 GST 薄膜的超表面 进行动态调控。当 GST 处于晶态时,超表面以镜子 的方式反射入射光,在非晶时则会对入射光进行异 常偏折。图 3(d)展示了康同同等设计的具有周期 孔洞的超表面^[29]。在 VO₂ 介质态时,能够在中红外 波长激励出 Au/air 界面的表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance,简记为 SPR)模式,获得 较高的透过效率,VO₂相变至金属态时,入射光被反 射和吸收,透过率低。通过调控 VO₂薄膜材料在金 属和介质态之间的切换,该超表面可以使入射光的 透射率表现为高或低,从而实现光学开关功能。

上述是将相变材料作为介质层的超表面构型, 而将相变材料以薄膜的形式覆盖在超表面上时,同 样可实现光学功能的主动调控。在热伪装装置上, Qu Y 等^[40]将 GST-Au 双层薄膜覆盖到物体表面,



图3 相变材料作为薄膜的可重构超表面构型。(a)开口谐振环构型超表面,实现对超表面的外在手征特性进行调控^[36],(b)超表 面吸收器,可以产生不同结构颜色^[37],(c)光束转向超表面,实现了对入射光正常反射和异常偏折的可逆开关^[39],(d)基于 Au/VO₂ 超表面示意图,实现全光光开关^[29],(e)不同背景温度下的热伪装图,通过改变 GST 相态可以实现完美的伪装^[40], (f) VO₂ 包覆 ITO 纳米线阵列的结构表征,实现从可见到 MIR 范围的全光切换^[41]

Fig. 3 Reconfigurable metasurface configuration of phase change materials as thin films. (a) A metasurface with an open resonant ring configuration can control the external chiral characteristics of the metasurface^[36], (b) a metasurface absorber that can produce different structural colors^[37], (c) a reconfigurable beam-steering metasurface, realizing the reversible switch of normal reflection and abnormal deflection of incident light^[39], (d) a metasurface based on Au/VO₂ structure to realize all-optical switch^[29], (e) thermal camouflage maps under different background temperatures. Perfect disguise can be achieved by controlling the GST phase transition^[40], (f) structural characterization of VO₂ coated ITO nanorod array, realize all-optical switching from visible MIR range^[41]

图 3(e) 展示了通过热发射控制不同的 GST 相态,能 够在背景中隐藏或伪装一个物体。Guo P 等^[41]将 VO₂ 覆盖在 ITO 纳米线阵列上 (如图 3(f)所示),导 致相应的光谱特征发生红移,而 VO₂ 从金属态到绝 缘态的转变导致所有光谱特征的蓝移。通过两种 材料之间的相互作用,产生了从可见到 MIR 范围的 全光切换。将相变材料以薄膜的形式覆盖在超表 面上也可以实现光学功能之间的主动切换。例如, 利用飞秒激光脉冲实现红外天线谐振的可逆光学 开关。Michel A 等^[42] 在高为 35 nm 的铝单元结构 和硅衬底构成的超表面上,覆盖 50 nm 厚的 GST 薄 膜,通过使用光激励作用于单个天线阵列,以独立 地切换它们。此外,还可以增加单元结构和 GST 层 之间的距离来减少共振位移。

2.3 相变材料嵌入结构间隙的超表面构型

当相变材料嵌入开口谐振环中,间隙从空气变为相变材料,通过折射率的改变从而影响谐振环共振模式,吸收等特性。可实现对 Fano 共振、太赫兹相移、完美吸收等光学功能的主动调控。

Zhang M 等^[43] 采用遗传算法对单元结构的几 何参数进行优化,将相变材料 GST 嵌入体超表面 中(如图 4(a)所示),实现了具有高对比度的偏振转 换率。GST 在非晶态下,该超表面,具有较高的偏 振转换率,而在晶态下具有较低的极偏振转换效率。 除此之外,在非晶态下,C形谐振腔通过旋转不同的 角度,可形成特定的几何相位分布,从而实现异常 偏折和聚焦等功能,在晶态下,该超表面的作用就 像传统的反射镜一样。在纳米尺度上控制光传播 的能力对于未来的集成光子电路是至关重要的。 Long J 等^[44] 将 VO2 嵌入金属层, 组成 VO2 嵌入上超 表面复合结构上金属层、液晶层、下金属层、二氧 化基体的复合结构的超表面。通过 VO, 的相变特 性和液晶的双折率特性同时作用实现对器件相位 的调控,并且在频率 f=0.736 THz 时,太赫兹移相器 的最大相移量达到 355.37°。Zhu Y 等^[45] 引入 VO2 来连接每个谐振器的特定区域,通过主动调控谐振 腔的有效长度来实现中心频率的偏移。图 4(b) 展 示了当T=25℃时,该器件表现为环型谐振器,而当



- 图4 将相变材料嵌入纳米间隙的可重构超表面构型。(a)嵌入 GST 的超表面,实现了不同的偏振转换率^[43],(b)液晶双带滤波 器单元的示意图,通过改变谐振器的有效长度来改变频带中心频率^[45],(c)双层 VO₂ 嵌入的杂化手性超表面,通过外部热激 发对手性特性的动态调控^[46],(d)采用 VO₂ 相变材料的可切换超表面吸收器的结构示意图,在双波段吸收和宽频波段吸收 之间呈现切换效应^[48],(e)嵌入 GST 单元结构的俯视图,产生显著不同的偶极子和电荷转移等离子体共振^[49],(f) GST 弧嵌 入的金属--介质杂化单元结构示意图,可有效地控制 Fano 和环形共振之间的切换^[50]
- Fig. 4 Reconfigurable metasurface configuration with phase change materials embedded in nano gaps. (a)Open resonant ring configuration metasurface, achieving regulation of the external chiral characteristics of the metasurface^[43], (b) a metasurface of liquid crystal dual band filter unit, changing the frequency band center frequency by changing the effective length of resonator^[45], (c) a two-layer VO₂ embedded hybrid chiral hypersurface can be dynamically controlled by external thermal excitation^[46], (d) the structural schematic of the switchable metasurface absorber with integrated VO₂ phase material. Switching effect between dual band absorption and broadband absorption^[48], (e) a top view of embedded GST cell structure, excitation of significantly different dipolar and charge transfer plasmon (CTP) resonances^[49], (f) the structural diagram of GST arc embedded metal dielectric hybrid unit can effectively control over the interplay between narrow and tunable Fano and toroidal modes^[50]

温度增加到 85℃ 时, VO2转变成金属态, 光谱中心 移到更高的频率,从而实现可调谐双波段选择性的 超表面太赫兹带通滤波器。手性和各向异性超表 面通常可以更容易地极化操纵电磁波。如图 4(c) 所示, Lv T T 等^[46] 将双层 VO, 嵌入 E 形金谐振器中, 通过控制温度调整 VO, 的电导率, 从而动态地修改 该杂化超表面的手性。Nouman M 等^[47] 将金属光栅 和 VO,相结合,通过 VO,从绝缘体到金属的转变来 调控光栅的谐振频率,并通过改变输入偏置电流来 改变相位,从而在太赫兹频率下起到移相器的作用。 Lv T 等^[48] 将 VO, 嵌入开口谐振器阵列的不同间隙 中,实现在横向电偏振中始终保持双频带吸收的特 性,如图 4(d) 所示。此外,通过对外部热刺激的控 制,可以灵活调整吸收带宽和动态范围。随着偏振 角度的增加,在双波段吸收和宽频波段吸收之间呈 现切换效应。这种太赫兹超表面吸收器在传感器、 成像和发射器件等方面具有广泛的应用潜力,甚至 可以推广到伪装涂料中。

将相变材料嵌入单元结构间隙而组成的杂化 超表面构型同样可实现光学功能之间的主动切换。 例如, Ahmadivand A 等^[49]将 GST 部分桥接到金属 纳米二聚体中,实现显著不同的偶极子和等离子体 共振,如图 4(e)所示。利用 GST 不同相态的电学特 性,可以对通信波段的偶极子共振的消光峰进行调 整,并且在远离通信波长的较长波长处形成独特的 charge transfer plasmon(CTP)峰,由此实现快速、可 逆开关性能。此外, Ahmadivand A 等^[50]将 GST 嵌 入 Au-SRR 的间隙处,在 GST 相变前后实现了环形 共振和 Fano 共振模式之间的切换。图 4(f)展示了 GST 和 Au-SRR 杂化的结构示意图,通过调节 GST 圆弧的结晶态,使纳米棒两侧的纳米环中的磁矩振 荡发生变化,从而在不同频率处实现环形共振和 Fano 共振模式的有效调制。

2.4 基于相变材料的可编程超表面构型

通常,外部激励除了对动态超表面的所有单元 结构进行统一调控外,还可以对超表面的局部或单 个单元实施精准、独立的逐点控制和编程^[51]。由于 相变材料具有良好的热稳定性、高的开关速度^[52], 通过引入激光直写、探针通电等手段,可以实现可 编程的相变材料超表面构型。

通过引入激光和电压脉冲等外部激励,可实现 多功能切换的可编程超表面构型。Wang Q 等将 GST 薄膜与激光写入工艺相结合 (如图 5(a) 所示) 实现了可见范围内的可重构双色和多聚焦菲涅耳 带板、亚波长聚焦的超振荡透镜、灰度全息图等^[53]。 图 5(b) 展示了可重写的彩色纳米印刷超表面,该超 表面由 Si3N₄/Sb₂S₃/Si₃N₄/Al 薄膜和 Si 衬底复合而 成^[54]。根据所设计的彩色图像的像素颜色分布,通 过不同激光功率对每个像素中 Sb₂S₃ 中相变程度进 行调控,该超表面可以实现彩色图像的写入或擦除。 Wang Q 等^[55] 设计了亚微米点结构,并逐点控制,可 以实现高密度图像存储。除此之外,他们通过调控 每个点特定的反射率,可以将两个灰度图像写入到 存储介质中,如图 5(c) 所示。这项工作为超快速二 维并行数据处理开辟了潜在的应用前景。BiC等^[56] 利用超短脉冲激光,证明了 GeSnTe 晶体可以在亚 波长水平上任意写入、擦除和修改,并且可以在整 个可见光谱范围内连续调制超表面的共振峰和所 显示的颜色。图 5(d) 展示了 Yamada N 等利用相变 材料电阻率差异显著的特性,使用不同功率的长电 压脉冲局部加热相变材料。通过非晶态到晶态的 动态切换,可以消除之前的存储信息,实现可重写 光数据存储^[57-59]。

通过引入通电探针,也可以实现多功能切换的 可编程超表面构型。利用原子力显微镜导电针尖 作为激励源,可以实现纳米级尺度 GST 相变程度的 定量控制^[61-62]。如图 5(e)所示, Rios C 等^[60,63] 通过在 导电原子力显微镜悬臂和 PCM 下的 ITO 薄膜之间 施加电压偏置,将非晶态 PCM 样品进行局部调控, 实现对显示颜色深度和分辨率的调制。Michel A K U等^[14] 基于碲化锗 (GeTe)、金薄膜、硅衬底以及二 氧化硅组成的平面多层结构,将晶态 GeTe 圆柱形 磁盘阵列写在非晶态 GeTe 薄膜上,实现了热扫描 探针诱导的 GeTe 局部开关。图 5(f)展示了通过局 部尖端诱导的 GeTe 结晶实现的近红外超表面,具 有远低于衍射受限光开关可实现的特征尺寸。

3 结论与展望

随着超表面加工技术和应用的迅速发展,应用 的材料已经从高损耗的金属材料发展到透明介电 材料,应用于更宽的波长范围。此外,光场调制方 法从单相调制扩展到结合各种光学参数来实现特 定功能,使超表面在亚波长尺度上可以实现对相位、 振幅和偏振的灵活调控,具有平面化和低损耗的优



- 图5 基于相变材料的直写可重构超表面构型。(a)在相变材料薄膜中书写可重构光子器件,可以实现各种设备^[53],(b)可重写超 表面,实现彩色图像的写入和擦除^[54],(c)灰度飞秒图像存储的实验装置,实现高密度图像存储^[55],(d)采用相变材料的非易 失性存储器,实现可重写光数据存储^[57],(e)通过局部独立的切换点来实现纳米显示颜色深度和分辨率的调制^[60],(f)通过 局部尖端诱导的 GeTe 结晶,实现近红外局部开关^[14]
- Fig. 5 Direct writing reconfigurable metasurface configuration based on phase change materials. (a) Various devices can be realized by writing reconfigurable photonic devices in a phase-change film^[53], (b) rewritable metasurface device for writing and erasing color images^[54], (c) experimental setup for gray-scale femtosecond image storage to achieve high-density image storage^[55], (d) rewritable optical data storage using non-volatile memory of phase-change materials^[57], (e) modulation of color depth and resolution of nano display by locally either by switching points independently^[62], (f) near-infrared local switching to realize by the localized tip-induced crystallization of the GeTe^[14]

点。而正因为超表面显示出的巨大潜力,可以塑造 和控制电磁波,所以超表面需要从早期固定、静态 的电磁响应中脱离出来,进入可调、可重构和可编 程的状态。可重构超表面可以在不改变器件结构 的条件下通过外部激励来实现不同功能和多路复 用,将对现代光子学、量子光学及相关技术产生越 来越深的影响。但是,在该领域同样面临着一些挑 战。第一,对于相变材料超表面,相变材料的厚度 一般控制在100 nm 以下, 过厚的相变材料则导致相 变不均匀。目前为止,相变材料 Ge2Sb2Se4Te(GSST) 可实现最大调节厚度(250 nm)。因此,对于任意厚 度相变材料的主动调控仍然具有挑战^[64]。第二,由 于常见的相变材料相变温度普遍较大,因此在电、 光驱动相变过程中会存在功耗较大的问题,这在单 个光学器件中是无关紧要的,但在集成系统中是不 可忽略的。第三,加热温度分布的不均匀会导致 PCM 相变的不均匀性,这也是相变材料超表面面临 的一个关键挑战。因此,本文对可重构超表面从基 本的可重构构型到基于相变材料可重构构型进展 进行了全面的综述,分别从相变材料应用于超表面

的不同结构、实现功能以及调控原理全面介绍了基于相变材料可重构超表面领域的最新进展。随着上述新方向的出现和技术的不断成熟发展,具有低损耗和优异光学响应的新型相变材料的发展也将为超表面领域带来新的机遇,我们相信更多的相变材料可以契合应用在超表面中从而实现更多功能的超表面,最终将在广泛的应用领域实现其前所未有的潜力。

参考文献

- [1] Zheludev N I. The road ahead for metamaterials[J]. Science, 2010, 328(5978): 582–583
- [2] Zhang J, Shao L D, Li Z F, et al. Graphene-based optically transparent metasurface capable of dual-polarized modulation for electromagnetic stealth[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(27): 31075–31084
- [3] He T, Liu T, Xiao S Y, et al. Perfect anomalous reflectors at optical frequencies[J]. Science Advances, 2022, 8(9): eabk3381
- [4] Li Y, Lin J, Guo H J, et al. A tunable metasurface with switchable functionalities: from perfect transparency to perfect absorption[J]. Advanced Optical Materials, 2020,

8(6): 1901548

- [5] Ding F, Yang Y Q, Bozhevolnyi S I. Dynamic metasurfaces using phase-change chalcogenides[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(14); 1801709
- [6] Kruk S, Hopkins B, Kravchenko I I, et al. Invited article: broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control[J]. Apl Photonics, 2016, 1(3): 030801
- [7] Li Z L, Kim I, Zhang L, et al. Dielectric meta-holograms enabled with dual magnetic resonances in visible light[J].
 ACS Nano, 2017, 11(9): 9382–9389
- [8] Zhang Y L, Cheng Y, Chen M, et al. Ultracompact metaimage display and encryption with a silver nanopolarizer based metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(2): 021105
- [9] Wang Y L, Fan Q B, Xu T. Design of high efficiency achromatic metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(1): 200008
- [10] Yang F, Lin H I, Shalaginov M Y, et al. Reconfigurable parfocal zoom metalens[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(17): 2200721
- [11] Wan W P, Yang W H, Ye S, et al. Tunable full-color vectorial meta-holography[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(22): 2201478
- [12] Fu R, Li Z L, Zheng G X. Research development of amplitude-modulated metasurfaces and their functional devices[J]. Chinese Optics, 2021, 14(4): 886–899
- [13] Du K, Barkaoui H, Zhang X D, et al. Optical metasurfaces towards multifunctionality and tunability[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9): 1761–1781
- [14] Michel A K U, Meyer S, Essing N, et al. The potential of combining thermal scanning probes and phase-change materials for tunable metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 9(2): 2001243
- [15] Landau L. The theory of phase transitions[J]. Nature, 1936, 138(3498): 840–841
- [16] Wang Y F, Landreman P, Schoen D, et al. Electrical tuning of phase-change antennas and metasurfaces[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(6): 667–672
- [17] Liu L, Kang L, Mayer T S, et al. Hybrid metamaterials for electrically triggered multifunctional control[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13236
- [18] Rudé M, Simpson R E, Quidant R, et al. Active control of surface Plasmon waveguides with a phase change material[J]. ACS Photonics, 2015, 2(6): 669–674
- [19] Lu L, Z G Dong, F Tijiptoharsono, et al. Reversible tun-

ing of mie resonances in the visible spectrum[J]. Acs Nano, 2021, 15(12): 19722–19732.

- [20] Zhang Z Y, Shi H Y, Wang L Y, et al. Recent advances in reconfigurable metasurfaces: principle and applications[J]. Nanomaterials, 2023, 13(3): 534
- [21] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. Nano Letters, 2016, 16(4): 2818–2823
- [22] Xiao S M, Chettiar U K, Kildishev A V, et al. Tunable magnetic response of metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(3): 033115
- [23] Komar A, Paniagua-Domínguez R, Miroshnichenko A, et al. Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018, 5(5): 1742–1748
- [24] Park J, Kang J H, Liu X G, et al. Electrically tunable epsilon-near-zero (ENZ) metafilm absorbers[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15754
- Shirmanesh G K, Sokhoyan R, Pala R A, et al. Dual-gated active metasurface at 1550 nm with wide (>300°) phase tunability[J]. Nano Letters, 2018, 18(5): 2957– 2963
- [26] Shcherbakov M R, Vabishchevich P P, Shorokhov A S, et al. Ultrafast all-optical switching with magnetic resonances in nonlinear dielectric nanostructures[J]. Nano Letters, 2015, 15(10): 6985–6990
- [27] Zhou C B, Qu X Y, Xiao S Y, et al. Imaging through a fano-resonant dielectric metasurface governed by quasi-bound states in the continuum[J]. Physical Review Applied, 2020, 14(4): 044009
- [28] Konnikova M R, Khomenko M D, Tverjanovich A S, et al. GeTe₂ phase change material for terahertz devices with reconfigurable functionalities using optical activation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(7): 9638–9648
- [29] Kang T T. Research on reconfigurable metasurfaces based on VO₂ phase change thin films[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022 (康 同同. 基于 VO₂ 相变薄膜的可重构超表面研究 [D]. 成 都: 电子科技大学, 2022(in Chinese))
- [30] Ruiz De Galarreta C, Sinev I, Alexeev A M, et al. Reconfigurable multilevel control of hybrid all-dielectric phasechange metasurfaces[J]. Optica, 2020, 7(5): 476–484
- [31] Zhang Y Q. Research on rewritable, programmable metamaterials based on phase change materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020 (张艺

琼. 基于相变化材料的可擦写可编程超材料研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2020(in Chinese))

- [32] Li S Y, Zhou C B, Ban G X, et al. Active all-dielectric bifocal metalens assisted by germanium antimony telluride[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(9): 095106
- [33] Ding F, Zhong S M, Bozhevolnyi S I. Vanadium dioxide integrated metasurfaces with switchable functionalities at terahertz frequencies[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(9): 1701204
- [34] Fang B, Feng D T, Chen P, et al. Broadband cross-circular polarization carpet cloaking based on a phase change material metasurface in the mid-infrared region[J]. Frontiers of Physics, 2022, 17(5): 53502
- [35] Zhu Z H, Evans P G, Haglund Jr R F, et al. Dynamically reconfigurable metadevice employing nanostructured phase-change materials[J]. Nano Letters, 2017, 17(8): 4881–4885
- [36] Shi Z L, He J L, Wang J J, et al. Design of tunable circular dichroism extrinsic chiral metasurface based on phase change material GST[J]. Opto-Electronic Engineering, 2022, 49(10): 220092 (史卓琳, 贺景琳, 王金金, 等. 基于相变材料 GST 的圆二色性可调谐外在手征超表面设计 [J]. 光电工程, 2022, 49(10): 220092(in Chinese))
- [37] Rui G H, Ding C C, Gu B, et al. Symmetric Ge₂Sb₂Te₅ based metamaterial absorber induced dynamic widegamut structural color[J]. Journal of Optics, 2020, 22(8): 085003
- [38] Zhou C B, Li S Y, Fan M H, et al. Optical radiation manipulation of Si-Ge₂Sb₂Te₅ hybrid metasurfaces[J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9690–9701
- [39] De Galarreta C R, Alexeev A M, Au Y Y, et al. Nonvolatile reconfigurable phase-change Metadevices for beam steering in the near infrared[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(10): 1704993
- [40] Qu Y R, Li Q, Cai L, et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 26
- [41] Guo P J, Weimer M S, Emery J D, et al. Conformal coating of a phase change material on ordered plasmonic nanorod arrays for broadband all-optical switching[J]. ACS Nano, 2017, 11(1): 693–701
- [42] Michel A K U, Zalden P, Chigrin D N, et al. Reversible optical switching of infrared antenna resonances with ultrathin phase-change layers using femtosecond laser pulses[J]. ACS Photonics, 2014, 1(9): 833–839

- [43] 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
- [44] Long J, Li J S. Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(7): 074201 (龙洁,李九生. 相 变材料与超表面复合结构太赫兹移相器 [J]. 物理学报, 2021, 70(7): 074201 (in Chinese))
- [45] Zhu Y H, Vegesna S, Zhao Y, et al. Tunable dual-band terahertz metamaterial bandpass filters[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2382–2384
- [46] Lv T T, Li Y X, Ma H F, et al. Hybrid metamaterial switching for manipulating chirality based on VO₂ phase transition[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 23186
- [47] Nouman M T, Hwang J H, Faiyaz M, et al. Vanadium dioxide based frequency tunable metasurface filters for realizing reconfigurable terahertz optical phase and polarization control[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12922– 12929
- [48] Lv T T, Dong G H, Qin C H, et al. Switchable dual-band to broadband terahertz metamaterial absorber incorporating a VO₂ phase transition[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5437–5447
- [49] Ahmadivand A, Gerislioglu B, Sinha R, et al. Optical switching using transition from dipolar to charge transfer plasmon modes in Ge₂Sb₂Te₅ bridged metallodielectric Dimers[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 42807
- [50] Ahmadivand A, Gerislioglu B, Pala N. Active control over the interplay between the dark and hidden sides of plasmonics using metallodielectric Au–Ge₂Sb₂Te₅ unit cells[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(36): 19966–19974
- [51] Conrads L, Honné N, Ulm A, et al. Reconfigurable and polarization-dependent grating absorber for large-area emissivity control based on the plasmonic phase-change material In₃SbTe₂[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(8): 2202696
- [52] Fang Z R, Chen R, Tara V, et al. Non-volatile phasechange materials for programmable photonics[J]. Science Bulletin, 2023, 68(8): 783–786
- [53] 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(1): 60–65
- [54] Liu H L, Dong W L, Wang H, et al. Rewritable color

nanoprints in antimony trisulfide films[J]. Science Advances, 2020, 6(51): eabb7171

- [55] Wang Q, Maddock J, Rogers E T F, et al. 1.7 Gbit/in. 2 gray-scale continuous-phase-change femtosecond image storage[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(12): 121105
- [56] Bi C B, Wang L, Li R F, et al. Germanium monotelluridebased solid solutions as whole-visible dielectric-metallictransition material platforms for programmable metasurfaces[J]. Acta Materialia, 2023, 250: 118863
- [57] Wuttig M, Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. Nature Materials, 2007, 6(11): 824–832
- [58] Wuttig M. Phase-change materials: towards a universal memory?[J]. Nature Materials, 2005, 4(4): 265–266
- [59] Yamada N, Ohno E, Akahira N, et al. High speed overwritable phase change optical disk material[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26(S4): 61–66

- [60] Gotoh T, Sugawara K, Tanaka K. Minimal phase-change marks produced in amorphous Ge₂Sb₂Te₅ films[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(6B): L818–L821.
- [61] Sugawara K, Gotoh T, Tanaka K. Nanoscale phase change in telluride films induced with scanning tunneling microscopes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(5B): L676–L679.
- [62] Ríos C, Hosseini P, Taylor R A, et al. Color depth modulation and resolution in phase-change material nanodisplays[J]. Advanced Materials, 2016, 28(23): 4720–4726
- [63] Hosseini P, Wright C D, Bhaskaran H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films[J]. Nature, 2014, 511(7508): 206–211
- [64] Zhang Y F, Fowler C, Liang J H, et al. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(6): 661–666