

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 动态可调谐超表面的研究进展与应用

王家伟, 李珂, 成茗, 陈磊, 孔德来, 刘言军

#### 引用本文:

王家伟, 李珂, 成茗, 等. 动态可调谐超表面的研究进展与应用[J]. *光电工程*, 2023, 50(8): 230141.  
Wang J W, Li K, Cheng M, et al. Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230141.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230141>

收稿日期: 2023-06-20; 修改日期: 2023-09-05; 录用日期: 2023-09-05

### 相关论文

#### Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices

Arash Nemati, Qian Wang, Minghui Hong, Jinghua Teng

*Opto-Electronic Advances* 2018, 1(5): 180009 doi: 10.29026/oea.2018.180009

#### Nonlinear optics with structured light

Wagner Tavares Buono, Andrew Forbes

*Opto-Electronic Advances* 2022, 5(6): 210174 doi: 10.29026/oea.2022.210174

#### Metasurface-based nanoprinting: principle, design and advances

Rao Fu, Kuixian Chen, Zile Li, Shaohua Yu, Guoxing Zheng

*Opto-Electronic Science* 2022, 1(10): 220011 doi: 10.29026/oes.2022.220011

#### 超表面全息术: 从概念到实现

许可, 王星儿, 范旭浩, 刘耘呈, 余轩, 高辉, 熊伟

*光电工程* 2022, 49(10): 220183 doi: 10.12086/oe.2022.220183

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

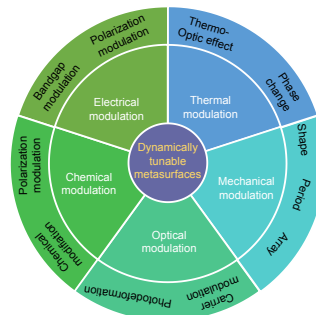
DOI: 10.12086/oe.2023.230141

# 动态可调谐超表面的研究进展与应用

王家伟<sup>1,2</sup>, 李珂<sup>1,2</sup>, 成茗<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>1,2</sup>,  
孔德来<sup>1,2</sup>, 刘言军<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>南方科技大学电子与电气工程系, 广东 深圳 518055;

<sup>2</sup>深圳市高分辨光场显示与技术工程研究中心, 广东 深圳 518055



**摘要:** 超表面能够对电磁波的偏振、振幅和相位等物理参量进行前所未有的调控, 微纳加工技术的发展进一步推动了超表面在显示、成像、传感、防伪、光场调控等领域的应用前景。然而, 大多数超表面缺乏动态调控, 限制了其应用范围。近年来超表面的动态调控研究也取得了一些重要进展, 本文将主要介绍当前超表面动态调控的主要机制, 包括电调控、热调控、光调控、机械调控、化学调控等, 综述了国内外学者在超表面动态调控方面的研究进展。此外, 本文还对动态超表面在成像、显示、光场调控等领域的应用进行了概述, 阐述了其重要意义和应用前景。最后本文总结了当前可调谐超表面的主要问题及未来发展方向。

**关键词:** 超表面; 结构色; 全息; 成像; 显示; 动态调控

**中图分类号:** O436

**文献标志码:** A

王家伟, 李珂, 成茗, 等. 动态可调谐超表面的研究进展与应用 [J]. 光电工程, 2023, 50(8): 230141

Wang J W, Li K, Cheng M, et al. Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230141

## Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces

Wang Jiawei<sup>1,2</sup>, Li Ke<sup>1,2</sup>, Cheng Ming<sup>1,2</sup>, Chen Lei<sup>1,2</sup>, Kong Delai<sup>1,2</sup>, Liu Yanjun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

<sup>2</sup>Shenzhen Engineering Research Center for High Resolution Light Field Display and Technology, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

**Abstract:** Metasurfaces can manipulate the physical parameters of electromagnetic waves, including polarization, amplitude, and phase. The development of micro-nanofabrication technology further promotes the application prospects of metasurfaces in fields such as display, imaging, sensing, anti-counterfeiting, and optical modulation. However, most metasurfaces lack dynamic modulation, which restricts their scope of application. In recent years, the research on dynamic metasurfaces has made some progress. This review mainly introduces several mechanisms for dynamic metasurfaces, including electrical, thermal, optical, mechanical, and chemical

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-09-05; 录用日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62075093, 62211530039); 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目 (2017ZT07C071); 深圳市科创委科技计划项目 (JCYJ20220818100413030); 深圳市发改委工程中心项目 (XMHT20220114005)

\*通信作者: 刘言军, yliu@sustech.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

modulations, and summarizes the research progress in the dynamic metasurfaces. In addition, this review also outlines the applications of dynamic metasurfaces in fields such as imaging, display, and optical modulations, and highlights their significance and prospects. Finally, this review summarizes the main problems and future development directions of currently tunable metasurfaces.

**Keywords:** metasurface; structural color; hologram; imaging; display; dynamic modulation

## 1 引言

超表面通常是由具有亚波长尺寸的离散电磁散射体组成的二维阵列<sup>[1]</sup>, 具有前所未有的控制光传播的能力, 在过去十几年中引起人们极大的兴趣。超表面可以通过恰当的材料选择以及合适的结构设计, 调控电磁波的相位、振幅、频率、偏振等物理参量<sup>[2-5]</sup>, 并且实现天然材料和复合材料均难以实现的新特性和新功能, 例如负折射率<sup>[6]</sup>、隐身<sup>[7]</sup>、选频<sup>[8]</sup>、光场调控<sup>[9-12]</sup>等。另外, 电磁波与亚波长结构相互作用, 可以诱发表面等离激元<sup>[13-14]</sup>、晶格共振<sup>[15]</sup>、Mie共振<sup>[16-19]</sup>、以及 Fano 共振<sup>[20]</sup>等模式。总之, 超表面既可以实现天然材料不可比拟的新特性, 也可以对电磁波具有更多自由度的调控。

得益于超表面灵活的设计自由度, 超薄平面光学器件得到迅速发展, 被广泛地应用于如选频滤波<sup>[21]</sup>、全息显示<sup>[22]</sup>、光束偏转<sup>[23]</sup>、聚焦<sup>[24]</sup>和光开关<sup>[25-27]</sup>等领域。超表面具有平面化的特点, 典型厚度为亚波长尺寸, 可以实现超薄的平面光学元件功能, 如平透镜<sup>[28]</sup>、滤波片<sup>[14]</sup>、全息板<sup>[29]</sup>等。然而, 稳定的贵金属静态电子密度、电介质材料光学常数, 以及固定的结构形状/几何形状, 导致超表面的电磁响应在其制备完成后是固定而无法改变的, 这限制了超表面的实际应用范围<sup>[30]</sup>。因此, 研究和设计动态超表面光学器件用于实现光学特性的动态调控和拓展其应用范围是非常必要的。动态光学超表面可以对透射、反射、折射等的光束进行动态控制, 包括单独或同时控制光的相位、振幅、偏振以及光谱的时间、空间响应。通过对可调材料的适当选择和对超原子的合理设计, 超表面能够实现对光的相位和振幅等物理参量的动态调控<sup>[31]</sup>。合理设计具有入射光方向、偏振依赖的超表面<sup>[32-36]</sup>, 并结合可调材料或者手段实现入射光方向和偏振的动态可调, 即可实现超表面的动态响应调控。同时, 超表面引入动态调控机制也会促进其光学功能的多样化, 进一步扩展其应用范围和场景。在过去的几年里, 人们利用可调材料和新颖的设计, 为实现具有可控振幅

和相位调制的超表面进行了大量的尝试<sup>[37]</sup>。

目前, 主要的可调材料包括液晶<sup>[38-39]</sup>、导电氧化物材料<sup>[40]</sup>、二维材料<sup>[41]</sup>、相变材料<sup>[42]</sup>等。超表面主要的调控机制包括机械调控、温度调控、电调控、微米/纳米机电系统调控和非线性光学调控等<sup>[43]</sup>。动态超表面领域的这些研究大多处于原理论证阶段, 每种调控机制在光学性能和实际应用中都有其独特优势和难以避免的劣势, 所以特定的光学应用和场景需要选取合适的调控机制。目前, 已有一些文献<sup>[44-45]</sup>对超表面的原理及应用做了系统概述与总结, 但关于动态可调超表面的调控机制和应用目前仍缺乏最新的、全面的梳理与综述。图 1 总结了动态超表面的调控手段与机理, 本文将以调控手段分类总结动态超表面的研究进展, 并对动态超表面的应用前景做概要梳理。

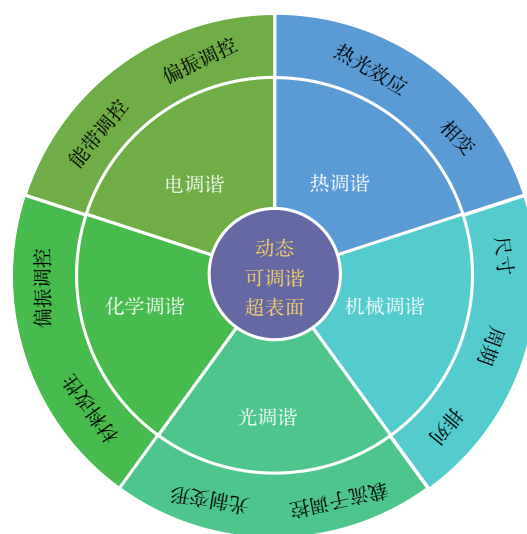


图 1 超表面动态调控手段与机理

Fig. 1 Typical working mechanisms of dynamically tunable metasurfaces

## 2 动态可调谐超表面的调控机制

### 2.1 电调谐动态超表面

可调谐的等离激元超表面主要基于构成超表面的纳米结构的材料介电常数, 其周边环境的介电常数, 以及超表面的纳米结构的尺寸变化导致的响应变



化<sup>[46-47]</sup>。电控可调的超表面主要是利用电响应的一些材料，比如液晶材料<sup>[48-49]</sup>、二维材料<sup>[50-56]</sup>、电致变色材料<sup>[57]</sup>等改变折射率或者结构单元的尺寸<sup>[58-59]</sup>，进而达到响应调谐的目的。其中液晶材料集成在超表面上面可以实现连续的折射率调节，在光调控上有比较广泛的应用，并且材料的制备工艺非常成熟；二维材料因能带的连续可调谐性，使其图形化的结构或者集成其他纳米结构都能实现良好的光学性能的可调谐，但目前在制备工艺上还不是特别成熟，需要进一步探索可能产业化的制备流程。

如图 2(a) 所示，Chanda 课题组在铝纳米碗的表面集成了一层平行取向的向列相液晶<sup>[48]</sup>，液晶材料因为分子结构的棒状特性导致其具有双折射效应。在外加电场作用下，液晶分子会发生重新取向，重新取向之后的液晶指向矢方向与外加电场的方向一致，从而使入射电场感受到不同的折射率。因为液晶层直接覆盖在金属结构上方，液晶的连续折射率变化，使得等离激元响应产生一个连续的红移。除了连续可调的响应变化，Liu 课题组利用金属铝纳米孔的偏振依赖透射特性和扭曲向列相液晶引起的偏振波导效应展示

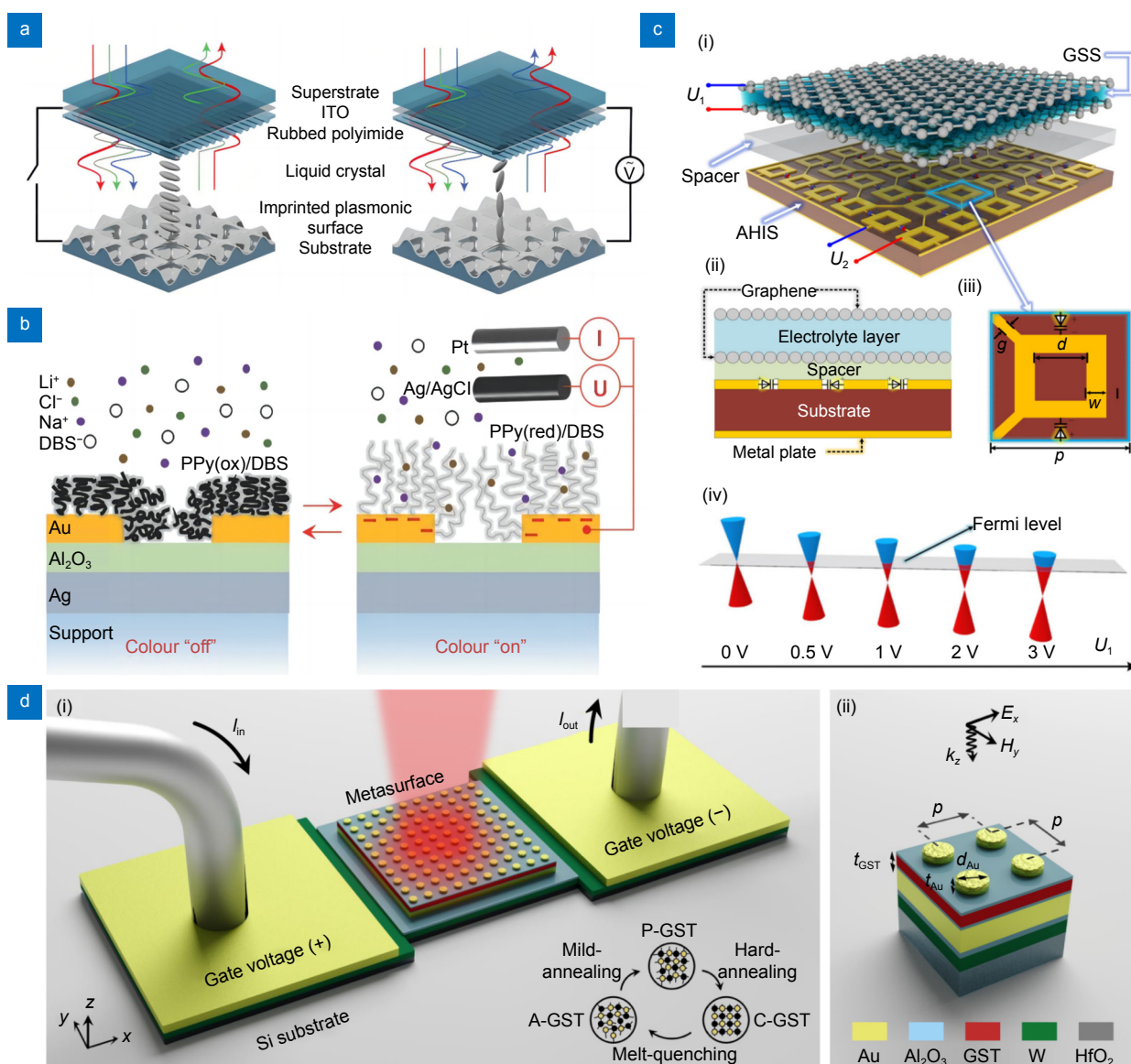


图 2 几种不同材料的电调谐动态超表面方法。(a) 液晶材料集成<sup>[48]</sup>；(b) 电致变色材料集成<sup>[57]</sup>；(c) 石墨烯材料集成<sup>[50]</sup>；(d) 相变材料作为间隔层集成<sup>[61]</sup>

Fig. 2 Electrically tunable metasurfaces with different active materials. (a) Liquid crystal integration<sup>[48]</sup>; (b) Electrochromic material integration<sup>[57]</sup>; (c) Graphene material integration<sup>[50]</sup>; (d) Integration of phase change material as the sandwich layer<sup>[61]</sup>



动态结构色<sup>[49]</sup>。

聚吡咯是一种典型的电致变色材料, 该材料分散在溶液中后外加或者去除电场时会发生可逆的氧化或者还原化学反应进而改变其能带的结构<sup>[60]</sup>, 实现宽带吸收与不吸收的可逆切换。因此, 如图 2(b) 所示, Dahlin 团队证明了一种大面积的电子墨水开关的实现方法<sup>[57]</sup>。这种方法主要通过胶体小球自组装制备了大面积的金属电介质金属结构, 通过法布里—珀罗干涉形成特定的颜色, 产生反射式结构色。在这种微纳结构的表面上通过电化学聚合的方式生长一层聚吡咯, 因此结构色的产生与关闭可以通过外加电场的方式来实现动态控制。

离子掺杂能改变石墨烯的费米能位置。双层石墨烯之间夹电解液层的三明治结构在外加电压的驱动下, 正负离子会发生反向运动至石墨烯表面, 改变石墨烯的能级, 从而调谐整个器件的光学性能。在图 2(c) 中, 朱卫仁团队用这种双层石墨烯夹电解液层的三明治结构覆盖高阻抗周期性金属电路组成一个电控可调谐的超表面<sup>[50]</sup>, 并且在实验上和数值仿真上证明了在 3.41 GHz 到 4.55 GHz 波段的、反射系数在 -3 dB 到 -30 dB 之间的调谐响应。锗碲碲 ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , GST) 材料是另一种被广泛使用的可调相变材料, Adibi 小组展示了用电脉冲可连续调控 GST 的结晶比例<sup>[61]</sup>, 如图 2(d) 所示, 从而在 1390~1640 nm 范围内通过调节电压的大小实现准连续的光学响应。这为 GST 材料的应用提供了一种新的思路。微机电系统可以改变自身的形状, 当超材料本身设计为一种微机电系统<sup>[58]</sup>, 或者与微机电系统结合<sup>[59]</sup>, 改变单元的结构, 从而引起最终超表面的响应变化, 这也是一种电控可调响应的很好形式, 但由于该方法最直接的调控机理是微机电系统引入的超表面形变, 因此本文将微机电系统归纳为机械调谐, 并将在 2.4 小节详细介绍其调控机理。

## 2.2 热调谐动态超表面

将超表面与半导体、透明导电氧化物、相变材料等热响应材料相结合, 基于热光效应、载流子变化和相变等机制, 可实现热调谐动态超表面。以硅为代表的半导体, 温度改变会使其能带发生变化, 进而影响材料的折射率, 调节超表面的响应。Mohsen 等人基于此将硅基超表面样品从室温加热到 300 °C, 实现了通信波段向前和向后的散射调制, 产生 0.1 nm/°C 的共振峰位红移<sup>[62]</sup>。同时, 硅基超表面具有 CMOS 工艺兼容的优势, 在纳米光子集成上有巨大的发展前景。

Sun 等人基于 CMOS 工艺加工制备了  $64 \times 64$  的硅基纳米光子相控阵, 如图 3(a) 所示, 电路产生的焦耳热, 每 8.5 mW 可以完成  $\pi$  的相移, 通过像素化的相位可调, 实现了 6° 的光束偏转和图形化远场辐射的功能<sup>[63]</sup>。Teng 等人基于 PN 结硅基超表面设计实现了可调的宽带 THz 防反射器件<sup>[64]</sup>。Khosro 等人基于硅的热光效应与闪加热驱动, 制备了氧化铟锡 (ITO) 局部加热的非晶硅孔的超表面, 实现了偏置电压 < 5 V、上升时间 < 625  $\mu\text{s}$ 、9 倍透过率调制的超表面<sup>[65]</sup>。除了硅以外, III-V 族半导体如砷化镓 (GaAs)、锑化铟 (InSb) 等也可以通过热激发调控载流子, 改变材料有效折射率。Iyer 等人在重掺杂的 InSb 衬底制备本征 InSb 结构, 温度升高使得重掺杂衬底电子有效质量增加, 导致折射率变化, 同时热效应也导致本征 InSb 结构载流子浓度大幅提升, 二者共同作用导致共振峰位移动, 如图 3(b) 所示<sup>[66]</sup>。

另一类热调谐超表面是基于以二氧化钒 ( $\text{VO}_2$ )、锗碲碲 (GST) 相变合金、液晶为代表的相变材料, 温度变化使得材料发生相变, 进而产生折射率调制, 影响超表面的响应。其中  $\text{VO}_2$  发生从金属到绝缘体的相变, 产生较大的折射率调制, 且相变温度较低 (340 K), 被广泛的应用于热可调超表面。Driscoll 等人将金开口谐振环 (SRR) 阵列制备于  $\text{VO}_2$  薄膜上, 通过温度控制, 实现了红外光谱共振协调<sup>[67]</sup>; 通过电流的局域焦耳热效应激发其相变, 实现了太赫兹波段如图 3(c) 所示的共振波长的调制<sup>[68]</sup>。Liu 等人利用图形化金- $\text{VO}_2$ -金三明治结构, 通过电流热效应使得两个共振反射峰分别产生 75% 和 55% 的变化, 其变化的迟滞效应可用来做电控可擦写存储设备<sup>[69]</sup>。除了  $\text{VO}_2$ 、GST 相变合金可由温度调制产生非晶态到晶态的变化, 广泛应用于可重写光盘, 也可被应用于可重构超表面。Tittl 等人将方形铝纳米结构堆叠在  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  (GST-326) 间隔层和铝镜上, 通过加热使材料从非晶态 ( $n=3.5$ ) 相变至晶态 ( $n=6.5$ ), GST 强局域共振由于折射率的极大改变导致共振波长红移 0.7  $\mu\text{m}$ , 同时保持很高的吸收; 且在共振波长下有 60% 的反射率调制, 如图 3(d) 所示<sup>[70]</sup>。Mou 等人基于 GST 材料实现了吸收峰位的调制, 进而扩大了工作带宽<sup>[71]</sup>。Yin 等人将金纳米天线与 GST-326 相结合, 基于几何相位, 通过对两种不同尺寸金纳米棒的精细设计与空间排布, 实现了光束偏转和可调双焦距透镜的功能<sup>[72]</sup>。罗先刚团队基于 GST 材料实现了光子轨道角动量耦合的多

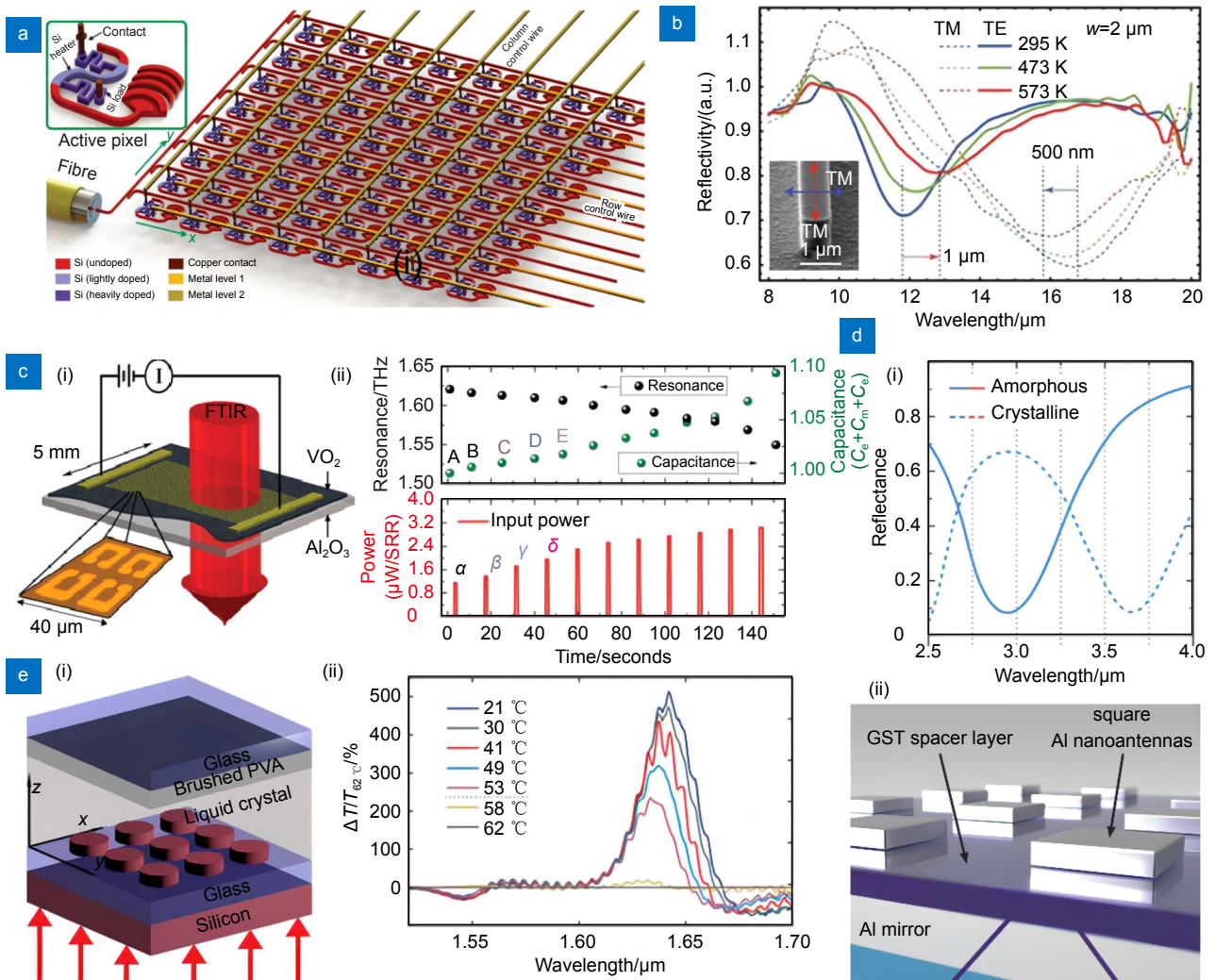


图3 几种不同材料的热调谐动态超表面方法。(a) 电热可调硅基纳米光子相控阵示意图<sup>[63]</sup>；(b) 基于重掺杂 InSb 衬底和 InSb 结构的热可调反射率光谱<sup>[66]</sup>；(c) 基于 VO<sub>2</sub> 电热可调超表面的 (i) 结构示意图及 (ii) 共振峰位的移动<sup>[68]</sup>；(d) 基于 GST 材料热可调超表面 (i) 相变导致的反射谱调制及 (ii) 器件结构示意图<sup>[70]</sup>；(e) 基于液晶热可调超表面的 (i) 结构示意图及 (ii) 不同温度下透过率调制<sup>[74]</sup>

Fig. 3 Thermally tunable metasurfaces with different active materials. (a) Schematic diagram of an electrothermally tunable silicon-based nanophotonic phased array<sup>[63]</sup>; (b) Thermally tunable reflectance spectrum based on a heavily doped InSb substrate and InSb nanostructures<sup>[66]</sup>; (c) VO<sub>2</sub>-based electrothermally tunable metasurface: (i) schematic diagram and (ii) the shift of its resonant peak<sup>[68]</sup>; (d) GST-based thermally tunable metasurface: (i) the reflection modulation caused by the phase change and (ii) schematic diagram of the device<sup>[70]</sup>; (e) LC-based thermally tunable metasurface: (i) schematic diagram of the device and (ii) the transmittance modulation at different temperatures<sup>[74]</sup>

重态转换，通过调整其晶体化程度，实现了对称、非对称和关闭的三种光子自旋角动量相互作用<sup>[73]</sup>。VO<sub>2</sub> 与 GST 材料除了相变温度的差异外，另一重要区别在于撤去外部激励后，材料是否可保持相变后的状态。对于 VO<sub>2</sub> 材料，温度恢复至相变温度以下，其恢复至初始态；而 GST 可保持晶态或非晶态。

液晶作为一种光学各向异性的相变材料，被广泛应用于光电器件和传感器中。对于液晶可调超表面，主要分为两种机制。第一种与上述其他相变材料类似，

液晶和超表面作为一个整体，通过热控液晶材料相变调制其折射率，从而影响超表面的功能。2015 年，Sautter 等人将液晶与硅纳米盘阵列相结合，通过升温诱导液晶从向列相变为各向同性态，实现了如图 3(e) 所示的 40 nm 共振峰位的移动，且对 1.64 μm 的入射波产生 84% 的透过率调制<sup>[74]</sup>。在此之后，Komar 等人基于相位设计，通过加热液晶超表面至 60 °C，实现了由室温下光束直接透射到 12° 光束偏转的功能<sup>[75]</sup>。基于液晶独特的光学性质，液晶可调超表面另外一种



调控机制为液晶作为独立的调控单元, 通过调制以偏振为主的入射光状态来调制超表面的功能, 这种方式相比于改变液晶折射率可实现更大的调制范围。Kim 等人基于几何相位和传输相位相结合的设计, 图形化硅纳米结构, 实现其对左右旋偏振光有不同的全息图像。通过温度改变初始取向与入射光偏振夹角  $45^\circ$  的液晶的状态, 从而改变其相位延迟, 实现特定温度下左右旋入射光的切换, 从而显示不同的全息图<sup>[76]</sup>。热调制动态超表面, 通常具有较慢的响应速度, 成为阻碍其发展的一大瓶颈。此外, 无论是基于半导体还是相变材料的热控超表面, 其调制范围受限, 且较难实现可见光范围的应用。

### 2.3 光调制动态超表面

光泵浦可以实现皮秒甚至飞秒量级更快的调制。2006 年, Padilla 等人报道了第一个光泵浦超表面调制器件, 将铜 SRR 阵列制备在 GaAs 衬底上, 在波长 800 nm 超快激光的激发下, GaAs 衬底电导率变化导致金属 SRR 共振被抑制, 从而产生太赫兹波段透

过率的极强调制<sup>[77]</sup>。此后, 基于硅、III-V 族半导体、透明导电氧化物 (TCO) 等材料的光激发载流子调控机制被广泛应用于光可调超表面中。谷建强等人基于此机制实现了如图 4(a) 所示的电磁诱导透明 (EIT), 将硅与铝的 SRR 结构复合, 通过红外激发光诱导硅结构电导率的变化, 使得 SRR 从开环到闭环, 产生有效折射率的极大调制, 在 0.74 THz 下实现了 42% 的透过率变化<sup>[78]</sup>。Shcherbakov 等人利用如图 4(b) 所示的 GaAs 衬底上的  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}/\text{AlGaO}$  纳米柱结构, 在低于  $400 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  的泵浦光激发下, 实现了皮秒量级快速响应的 35% 的反射调制和 30 nm 的共振峰位移动<sup>[79]</sup>。丛龙庆等人基于硅和铝的 SRR 复合结构, 实现了全光控太赫兹波段的偏振调制和动态光束偏转的功能<sup>[80]</sup>。除了半导体材料, TCO 也是在近红外至中红外波段常用的光可调超表面材料。Guo 等人用氧化铟锡 (ITO) 纳米棒阵列在小于  $7 \text{mJ}/\text{cm}^2$  的激发光强下实现了近红外和中红外波段的超快透过率调制和共振峰位移动, 响应时间在亚皮秒量级, 其机制为在光泵

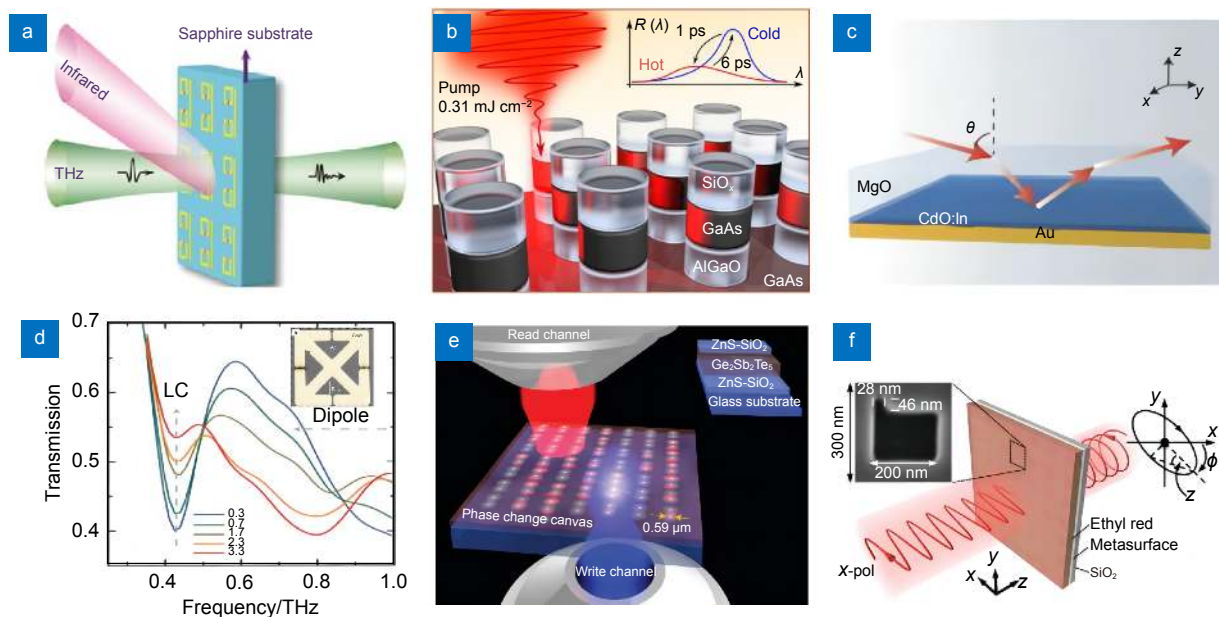


图 4 几种不同材料的光调制动态超表面方法。(a) 基于硅和铝 SRR 结构的光控太赫兹波调制示意图<sup>[78]</sup>；(b) 基于 III-V 族半导体的超快光泵浦反射调制示意图<sup>[79]</sup>；(c) 基于 CdO:In 的光控超快反射率调制器件结构示意图<sup>[82]</sup>；(d) 基于  $\text{VO}_2$  的太赫兹波激发超表面透过率光谱调制及结构示意图<sup>[83]</sup>；(e) 飞秒激光直写可擦除超表面器件结构示意图<sup>[84]</sup>；(f) 基于偶氮乙基红光可调超表面的偏振调制示意图<sup>[87]</sup>

Fig. 4 Optically tunable metasurfaces with different active materials. (a) Schematic diagram of the optically controlled THz device based on Si and Al SRR structure<sup>[78]</sup>; (b) Schematic diagram of a III-V semiconductor device with reflection modulated by ultrafast laser pump<sup>[79]</sup>; (c) Schematic diagram of a CdO:In device with optically controlled fast reflection modulation<sup>[82]</sup>; (d) The transmittance spectrum modulation of a  $\text{VO}_2$ -based metasurface modulated by the THz wave, and its schematic diagram<sup>[83]</sup>; (e) Schematic diagram of the erasable metasurface modulated by the femtosecond laser direct writing<sup>[84]</sup>; (f) Schematic diagram of the polarization modulation of an optically controlled metasurface based on azo ethyl red<sup>[87]</sup>



浦作用下电子分布的变化<sup>[81]</sup>。Yang 等人用高迁移率的铟掺杂氧化铬 (CdO:In) 基于如图 4(c) 所示结构实现 800 fs 超快响应的 85% 的反射率变化<sup>[82]</sup>。

另一种光调谐超表面基于光热效应与材料相变, 与基于相变材料的热可调超表面类似, 高能激光的光热效应诱导材料局部升温, 产生相变, 其折射率的变化调制超表面功能。Liu 等人将金 SRR 结构在 VO<sub>2</sub> 表面图形化, 泵浦太赫兹波激发局域电场从 0.3 MV/cm 增强至 3.3 MV/cm, 透过率在 0.42 THz 下改变 13%, 如图 4(d) 所示, 其机制为 Poole-Frenkel 效应导致载流子密度提升, 在电场作用下加速运动导致电子-晶格耦合产生焦耳热, 诱导 VO<sub>2</sub> 发生相变, 此过程在皮秒量级完成<sup>[83]</sup>。Wang 等人基于 GST 材料制备如图 4(e) 所示的可擦写超材料器件, 利用飞秒激光直写使得局域发生像素化可重构相变, 通过对 GST 的图形化设计, 制备了可见波段双色多焦点的非涅尔波带片、具有亚波长焦距的超振荡透镜、灰度全息、介电超材料器件, 实现了多种功能<sup>[84]</sup>。随后, 德国 Taubner 教授团队利用 GST 相变材料实现了对表面声子-激子的动态调控<sup>[85]</sup>。除了 VO<sub>2</sub> 和 GST 材料, 液晶也可通过激光热效应来产生相变。Sharma 等人基于扭曲向列相液晶 (TNLC) 的旋光性, 利用近红外飞秒激光的光热效应使其由向列相变为各项同性态, 失去旋光功能, 从而改变入射至超表面的光的偏振方向, 实现了图案可调颜色的功能<sup>[86]</sup>。此外, 一些光敏感分子可在光激发下发生顺反异构转变, 也可用于光可调超表面。Ren 等人基于偶氮乙基构建如图 4(f) 所示的器件结构, 利用光激发下偶氮分子从反式异构到顺式的转变, 从而改变等离激元耦合模式, 实现了对入射光的偏振调制<sup>[87]</sup>。值得一提的是, 光热效应激发的材料形变也会使超表面结构分布产生变化, 调制超表面响应。Liu 等人基于液晶弹性体 (LCE) 的光机械效应, 实现了 230 nm 的超大吸收谱峰位移动<sup>[88]</sup>。

## 2.4 机械调谐动态超表面

机械调控是通过机械力作为外部激励改变超表面中超原子的几何形状和相邻原子间距来进行动态调控, 主要有微机电系统 (MEMS)<sup>[89-93]</sup> 以及柔性衬底<sup>[94-101]</sup> 两种思路。MEMS, 也称为微机电系统, 是一种在微米或纳米尺度上的机械系统, 其机械结构在外部激励下会发生变化。图 5(a) 展示了加载 MEMS 的可调超表面, 能实现不同的相位响应<sup>[89]</sup>。它的调控原理是: 通过在 MEMS 上施加不同的电压, 来改变悬臂的角度,

可以获得不同的相位响应。Cong 等人使用此设计, 通过控制各柱的偏压, 实现了入射波的动态偏振操纵和太赫兹波段的实时动态全息。图 5(b) 显示了加载在超表面上的 MEMS 如何执行可重新配置的功能<sup>[90]</sup>。当电压施加在 MEMS 上时, 电极之间的静电力可以拉起部分光栅, 改变整个光栅的形状和周期, 并改变超表面的电磁响应。Shimura 等人设计了这种超表面来实现可见光波段的双折射。

而通过柔性衬底来实现可调超表面的早期工作<sup>[102-105]</sup>, 是通过将超原子阵列转移到柔性基板上, 拉伸衬底导致超表面的超原子结构和晶格的变化。Ee 等人将金棒状天线制备在一个 PDMS 基底上<sup>[106]</sup>, 在基底被拉伸过程中, 超构原子晶格及相邻原子间距被改变, 使得原子间的近场相互作用发生变化, 从而使整个器件的电磁响应发生变化, 实现了一个受拉力控制的变焦透镜。图 5(c) 展示了在可拉伸的 PDMS 衬底上用金纳米棒制作的机械可重构光学全息超表面<sup>[95]</sup>, 其具有多达三个在可见光范围内操作的图像平面。拉伸衬底放大了全息图像并改变了图像平面的位置, 因此在拉伸时, 可以切换不同的显示全息图像。

## 2.5 化学调谐动态超表面

化学调谐是通过化学的手段使构成超构原子的材料发生化学成分改变或者超构原子周围介质发生化学性质改变, 材料化学性质的改变会造成折射率或者偏振等材料光学物理参量的变化, 因此整个器件的电磁响应也会被改变, 然后再通过可逆的转化, 从而达到对超构表面光学器件进行可逆重构调控<sup>[107-115]</sup>。化学调谐动态超表面实现路径主要有两条, 第一种是使用 Mg、Si 等材料作为超构原子, 通过可逆化学反应使得超构原子的构成材料发生变化, 进而整个器件的电磁响应也会被改变<sup>[111-116]</sup>。图 6(a) 展示了一种在可见光频率下工作的镁 (Mg) 基的化学活性超表面<sup>[110]</sup>。使用可寻址 Mg 纳米棒, 在加氢时氢化成 MgH<sub>2</sub>, 加氧时脱氢成 Mg, 使纳米棒的等离子体响应发生改变, 从而实现动态像素变化。这种动态调谐超表面可以实现全息图、光学信息加密、光束调制等多种功能。Duan 等人通过对 Mg 纳米棒的加氢脱氢反应, 提出了一种基于镁超表面的动态等离激元调控显示技术, 实现了动态颜色擦除和恢复<sup>[107,111]</sup>。Yu 等人使用 Mg 纳米棒制作超表面, 实现了两个不同全息图案之间的切换<sup>[108]</sup>。Nagasaki 等人通过将 Si 氧化为低折射率的 SiO<sub>2</sub>, 展示了一种实现信息加密的“隐形墨水”的结构

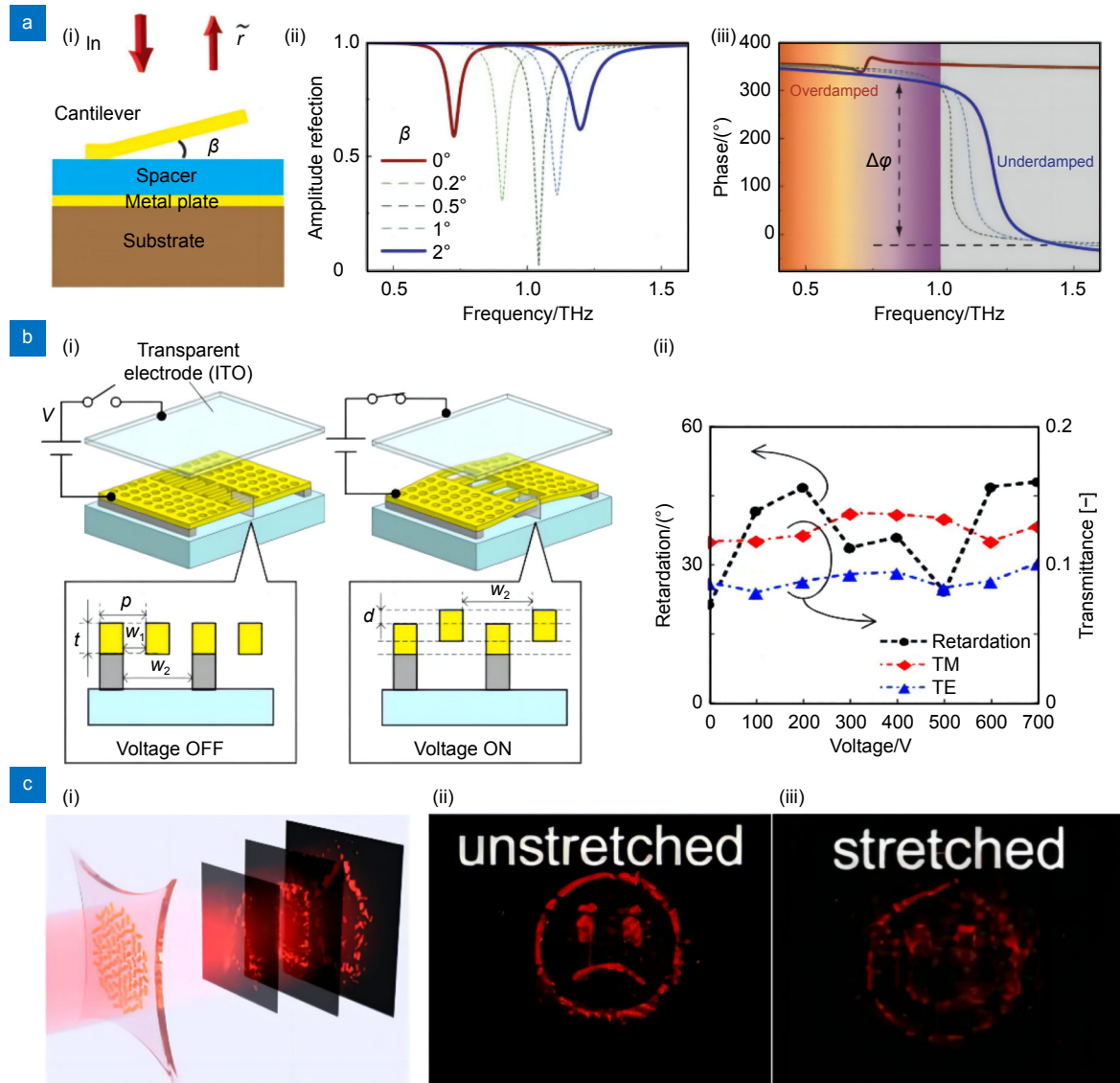


图 5 几种不同材料的机械调谐动态超表面方法。(a) 实现动态偏振控制和全息术的可重构超表面的 (i) 结构示意图、(ii) 不同悬臂角度下的模拟振幅、(iii) 不同悬臂角度下的辐射相谱<sup>[89]</sup>；(b) 可见光波段双折射超表面系统的 (i) 器件结构示意图和 (ii) 不同电压下器件在 633 nm 波长下对 TM 波和 TE 波的延迟和透射率调制<sup>[90]</sup>；(c) 基于柔性衬底的可重构光学超表面全息 (i) 器件示意图 (ii) 未拉伸状态下的光学全息图 (iii) 拉伸状态下的光学全息图<sup>[95]</sup>

Fig. 5 Mechanically tunable metasurfaces with different active materials. (a) Tunable metasurfaces for achieving dynamic polarization control and holography: (i) structural configuration, (ii) simulated amplitude and (iii) radiation phase spectra at varied cantilever angles<sup>[89]</sup>; (b) Birefringent reconfigurable metasurfaces in the visible range: (i) device structure and (ii) the modulation of delay and transmittance for TM and TE waves at 633 nm wavelength under different voltages<sup>[90]</sup>; (c) Optical metasurface holograms based on a flexible substrate: (i) schematic configuration, optical holograms at (ii) unstretched and (iii) stretched states<sup>[95]</sup>

色应用<sup>[114]</sup>。

第二种实现化学调谐动态超表面的思路是通过改变超构原子周围介质的性质，进而引起整个器件的电磁响应改变<sup>[115-116]</sup>。图 6(b) 展示了一种液晶与全息超表面结合的气体传感器，可以自主感应挥发性气体的存在并提供即时的视觉全息警报<sup>[115]</sup>。该工作中实现超表面动态调控的原理是利用液晶和氢化非晶硅组成

超表面，当出现挥发性气体时，气体分子会扰动液晶的分子有序性，导致液晶从向列相向各向同性态转变，液晶层转换透射光偏振功能发生改变，即入射的右旋圆偏振光 (RCP) 转变成左旋圆偏振光 (LCP)，并且 RCP 和 LCP 入射到设计好的超表面后会出现不同的全息图像，因此不同圆偏光的入射切换就可以实现即时的视觉全息警报。

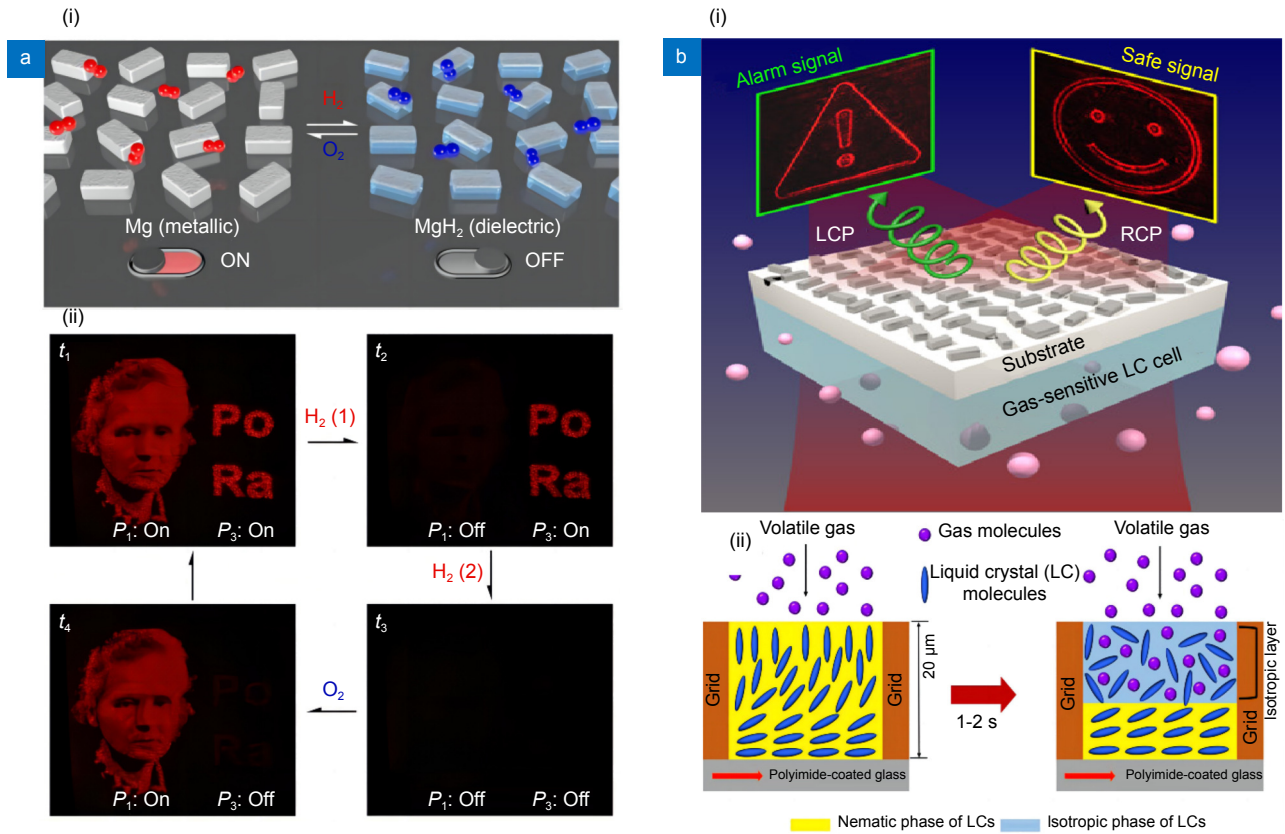


图 6 几种不同材料的化学调谐动态超表面方法。(a) 基于 Mg 纳米砖的可重构全息超表面的 (i) 动态调制机理及 (ii) 加氢脱氢反应后显示的不同全息图像<sup>[110]</sup>; (b) 基于液晶的光学全息超表面用于挥发性气体检测 (i) 左旋和右旋圆偏振光分别入射后的图案及 (ii) 挥发性气体改变液晶分子取向示意图<sup>[115]</sup>

Fig. 6 Chemically tunable metasurfaces with different active materials. (a) Reconfigurable metasurface holograms based on Mg nanobrick: (i) dynamic modulation principle and (ii) different holographic images after hydrogenation and dehydrogenation reaction<sup>[110]</sup>; (b) Optical metasurface holograms based on liquid crystals that are used for volatile gas detection: (i) different images are produced when the left and right circularly polarized light is incident on the metasurface hologram and (ii) the schematic diagram showing the change LC molecular orientation upon contacting volatile gas<sup>[115]</sup>

### 3 动态可调谐超表面的应用

#### 3.1 动态成像应用

经典的透镜成像主要是通过调控波前的相位，使光束实现偏折形成的。其中波前的调控主要通过玻璃或者塑料透镜的厚薄产生的光程差进行操控。因此实现一个周期内的相位需要厚度差比较大的结构完成。超表面通过拓展经典 Snell 定律，在亚波长到波长尺寸的厚度范围内即可实现一个周期内的相位变化，因此提供了一种小型化成像的很好的雏形。

可调的焦距无疑给成像增加了更多的通道。因此这部分内容主要讨论在可调材料基础上实现可调超表面的成像，主要表现为焦距的变化。如图 7(a) 所示，胡跃强课题组提出一种集成液晶与介质超表面的方法<sup>[38]</sup>。通过设计超表面的结构，使其具有线性偏振依

赖的焦距变化，然后通过叠加向列相液晶，外加电压控制液晶取向的方向进而选择不同的偏振方向，最终实现成像的焦距可调性质。图 7(b) 中，Zheludev 课题组通过微流控的方式改变超结构中的金属与介质材料的比例<sup>[117]</sup>，最终实现焦距的可调谐变化。图 7(c) 中主要是通过光控机械变化实现微结构的面外弯曲<sup>[118]</sup>，且在红外波段证明了硅材料在不同强度的激光照射下的连续形变引起的连续焦距调谐。图 7(d) 通过使用硫系相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  刻蚀制备成为微纳结构<sup>[119]</sup>，证明了其在无定形态和晶态时不同的焦距状态。图 7(e) 中，Faraon 团队通过设计两个微结构阵列<sup>[58]</sup>，并操纵微机电系统改变两个结构之间的距离，从而得到一个大范围及大视野 ( $40^\circ$ ) 的可调透镜，并将其应用于三维成像中。图 7(f) 中，将金属微纳结构放置在软性基底 (PDMS) 上<sup>[106]</sup>，通过受力拉伸基底改变结构



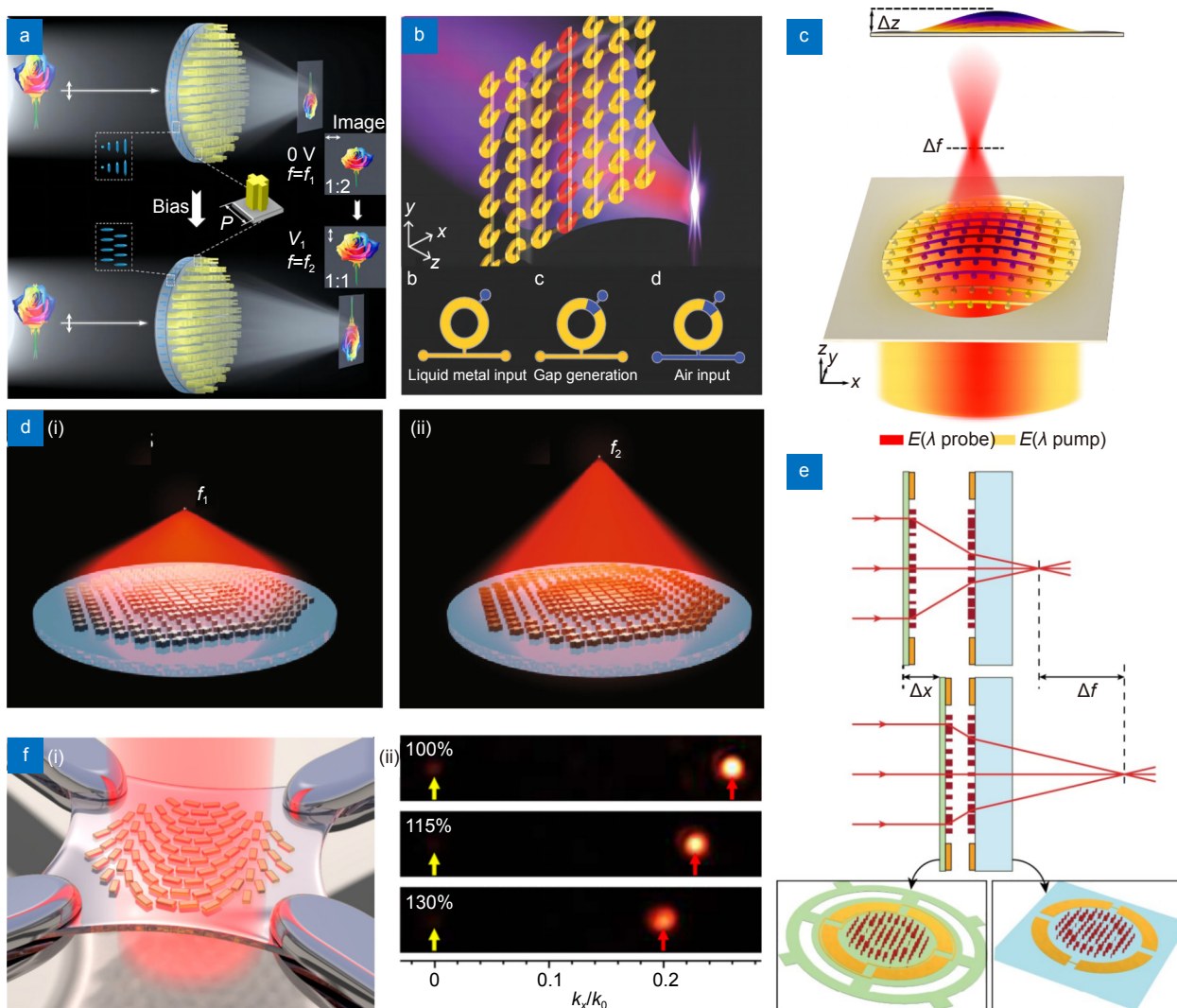


图 7 几种典型的可调谐动态超构透镜成像应用。(a) 集成液晶材料实现超透镜的可调焦距成像<sup>[38]</sup>；(b) 微流控液态金属改变材料的金属与介质比例实现可调的焦距成像<sup>[117]</sup>；(c) 光控微结构薄膜的形变实现的可调焦距成像<sup>[118]</sup>；(d) 相变材料的多晶态与晶态切换实现的可调焦距成像<sup>[119]</sup>；(e) 微机电系统控制的双超表面间隙实现的可调焦距三维成像<sup>[58]</sup>；(f) PDMS 基底拉伸改变超表面尺寸实现的可调焦距成像<sup>[106]</sup>

Fig. 7 Imaging applications of several typical dynamically tunable metalenses. (a) Electrically tunable molecular orientation of liquid crystals<sup>[38]</sup>; (b) Microfluidically controlled ratio between metal and dielectric of the material<sup>[117]</sup>; (c) Optically controlled deformation of thin films with the nanostructures<sup>[118]</sup>; (d) Temperature controlled phase change of GST<sup>[119]</sup>; (e) MEMS-controllable gap between two substrates with metasurface nanostructures<sup>[58]</sup>; (f) Mechanically controlled geometries of nanostructures on the PDMS substrate<sup>[106]</sup>

的周期，进而实现拉伸可调的焦距成像。

### 3.2 动态显示应用

全息术 (Holography) 不仅限于记录光的强度信息，还可以捕捉光场中的复杂相位信息，从而为精确重建原始光场提供更全面的数据支持。计算全息 (CGH) 的发明为全息显示获取目标相位提供了便利，使用空间光调制器或者数字微镜器件可以实现动态的全息显示。然而，受限于设备的像素尺寸和占空比等因素，这种方式的全息显示存在视场角小、衍射效率低、孪

生像等缺点。随着微纳加工技术的进步，超表面为光学全息记录和重建提供了极好的解决方案。静态超表面在相位调制<sup>[120]</sup>、振幅调制<sup>[121]</sup>、复振幅调制<sup>[122]</sup>、非线性调制<sup>[123]</sup>方面已经展现出了优越的性能，然而，大多数超表面一经制造就无法调整结构，无法实现动态显示。尽管通过多路复用超表面<sup>[124-126]</sup>可以记录多通道光场信息并且通道信息独立显示，但是仍然缺乏主动调控的功能。因此，开发有源材料来实现动态全息显示显得尤为重要。近年来，通过利用电光效应、

自由载流子效应、相变材料、机械拉伸材料、化学反应等方法, 超表面全息实现了各种主动调控, 并展现出了独特的优势。

得益于与传统的电气设备兼容, 电可调的超表面被认为是实现交互式全息显示最具有前途的方式之一<sup>[127]</sup>。Cui 等人将二极管掺入超表面的晶胞中, 可以通过在二极管上施加不同的偏执电压来控制每个晶胞的散射状态<sup>[128]</sup>。通过改进的 CGH 算法计算的相位曲线改变每个单元的二进制可切换状态, 如图 8(a) 所示, 可编程全息图能够以数十纳秒的快速重新配置时间再现。液晶具有双折射特性, 并且改变电压可以实现偏转, 因此可以用于调谐超表面全息。Liu 等人展示了一种通过可见光频率下的几何和传播相位定制其空间频率来实现主动调控超表面全息的方法<sup>[129]</sup>。每个超表面像素都包含排列在矩形晶格中的金纳米棒。在一些预选 (奇数或偶数) 列中, 纳米棒被介电材料覆盖。通过毫秒时间尺度上的电压信号控制液晶分子偏转来改变相邻奇数列和偶数列之间的相对相位, 从而实现全息图的动态调控, 如图 8(b) 所示, 在不同电压下全息图中的人物有站立和行走两种姿态。相变材料在不同的温度下对应有不同的光学特性, 例如碲化锗铋 (GeSbTe, GST)<sup>[130-131]</sup> 和二氧化钒 (VO<sub>2</sub>)<sup>[132-134]</sup>。Liu 等人提出了一种使用二氧化钒集成超表面的热调控动态元全息设计<sup>[135]</sup>。在外部加热下, 当温度从 25 °C 升高到 100 °C 时, 重建的图像从“H”变为“G”, 如图 8(d) 所示。机械可调的全息超表面通过拉伸改变晶胞周期, 具有简单的结构。Malek 等人提出了一种圆柱形二氧化钛 (TiO<sub>2</sub>) 阵列嵌入弹性聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 衬底的机械可调超表面谐振器, 以实现光学响应的调制<sup>[95]</sup>, 并构建了一个具有两个图像平面的多平面全息图, 每个图像平面中具有不同的全息图像, 如图 8(c) 所示。在其未拉伸的形式中, 全息图像“ONE”出现在位于  $z = 200 \mu\text{m}$  的图像平面中。当超表面被拉伸 1.24 倍时, 图像平面沿  $z$  方向进一步移动, 全息图像“TWO”出现在相同的图像平面上。

超表面结构色的动态显示有着巨大的应用前景。结构色在自然界和日常生活中无处不在, 如甲虫、孔雀、蜂鸟、蝴蝶等<sup>[136-138]</sup>。与化学染料不同的是, 结构色是光与谐振单元之间干涉、衍射或散射而产生的结构性颜色。所观察到的颜色由谐振单元的物理尺寸和形状决定。结构色与其他超表面应用一样, 超表面结构一经制造, 其光谱信息就无法修改, 难以实现

动态显示。然而, 使用相变材料、电压调控或者热控可以调谐超表面结构色。最近, Liu 等人提出了一种基于聚合物分散液晶 (PDLC) 结合铝纳米孔超表面的结构色加密方案<sup>[139]</sup>。如图 8(e) 所示, 铝纳米孔超表面由矩形和方形孔组成, 不对称和对称纳米孔径分别表现出偏振敏感和偏振不敏感的等离子元共振特性。这可以通过设计的非对称和对称纳米孔径的排列来加密光学图像。通过集成 PDLC 实现了额外程度的信息加密, 无论入射偏振如何, 都可以隐藏信息。Xiao 等人通过利用破坏性干涉和共振对环境折射率的依赖性, 提出并展示了一种选择性控制多路复用彩色图像的超表面全息图的新方法<sup>[140]</sup>, 如图 8(f) 所示。在明场显微镜下, 它是由树木、太阳等组成的“宇宙中的地球”图案。当样品在空气中的红色激光和绿色激光的照射下时, 显示的图像是“月下花蕾的花仙子”, 随着二甲基亚砜 (DMSO) 的渗透, 切换到了“月下盛开的兰花周围的两只蝴蝶”。

### 3.3 动态光束整形应用

光束控制在激光雷达、光通信、激光加工和 3D 打印等方面有着重要的作用。传统的光束控制手段主要依赖于机械手段或者液晶, 比如电动旋转平台、数字微镜 (DMD) 和空间光调制器 (SLM), 但是这些调控方式存在响应时间长、多衍射级次、难集成、成本高等问题。得益于亚波长尺寸的结构, 超表面有望解决这些问题。Huang 等人报告了一个由石英基板、金背板氧化铝薄膜和氧化钨层组成的超表面<sup>[141]</sup>, 如图 9(a) 所示。在金电极上施加偏置电压时, 导致在氧化铝薄膜附近形成的载流子浓度变化, 从而调制导电氧化物的复折射率。通过施加 2.5 V 栅极偏置测量 184° 的相移和 ~30% 的反射率变化。研究还展示了高达 10 MHz 的调制速度和一阶衍射光束的波束控制。进一步, 如图 9(b) 所示, Park 等人在每个单元中使用两个电极控制超表面, 实现了独立控制反射光的相位和幅值<sup>[142]</sup>。当施加的电压发生变化时, 相位将经历完全的 360° 变化, 而反射率保持不变。每个电极都可以进行独立寻址, 他们演示了在 LiDAR 系统中使用有源超表面作为固态扫描仪来生成 3D 距离图 (如图 9(c) 所示)。

Komar 等人将液晶与超表面结合<sup>[75]</sup>, 如图 9(d) 所示, 通过加热控制液晶的空间变化, 硅纳米盘阵列实现两个衍射阶次的衍射效率改变。在实验中, 他们通



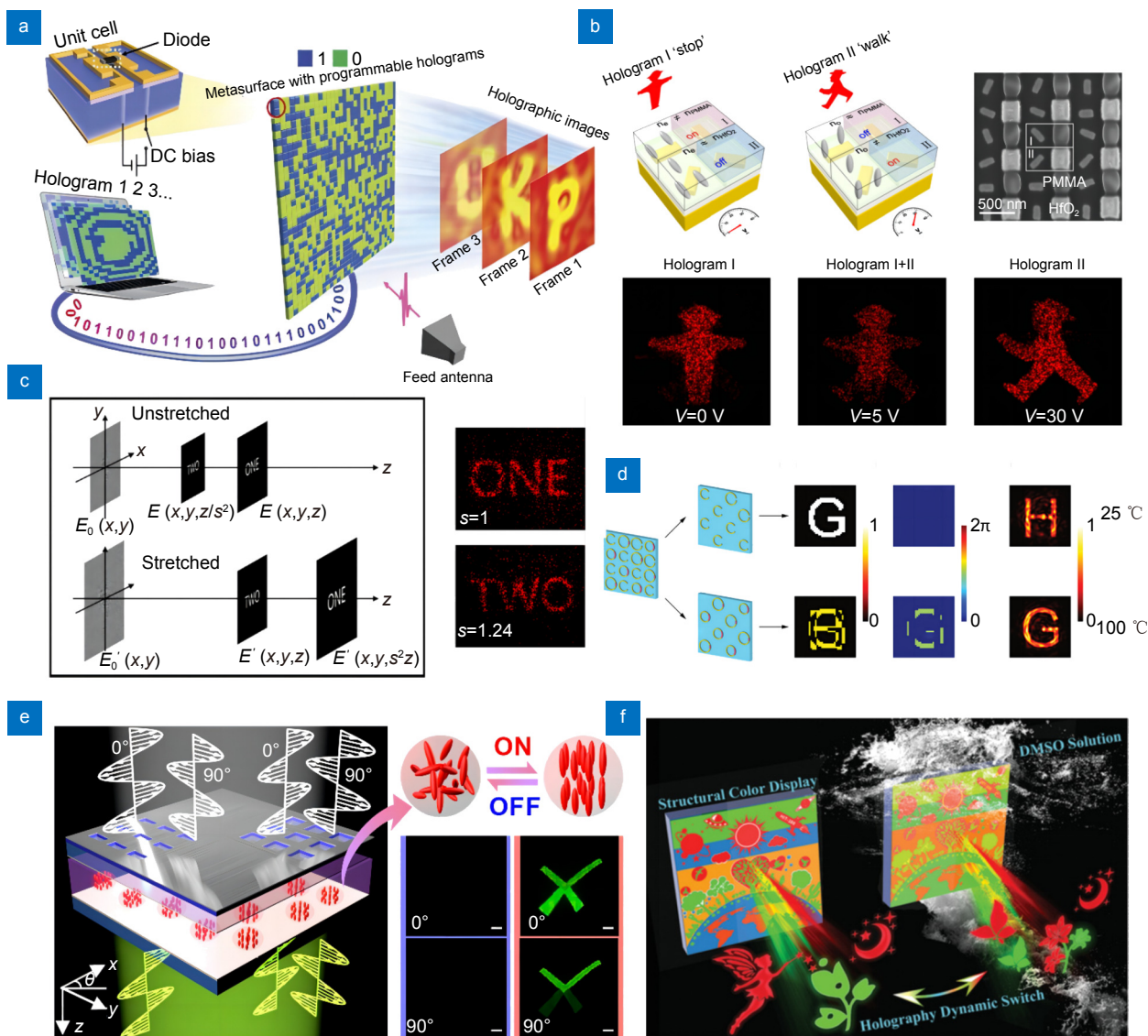


图 8 几种典型的可调谐动态显示应用。(a) 电调控可编程超表面全息原理图<sup>[128]</sup>, 每个单元都有一个二极管焊接在两个金属环之间, 并由直流电压独立控制; (b) 液晶超表面可切换全息图, 不同施加电压下在远场捕获的全息图像<sup>[129]</sup>; (c) 可拉伸基板上的超表面全息示意图<sup>[95]</sup>, 当基板被拉伸时, 全息影像会被切换并被放大; (d) 使用二氧化钒超表面的热依赖性动态元全息示意图<sup>[135]</sup>; (e) 基于聚合物分散液晶的超表面结构色的光学加密技术<sup>[139]</sup>; (f) 动态双功能超表面的工作原理<sup>[140]</sup>

Fig. 8 Dynamically tunable displays. (a) Electrically reprogrammable metasurface holograms<sup>[128]</sup>. The metasurface in the middle is formed by an array of meta-atoms, with each having a diode welded between the two metallic loops and independently controlled by a DC voltage; (b) Liquid crystal tunable metasurface holograms and captured images in the far field at different applied voltages<sup>[129]</sup>; (c) Schematic diagram of a hologram on a stretchable substrate<sup>[95]</sup>. Holograms are switched and enlarged when the substrate is stretched; (d) Thermally tunable meta-holograms using a vanadium dioxide integrated metasurface<sup>[135]</sup>; (e) Polymer-dispersed liquid crystal-based metasurfaces for optical encryption<sup>[139]</sup>; (f) Principle of dynamic bifunctional metasurfaces<sup>[140]</sup>

过加热样品到液晶的清亮点, 将输入光束偏转了 12°, 效率为 50%。最直接的调制方式是机械方法, 微机电系统 (MEMS) 上的超表面能够控制光束转向。Bozhevolnyi 等人通过驱动 MEMS 反射镜, 提供反射光的可控相位和幅度调制<sup>[59]</sup>。如图 9(e) 所示, 用于动态偏振无关的光束控制和反射式 2D 聚焦时, 两者都

表现出高效 (~50%)、宽带 (工作波长附近 ~20% 接近 800 nm) 和快速 (<0.4 ms)。此外, 通过改变层间厚度, 实现在多个衍射级次之间切换, 以实现准连续光束控制。在 800 nm 波长的正常入射光下, 在三个衍射阶数之间独立于偏振的动态光束控制, 实现了在玻璃中的 0°、5.2°和 10.5°的反射角。相变材料随材料相变,



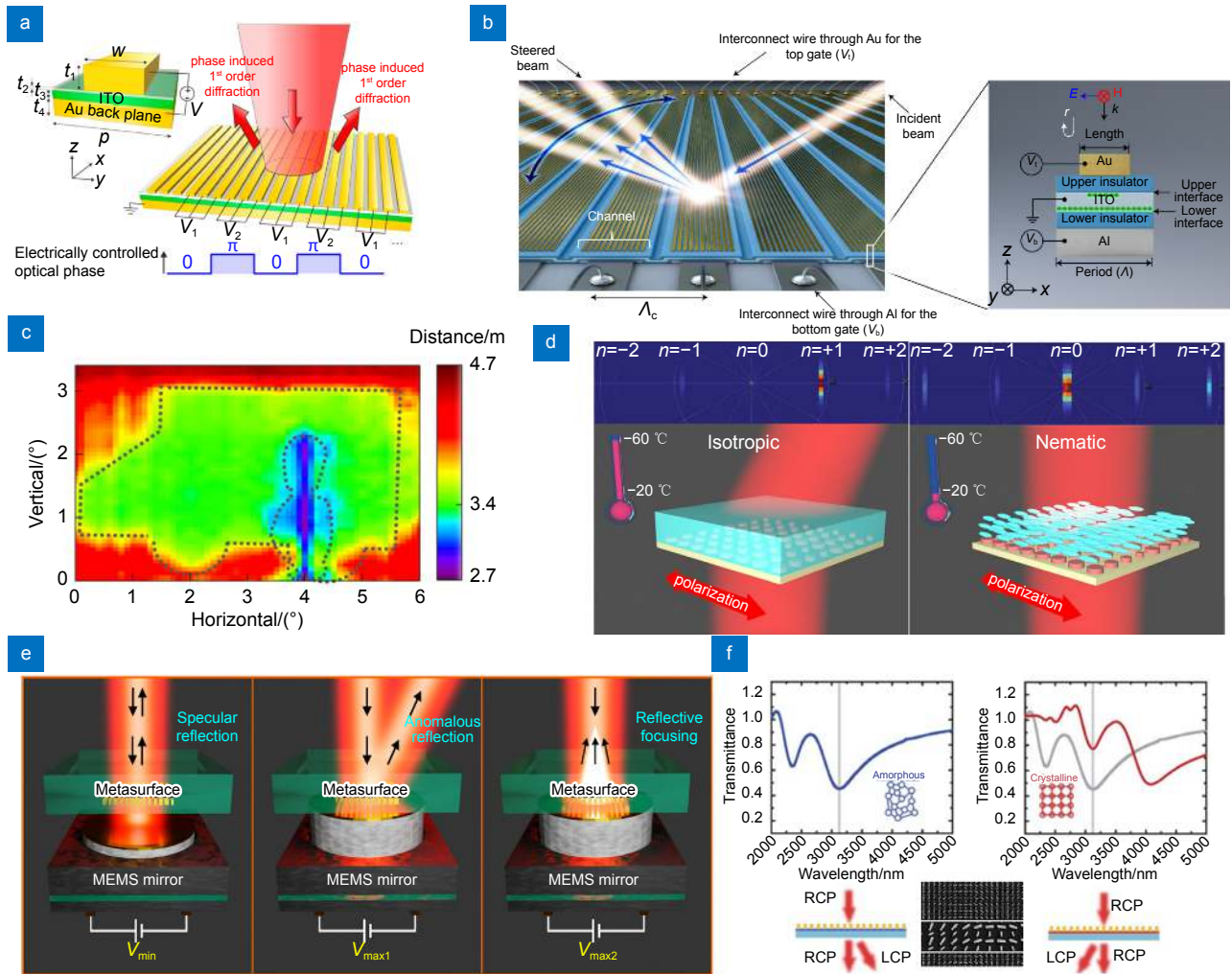


图 9 几种典型的可调谐动态光束整形应用。(a) 栅极可调超表面示意图<sup>[141]</sup>, 该结构由石英基板、金背板和覆盖有氧化铝膜和金条状天线的薄 ITO 膜组成, 在条状天线和底部金之间施加电压, 导致在靠近氧化铝处的透明氧化物处形成电荷积累;(b) 电可调通道组成的有源超表面阵列示意图<sup>[142]</sup>, 每个通道由 11 个可单独寻址的等离激元纳米谐振器组成, 右上方的入射光束从超表面阵列反射,  $V_1$  和  $V_0$  分别调节上下闸门控制转向光束的方向;(c) 使用超表面 SLM 生成的 3D 深度图像<sup>[142]</sup>;(d) 液晶控制的光束切换超表面工作原理图<sup>[75]</sup>, 左边是各向同性态, 右边是向列相态;(e) 使用微机电系统-超表面进行二维波前整形在驱动前、反射、聚焦三种驱动情况下微机电系统-超表面的镜面状光反射示意图<sup>[59]</sup>;

(f) 相变超表面光束偏转实验结果, 以及相变超表面的 SEM 图<sup>[72]</sup>

Fig. 9 Dynamically tunable beam shaping. (a) Schematic diagram of a tunable metasurface with adjustable gate electrodes<sup>[141]</sup>. The structure consists of a quartz substrate, a gold back plane, a thin ITO film covered by a thin alumina film, and a gold stripe nanoantenna array on the top. Applying voltages between the stripe antenna and the bottom gold will result in charge accumulation at the transparent oxide near the aluminum oxide; (b) Illustration of the active metasurface array composed of electrically tunable channels, with each channel composed of 11 individually addressable plasmonic nanoresonators<sup>[142]</sup>. The incident beam from the right side is reflected by the metasurface array, and the direction of the reflected beam is steered by adjusting the top and bottom gates,  $V_1$  and  $V_0$ , respectively; (c) 3D depth image produced using the metasurface SLM<sup>[142]</sup>; (d) Working principle diagram of dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces<sup>[75]</sup>; (e) Schematic diagram of mirror-like light reflection of MEMS-metasurfaces under three driving conditions: pre-drive, anomalous reflection, and focusing<sup>[59]</sup>;

(f) Experimental results of beam deflection using the phase-change metasurface and its SEM image<sup>[72]</sup>

其介电特性会发生很大的变化, 因此可逆相变的光学材料也常常用于光束控制。Yin 等人<sup>[72]</sup> 报告了一种基于 GST 相变材料的光束动态调控应用, 如图 9(f) 所示, GST 纳米棒在非晶态和晶态时展现出不同的共振峰位。接着, 基于几何相位的原理编码各向异性的

GST 纳米棒, 当圆偏光正入射非晶态 GST 超表面后, 与入射偏振正交的出射光以 $+13^\circ$ 的角度出射, 而正入射晶态 GST 超表面, 其出射光以 $-13^\circ$ 的角度出射, 通过改变 GST 材料的晶态可以实现光束的动态偏转。

## 4 结论与展望

超表面作为平面器件, 很大程度地避免了超材料在制备和材料损耗方面的困境。得益于微纳加工技术的发展, 人们可以实现更为严苛的尺寸制备, 这为超表面的发展和应用提供了强大的动力。如今, 超表面在显示、全息技术、光束偏转、结构色以及其他平面光学应用领域已经取得了极大的进展, 器件化和产业化趋势日益增长。然而, 大多数光学超表面缺乏动态调控, 限制了其应用范围。目前常用的调控手段包括温度调控、电调控、光调控、机械调控、化学调控等。但是没有完美的调控手段和可调材料, 所有的调控手段和可调材料都会受到环境因素、应用场景以及材料本身的其他性质所制约。表 1 总结了一些代表性的超表面动态调控工作, 基于微机电系统方法的机械调控, 其调控范围小、结构系统复杂, 但是易于集成和精准控制; 基于柔性衬底弹性形变的调控, 具有使用寿命短和不易与其他系统集成以及施加机械力的设备庞大等劣势, 但是其调控响应范围大, 且易于制作和调控; 温度调控的机制对于温度敏感的材料而言, 在特殊场景下具有特有的调控优势, 但是对于温度要求严格的应用场景便不太适用; 而电调谐是目前最容易与现有技术集成, 同时具备响应时间快、响应范围广、对使用环境没有特殊要求等特性的动态调控手段之一, 但是其亚波长尺寸结构的驱动仍面临挑战; 化学调控方法作为超表面动态调控方法的其中之一, 在特定场景

的防伪以及动画显示具有一定的意义, 但是超表面在不断的化学转化过程中会出现结构破坏等问题, 使用寿命和响应时间是目前该方法的主要突出问题。

电调谐超表面使用二维材料作为超表面的一部分, 利用其优异光电特性可能是一个解决挑战的突破口; 液晶材料由于其成熟的工艺和生产技术, 并且具有调控范围大、工作带宽广、生物兼容性好、调控手段多样等特性对于超表面动态调控的多功能化和产业化有推动作用; 另外, 还可以采用纳米尺度的金属线材或导电高分子作为电极材料, 利用微纳加工技术制备高精度的电极结构, 同时通过优化器件设计降低驱动电压, 减小功耗。热调谐超表面的快速响应需要设计和开发具有高热导率和低比热容的材料。热电材料或热敏材料可以作为超表面的结构材料, 通过优化热传导路径, 提高其热传输效率。光调谐动态超表面由于其非接触式的调控手段, 有望在未来的实际应用中大放异彩, 但是对于宽谱且低阈值响应的光控材料开发和研究是关键。可利用非线性光学效应, 如光致变色材料或二维材料实现光调谐超表面。基于 MEMS 的高精度机械调控是未来精密调控的主要手段之一, 但是目前对于 MEMS 材料的抗疲劳性及其结构稳定性是需要进一步探索的。压电材料或形状记忆合金等材料有望可以用于超表面的制备, 以提高其机械动态调控的稳定性和结构鲁棒性。对于化学调控的动态超表面而言, 化学反应的速率和精确可控性是需要平衡的, 可以利用化学吸附/脱附等过程实现对表面性质的可

表 1 超表面动态调控机制及其特性总结

Table 1 Summary of tuning mechanisms and characteristics of dynamic metasurfaces

调控机制	材料	物理机制	工作波长或频率	调控范围/响应时间	功能与应用	文献
电调	液晶	偏振调控	400-700 nm	NA/毫秒量级	结构色	[48]
电调	石墨烯	费米能级调控	3.41-4.55 GHz	NA	可调吸收	[50]
电调	聚吡咯	能带调控	400-700 nm	NA/~100 ms	结构色	[57]
热控	Si	热光效应	可见-近红外	30 nm 峰位移动/NA	散射调制	[20]
热控	GST	相变(非晶态-晶态折射率调控)	2.9-3.6 $\mu\text{m}$	25%共振峰位移动, 60%反射率变化/NA	热成像	[70]
热控	LC	相变(折射率调控)	NIR ~1.64 $\mu\text{m}$	40 nm 共振峰位移动, 84%透过率调制/NA	透射调制	[74]
光控	Si	载流子调控	0.74 THz	42%透过率变化/NA	电磁诱导透明	[78]
光控	GaAs	载流子调控	NIR ~1000 nm	35%反射率调制, 30 nm 共振峰位移动/恢复时间6 ps	反射调制	[79]
光控	LCE	光机械形变	NIR	~250 nm 共振峰位移动/NA	吸收调制	[88]
机械	MEMS	结构尺寸改变	0.5-1.5 THz	NA	全息	[89]
机械	MEMS	光栅周期改变	380-780 nm	NA	双折射	[90]
机械	PDMS	结构排列改变	380-780 nm	NA	全息	[95]
化学	Mg	材料改性	380-780 nm	NA	全息	[110]
化学	液晶	偏振调控	450-600 nm	NA/1-2s	全息	[115]

控调控。总之, 动态可调谐超表面器件正朝着响应速度快、可调机制友好、材料易于集成、多功能化等目标迈进。

## 参考文献

- [1] Yu N F, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2012, **12**(12): 6328–6333.
- [2] Lee G Y, Yoon G, Lee S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(9): 4237–4245.
- [3] Zhang K, Yuan Y Y, Zhang D W, et al. Phase-engineered metalenses to generate converging and non-diffractive vortex beam carrying orbital angular momentum in microwave region[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(2): 1351–1360.
- [4] Maguid E, Yulevich I, Yannai M, et al. Multifunctional interleaved geometric-phase dielectric metasurfaces[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(8): e17027.
- [5] Almeida E, Shalem G, Prior Y. Subwavelength nonlinear phase control and anomalous phase matching in plasmonic metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**(1): 10367.
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77–79.
- [7] Chu H C, Li Q, Liu B B, et al. A hybrid invisibility cloak based on integration of transparent metasurfaces and zero-index materials[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 50.
- [8] Liu Y J, Hao Q Z, Smalley J S T, et al. A frequency-addressed plasmonic switch based on dual-frequency liquid crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **97**(9): 091101.
- [9] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Opt Lett*, 2022, **27**(13): 1141–1143.
- [10] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nat Mater*, 2012, **11**(5): 426–431.
- [11] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2012, **12**(12): 6223–6229.
- [12] Xie X, Pu M B, Liu K P, et al. High-efficiency and tunable circular-polarization beam splitting with a liquid-filled all-metallic catenary meta-mirror[J]. *Adv Mater Technol*, 2019, **4**(7): 1900334.
- [13] Hu M, Chen J Y, Li Z Y, et al. Gold nanostructures: engineering their plasmonic properties for biomedical applications[J]. *Chem Soc Rev*, 2006, **35**(11): 1084–1094.
- [14] Liu Y J, Si G Y, Leong E S P, et al. Light-driven plasmonic color filters by overlaying photoresponsive liquid crystals on gold annular aperture arrays[J]. *Adv Mater*, 2012, **24**(23): OP131–OP135.
- [15] Chen Y G, Kao T S, Ng B, et al. Hybrid phase-change plasmonic crystals for active tuning of lattice resonances[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(11): 13691–13698.
- [16] Iyer P P, Butakov N A, Schuller J A. Reconfigurable semiconductor phased-array metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2015, **2**(8): 1077–1084.
- [17] Komar A, Fang Z, Bohn J, et al. Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(7): 071109.
- [18] Wu P C, Pala R A, Shirmanesh G K, et al. Dynamic beam steering with all-dielectric electro-optic III-V multiple-quantum-well metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 3654.
- [19] Zou C J, Komar A, Fasold S, et al. Electrically tunable transparent displays for visible light based on dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(6): 1533–1540.
- [20] Yan C, Yang K Y, Martin O J F. Fano-resonance-assisted metasurface for color routing[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(7): e17017.
- [21] Wang C T, Hou H H, Chang P C, et al. Full-color reflectance-tunable filter based on liquid crystal cladded guided-mode resonant grating[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(20): 22892–22898.
- [22] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(4): 308–312.
- [23] Berini P. Optical beam steering using tunable metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(7): 2204–2218.
- [24] Chen M K, Wu Y F, Feng L, et al. Principles, functions, and applications of optical meta-lens[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(4): 2001414.
- [25] Decker M, Kremers C, Minovich A, et al. Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(7): 8879–8885.
- [26] Buchnev O, Podoliak N, Kaczmarek M, et al. Electrically controlled nanostructured metasurface loaded with liquid crystal: toward multifunctional photonic switch[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, **3**(5): 674–679.
- [27] Wang D C, Zhang L C, Gu Y H, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 15020.
- [28] Colburn S, Zhan A, Majumdar A. Metasurface optics for full-color computational imaging[J]. *Sci Adv*, 2018, **4**(2): eaar2114.
- [29] Kim J, Jeon D, Seong J, et al. Photonic encryption platform via dual-band vectorial metaholograms in the ultraviolet and visible[J]. *ACS Nano*, 2022, **16**(3): 3546–3553.
- [30] Nemati A, Wang Q, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electron Adv*, 2018, **1**(5): 180009.
- [31] Du K, Barkaoui H, Zhang X D, et al. Optical metasurfaces towards multifunctionality and tunability[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(9): 1761–1781.
- [32] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(1): 225–230.
- [33] Wen D D, Yue F Y, Li G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 8241.
- [34] Li S Q, Wang Z, Dong S H, et al. Helicity-delinked manipulations on surface waves and propagating waves by metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(10): 3473–3481.
- [35] Chen Y Z, Zheng X Y, Zhang X Y, et al. Efficient meta-couplers squeezing propagating light into on-chip subwavelength devices in a controllable way[J]. *Nano Lett*, 2023, **23**(8): 3326–3333.
- [36] Wang Z, Yao Y, Pan W K, et al. Bifunctional manipulation of Terahertz waves with high-efficiency transmissive dielectric metasurfaces[J]. *Adv Sci*, 2023, **10**(4): 2205499.
- [37] Ali A, Mitra A, Aïssa B. Metamaterials and metasurfaces: A review from the perspectives of materials, mechanisms and advanced metadevices[J]. *Nanomaterials*, 2022, **12**(6): 1027.



- [38] Ou X N, Zeng T B, Zhang Y, et al. Tunable polarization-multiplexed achromatic dielectric metalens[J]. *Nano Lett*, 2022, **22**(24): 10049–10056.
- [39] Wen Y F, Zhang Q, He Q, et al. Shortening focal length of 100-mm aperture flat lens based on improved Sagnac interferometer and bifacial liquid crystal[J]. *Adv Opt Mater*, 2023, **11**(16): 2300127.
- [40] Sabri R, Forouzmand A, Mosallaei H. Genetically optimized dual-wavelength all-dielectric metasurface based on double-layer epsilon-near-zero indium-tin-oxide films[J]. *J Appl Phys*, 2020, **128**(22): 223101.
- [41] Cai Z Q, Liu Y M. Near-infrared reflection modulation through electrical tuning of hybrid graphene metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(6): 2102135.
- [42] Tian J Y, Adamo G, Liu H L, et al. Phase-change perovskite microlaser with tunable polarization vortex[J]. *Adv Mater*, 2023, **35**(1): 2207430.
- [43] Abdelraouf O A M, Wang Z Y, Liu H L, et al. Recent advances in tunable metasurfaces: materials, design, and applications[J]. *ACS Nano*, 2022, **16**(9): 13339–13369.
- [44] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Rep Prog Phys*, 2016, **79**(7): 076401.
- [45] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2019, **11**(2): 380–478.
- [46] Kelly K L, Coronado E, Zhao L L, et al. The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment[J]. *J Phys Chem B*, 2003, **107**(3): 668–677.
- [47] Murray W A, Barnes W L. Plasmonic materials[J]. *Adv Mater*, 2007, **19**(22): 3771–3782.
- [48] Franklin D, Chen Y, Vazquez-Guardado A, et al. Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 7337.
- [49] Li K, Wang J W, Cai W F, et al. Electrically switchable structural colors based on liquid-crystal-overlaid aluminum anisotropic nanoaperture arrays[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(18): 31913–31924.
- [50] Zhang J, Wei X Z, Rukhlenko I D, et al. Electrically tunable metasurface with independent frequency and amplitude modulations[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(1): 265–271.
- [51] Wang H T, Hao C L, Lin H, et al. Generation of super-resolved optical needle and multifocal array using graphene oxide metalenses[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(2): 200031.
- [52] Ju L, Geng B S, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. *Nat Nanotechnol*, 2011, **6**(10): 630–634.
- [53] Fang Z Y, Wang Y M, Schlather A E, et al. Active tunable absorption enhancement with graphene nanodisk arrays[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(1): 299–304.
- [54] Mou N L, Sun S L, Dong H X, et al. Hybridization-induced broadband terahertz wave absorption with graphene metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(9): 11728–11736.
- [55] Nemati A, Wang Q, Ang N S S, et al. Ultra-high extinction-ratio light modulation by electrically tunable metasurface using dual epsilon-near-zero resonances[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(7): 200088.
- [56] Zeng C, Lu H, Mao D, et al. Graphene-empowered dynamic metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(4): 200098.
- [57] Xiong K L, Emilsson G, Maziz A, et al. Plasmonic metasurfaces with conjugated polymers for flexible electronic paper in color[J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(45): 9956–9960.
- [58] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 812.
- [59] Meng C, Thrane P C V, Ding F, et al. Dynamic piezoelectric mems-based optical metasurfaces[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(26): eabg5639.
- [60] Camurlu P. Polypyrrole derivatives for electrochromic applications[J]. *RSC Adv*, 2014, **4**(99): 55832–55845.
- [61] Abdollahramezani S, Hemmatyar O, Taghinejad M, et al. Electrically driven reprogrammable phase-change metasurface reaching 80% efficiency[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 1696.
- [62] Rahmani M, Xu L, Miroshnichenko A E, et al. Reversible thermal tuning of all-dielectric metasurfaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2017, **27**(31): 1700580.
- [63] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, Hosseini E S, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, **493**(7431): 195–199.
- [64] Ding L, Luo X S, Cheng L, et al. Electrically and thermally tunable smooth silicon metasurfaces for broadband terahertz antireflection[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(23): 1800928.
- [65] Kamali K Z, Xu L, Gagrani N, et al. Electrically programmable solid-state metasurfaces via flash localised heating[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12**(1): 40.
- [66] Iyer P P, Pendharkar M, Palmstrøm C J, et al. Ultrawide thermal free-carrier tuning of dielectric antennas coupled to epsilon-near-zero substrates[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 472.
- [67] Driscoll T, Palit S, Qazilbash M M, et al. Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **93**(2): 024101.
- [68] Driscoll T, Kim H T, Chae B G, et al. Memory metamaterials[J]. *Science*, 2009, **325**(5947): 1518–1521.
- [69] Liu L, Kang L, Mayer T S, Werner D H. Hybrid metamaterials for electrically triggered multifunctional control[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**: 13236.
- [70] Tittl A, Michel A K U, Schäferling M, et al. A switchable mid-infrared plasmonic perfect absorber with multispectral thermal imaging capability[J]. *Adv Mater*, 2015, **27**(31): 4597–4603.
- [71] Mou N L, Liu X L, Wei T, et al. Large-scale, low-cost, broadband and tunable perfect optical absorber based on phase-change material[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(9): 5374–5379.
- [72] Yin X H, Steinle T, Huang L L, et al. Beam switching and bifocal zoom lensing using active plasmonic metasurfaces[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(7): e17016.
- [73] 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.
- [74] Sautter J, Staude I, Decker M, et al. Active tuning of all-dielectric metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2015, **9**(4): 4308–4315.
- [75] 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.
- [76] Kim I, Ansari M A, Mehmood M Q, et al. Stimuli-responsive dynamic metaholographic displays with designer liquid crystal modulators[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(50): 2004664.
- [77] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, et al. Dynamical

- electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(10): 107401.
- [78] Gu J Q, Singh R, Liu X J, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**: 1151.
- [79] Shcherbakov M R, Liu S, Zubyuk V V, et al. Ultrafast all-optical tuning of direct-gap semiconductor metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 17.
- [80] 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**: 28.
- [81] Guo P J, Schaller R D, Ketterson J B, et al. Ultrafast switching of tunable infrared plasmons in indium tin oxide nanorod arrays with large absolute amplitude[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(4): 267–273.
- [82] Yang Y M, Kelley K, Sachet E, et al. Femtosecond optical polarization switching using a cadmium oxide-based perfect absorber[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(6): 390–395.
- [83] Liu M K, Hwang H Y, Tao H, et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial[J]. *Nature*, 2012, **487**(7407): 345–348.
- [84] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(1): 60–65.
- [85] Li P N, Yang X S, Maß T W W, et al. Reversible optical switching of highly confined phonon-polaritons with an ultrathin phase-change material[J]. *Nat Mater*, 2016, **15**(8): 870–875.
- [86] Sharma M, Ellenbogen T. An all-optically controlled liquid-crystal plasmonic metasurface platform[J]. *Laser Photonics Rev*, 2020, **14**(11): 2000253.
- [87] Ren M X, Wu W, Cai W, et al. Reconfigurable metasurfaces that enable light polarization control by light[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(6): e16254.
- [88] Liu J X, Zeng H, Cheng M, et al. Photoelastic plasmonic metasurfaces with ultra-large near infrared spectral tuning[J]. *Mater Horiz*, 2022, **9**(3): 942–951.
- [89] Cong L Q, Pitchappa P, Wu Y, et al. Active multifunctional microelectromechanical system metadvice: Applications in polarization control, wavefront deflection, and holograms[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(2): 1600716.
- [90] Shimura T, Kinoshita T, Koto Y, et al. Birefringent reconfigurable metasurface at visible wavelengths by MEMS nanograting[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, **113**(17): 171905.
- [91] Roy T, Zhang S Y, Jung I W, et al. Dynamic metasurface lens based on MEMS technology[J]. *APL Photonics*, 2018, **3**(2): 021302.
- [92] Oshita M, Takahashi H, Ajiki Y, et al. Reconfigurable surface plasmon resonance photodetector with a MEMS deformable cantilever[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(3): 673–679.
- [93] He S W, Yang H M, Jiang Y H, et al. Recent advances in MEMS metasurfaces and their applications on tunable lens[J]. *Micromachines*, 2019, **10**(8): 505.
- [94] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses[J]. *Laser Photonics Rev*, 2016, **10**(6): 1002–1008.
- [95] Malek S C, Ee H S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(6): 3641–3645.
- [96] Yuan S M, Chen A L, Wang Y S. Switchable multifunctional fish-bone elastic metasurface for transmitted plate wave modulation[J]. *J Sound Vib*, 2020, **470**: 115168.
- [97] Cao L Y, Yang Z C, Xu Y L, et al. Deflecting flexural wave with high transmission by using pillared elastic metasurface[J]. *Smart Mater Struct*, 2018, **27**(7): 075051.
- [98] Cao L Y, Yang Z C, Xu Y L, et al. Disordered elastic metasurfaces[J]. *Phys Rev Appl*, 2020, **13**(1): 014054.
- [99] Kocer H, Durna Y, Kurt H, et al. Dynamic beam splitter employing an all-dielectric metasurface based on an elastic substrate[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(13): 3521–3524.
- [100] Lee S W, Oh J H. Single-layer elastic metasurface with double negativity for anomalous refraction[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2020, **53**(26): 265301.
- [101] Song S C, Ma X L, Pu M B, et al. Actively tunable structural color rendering with tensile substrate[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(9): 1600829.
- [102] Tao H, Strikwerda A C, Fan K, et al. Reconfigurable terahertz metamaterials[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **103**(14): 147401.
- [103] Han Z L, Kohno K, Fujita H, et al. MEMS reconfigurable metamaterial for terahertz switchable filter and modulator[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(18): 21326–21339.
- [104] Zhao X G, Schalch J, Zhang J D, et al. Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies[J]. *Optica*, 2018, **5**(3): 303–310.
- [105] Fu Y H, Liu A Q, Zhu W M, et al. A micromachined reconfigurable metamaterial via reconfiguration of asymmetric split-ring resonators[J]. *Adv Funct Mater*, 2011, **21**(18): 3589–3594.
- [106] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(4): 2818–2823.
- [107] Duan X Y, Kamin S, Liu N. Dynamic plasmonic colour display[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 14606.
- [108] Yu P, Li J X, Li X, et al. Generation of switchable singular beams with dynamic metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(6): 7100–7106.
- [109] Li J X, Chen Y Q, Hu Y Q, et al. Magnesium-based metasurfaces for dual-function switching between dynamic holography and dynamic color display[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(7): 7892–7898.
- [110] Li J X, Kamin S, Zheng G X, et al. Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption[J]. *Sci Adv*, 2018, **4**(6): eaar6768.
- [111] Duan X Y, Kamin S, Sterl F, et al. Hydrogen-regulated chiral nanoplasmonics[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(2): 1462–1466.
- [112] Cui Y, Hegde R S, Phang I Y, et al. Encoding molecular information in plasmonic nanostructures for anti-counterfeiting applications[J]. *Nanoscale*, 2014, **6**(1): 282–288.
- [113] Duan X Y, Liu N. Scanning plasmonic color display[J]. *ACS Nano*, 2018, **12**(8): 8817–8823.
- [114] Nagasaki Y, Suzuki M, Hotta I, et al. Control of Si-based all-dielectric printing color through oxidation[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(4): 1460–1466.
- [115] Kim I, Kim W S, Kim K, et al. Holographic metasurface gas sensors for instantaneous visual alarms[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(15): eabe9943.
- [116] Dai C J, Wang Z J, Shi Y Y, et al. Scalable hydrogel-based nanocavities for switchable meta-holography with dynamic color printing[J]. *Nano Lett*, 2022, **22**(24): 9990–9996.
- [117] Zhu W M, Song Q H, Yan L B, et al. A flat lens with tunable phase gradient by using random access reconfigurable

- metamaterial[J]. *Adv Mater*, 2015, **27**(32): 4739–4743.
- [118] Afridi A, Gieseler J, Meyer N, et al. Ultrathin tunable optomechanical metalens[J]. *Nano Lett*, 2023, **23**(7): 2496–2501.
- [119] Shalaginov M Y, An S D, Zhang Y F, et al. Reconfigurable all-dielectric metalens with diffraction-limited performance[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 1225.
- [120] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2808.
- [121] Xu Z T, Huang L L, Li X W, et al. Quantitatively correlated amplitude holography based on photon sieves[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(2): 1901169.
- [122] Overvig A C, Shrestha S, Malek S C, et al. Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase[J]. *Light Sci Appl*, 2019, **8**: 92.
- [123] Gao Y S, Fan Y B, Wang Y J, et al. Nonlinear holographic all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(12): 8054–8061.
- [124] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. *Nano Lett*, 2015, **15**(5): 3122–3127.
- [125] Wang E L, Niu J B, Liang Y H, et al. Complete control of multichannel, angle-multiplexed, and arbitrary spatially varying polarization fields[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(6): 1901674.
- [126] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, **15**(11): 948–955.
- [127] Kim G, Kim S, Kim H, et al. Metasurface-empowered spectral and spatial light modulation for disruptive holographic displays[J]. *Nanoscale*, 2022, **14**(12): 4380–4410.
- [128] Li L L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding–metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 197.
- [129] Li J X, Yu P, Zhang S, et al. Electrically-controlled digital metasurface device for light projection displays[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 3574.
- [130] Chen Y Q, Duan X Y, Matuschek M, et al. Dynamic color displays using stepwise cavity resonators[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(9): 5555–5560.
- [131] Sterl F, Strohfeldt N, Walter R, et al. Magnesium as novel material for active plasmonics in the visible wavelength range[J]. *Nano Lett*, 2015, **15**(12): 7949–7955.
- [132] Ko B, Badloe T, Rho J. Vanadium dioxide for dynamically tunable photonics[J]. *ChemNanoMat*, 2021, **7**(7): 713–727.
- [133] Kim S J, Lee D, Chae J Y, et al. Reconfigurable, vivid reflective colors based on solution-processed Fabry-Perot absorber using thermochromic vanadium dioxide[J]. *Appl Surf Sci*, 2021, **565**: 150610.
- [134] Badloe T, Kim I, Rho J. Moth-eye shaped on-demand broadband and switchable perfect absorbers based on vanadium dioxide[J]. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 4522.
- [135] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, et al. Thermally dependent dynamic meta-holography using a vanadium dioxide integrated metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(12): 1900175.
- [136] Kinoshita S, Yoshioka S, Miyazaki J. Physics of structural colors[J]. *Rep Prog Phys*, 2008, **71**(7): 076401.
- [137] Ghiradella H. Light and color on the wing: structural colors in butterflies and moths[J]. *Appl Opt*, 1991, **30**(24): 3492–3500.
- [138] Zhang K, Tang Y W, Meng J S, et al. Polarization-sensitive color in butterfly scales: polarization conversion from ridges with reflecting elements[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(22): 27437–27450.
- [139] Li K, Wang J W, Cai W F, et al. Electrically switchable, polarization-sensitive encryption based on aluminum nanoaperture arrays integrated with polymer-dispersed liquid crystals[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(17): 7183–7190.
- [140] Yang W H, Qu G Y, Lai F X, et al. Dynamic bifunctional metasurfaces for holography and color display[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(36): 2101258.
- [141] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(9): 5319–5325.
- [142] Park J, Jeong B G, Kim S I, et al. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional LiDAR applications[J]. *Nat Nanotechnol*, 2021, **16**(1): 69–76.

## 作者简介



王家伟 (1993-), 男, 博士, 主要从事动态超表面、微纳加工等领域的研究。

E-mail: 11930844@mail.sustech.edu.cn



【通信作者】刘言军 (1977-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事液晶光子学、等离激元光子学、超材料及超表面等领域的研究。

E-mail: yjliu@sustech.edu.cn



## 团队介绍

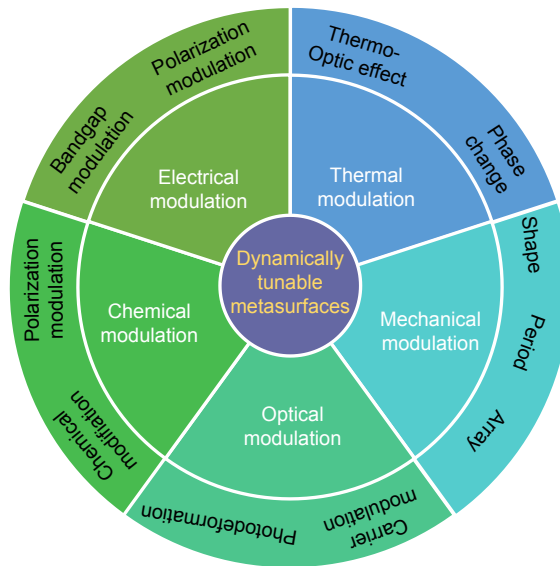
南方科技大学电子与电气工程系微纳光子学实验室, 在刘言军教授的带领下主要致力于液晶光子学、等离激元光子学、超材料及超表面等领域的研究。实验室参与和主持包括国家重点研发计划、国家自然科学基金、广东省广创团队、深圳市孔雀团队、深圳市工程中心、深圳市基础研究重点项目等十余项纵向项目, 已与国内龙头企业开展多项横向课题。刘言军教授在 *Nat. Commun.*、*Adv. Mater.*、*Nano Lett.*、*Sci. Bull.* 等高影响力期刊发表论文 200 多篇, 引用超过 6400 余次, H-index 41, 出版专著 5 章节, 获授权发明专利 16 项。此外, 刘言军教授 2016 年入选国家级人才计划青年项目, 2017 年入选广东省“珠江人才计划”青年拔尖人才, 2017 年入选深圳市孔雀计划 B 类人才, 2021 年入选 IEEE Senior Member, 2022 年入选全球前 2% 顶尖科学家榜单。



扫描二维码, 获取PDF全文

# Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces

Wang Jiawei<sup>1,2</sup>, Li Ke<sup>1,2</sup>, Cheng Ming<sup>1,2</sup>, Chen Lei<sup>1,2</sup>, Kong Delai<sup>1,2</sup>, Liu Yanjun<sup>1,2\*</sup>



Typical working mechanisms of dynamically tunable metasurfaces

**Overview:** Researchers have witnessed significant progress for metasurfaces in various domains of flat optics, including displays, holograms, beam steering, structural colors, and other planar optical applications. The progress is also accompanied by a growing trend towards device integration and industrialization. However, most optical metasurfaces lack the function of dynamic modulation, which further limits their potential applications. In recent years, numerous efforts have been made for dynamic control of metasurfaces. This review article primarily focuses on elucidating the working mechanisms for the current dynamic modulation methods, namely electrical, thermal, optical, mechanical, and chemical modulations.

Electrically tunable metasurfaces primarily utilize materials that exhibit electrical response, such as liquid crystals, two-dimensional materials, and electrochromic materials, to change the refractive index and the dimensions of structural units, thereby achieving responsive tuning. By combining metasurfaces with thermally responsive materials such as semiconductors, transparent conductive oxides, and phase-change materials, dynamic thermal tuning of metasurfaces can be realized based on mechanisms such as thermo-optic effects, carrier modulation, and phase change. Optical pumping allows for modulation at picosecond and even femtosecond timescales. Optically tunable metasurfaces can also rely on photothermal effects and the phase change of materials. The photothermal effect induced by high-energy lasers could enable to locally heat the material, leading to a phase change and modulation of the refractive index. This tuning of the refractive index gives rise to the adjusted functionality of the metasurfaces. Mechanical tuning involves dynamically controlling metasurfaces by changing the geometric shape of meta-atoms and/or the spacing between adjacent meta-atoms using mechanical force as an external excitation. This can be achieved through two approaches, namely microelectromechanical systems (MEMS) and flexible substrates. Chemical tuning involves altering the composition of materials constituting meta-atoms and changing the chemical properties of the surrounding medium. These changes in the chemical properties can cause variations in material optical parameters, such as refractive index and polarization, resulting in the tuning of the functionality of the metasurfaces.

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (62075093, 62211530039), the Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program (2017ZT07C071), the Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (JCYJ20220818100413030), and the Shenzhen Development and Reform Commission (XMHT20220114005)

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

<sup>2</sup>Shenzhen Engineering Research Center for High Resolution Light Field Display and Technology, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

\* E-mail: yjliu@sustech.edu.cn

Furthermore, this review article provides an overview of the applications of dynamic metasurfaces in imaging, displays, and light field modulation, shedding light on their significance and future prospects. In metalens-based imaging, the adjustable focal length undoubtedly adds more channels to imaging, hence greatly expanding the application range. Due to its compatibility with traditional electrical devices, electrically tunable metasurfaces are considered as one of the most promising pathways to achieve interactive holographic displays. Furthermore, the dynamic display of metasurface-based structural colors holds great potential for super-resolution display applications. Moreover, dynamic beam control plays an important role in various fields such as laser radar, optical communication, laser processing, and 3D printing.

In summary, the development of dynamically tunable metasurface devices aims to achieve fast response speeds, user-friendly tuning mechanisms, easy integration, and multiple functions in one device.

Wang J W, Li K, Cheng M, et al. Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230141; DOI: [10.12086/oe.2023.230141](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230141)