

光学学报

可调谐电磁超表面研究进展

郑皓天, 张松, 徐挺*

南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210033

摘要 超表面是由亚波长尺度的人工原子组成的二维平面超材料, 具有操纵电磁波属性的能力。超表面领域的快速发展催生了多种技术/功能器件, 包括超表面全息术、矢量涡旋光技术、超透镜、偏振转换器等。主动性超表面是指可以通过电、磁、光照、热、应力等外部刺激对超表面的结构、性质和功能进行灵活调控的超表面。近年来, 人们一直致力于研究基于多种调控技术的多功能可调谐超表面, 从而实现动态调控电磁波的目的。本文归纳总结了基于多种调控方法的可调谐超表面的研究进展, 主要包括基于液晶的可调谐超表面、基于相变材料的可调谐超表面和结构可重构型可调谐超表面, 并讨论了不同类型可调谐超表面的优势、面临的挑战以及未来的发展方向。

关键词 光学设计; 超表面; 可调性; 液晶; 相变材料; 微纳光子学

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222101

1 引言

超材料是通过微纳加工技术, 在天然材料表面或内部制造出周期性排列的亚波长尺度结构而形成的。超材料能够自由地调控光传播的相位、振幅、偏振等属性, 具有天然材料所不具备的光学性质, 例如负折射^[1-3], 可用于实现隐形^[4-7]和制作完美透镜^[8-10]等。然而, 三维超材料的高损耗、制造难度大、良率低等缺陷限制了其大规模生产, 从而限制了三维超材料的应用范围。近年来, 科学家将目光投向了二维平面超材料——超表面。与三维超材料相比, 超表面具有易于制造加工、低损耗、高集成度等优点。同时利用现有的较为成熟的光刻以及微纳加工技术, 在很多应用领域, 超表面可以代替需要更大体积的三维结构超材料, 具有更好的应用前景。二维超表面在偏振转换器^[11-14]、全息成像^[15-18]、光学神经网络以及光路由^[19]等领域的应用研究受到了广泛关注。

超表面的理论基础是 2011 年哈佛大学 Capasso 教授课题组^[20]提出的广义斯涅耳定律, 其核心原理是利用费马原理, 通过引入界面上的相位突变实现异常反射和异常折射, 如图 1(a) 所示。他们选取 8 个具有不同参数的 V 型金属纳米结构, 实现从 $0 \sim 2\pi$ 的相位覆盖, 从而实现了电磁波波前的灵活调控, 如图 1(b) 所示。自此, 具有不同功能的超表面应运而生。

被动超表面一经加工完成, 它的材料特性和几何结构便确定了, 无法通过外部条件进行更改。因此, 被

动超表面对电磁波的调控缺乏灵活性, 这个缺陷限制了超表面的应用。为了实现可调谐的功能, 科学家将具有不同功能的多种超表面集合到同一个超表面器件中, 并针对不同的功能设置不同的激励触发条件, 可以实现不同功能的灵活切换, 进而有效降低超表面的制作成本, 拓宽其应用范围。近年来, 人们致力于研究通过各种调控手段如压力、热量、电流、外界光照等, 获得具有多种功能的可调谐超表面, 从而自由而动态地操控电磁波。

目前, 可调谐超表面的工作原理主要分为两类: 一是基于活性材料的光学超表面^[21]。利用光电效应、载流子注入或热光效应, 通过调整热、电、光等外部条件, 调节超表面的组成材料如石墨烯^[22-25]、透明导电氧化物(TCO)^[26]、过渡金属硫化物、相变材料^[27-29]、液晶(LC)^[30-33]、铁电体^[34]等的光学特性。常用的活性材料是液晶和相变材料, 也是本文重点介绍的两种活性材料。二是通过机械驱动, 在不改变超表面材料性质的前提下, 重新配置组成超表面的微纳天线的几何形状或空间排列来调控超表面的光学响应, 如调节机械结构^[35-38]或通过柔性可拉伸材料的弹性形变^[39]来改变超表面的物理结构。

本文介绍了可调谐光学超表面的最新研究进展, 主要包括基于液晶的可调谐超表面、基于相变材料的可调谐超表面以及结构重构型可调谐超表面; 讨论了可调谐超表面的调制原理, 总结了不同类型的可调谐超表面的优缺点及其发展所面临的问题。

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-03-03; 录用日期: 2023-03-13; 网络首发日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(12274217)

通信作者: *xuting@nju.edu.cn

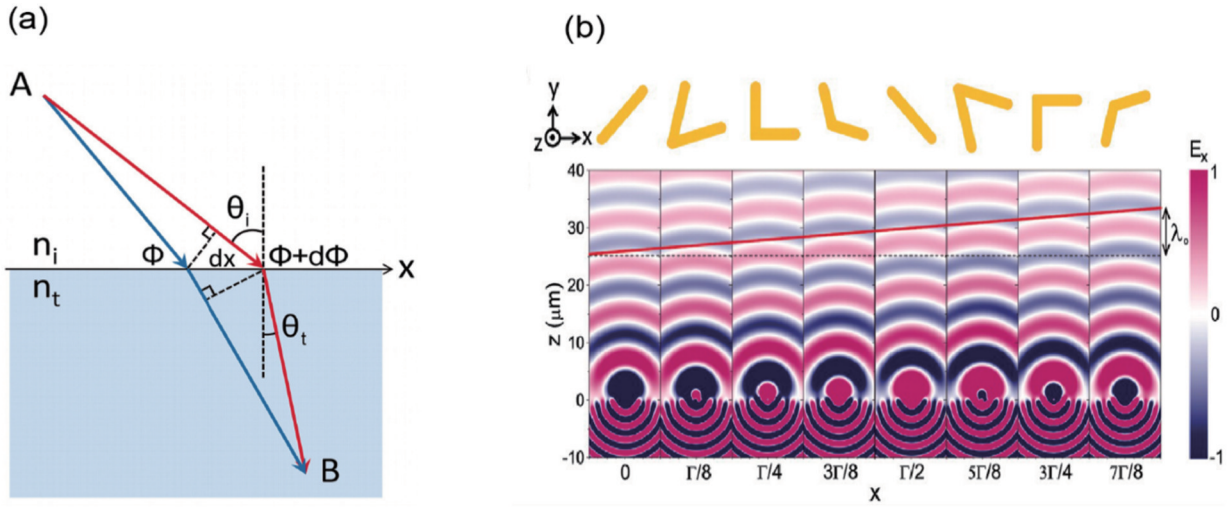


图 1 广义斯涅耳定律示意图^[20]。(a)费马原理示意图;(b)超表面波前调控示意图

Fig. 1 Schematic of the generalized Snell's law^[20]. (a) Schematic of Fermat principle; (b) schematic of wavefront shaping of metasurface

2 基于液晶的可调谐超表面

可调谐超表面的一个重要研究领域就是液晶。液晶是一种兼具液体流动性和晶体各向异性的特殊物质,并且液晶的光学各向异性可以通过电场、光照、热等外界因素进行调节。液晶分子的双折射效应能够将光学各向异性引入超表面,进而实现所需的功能。目前除了少数设计依赖于温度的变化进行调谐^[32,40],大多数情况下通过改变液晶所处的电磁环境来对超表面进行调谐,如外加电场^[41-44]或通过光照(一般是紫外光)来电诱导液晶分子进行重新排列^[45],进而改变超表面周围的电磁环境,实现调制效果。此外,如果将液晶与金属相结合,液晶的相变不仅可以改变材料的各向异性,还可以改变附近金属的等离子体共振频率。基

于此原理,科研人员制作了各种液晶等离子体混合器件^[46-49]。

按照液晶分子的有序性,可分为几种典型的液晶相,如胆甾相、近晶相、向列相等,其中胆甾相、近晶相、向列相的分子排列如图 2 所示^[50]。胆甾相呈现特殊的扭曲型特点,在垂直于螺旋轴的剖面内液晶分子的排列一维有序,而相邻剖面间分子指向彼此旋转一定的角度,沿层法线方向排列成螺旋结构。近晶相兼具指向有序性和平移有序性,分子呈层状排列,规整性接近晶体,具有二维有序性,常出现在较低的温度环境。向列相是目前最简单、常见的液晶相,也是应用最广泛的液晶相,其分子排列一维有序。向列相液晶由于分子取向排布规则且易于控制,成为与超表面结合的最佳选择。

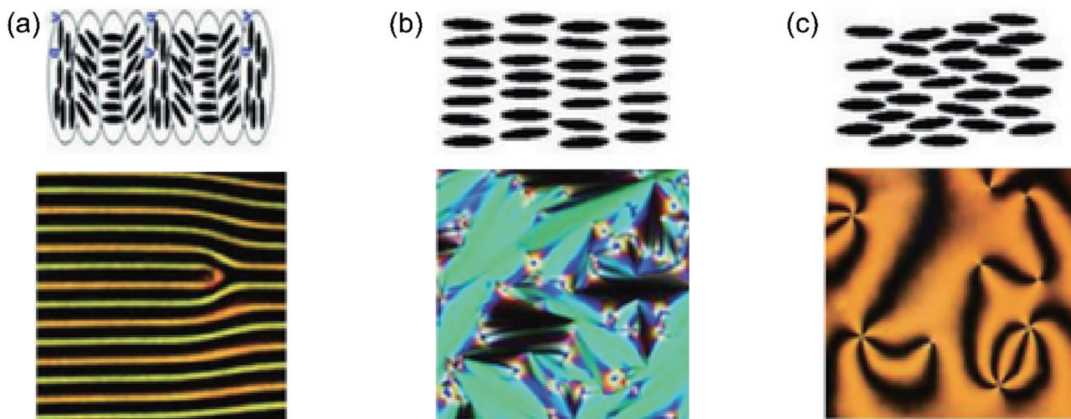


图 2 三种典型液晶相的分子排列示意图^[50]。(a)胆甾相液晶;(b)近晶相液晶;(c)向列相液晶

Fig. 2 Schematic of molecular arrangement for three typical LCs^[50]. (a) Cholesteric LC; (b) smectic LC; (c) nematic LC

通过电场控制液晶分子的倾角 θ 或方位角 φ 来获得特定的相位延迟,从而实现入射光场调控。当入射光的偏振方向与光轴成一定夹角时,此时的有效折射率为

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中: θ 为入射光的偏振方向与光轴之间的夹角; n_o 为液晶材料的寻常光折射率; n_e 为液晶材料的非寻常光

折射率。因此对于入射线偏振光,经过液晶层后的相位延迟为

$$\Gamma(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}(\theta) d = \frac{2\pi n_e n_o d}{\lambda \sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}, \quad (2)$$

式中: d 为液晶层的厚度; λ 为入射光在真空中的波长。这类因传播过程中的光程差引入的相位即为传播相位,也被称为“动力学相位”,它与传播介质的折射率和厚度密切相关。通过调节电压,可改变入射光经过液晶层后的相位延迟,进而实现对入射光波前的整形。基于此原理可以制成空间光调制器、光束偏转器^[33,51-52]等。

通过控制液晶指向矢在面内的排布方式,即方位角 φ ,也可以实现对液晶的动态调控。同一线偏光对于沿不同方位角排列的液晶畴的有效折射率也不同。当入射光偏振方向平行于液晶指向矢方向时,折射率为 n_e ;当偏振方向与指向矢方向垂直时,折射率为 n_o ;两者存在一定角度 φ 时,相应的有效双折射率为

$$\Delta n = n_{\text{eff}}(\varphi) - n_o = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \varphi + n_o^2 \cos^2 \varphi}} - n_o. \quad (3)$$

因此,入射光在不同液晶畴之间存在相位差 $\Delta\Gamma = 2\pi d \Delta n_{\text{eff}}/\lambda$ 。通过控制液晶盒内液晶畴的局域指示方向,即可实现对入射光的相位调制,这类方法也属于动力

学相位的范畴。除了上述对液晶分子倾角 θ 和方位角 φ 的调控,还可以通过调节温度来改变介质超表面上液晶的各向异性以实现温控激光转向^[32],或通过机械拉伸来改变纳米砖的排列周期^[53]以调谐液晶的各向异性。

2019年, Li等^[33]设计了由包覆在液晶中的 TiO₂ 纳米天线阵列构成的超表面光束偏折器。他们制造了包括 28 个单独可寻址电极的器件,可以独立控制 28 个电极的电位,进而实现对入射光波前的整形。当电极处于相同电位时,入射光束直接穿过器件;当相邻电极存在电位差时,对应液晶层的液晶分子发生旋转,产生相位梯度,从而导致光束发生偏折,如图 3(a)所示。这种器件可以在超过 35% 的效率下,使光束产生 11° 的偏转。2021年, Shen等^[54]设计了图 3(b)所示的双焦透镜结构。该双焦透镜由顶部的衬底、中间的液晶层及底部的介质超表面构成,衬底以及超表面上各覆盖一层对准层,对准层为中间的液晶层提供了均匀的预对准,保证了对液晶倾角 θ 的精确控制。衬底以及超表面具有导电性,可以通过外加偏置电压调控液晶分子的方向。如此,可以电调控入射光的波前,从而实现入射平行光的电控聚焦,但是无法实现对液晶分子倾角的连续调控,因此只能用于外加偏置电压 ON 状态以及无偏置电压 OFF 状态下的双焦透镜的制作。在

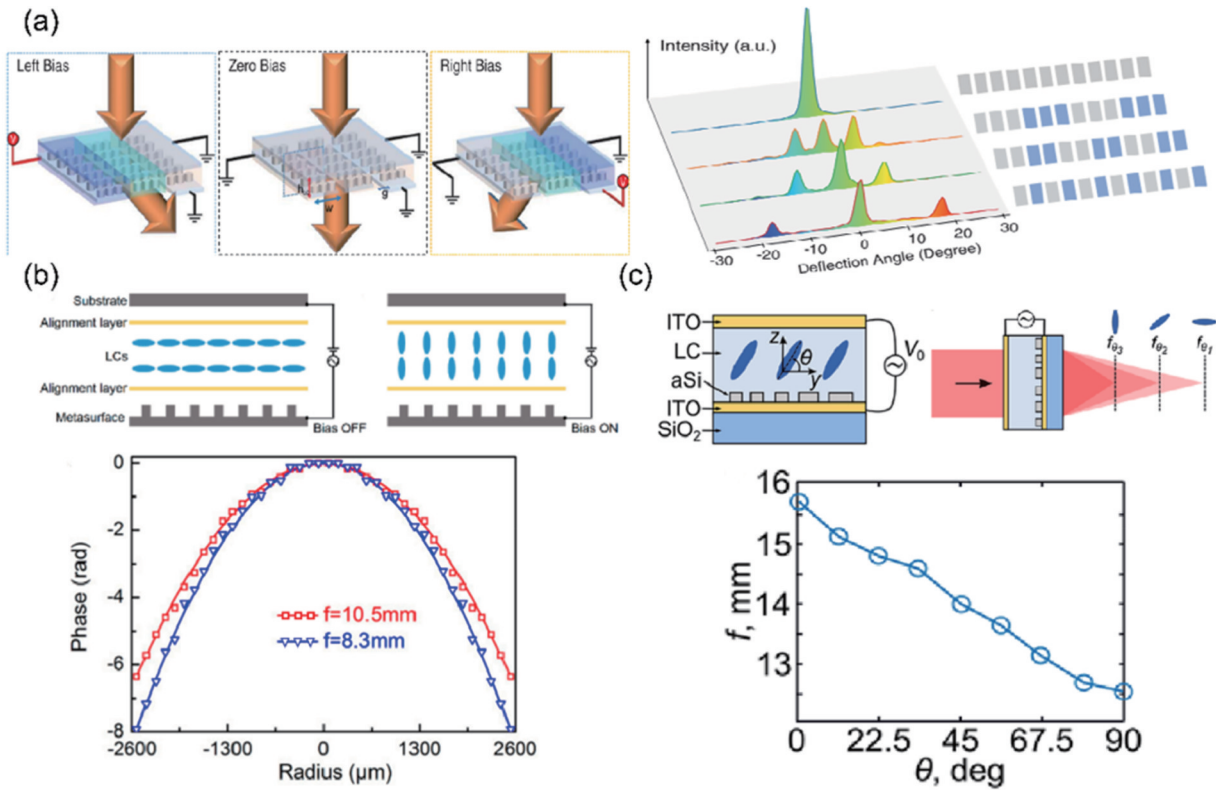


图 3 利用液晶可调谐超表面实现光束偏转和变焦透镜。(a)基于液晶的超表面光束偏折器^[33];(b)基于液晶的可调控双焦透镜^[54];
(c)基于液晶的连续可调变焦超透镜^[55]
Fig. 3 LC based tunable metasurface for beam steering and zoom lens. (a) LC based metasurface for beam steering^[33]; (b) LC based tunable bifocal lens^[54]; (c) LC based metalens with a continuously tunable focal length^[55]

不施加偏置电压和施加偏置电压的情况下超透镜的焦距分别为 10.5 mm 和 8.3 mm。为了实现对一定范围焦距的连续控制,2021 年 Bosch 等^[55]仿真设计了一种封装在电偏压液晶层中的超薄变焦超透镜。与 Shen 等^[54]的工作不同,Bosch 等^[55]设计的变焦透镜可以实现液晶倾角 θ 的连续变化,进而实现了一定范围内的连续变焦,焦距和液晶分子倾角 θ 的关系如图 3(c) 所示。

将液晶和金属材料结合,可以调节金属超表面的等离子体共振。基于这个原理,研究人员设计了多种主动式光调制器,能够获得从可见光到太赫兹频段的可调谐性^[48,56-57]。2017 年,Xie 等^[58]使用与向列相液晶集成的铝光栅制成了电调动态等离子体滤光片,如图 4(a) 所示。通过改变外加电压,能够改变液晶分子的取向:当没有外加电压时,传输模式为 TM 模式;当施 4 V 的电压时,传输模式变为 TE 模式。不同的传输模式会产生不同的颜色,基于这种工作原理可以实现颜色的动态可调性。2005 年,Kossyrev 等^[47]设计了由嵌入到液晶层中的横向六边形金纳米点阵列组成的等离

子体超表面,如图 4(b) 所示。吸收光谱出现两个峰值,分别对应于横向和纵向等离体模式。当没有外加电压时,液晶分子垂直分布;当有外部偏置电压时,液晶分子平行于液晶单元表面,通过调节偏置电压实现了对液晶分子倾角 θ 的调节,从而改变了金纳米点阵列周围环境的有效折射率,实现了两个吸收峰朝不同方向的移动。2007 年,Zhao 等^[59]将液晶与开口谐振环(SRR)相结合,制作了工作在微波波段的电控负磁导率超材料,如图 4(c) 所示。通过调节电压,可以更改器件的共振频率:当电场强度为 0 时,其共振频率为 11.08 GHz;当电场强度达到 0.28 V/ μm 时,共振频率达到最小值,为 10.87 GHz,最大偏移为 210 MHz;继续增加电场强度,由于液晶分子与电场强度几乎同向,器件共振频率偏移达到最大值,不会继续增加。2010 年,Kang 等^[45]将液晶与双开口谐振环(DSRR)结合,通过紫外线照射调控液晶分子的方位角,实现了对器件共振频率的控制,如图 4(d) 所示。该光控光学开关可以在 60 s 内实现共振频率在 1200~1650 nm 范围内的调节。

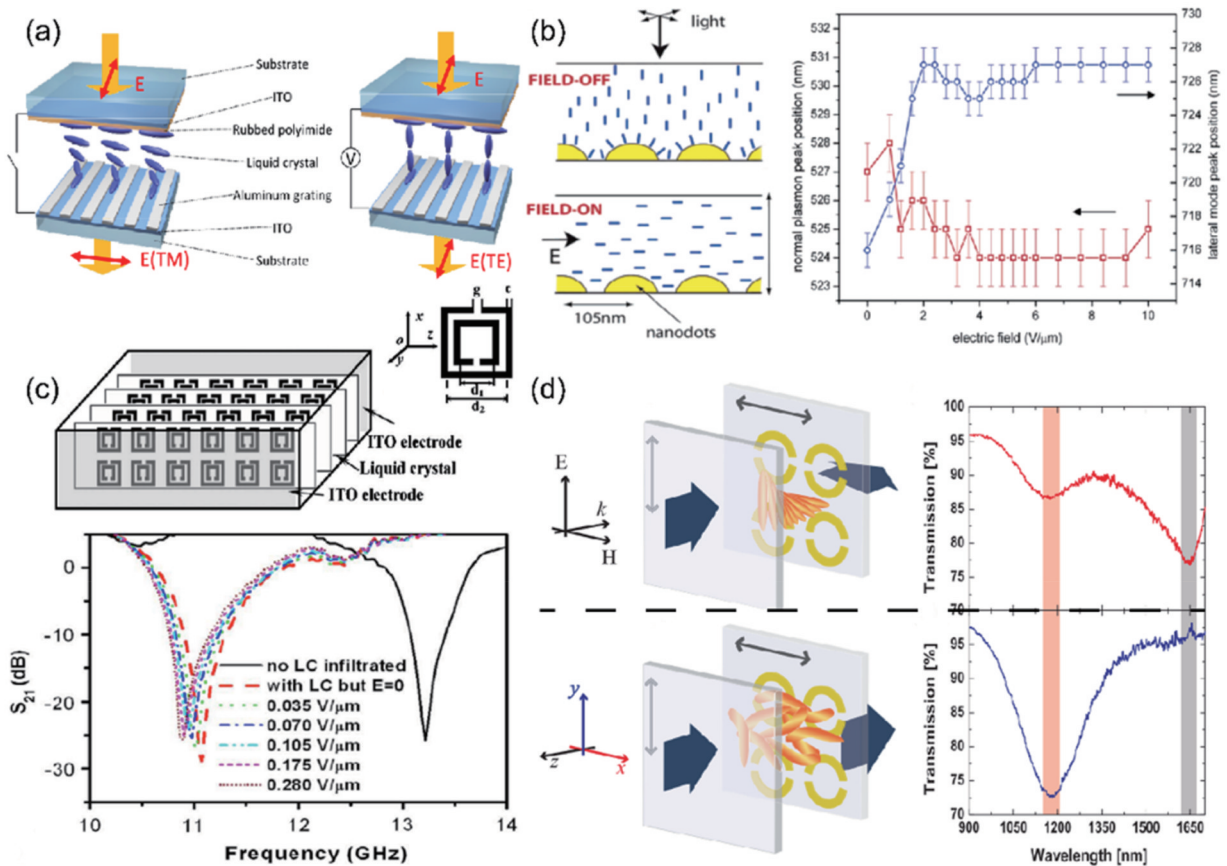


图 4 液晶等离子体混合器件。(a)电可调等离子体滤色器^[58]; (b)液晶矩阵中的六边形金纳米点阵列^[47]; (c)基于液晶的电可调负磁导率超表面^[59]; (d)基于液晶的光控超表面开关^[45]

Fig. 4 LC-plasmon hybrid device. (a) Electrically tuned dynamic plasma color filter^[58]; (b) a hexagonal gold nanodot array in a LC matrix^[47]; (c) LC-based electrically tunable negative permeability metasurface^[59]; (d) optically controlled LC-based metasurface switch^[45]

液晶等离子体混合器件具有优异的光调节性能,然而在可见光和近红外区域,金属超原子(如 SRR)与

液晶分子具有相似的尺寸,并且由于液晶锚定在金属表面,调谐效率降低。针对这个问题,科学家设计出多

种全介质液晶超表面。2015年, Sautter等^[40]首先提出一种可能的解决方案, 将液晶集成到由硅纳米盘阵列组成的全介质超表面上, 如图5(a)所示。通过电阻加热的方式将液晶从21℃时的向列相转变为62℃时的各向同性相, 从而实现超表面透射率的变化。实验结果显示: 在1642 nm处, 透射率变化最大, 从0.84变为0.16。2018年, Komar等^[32]使用电子束光刻和反应离子刻蚀技术在石英衬底上制造出不同半径的硅纳米盘阵列, 并将其用于构筑相位梯度超表面; 之后将液晶渗入超表面, 制造出基于可调谐液晶超表面的动态光束开关。将器件从室温加热到60℃, 液晶由向列相转变为各向同性相, 液晶分子折射率发生变化, 导致激光光束发生了12°的偏折, 如图5(b)所示。2018年, Wang

等^[60]设计了一种通过将液晶相位延迟器与介电超表面波片结合的高效矢量涡旋光束发生器, 光路图如图5(c)所示。通过改变施加在液晶相位延迟器上的交流电压, 可以对光路引入0~2π的可调相位延迟。因此, 它可以将氦氖激光器产生的线性偏振高斯光束转变为任何庞加莱球上的矢量涡旋光束。2022年, Badloe等^[61]将液晶和椭圆形超原子结合, 设计了一种电控全介质超表面, 如图5(d)所示, 并探索了该器件在加密以及全色反射显示器中的应用。该器件利用晶格诱导的准导模共振(qGMR)增强米氏散射的工作机制, 通过在液晶上施加不同的电压对入射光的偏振态进行调谐, 实现对椭圆形超原子散射的连续调控, 从而实现了器件从明亮鲜艳的颜色到黑色的调制。

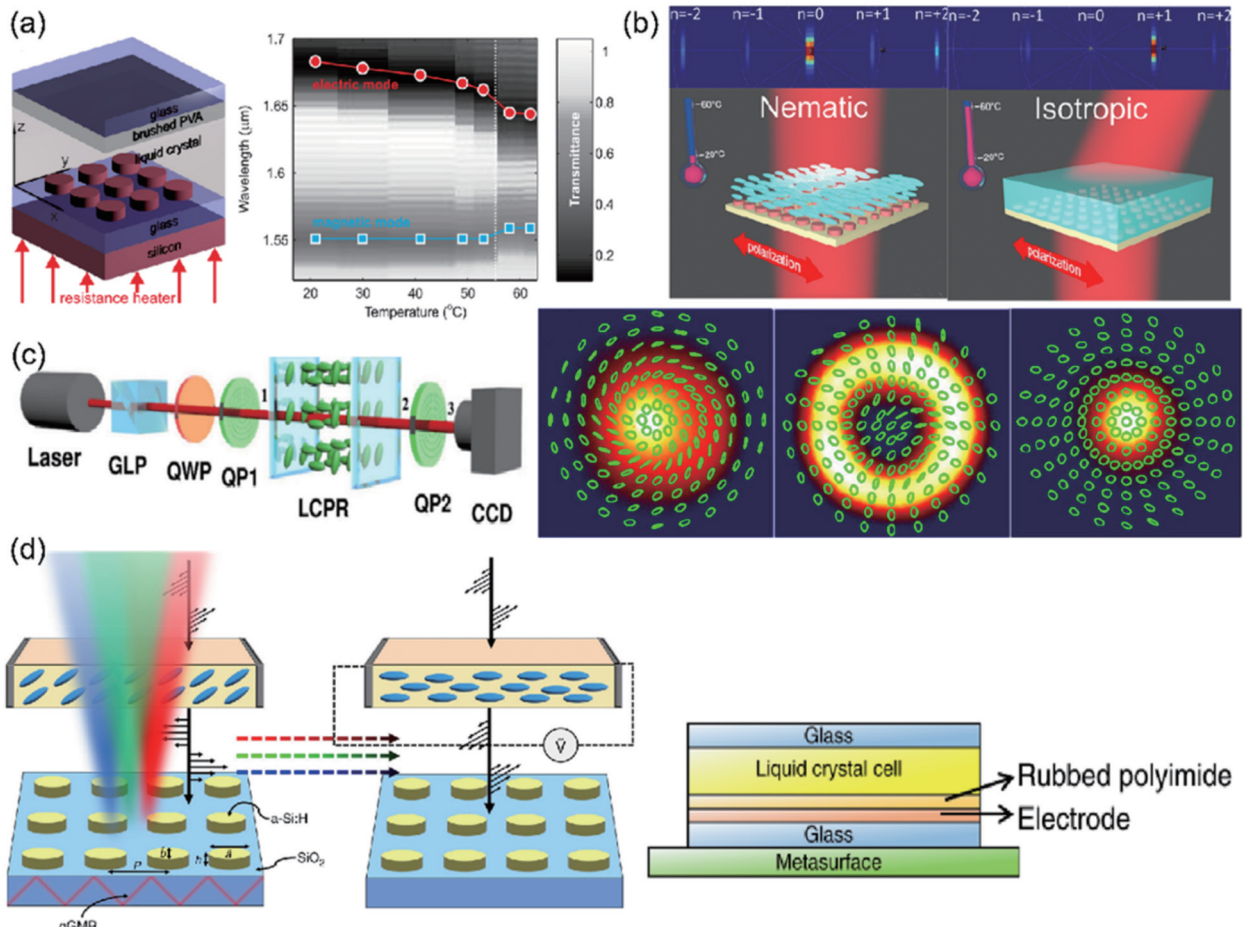


图5 全介质液晶超表面。(a)通过加热实现透射率调制^[40]; (b)基于温度调制的光束偏折^[32]; (c)矢量涡旋光束发生器^[60]; (d)电可调全色反射式显示器^[61]

Fig. 5 All dielectric LC-based metasurface. (a) Transmission modulation by heating^[40]; (b) thermally induced beam deflection^[32]; (c) vector vortex beam generator^[60]; (d) electrically tunable full-color reflective displays^[61]

基于液晶的可调谐超表面展现出卓越的性能, 但目前仍然面临两大挑战: 1) 空间上, 为了实现精确控制, 需要逐像素对液晶施加偏压, 由于施加偏压时产生条纹效应, 每个电极的间距需要限制在μm尺度, 这就制约了空间上的集成^[62]; 2) 时间上, 液晶切换时间在ms量级, 响应相对较慢。

3 基于相变材料的可调谐超表面

除了液晶外, 相变材料例如锗碲铋(GST)、二氧化钒(VO₂)、镓等都在可调谐超表面中得到了广泛的应用。这些相变材料可以通过施加热量^[63]、光照^[64]或电压^[65-66]来诱导相变, 从而利用其在结晶态和非晶态

的光学和电学特性上的巨大差异^[67]。结晶态和非晶态之间的相变是可逆的,这可以通过精细调谐输入能量脉冲来实现^[68-70]。一般来说,施加长电压脉冲局部加热非晶区,使其升温至玻璃化温度以上,可使非晶态材料再结晶。对低电阻的结晶状态施加功率更大的局部电压短脉冲,使结晶态材料熔化,并在快速降温淬火时形成非晶区,一般来说,冷却过程的降温速率需要达到 10^9 K/s。目前,相变材料已经在可重写光盘^[68,71-72]以及电子相变存储器^[73]中得到广泛的应用。

3.1 硫系材料

在众多相变材料中,以锗锑碲化[如 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)]为代表的硫系材料具有相变时间短、热稳定性强、不同相态之间的折射率和吸收率对比度大以及几乎完全可逆的相变特性。本节将集中介绍基于硫系材料的可调谐超表面的研究进展。

基于硫系材料的可调谐超表面大多数是将硫系玻璃材料用作金属超表面的周围电介质环境,利用其介电常数变化来调节金属产生的等离子体共振^[74-75]。2010年,Sámson等^[76]提出了被硫化镓镧(GLS)材料包覆的金制非对称开口环(ASR)结构。如图6(a)所示,该结构是通过在氮化硅膜上制作金等离子体超材料,并在金属结构上覆盖GLS硫系玻璃制成的。通过在金结构层和铂电极之间施加电压为45 V、持续时间为10 ms的电脉冲,可以使GLS层发生从非晶态到结晶态的相变,实现共振峰最大150 nm的蓝移。这种结构的GLS层从非晶态到结晶态的相变时间为50~100 ns。2013年,Gholipour等^[74]利用GST取代GLS,设计了一种全光双向开关,该开关由覆盖GST膜的金纳米结构组成,并在GST层顶部、GST与金结构层之间各有一层ZnS/SiO₂作为保护层。如图6(b)所示,通过改变外加电脉冲的持续时间和峰值幅度,实现了近红外波段共振峰200 nm的红移以及4 dB的调制深度,并且这种器件的功能层厚度只有175 nm,相较于Sámson等^[76]设计的结构厚度减少一半以上。此外,通过不同的超材料设计,这种全光调制的非易失性超表面可以工作在透明范围内硫系玻璃相变层的任何波段,大大拓展了使用范围。2015年,Titl等^[77]用铝代替金,通过在铝镜顶部的GST层上制造铝方形天线阵列,制备得到一种超表面,如图6(c)所示。这种超表面的制作工艺与CMOS加工技术完全兼容,有利于大规模的工业生产。通过加热将GST层从非晶态转变为结晶态时,由于GST结晶态和非晶态的折射率相差较大以及GST层中对共振模式的强限制,共振波长可以实现0.7 μm 的红移,并且绝对反射率变化了60%。2022年,Zhu等^[78]先在硅衬底上沉积一层金作为背面反射层,再在金层上制作金/GST纳米盘阵列,制成了金-GST-金三明治结构的带隙表面等离子体混合GST器件,如图6(d)所示。通过控制器件的温度来对GST的结晶程度进行调控,而GST材料不同的结晶程度对

应不同的复折射率,进而对二次谐波发生器所产生的二次谐波强度进行调制。器件在GST完全结晶和50%结晶态下产生的二次谐波强度分别是非晶态的100倍和50倍。此外,Zhu等^[78]还将此金-GST-金器件与非对称F-P结构的二次谐波发生器进行对比,发现二者在GST结晶态下的二次谐波共振波长大致相同,但是金-GST-金器件输出的二次谐波的强度约是非对称F-P结构的100倍。

以上的超表面都是以硫系玻璃材料为介质环境,利用其介电常数变化来调节金属产生的等离子体共振,但是这种超表面具有较强的损耗和较低的效率。为了克服上述缺点,科学家使用硫系玻璃材料代替金属超表面上的金属,制作出各种全介质超表面^[27,79-80]。2016年,Chu等^[27]利用GST棒制作了Dolmen状微纳结构单元:一根水平排列棒用作偶极天线,一对竖直排列棒用作四极天线,结构如图7(a)所示。当结构中的部分GST棒发生相变时,超表面的光学共振也会显著变化,从而实现对入射光的相位调控。另外,通过两种不同GST棒的组合,并改变交界处GST棒的相态,设计出动态梯度超表面,可以实现对垂直入射光的异常反射。同年,Karvounis等^[79]通过聚焦离子束在300 nm厚的非晶GST薄膜上制备750 nm周期的光栅,实现了在可见光和近红外波段对反射光最高7 dB以及对透射光最高-3 dB的对比度,结构如图7(b)所示。与GST相比, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ (GSST)具有较强的非易失调节能力、宽波段内低的光学损耗和大的可逆调节范围,使得相变材料中光与物质的相互作用显著增强,为超宽带谐振调谐提供了基础。2021年,Zhang等^[28]设计了基于GSST的可调谐非易失性超表面,超原子在GSST膜中图案化,以方形晶格排列,并放置在充当反射器的金属加热器上,如图7(c)所示。使用脉宽为5 μs 、幅度为20~23 V和脉宽为500 ms、幅度小于12 V的脉冲信号分别实现GSST非晶化和结晶化。该器件实现了从1190 nm至1680 nm的超宽带调谐,获得了超过400%的调制对比度。Zhang等^[28]还在此基础上进一步研究了可调相位梯度超表面,并实现了动态光束偏折。

3.2 二氧化钒

与硫系玻璃材料等非易失性相变材料相比,二氧化钒(VO_2)是一种在常温下具有类似半导体性质的相变材料。它在68 $^\circ\text{C}$ 的温度下由单斜晶体结构变为四方晶体结构(金红石结构),经历了从绝缘体到金属的转变,并且这种固-固相变过程是完全可逆的,但是如果如果没有恒定的热量供应,温度降低后它的结晶状态就无法维持。除了传统的热激发 VO_2 相变外,人们也可以通过电磁场^[81]、机械力^[82-83]、光^[84]等方式激发其相变。 VO_2 的低转变温度和易失性记忆(材料在撤销外界激励后会恢复到绝缘状态)为其与超表面结合提供了条件。

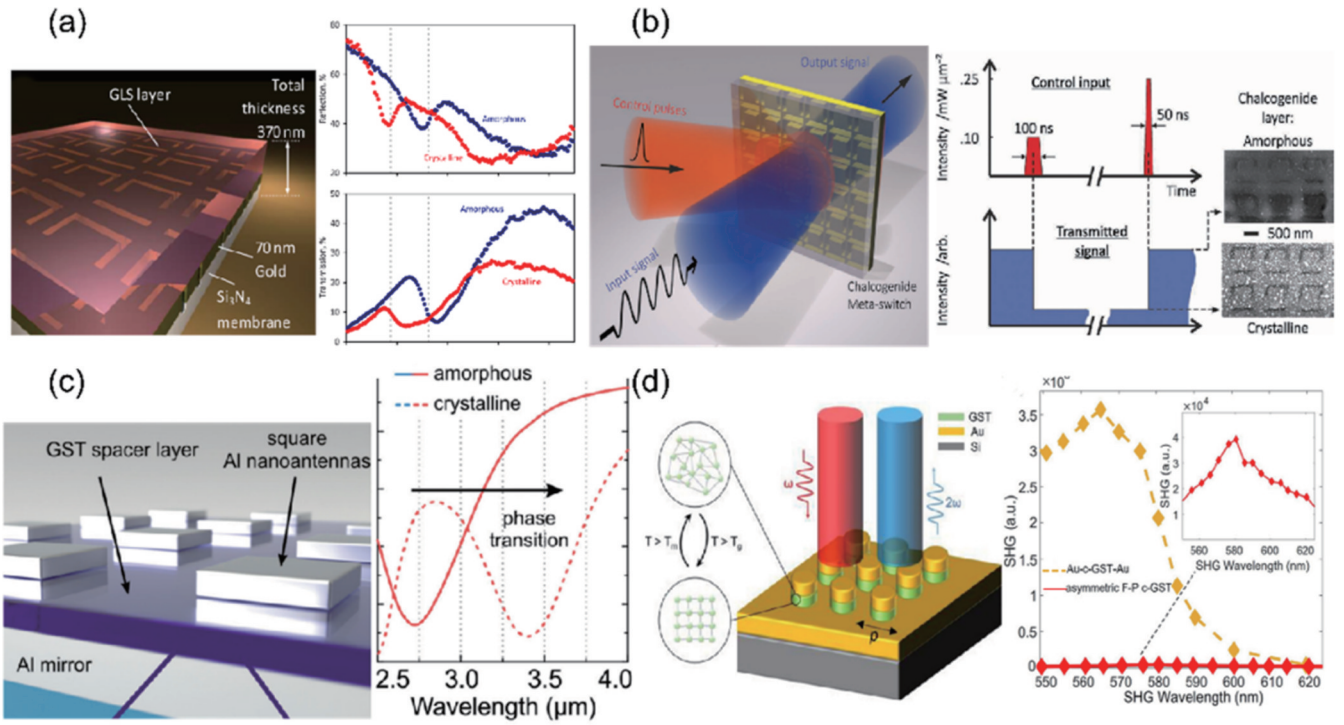


图 6 硫系玻璃等离子体混合器件。(a)超表面电光开关^[76]；(b)基于 GST 的双向全光开关^[74]；(c)基于 GST 的完美吸收器^[77]；(d)电可调二次谐波发生器^[78]

Fig. 6 Chalcogenide glass-plasmon hybrid device. (a) Metasurface electro-optic switch^[76]; (b) GST-based bidirectional, all-optical switch^[74]; (c) GST-based perfect absorber^[77]; (d) electrically tunable second-harmonic generator^[78]

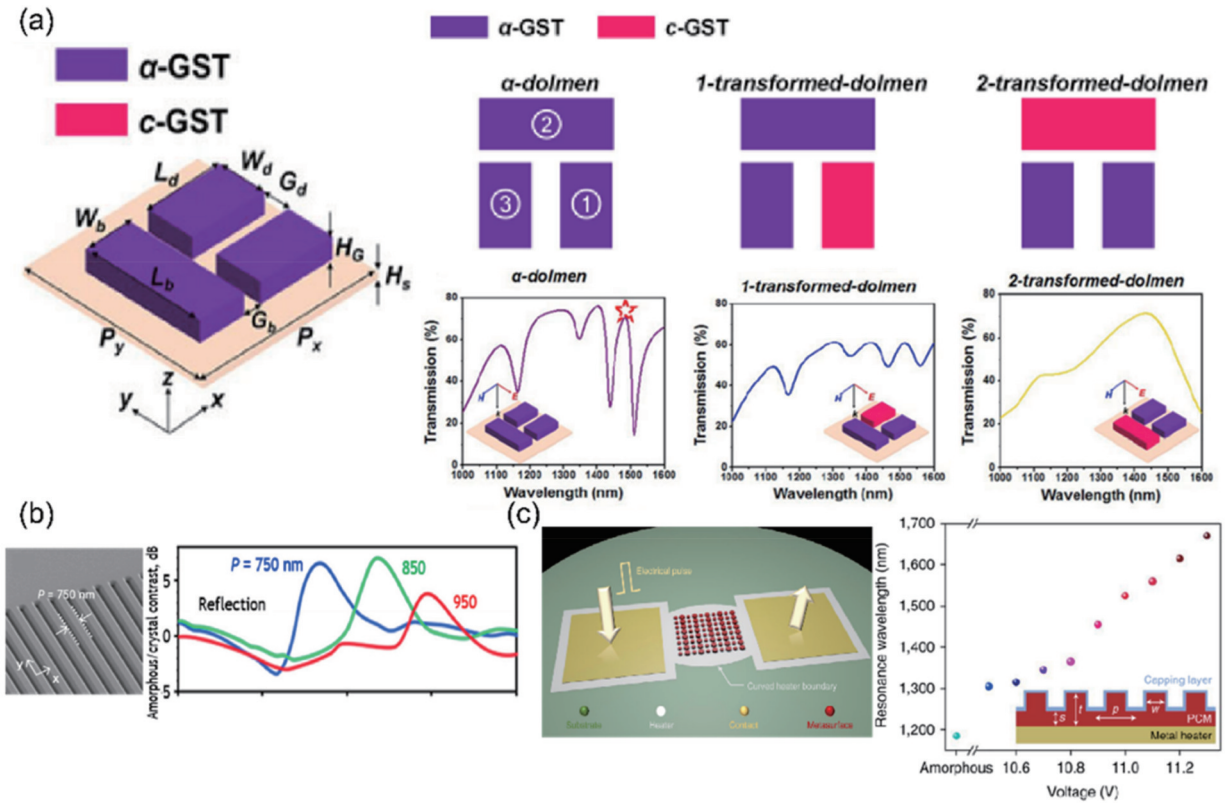


图 7 全介质硫系玻璃超表面。(a) Dolmen 型超原子结构^[27]；(b)平面介电纳米光栅超表面^[79]；(c)基于 GSST 的可重构非易失性超表面^[28]

Fig. 7 All-dielectric chalcogenide glass metasurface. (a) Dolmen metamolecule structure^[27]; (b) planar dielectric nano-grating metasurface^[79]; (c) GSST-based reconfigurable non-volatile metasurface^[28]

2014年,Goldflam等^[85]通过在VO₂薄膜上制造开口环谐振器并用电介质包覆,制作了一种通过电压调节的太赫兹VO₂记忆超表面,结构如图8(a)所示。通过对离子凝胶施加电压以触发VO₂层的绝缘体-金属相变(IMT)来实现共振切换。施加正电压和负电压可以将VO₂切换到绝缘/导电状态,从而选择性地将其谐振调到接通/断开状态。2016年,Hashemi等^[86]将一层200 nm厚的VO₂薄膜夹在十字形金孔结构与轻掺杂硅衬底之间,形成一种三明治结构,实现了电控光束偏转超表面,其结构如图8(b)所示。当入射光频率为100 GHz时,通过对超表面施加13 mA的电流,可以实

现从100 GHz到92 GHz的谐振频率变化和59°的相位变化以及对透射光50%的强度调制。该结构还可以实现对光束波前的调节,导致入射光束发生最大44°偏转。2022年,Ge等^[87]设计了基于VO₂的纳米层太赫兹超表面,该器件可以实现四波段近完美吸收和透射之间的切换。该器件由上层的石墨烯十字形谐振器阵列(GCS)和下层的石墨烯椭圆纳米盘阵列(GED)组成,如图8(c)所示。通过调整顶部和底部栅极的外部栅极电压V_{g1}和V_{g2},能够单独微调GCS和GED结构的费米能级,同时调节VO₂的相态,实现超表面由四通道近完美吸收到透射的功能切换。

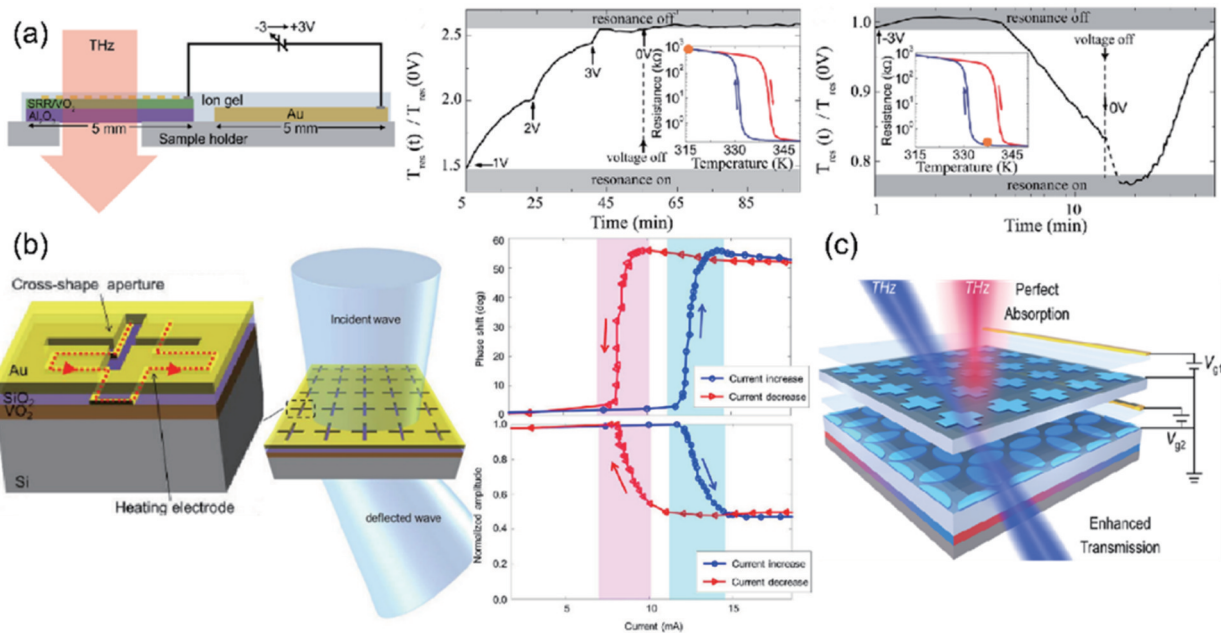


图8 电控VO₂超表面。(a)太赫兹VO₂记忆超表面^[85];(b)基于VO₂的超表面的光束偏折^[86];(c)基于VO₂的太赫兹可切换超表面^[87]
Fig. 8 Electrically controlled VO₂ metasurface; (a) Terahertz VO₂ memory metasurface^[85]; (b) beam deflection through VO₂-based metasurface^[86]; (c) VO₂-based switchable terahertz metasurface^[87]

除了通过施加电压/电流进行调节,也可以通过控制VO₂材料的温度来控制VO₂的相变,实现对超表面的调谐。2009年,Dicken等^[88]设计了工作在近红外波段的基于VO₂的可调谐超表面,他们在VO₂薄膜上面通过电子束光刻制造了银制开口环谐振器(SRR),又通过反应离子刻蚀去掉多余的VO₂薄膜,从而产生自对准Ag/VO₂混合SRR,并将其作为超表面的结构单元,结构如图9(a)所示。Dicken等^[88]通过对SRR排列方式进行不同组合,调控SRR之间的耦合,制作了多种不同超表面器件并实验测量了与器件温度有关的反射光谱,实现了最大110 nm的反射光谱谐振峰移动。2012年,Kats等^[89]将包覆有180 nm厚VO₂薄膜的蓝宝石衬底置于温度控制台上,制备了中红外波段的温控超薄完美吸收器,吸收器的结构如图9(b)所示。该吸收器能够对11.6 μm的入射波实现20%~99.75%的大可调范围的吸收。2013年,他们在蓝宝石衬底上沉积VO₂薄膜,并在VO₂薄膜上制造Y型金制天线^[90],结构如图9(c)所示,通过改变VO₂薄膜的温度来控制

VO₂的相变,进而能够使谐振峰产生λ/10的移动。2017年,Zhu等^[91]将VO₂贴片放置在金蝴蝶结天线的馈电间隙中,实现了在近红外波段33%的电调制深度和高达360 nm的调谐范围,其结构如图9(d)所示。他们在设计器件时最小化了必须加热的结构的体积并提高了集成度,因此与基于相变材料薄膜的器件相比,该器件能够实现更快的调制速度和更精确的空间控制,为光波段的信号处理、存储、安全提供了新的思路。2018年,Shu等^[92]通过在VO₂介质层上排列周期性银纳米盘阵列,制作了一种反射式可调谐光学超表面,通过调整阵列的空间周期性和银纳米盘的直径,可以在整个可见光谱中获得各种颜色。此外,使用VO₂的绝缘体-金属相变,可以通过改变温度来动态调节颜色。Shu等^[92]通过将器件从20 °C升温到80 °C,实现了由绿色到黄色的变色效果,如图9(e)所示。基于VO₂相变的动态颜色调控在显示和成像技术等方面具有潜在的应用价值,具有多功能、高灵活性和高效率的显著优势。

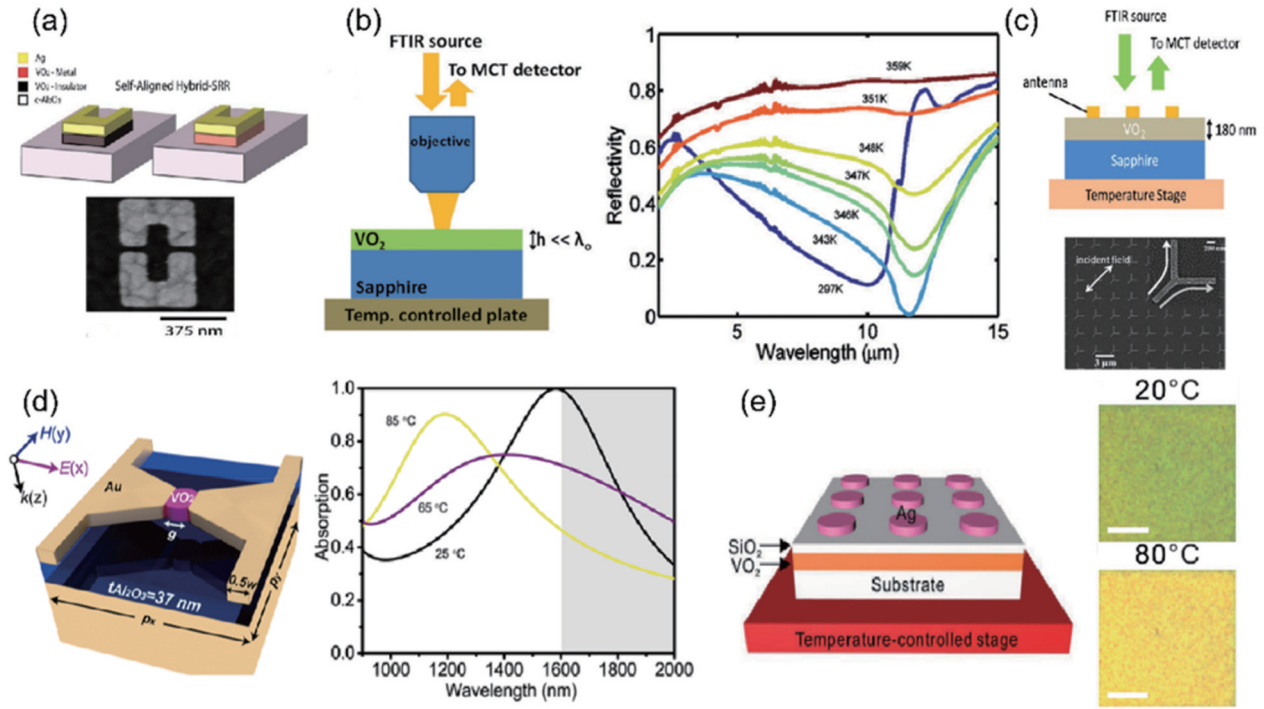


图9 温控VO₂超表面。(a)自对准Ag/VO₂超表面^[88];(b)基于VO₂的完美吸收器^[89];(c)中红外等离子体纳米天线的温度调谐^[90];(d)基于VO₂的可调谐吸收器^[91];(e)基于VO₂的等离子体颜色发生器^[92]

Fig. 9 Thermally-controlled VO₂ metasurface. (a) Self-aligned Ag/VO₂ metasurface^[88]; (b) VO₂-based perfect absorber^[89]; (c) thermal tuning of mid-infrared plasmonic antenna arrays^[90]; (d) VO₂-based tunable absorber^[91]; (e) VO₂-based plasmonic color generator^[92]

将相变材料与超表面相结合是一个新兴的领域,可以提供诸如光调制、热调制以及电调制等高对比度的调制手段,但是在调制速度上,相变材料还有很大的提升空间。

4 结构重构型可调谐超表面

液晶和相变材料都属于活性材料。对于给定的材料成分,超表面的光学响应与结构特性密切相关^[93]。换言之,改变超原子的形状或空间排布方式是调节超表面光学响应的有力手段。因此,除了基于活性材料的光学超表面,还可以通过机械驱动,在不改变超表面组成材料光学性质的前提下,通过重新配置组成超表面的微纳天线的几何形状和空间排列方式来调制超表面的光学响应特性。目前,结构重构型可调谐超表面主要分为基于柔性可拉伸材料的可调谐超表面^[94]和基于微机电系统(MEMS)的可调谐超表面^[35-38]。

4.1 柔性可拉伸材料

近年来,人们通过柔性可拉伸衬底的弹性形变,在基于柔性材料的超表面观察到明显的响应调制。聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种硅基有机聚合物,因具有低光学损耗、高化学稳定性以及优异延展性,被广泛用作结构重构型可调谐超表面的衬底。PDMS弹性衬底和超表面结合,在调节器件的散射特性^[95-96]、手性^[97]、结构色^[98-99]、超透镜^[100-101]等领域得到了广泛应用。

利用金属纳米粒子和PDMS复合结构实现光谱动态调谐是实现结构色较为容易的方法。在外力作用下,PDMS柔性衬底上的金属纳米粒子的结构阵列周期发生变化,根据相位匹配条件,这会导致等离子体共振波长发生变化,利用这个原理可以产生结构色。相对于早期的介质-PDMS器件,此方法不需要厚的、高深宽比的介电纳米结构或特定的入射角来产生结构色。此外,它还可以通过改变不同入射角下的周期来实现大的颜色范围。2017年,Song等^[98]将PDMS柔性衬底与铝纳米粒子结合,制作了一种可调控的超表面结构色器件,器件结构如图10(a)所示。通过对PDMS柔性衬底进行不同程度的拉伸来引起结构周期变化,能够实现从绿色到紫红色的颜色变化。同年,Tseng等^[99]也利用类似的方法制作出全色谱可拉伸等离子体器件,能够通过不同方向的拉伸实现颜色变化。此外,他们还通过在PDMS柔性衬底上制作出3种不同周期的等离子体纳米粒子阵列,设计了一种动态图案选择器,如图10(b)所示。在窄带光源照射下,只有满足等离子体共振条件的图案才能被显示。3种不同周期的等离子体纳米粒子对应着3种不同的等离子体共振波长,通过水平/竖直拉伸,可以动态调节不同图案对应的等离子体共振波长,进而实现对字母O、W和L这3种图案的选择性显示。柔性可拉伸材料还在可调谐超透镜中发挥重要的作用,例如2016年Kamali等^[100]将氧化铝薄膜上具有高折射率的非晶硅方形纳

米柱封装在低折射率的 PDMS 层中,制成了拉伸可调谐超透镜,其结构如图 10(c)所示。对 PDMS 拉伸之后,其长和宽均会变为原来的 $(1+\epsilon)$ 倍,厚度会变成原

来的 $1/(1+\epsilon)^2$,从而使焦距变为原来的 $(1+\epsilon)^2$ 倍。通过对方形纳米柱几何结构的精细设计,最终使超透镜实现了 600~1400 μm 的大范围变焦。

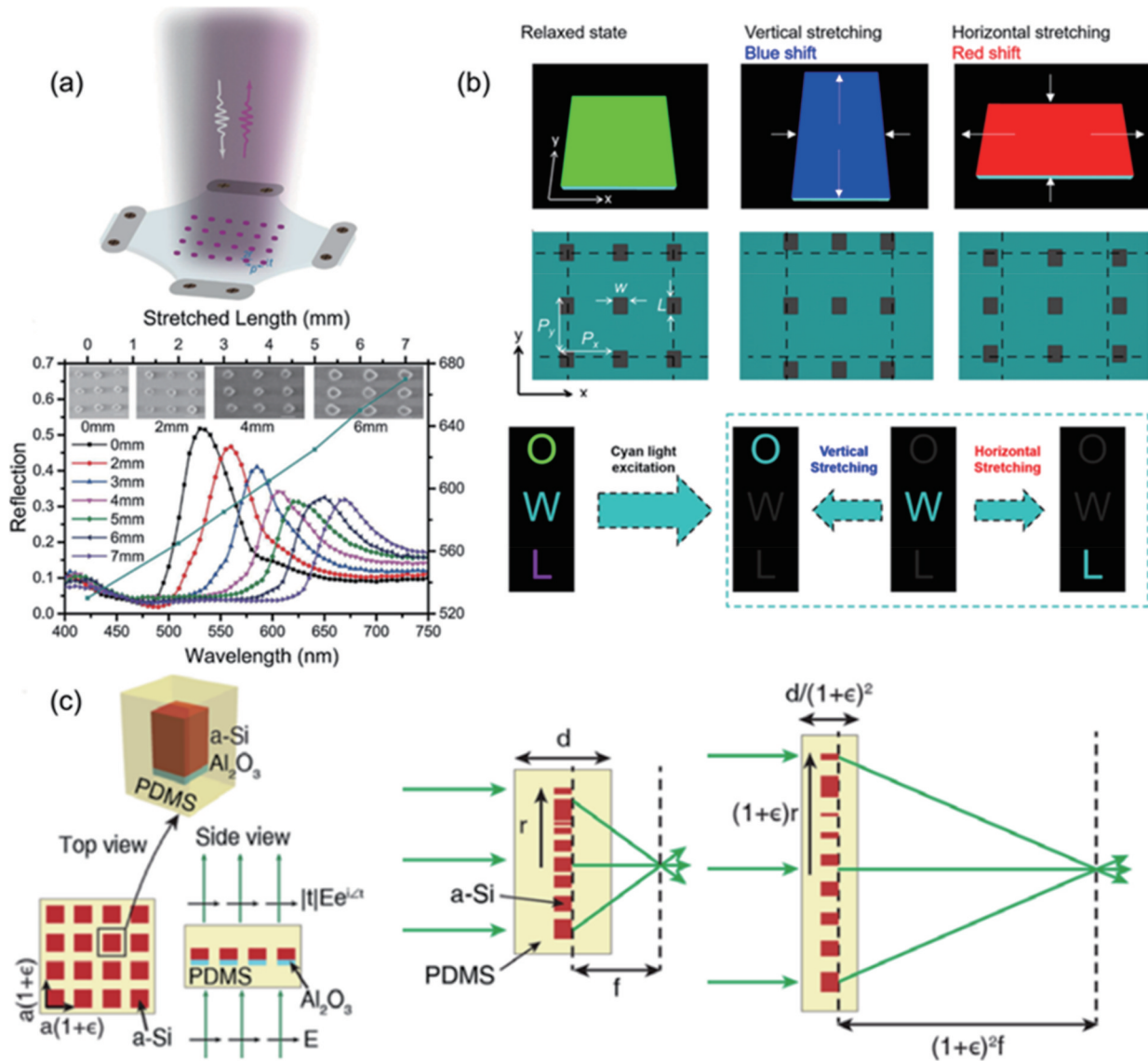


图 10 基于柔性可拉伸材料的可调谐超表面。(a)基于 PDMS 的可调结构色器件^[98]; (b)全谱可拉伸等离子体器件^[99]; (c)可调谐弹性介质变焦透镜^[100]

Fig. 10 Flexible and stretchable materials-based tunable metasurface. (a) PDMS-based tunable structural color metasurface^[98]; (b) full-spectrum stretchable plasmonic device^[99]; (c) tunable elastic dielectric zoom lens^[100]

通过机械拉伸的方式调控超表面的光学响应是目前最简单的调控方式之一,其设计和加工都相对简单。然而,其调制速度较慢,对周围的环境(比如温度)变化较为敏感,且与 CMOS 工艺不兼容。同时,只能通过柔性材料对超表面整体的单元结构分布进行调制,不能独立地调控单个单元结构。

4.2 微机电系统

微机电系统(MEMS)是在微电子技术基础上发展起来的,融合了光刻、刻蚀、薄膜制造和精密机械加工等技术,其单元尺寸一般在 μm 量级。基于微机电系统的超表面具有移动迅速、波长和偏振无关以及低

光学损耗等优势,已经被用来制作可调谐垂直腔面发射激光器^[102-103]以及空间光调制器^[104-105]等。图 11(a)是 Zhao 等^[106]设计的一种基于 MEMS 的透射型太赫兹超表面波片,它是由一系列悬浮的悬臂阵列、电容垫以及连接线组成的。当平行于悬臂的 X 偏振光入射到单元结构上时,其可以看作一个二阶 LC 谐振器;当 Y 偏振光入射时,则不会发生谐振现象。施加电压时,悬臂与基底之间的静电力会使悬臂向下弯曲,从而改变 X 方向的透射振幅和相位,而 Y 方向的透射振幅和相位不会发生变化。当施加电压达到临界值 38 V 时,悬臂的一端会和电容垫贴合在一起,从而达到最大的调制幅

度。Zhao 等^[106]在实验中实现了 0.81~1.04 THz 的谐振峰变化,以及最大 34% 的透射率变化和最大 85° 的相位变化,从而实现了透射光从圆偏振光到线偏振光的转变。MEMS 也可以集成到超透镜上,从而实现可调谐超透镜。2018 年 Roy 等^[37]利用 MEMS 控制内轴和外轴的转动,实现了超透镜在两个方向上达 ±9° 的转动,进而实现了超透镜焦点在空间中位置的动态调控,如图 11(b)所示。实验结果显示:当超透镜水平放置时,光线将聚焦在超透镜法向位置;当超透镜转动 1° 和 2.5° 时,聚焦位置将分别转动 2.7° 和 7.3°。

此外,利用 MEMS 独立地调节多个相互平行的超表面之间的距离可以制成焦距可变的超透镜。2018 年,Arbabi 等^[107]将玻璃衬底上固定的超表面和氮化硅衬底上可移动的超表面结合,通过 MEMS 的电驱动改

变两个超表面的距离,制成了变焦透镜,其结构如图 11(c)所示。通过使用 MEMS 调节两个超表面的间距,就可以实现焦距从 565 μm 到 629 μm 的大幅度调控。利用阿尔瓦雷斯透镜也可以制备变焦透镜。阿尔瓦雷斯透镜一般由一对光轴相互垂直的互补型立方相分布的折射型光学元件组成。通过横向移动两个光学元件可以实现对屈光度的调节,由此产生的焦距变化与横向位移成反比。阿尔瓦雷斯透镜具有结构简单、屈光度可以连续线性变化、易于控制等优点。2020 年,Han 等^[108]将一对阿尔瓦雷斯超透镜组装到 MEMS 制动器中,以产生调焦所需的横向位移,其结构如图 11(d)所示。通过在 MEMS 上施加 -20~20 V 的直流电压,获得 6.3 μm 的横向调节范围,对应的超透镜焦距调节范围为 -34~34 μm。

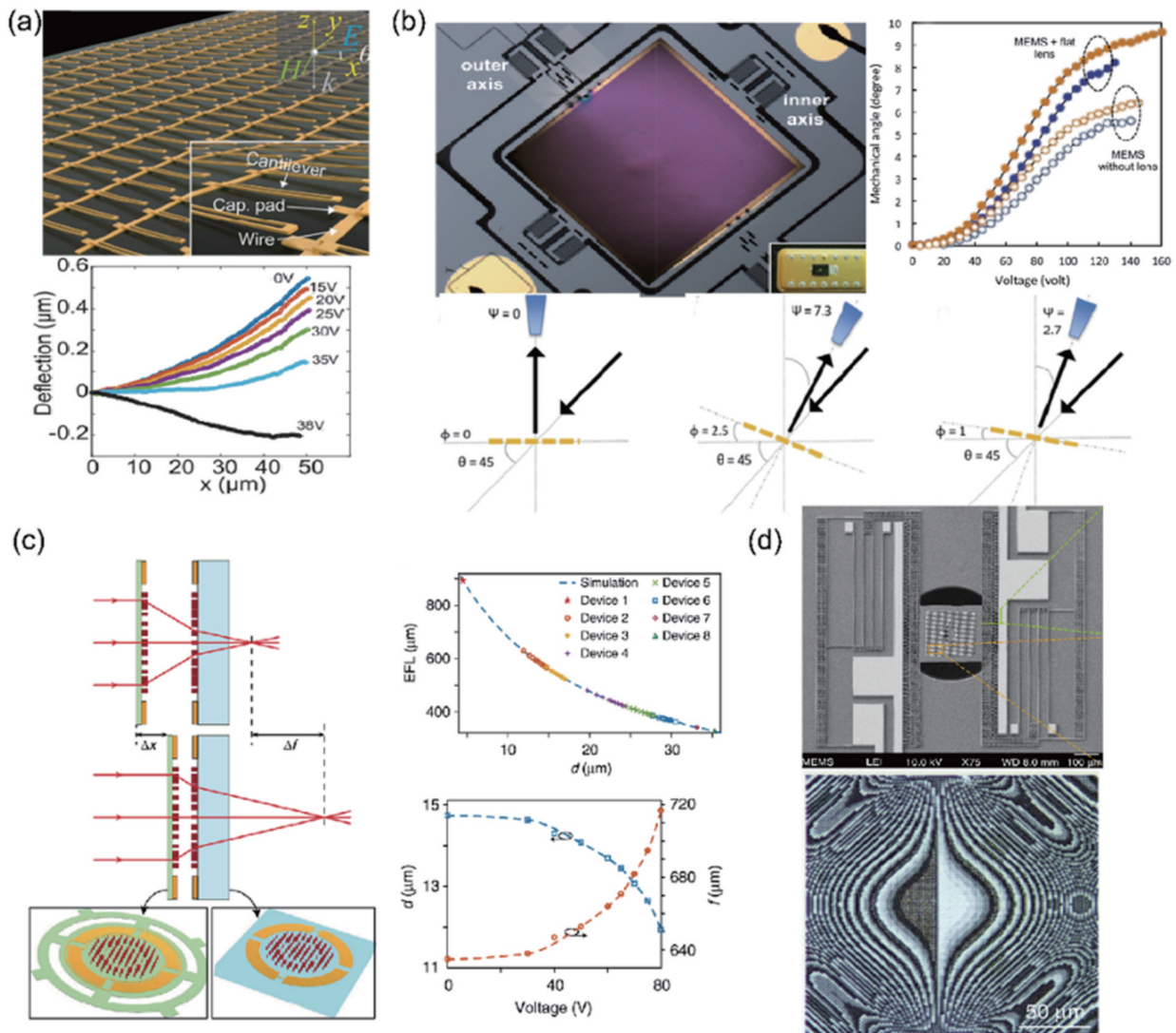


图 11 基于 MEMS 的可调节超表面示例 1。(a) 基于 MEMS 的超表面动态波片^[106]; (b) 基于 MEMS 的动态超表面透镜^[37]; (c) 基于 MEMS 的介质变焦透镜^[107]; (d) 基于 MEMS 的超表面阿尔瓦雷斯透镜^[108]

Fig. 11 Example 1 of MEMS-based tunable metasurface. (a) MEMS-based metasurface dynamic waveplate^[106]; (b) MEMS-based dynamic metasurface lens^[37]; (c) MEMS-based dielectric zoom lens^[107]; (d) MEMS-actuated metasurface Alvarez lens^[108]

2012年,Zhu等^[109]设计了一种基于MEMS的具有光学可调各向异性的太赫兹超表面。他们设计了马耳他十字图案形的超材料阵列,通过基于MEMS的驱动器移动十字的一根梁来破坏十字的对称性,从而激活偏振法诺模式,使得超表面由各向同性状态转变为各向异性状态,如图12(a)所示。该器件可以实现30°相位变化幅度以及高达120%的透射率调制,他们的工作为太赫兹可调波片、滤波器和偏振片设计提供了新的思路。2014年,Lin等^[110]提出一种具有平面外可移动微结构的镜状T型太赫兹超表面,如图12(b)所示。该器件的谐振频率可以通过静电力或液体力来主动控制。当偏压小于临界电压(12 V)时,随着偏压增大,悬臂会朝向衬底发生连续曲折,从而控制器件的谐振频率发生偏移,且通过静电力的调节可以使TM偏振光

实现最大0.27 THz、TE偏振光最大0.50 THz的调谐;当偏压达到临界电压(12 V)时,悬臂发生折断,此时可以通过在器件表面滴加不同种类的液体,利用液体力来主动控制器件的谐振频率,通过液体力的调节可以实现最大0.30 THz的调谐范围。2022年,Meng等^[111]通过将玻璃衬底上的超表面和安装在MEMS上的可移动镜面组合,设计了一种基于MEMS的超表面动态可调波片,如图12(c)所示。通过施加电压,可以调节镜面和超表面间的距离,进而对反射波实现连续可调的调控。Meng等^[111]设计的动态可调波片具有高偏振转换效率(约75%)、宽带响应(在800 nm的中心波长附近约100 nm)、小于0.4 ms的响应时间和全范围双折射控制。

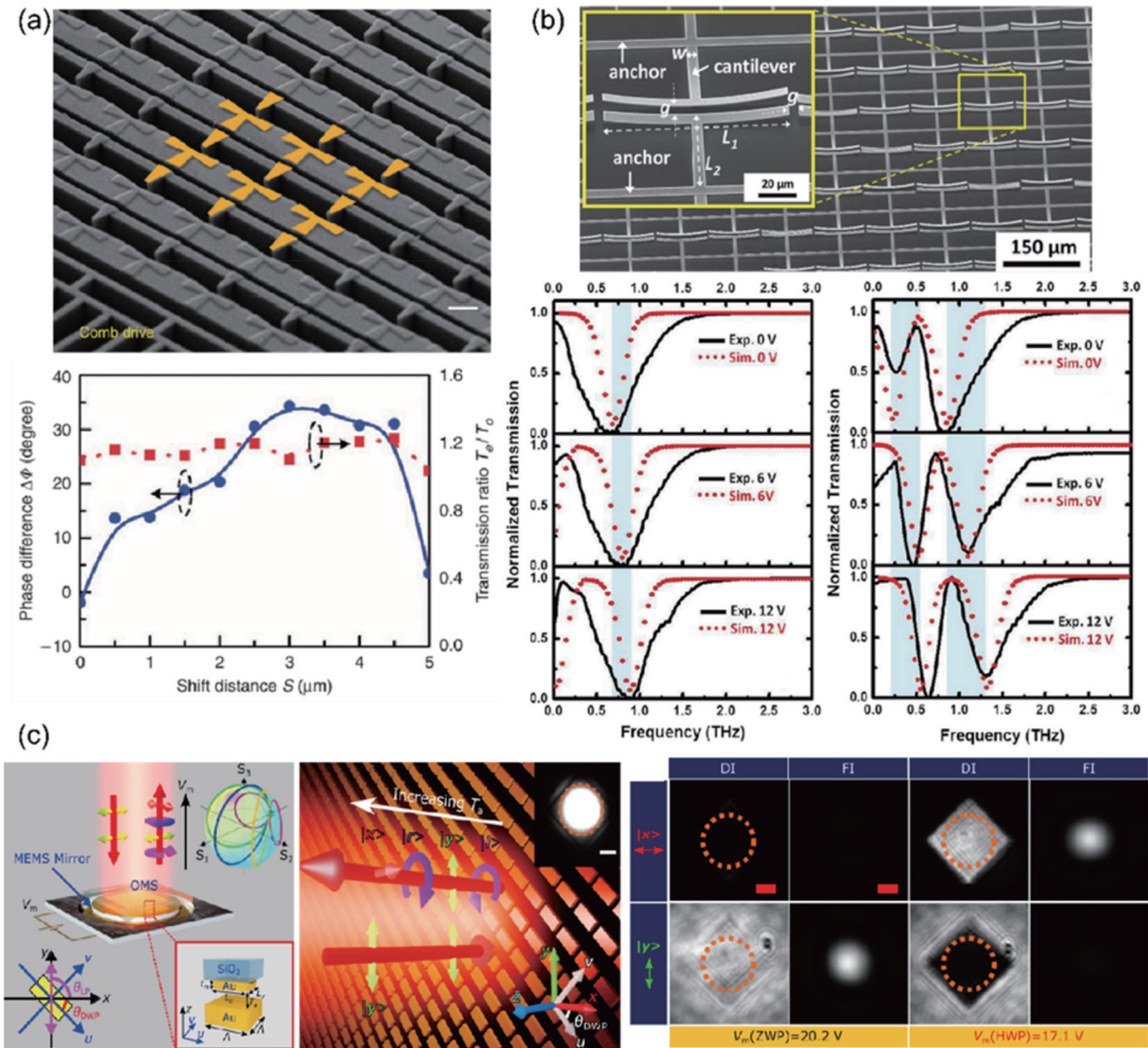


图 12 基于 MEMS 的可调节超表面示例 2。(a) 基于 MEMS 的马耳他十字形可调超表面^[109]; (b) 镜状 T 型太赫兹超表面^[110]; (c) MEMS 动态波片^[111]
 Fig. 12 Example 2 of MEMS based tunable metasurface. (a) MEMS-based Maltese-cross metasurface^[109]; (b) mirrorlike T-shape terahertz metasurface^[110]; (c) MEMS dynamic waveplate^[111]

基于 MEMS 的可调谐超表面具有低能量损耗、大调谐深度以及对单个超原子的光学响应进行调制等优点,并且在可见光波段,已经可以覆盖 $0 \sim 2\pi$ 的相位调节范围。但是,由于技术的限制,基于 MEMS 的可调谐超表面的单元结构无法达到纳米尺度量级(目前还没有报道),且在 kHz 到 GHz 波段其调制速度相对较慢。

5 其他类型的可调谐超表面

5.1 石墨烯

自从 2004 年 Novoselov 等^[112]发现石墨烯以来,石墨烯受到了科研人员的广泛关注。石墨烯是由蜂窝晶格排列的扁平单层碳原子组成的二维材料,具有较高的电子迁移率和光学透明度,以及较强的鲁棒性和环境稳定性。此外,作为一种零带隙的二维材料,石墨烯的载流子浓度随着外加电场的变化而变化,因此可以实现电可调的介电函数。金属纳米天线的共振对其附近的电磁环境极为敏感,石墨烯的电可调介电函数的变化会对超表面的光学响应产生重大影响,这为实现中红外波段到远红外波段的高度集成和可调谐性的超表面提供了可能性。目前,基于石墨烯的可调谐超表面主要有两种类型。第一种是将石墨烯图案化为微纳天线或对石墨烯进行选择性掺杂,调控局部表面等离子体共振^[113]。2011 年, Ju 等^[114]首次报道了太赫兹波段石墨烯微带阵列中的可调谐等离子体激发和光-等离子体耦合现象。等离子体共振频率 ω_p 和石墨烯微带宽度 w 以及载流子浓度 n (或费米能级 E_F) 之间的关系可以表示为

$$\omega_p \propto n^{1/4} \cdot w^{-1/2} \propto |E_F|^{1/2} \cdot w^{-1/2} \quad (4)$$

Ju 等^[114]通过改变微带宽度和栅极电压,在很宽的太赫兹波段内对石墨烯的等离子体共振进行调谐。他们通过改变石墨烯微带的宽度,可以使等离子体共振频率实现从 1 THz 到 10 THz 的变化。由于局域表面等离子体对亚波长石墨烯微带表面的强电场限制,当栅极电压增大时,载流子浓度 n 减小,从而产生等离子体共振的红移和透射率峰值的增大(7%~13%)。2015 年, Liu 等^[115]设计了由排列在正方形晶格中的周期性石墨烯反点阵组成的太赫兹等离子体晶体,通过改变偏置电压,可以实现对器件相对透射率的调节。

第二种可调谐超表面是将单层的各向同性石墨烯作为金属或介电超表面的衬底或盖板,石墨烯层作为活性层来调节超表面的等离子体共振。由于单层石墨烯在太赫兹波段的吸收率很低,基于单层石墨烯的太赫兹调制器难以实现大的调制深度。为了解决这个问题,2014 年 Gao 等^[116]在石墨烯层设计了金属孔环周期阵列,利用金属孔环的反常透射使得太赫兹波段石墨烯的近场吸收增强约 7 倍,从而实现了高达 50% 的调制深度。此外,由于金属孔环的光圈面积比很小,因此

该器件可以达到数百 MHz 的调制速度。该器件还可以通过像素化,利用单独可寻址电极来实现对不同区域的单独控制,这为开发工作在室温下的片上高速太赫兹空间光调制器提供了新的思路。

5.2 基于电磁力驱动的可调谐超表面

用于实现可调谐超表面的电磁驱动力可分为 4 种类型,即库仑力、光学力、安培力和洛伦兹力,它们分别可以由电势差、光照强度、电流和外部磁场等外部激励来实现。通过这些外部激励,可以改变组成超表面的单元结构间的电磁力,从而改变单元结构的间距或者改变其几何形状,实现对超表面几何结构的动态调制^[117]。虽然理论上 4 种机制都可以实现超表面调谐,但是这 4 种机制在调谐效果和实现难度方面有差异,例如安培力和洛伦兹力的产生需要电流,但这可能会产生热光效应。此外,对外部磁场的控制也是一个难题。在强度上,光学力和安培力往往弱于库仑力。因此,大多数基于电磁力驱动的可调谐超表面的研究都利用库仑力,通过改变纳米天线之间的电势差和距离来实现对超表面的调谐。

2017 年, Cencillo-Abad 等^[118]在镜子前几微米处放置等离子体超表面吸收器,并通过静电力调控超表面吸收器和镜子的间距,使得超表面在干涉相长位置和干涉相消位置之间移动。该器件作为电控光谱滤波器和强度调制器,具有显著的结构吸收共振偏移和高的吸收调制对比度等优点。

变焦透镜一般是通过沿光轴纵向调谐多透镜系统组件间的距离来实现的,而利用对超透镜衬底应力场的操控可以调控出射光波前,以实现大衍射极限的焦距调谐和像差控制,为变焦透镜的实现拓展了新的思路。2018 年, She 等^[119]在超透镜结构上设计了 5 个单独可寻址电极(1 个中心电极和 4 个周围电极),通过调控 5 个电极的电压,实现对超透镜表面非晶硅纳米柱的重新排列,制成了基于电磁力驱动的大尺寸可调谐超透镜。该超透镜可以实现超过 100% 的焦距调制以及对图像偏移的校正。

6 总结和展望

可调谐超表面能够实现根据需要动态操纵和控制电磁波,在变焦透镜、光束控制、结构色等领域发挥了越来越重要的作用。本文从电磁超表面的调谐机制及其控制方法两个方面着手,总结了可调谐光学超表面的最新进展,重点介绍了基于液晶、相变材料等活性材料的可调谐超表面,以及基于结构重构的可调谐超表面,如基于柔性可拉伸材料与 MEMS 的可调谐超表面。此外,还简要介绍了基于石墨烯和电磁力驱动的可调谐超表面。近年来,各种应用如增强现实/虚拟现实(AR/VR)^[120-122]、激光雷达、自动驾驶等新兴技术领域对微纳光子学的需求不断增长,可调谐超表面为亚波长尺度的电磁波的偏振、振幅和相位控制提供了支

撑平台,这对于上述应用至关重要。激光加工、光刻、光固化成型、3D 打印、激光剥离等微纳加工技术的快速发展为在微米甚至纳米尺度制造提供了条件,在产业需求和技术支持的双重推动下,可调谐超表面朝着调谐速度更快、相位和幅度调谐深度更大、效率更高、功耗更小的方向发展。

6.1 不同类型可调谐超表面的特点

基于液晶的可调谐超表面具有很大的调制对比度并且能覆盖 $0\sim 2\pi$ 的相位调制范围。此外,该器件效率高、对控制电压的要求低(施加电压 $< 10\text{ V}$),并且调制范围主要在可见光和近红外波段。液晶也可以应用到太赫兹^[123]和微波波段^[124]的可调谐超表面器件中,基于液晶的可调谐超表面主要应用在光束控制、变焦透镜和空间光调制中。然而,液晶受到施加偏压时产生的条纹效应以及液晶分子本身尺寸的限制,空间集成效果不是非常理想;其 ms 量级的切换速度限制了调制速度(低于 1 kHz),导致它无法应用在对调制速度要求较高的环境中。

硫系玻璃和 VO_2 等相变材料具有应用场景广泛的优点,可以提供易失性和非易失性的相变。相变材料在相变前后的折射率变化很大,这导致器件的调制幅度很大($\Delta R \approx 100\%$),相位调制范围也很大。基于相变材料的超表面器件主要工作在可见光、近红外和中红外波段。由于相变过程中的加热和冷却过程需要能量和时间,因此器件效率适中(通常 $< 50\%$),调制速度仍旧较慢(低于 1 kHz)。目前基于相变材料的超表面被广泛应用到光开关、光束控制、结构色等领域。

基于石墨烯的可调谐超表面调制波段主要在中红外和太赫兹波段。基于石墨烯的可调谐超表面具有器件厚度小、相位调制范围大、调制速度快(GHz 量级)、与 CMOS 工艺兼容性好等优点。与传统的由金属纳米天线组成的超表面相比,利用图案化石墨烯或对石墨烯进行选择掺杂来调控局部表面等离子体共振,可显著降低超表面的制作难度。然而,基于石墨烯的可调谐超表面仍具有效率较低的缺点。此外,单层和少层石墨烯还面临着光与物质相互作用较弱、调制深度较浅的问题。目前基于石墨烯的可调谐超表面在可调吸收器和空间光调制器领域得到了广泛的应用。

基于柔性材料的可调谐超表面设计和加工都相对简单,具备覆盖 $0\sim 2\pi$ 的相位调制能力、调制深度大、器件效率较高(90%)、可以工作在可见光到近红外波段。然而,基于柔性材料的可调谐超表面的缺点包括调谐速度慢,对温度、湿度等环境因素高度敏感,并且无法单独控制超表面的单元结构,与 CMOS 工艺不兼容等。目前基于柔性可拉伸材料的可调谐超表面已经在结构色、超透镜、手性等领域得到了广泛应用。

基于 MEMS 的可调谐超表面具有低损耗、大调制深度、可覆盖 $0\sim 2\pi$ 相位调制范围、高效率、便于芯片集成等优点,主要应用于滤色器、变焦透镜等领域。但

是其加工工艺较为复杂,并且超原子的特征尺寸也难以达到 nm 量级,难以将每个谐振器单独像素化。除此之外,较高的制造成本和较低的调制速度仍是基于 MEMS 的可调谐超表面面临的主要问题。

基于电磁力驱动的可调谐超表面可以通过调节偏置电压直接改变结构的几何参数,具有对控制信号强度要求低(可由几伏特的电信号或几毫瓦功率的光信号驱动)、与主流的硅纳米制造技术兼容、结构紧凑(可以在微米尺寸的器件中提供光调制)等优点。但是目前这类器件主要依靠库仑力来对超表面进行调谐,而基于安培力、光学力、洛伦兹力的报道仍然较少,有待进一步研究。

6.2 可调谐超表面发展方向展望

目前,针对可调谐超表面的研究已经取得了辉煌的成就,但是仍然面临着许多问题,这些问题仍然需要科研人员在材料、工艺、设计、调谐机制等方面不断努力进行解决。

6.2.1 新材料

为了实现对超表面更快、更精确的动态控制,需要研究人员继续寻找具有较大折射率,较快响应速度,对电、热、光、机械等外部刺激更灵敏,与纳米制造技术的兼容性更好的新型光学材料。例如,通过研究新的化学工艺来开发新型可电寻址的液晶材料,可以显著提高液晶的调制速度。近年来,合成单层二维过渡金属二硫化物的突破可以为具有应变诱导的可调谐非线性超表面制备提供新的思路^[125]。通过对 VO_2 等传统相变材料进行掺杂也可以进一步降低其相变温度,为基于相变材料的超表面在常温下工作提供了条件。此外,新型导电氧化物^[126]、过渡金属氮化物^[127]、III-V 族化合物半导体^[128]、手性材料、黑磷(BP)^[129]和导电聚合物等新型材料也在可调谐超表面制备中具有潜在的应用价值。

6.2.2 纳米加工工艺

超表面的宏观尺寸为数十毫米至数米,微观尺度可到亚纳米量级。在可见光波段,超表面的特征结构尺寸一般大于 50 nm 、结构形貌精度达亚纳米量级;在红外波段,超表面的特征结构尺寸在亚微米以上,形貌精度为纳米量级;在太赫兹、微波波段,超表面的特征结构尺寸为数微米到数百微米。当前用于超表面的纳米制造工艺所使用的技术(如电子束光刻和聚焦离子束刻蚀)存在成本高、工艺耗时长以及良率低等问题,难以大规模生产具有亚波长尺度特征结构的大面积超表面,这就迫切需要一种能兼顾良率、精度、加工时间和成本的新型纳米加工工艺。相比之下,纳米压印技术(尤其是紫外光卷对卷纳米压印/转印光刻)和投影光刻技术能够在短时间内形成大规模纳米结构的图案,是未来加工超表面重要研究方向^[130]。

1) 纳米压印光刻技术

纳米压印光刻技术是通过在金属表面层或压印抗

蚀剂上产生机械变形或将图案作为蚀刻掩模转移到衬底上,从而实现纳米结构图案化的技术。目前,该技术可以支持米级幅面柔性衬底微纳图案加工,但是纳米压印需要掩模与代加工材料进行直接接触,存在模板磨损、良率低的问题。此外,纳米压印的掩模制造仍然需要使用电子束光刻技术,这使得掩模的成本高且产能不足。目前纳米压印光刻技术的发展方向包括:大面积微纳结构的模具制备技术、柔性衬底上 3D 形貌结构的高效复制技术、多层 3D 微纳结构层叠套压印技术、在牺牲层上纳米压印深结构和有效脱模。

2) 投影光刻技术

投影光刻技术是一种利用光将图案从光掩模转移到衬底上的光致抗蚀剂(光刻胶)技术,其在一致性和产量方面具有优势。自从 1957 年光刻技术诞生以来,它已成为微米和纳米制造领域的一项成熟技术^[131]。目前,光刻技术是集成电路制造中最为重要的一道工艺,占据了芯片制造总成本的 35%。光刻技术目前除被用于微电子工业中 CMOS 制造工艺外,它还用于制造 MEMS^[132]和光子器件^[133]。近年来,超表面向着器件集成度不断提高、特征尺寸越来越小的方向发展,这就对光刻技术的制造分辨率提出了更高的要求,先进光学光刻技术如深紫外(DUV)与极紫外(EUV)浸没光刻随之产生,它们使用的光源波长更短,因而衍射约束的线宽更小,投影的分辨率更高。但是光刻技术若要大规模应用在超表面制造中,还需要突破纳米光刻的并行性加工难题,尤其是攻克光场调制的纳米光刻技术的难题,实现亚纳米精度甚至皮米精度的高效纳米光刻。

6.2.3 新的设计和优化方法

与被动超表面相比,设计主动式表面的难度更大,这是因为主动式超表面通常需要在设备上集成多个功能,而不同功能所需要的设计目标也不同,这就需要在不同的状态下对器件的光学性质进行优化。同时,设计主动式超表面还需要具备从单个超原子到宏观光学系统的多尺度、多物理系统的设计框架。主动式超表面的多尺度、多物理和多目标特性需要一个完整而高效的设计过程,将材料表征、加工制造和系统操作的所有关键阶段连接起来,统筹规划。

在过去的工作中,纳米天线通常被设计成简单的规则图形,如三角形、矩形、菱形、环形、棒状及其组合。随着对超表面工作原理和调谐机制理解的加深,科研人员发现不规则形状的纳米天线在透射率或反射率、相位调制范围、频谱带宽等方面相较于规则图形具有很大的优势。纳米天线从规则形状向不规则形状的发展,在明显提高设计自由度的同时,也提高了设计的复杂性。传统的微纳光学设计和优化算法,比如时域有限差分(FDTD)算法,仅能支持数平方毫米面积和纳米分辨率的计算优化。随着对可调谐超表面设计复杂性和性能要求的提高,传统设计方法面临着提高精度、

计算效率和缩放率的挑战。为了解决这些问题,近年来科研人员提出了适用于可调谐超表面的先进设计和优化方法。

超表面设计的优化方法大致分为局部、全局和多目标策略,并通过代价函数(cost function)来评价优化器的质量。在超表面设计中,代价函数通常是由多个输入自变量决定的,这些变量包括材料的电阻率、折射率、相变温度等物理参数,纳米天线的结构和天线阵列的排列方式,器件的尺度和质量、加工制造工艺等。

局部优化在超表面设计优化中的一个典型例子是基于梯度下降的拓扑优化。拓扑优化是以材料分布为优化对象,在均匀分布材料的设计空间中实现最佳的分布方案。与传统优化方法不同,拓扑优化无须提供参数和优化变量的定义,其目标函数、状态变量和设计变量已经过预定义,因此拓扑优化算法具有更高的设计自由度,同时能够获得更大的设计空间,与其他启发式算法(例如遗传算法和模拟退火算法)相比,拓扑优化在计算效率方面具有显著优势。作为一种强大的迭代逆向设计技术,拓扑优化能够产生复杂多样的几何图形,在多次迭代中将器件的初始布局转变为高性能布局,这使其在纳米天线设计中得到了广泛的应用^[134-136]。然而,拓扑优化侧重于找到局部代价函数的最小值点,这并不能保证最后得到的仿真结果为全局最优。此外,拓扑优化还存在难以处理多模态问题以及其优化效果严重依赖初始情况下材料的分布等不足^[137]。

与局部优化相比,全局优化可以从多模态代价函数中找到全局最小值,而无需理想的初始布局和梯度信息,因此,全局优化算法如遗传算法(GA)^[138]、蚁群优化算法(ACO)^[139]、粒子群优化(PSO)^[140-141]和协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES)^[142-143]等都在超表面设计优化中发挥了重要的作用。大多数全局优化算法都是基于种群的进化算法,根据函数响应不断更新和调整种群,经过多次迭代最终找到使代价函数全局最小的设计(最优子群)。

传统的局部和全局优化通常只优化单个代价函数,但在实际工程问题中,一般同时存在多个相互竞争的性能指标,并被捕获为多个目标函数。面对这种情况,传统的单目标优化器(SOO)的解决方案是对不同设计指标求加权平均数,得到一个复合目标,然后对这个复合函数进行优化。然而,如何权衡不同指标的权重是一个很大的问题,这将直接影响器件的综合性能。此外,尽管存在一系列满足目标之间最佳折中的潜在解决方案,但 SOO 算法只产生一个解决方案,并且不向用户提供关于系统如何权衡不同设计目标的附加信息。多目标优化器(MOO)如 NSGA-III^[144]、Borg^[145]能够利用多个相互竞争的代价函数实现全局优化。多目标优化器会生成一组被称为帕累托集的解决方案,帕累托集既免除了工程师提前确定目标函数优先级的任

务,又有助于理解问题目标之间的物理基础。此外,帕累托集中的一些方案无法通过对不同设计目标加权求和找到,这就避免了利用单目标优化器在优化多目标问题时出现设计方案遗漏的情况。

近年来,机器学习技术的迅速发展为实现光学超表面的设计优化提供了有力的工具^[146-151]。利用从全波模拟中提取的超表面结构及其相应的光学响应神经网络进行训练,研究超表面光学响应和几何结构之间的关系,进而可以对给定纳米结构超表面的光学响应进行准确快速的正向预测,或者应用在逆向结构设计中,根据期望得到的光学响应反推出超表面的器件布局和特征参数。然而,由于构建超表面时存在巨大的自由度,传统的神经网络受到初始训练集的限制,模型精度较低。可以利用生成对抗网络(GAN)来解决这个问题。生成对抗网络是一种无监督的学习架构,它由生成器和判别器组成,生成器生成设计信息并由判别器进行评估,通过这种相互竞争实现对模型的不断优化。与传统的神经网络相比,生成对抗网络可以以较好的效果生成具有复杂几何结构的超表面结构,而且可以并行处理多条输入光谱,同时设计和优化多个超表面结构^[152-154]。

参 考 文 献

- [1] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M. Negative refractive index at optical wavelengths[J]. *Science*, 2007, 315(5808): 47-49.
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [3] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-379.
- [4] Cai W S, Chettiar U K, Kildishev A V, et al. Optical cloaking with metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 224-227.
- [5] Alù A, Engheta N. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(1): 016623.
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [7] Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [8] Zhang X, Liu Z W. Superlenses to overcome the diffraction limit[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(6): 435-441.
- [9] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [10] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [11] Gao X, Singh L, Yang W L, et al. Bandwidth broadening of a linear polarization converter by near-field metasurface coupling[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-8.
- [12] Li J, Zheng C L, Li J T, et al. Terahertz wavefront shaping with multi-channel polarization conversion based on all-dielectric metasurface[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1939-1947.
- [13] Li Z C, Liu W W, Cheng H, et al. Realizing broadband and invertible linear-to-circular polarization converter with ultrathin single-layer metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2016, 5(1): 1-9.
- [14] Yue Z, Li J T, Zheng C L, et al. Manipulation of polarization conversion and multiplexing via all-silicon phase-modulated metasurfaces[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(4): 043601.
- [15] Xu Q, Su X Q, Zhang X Q, et al. Mechanically reprogrammable Pancharatnam-Berry metasurface for microwaves[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(1): 016002.
- [16] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1-6.
- [17] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1-8.
- [18] Zheng G X, Zhou N, Deng L G, et al. Full-space metasurface holograms in the visible range[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2920-2930.
- [19] Meng Y, Chen Y Z, Lu L H, et al. Optical meta-waveguides for integrated photonics and beyond[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-44.
- [20] 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.
- [21] Cui T, Bai B F, Sun H B. Tunable metasurfaces based on active materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(10): 1806692.
- [22] Balci O, Kakenov N, Karademir E, et al. Electrically switchable metadevices via graphene[J]. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaao1749.
- [23] Liu P Q, Luxmoore I J, Mikhailov S A, et al. Highly tunable hybrid metamaterials employing split-ring resonators strongly coupled to graphene surface plasmons[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-7.
- [24] Yao Y, Kats M A, Genevet P, et al. Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 1257-1264.
- [25] Kim J, Son H, Cho D J, et al. Electrical control of optical plasmon resonance with graphene[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5598-5602.
- [26] Yildirim D U, Ghobadi A, Soydan M C, et al. Disordered and densely packed ITO nanorods as an excellent lithography-free optical solar reflector metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(7): 1812-1822.
- [27] Chu C H, Tseng M L, Chen J, et al. Active dielectric metasurface based on phase-change medium[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 986-994.
- [28] 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.
- [29] Zou L F, Cryan M, Klemm M. Phase change material based tunable reflectarray for free-space optical inter/intra chip interconnects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24142-24148.
- [30] Su H, Wang H, Zhao H, et al. Liquid-crystal-based electrically tuned electromagnetically induced transparency metasurface switch[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-7.
- [31] Buchnev O, Podoliak N, Kaczmarek M, et al. Electrically controlled nanostructured metasurface loaded with liquid crystal: toward multifunctional photonic switch[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(5): 674-679.
- [32] 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.
- [33] Li S Q, Xu X W, Maruthiyodan Veetil R, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [34] Kim W Y, Kim H D, Kim T T, et al. Graphene-ferroelectric metadevices for nonvolatile memory and reconfigurable logic-gate operations[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-6.
- [35] Aksyuk V A, Pardo F, Carr D, et al. Beam-steering

- micromirrors for large optical cross-connects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(3): 634-642.
- [36] Meng C, Thrane P C V, Ding F, et al. Dynamic piezoelectric MEMS-based optical metasurfaces[J]. *Science Advances*, 2021, 7(26): eabg5639.
- [37] Roy T, Zhang S Y, Jung I W, et al. Dynamic metasurface lens based on MEMS technology[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(2): 021302.
- [38] Wang Y M, Zhou G Y, Zhang X S, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [39] Xu Z L, Yu S B, Liu J J, et al. A tunable zig-zag reflective elastic metasurface[J]. *Crystals*, 2022, 12(8): 1170.
- [40] Sautter J, Staude I, Decker M, et al. Active tuning of all-dielectric metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4308-4315.
- [41] Lee K M, Tondiglia V P, McConney M E, et al. Color-tunable mirrors based on electrically regulated bandwidth broadening in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(10): 1033-1041.
- [42] Ji Y Y, Fan F, Chen M, et al. Terahertz artificial birefringence and tunable phase shifter based on dielectric metasurface with compound lattice[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11405-11413.
- [43] Wang J, Tian H, Wang Y, et al. Liquid crystal terahertz modulator with plasmon-induced transparency metamaterial[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5769-5776.
- [44] Chen K P, Ye S C, Yang C Y, et al. Electrically tunable transmission of gold binary-grating metasurfaces integrated with liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16815-16821.
- [45] Kang B, Woo J H, Choi E, et al. Optical switching of near infrared light transmission in metamaterial-liquid crystal cell structure[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16492-16498.
- [46] Cheng H C, Kuo C Y, Hung Y J, et al. Liquid-crystal active tamm-plasmon devices[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(6): 064034.
- [47] Kossyrev P A, Yin A J, Cloutier S G, et al. Electric field tuning of plasmonic response of nanodot array in liquid crystal matrix[J]. *Nano Letters*, 2005, 5(10): 1978-1981.
- [48] Decker M, Kremers C, Minovich A, et al. Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8879-8885.
- [49] Khoo I C. Nonlinear optics, active plasmonics and metamaterials with liquid crystals[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(2): 77-117.
- [50] Ma L L, Hu W, Zheng Z G, et al. Light-activated liquid crystalline hierarchical architecture toward photonics[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(16): 1900393.
- [51] Berini P. Optical beam steering using tunable metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(7): 2204-2218.
- [52] Yang H N, Robertson B, Wilkinson P, et al. Small phase pattern 2D beam steering and a single LCOS design of 40 1×12 stacked wavelength selective switches[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12240-12253.
- [53] Zhang C, Jing J X, Wu Y K, et al. Stretchable all-dielectric metasurfaces with polarization-insensitive and full-spectrum response[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(2): 1418-1426.
- [54] Shen Y C, Shen Z X, Wang Y Y, et al. Electrically tunable terahertz focusing modulator enabled by liquid crystal integrated dielectric metasurface[J]. *Crystals*, 2021, 11(5): 514.
- [55] Bosch M, Shcherbakov M R, Won K, et al. Electrically actuated varifocal lens based on liquid-crystal-embedded dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3849-3856.
- [56] Buchnev O, Ou J Y, Kaczmarek M, et al. Electro-optical control in a plasmonic metamaterial hybridised with a liquid-crystal cell[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1633-1638.
- [57] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J. Liquid crystal tunable metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(17): 177403.
- [58] Xie Z W, Yang J H, Vashistha V, et al. Liquid-crystal tunable color filters based on aluminum metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30764-30770.
- [59] Zhao Q, Kang L, Du B, et al. Electrically tunable negative permeability metamaterials based on nematic liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(1): 011112.
- [60] Wang R S, He S S, Chen S Z, et al. Electrically driven generation of arbitrary vector vortex beams on the hybrid-order Poincaré sphere[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3570-3573.
- [61] Badloe T, Kim J, Kim I, et al. Liquid crystal-powered Mie resonators for electrically tunable photorealistic color gradients and dark blacks[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 1-11.
- [62] McManamon P F, Bos P J, Escuti M J, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [63] Hamann H F, O'Boyle M, Martin Y C, et al. Ultra-high-density phase-change storage and memory[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(5): 383-387.
- [64] Chang C M, Chu C H, Tseng M L, et al. Local electrical characterization of laser-recorded phase-change marks on amorphous $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9492-9504.
- [65] Pandian R, Kooi B J, Palasantzas G, et al. Nanoscale electrolytic switching in phase-change chalcogenide films[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(24): 4431-4437.
- [66] Loke D, Lee T H, Wang W J, et al. Breaking the speed limits of phase-change memory[J]. *Science*, 2012, 336(6088): 1566-1569.
- [67] Raoux S. Phase change materials[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2009, 39: 25-48.
- [68] Wuttig M, Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(12): 1004.
- [69] Xiong F, Liao A D, Estrada D, et al. Low-power switching of phase-change materials with carbon nanotube electrodes[J]. *Science*, 2011, 332(6029): 568-570.
- [70] Wuttig M, Bhaskaran H, Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 465-476.
- [71] Yamada N, Ohno E, Akahira N, et al. High speed overwriteable phase change optical disk material[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1987, 26(S4): 61.
- [72] Yamada N, Ohno E, Nishiuchi K, et al. Rapid-phase transitions of $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(5): 2849-2856.
- [73] Terao M, Morikawa T, Ohta T. Electrical phase-change memory: fundamentals and state of the art[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(8): 080001.
- [74] Gholipour B, Zhang J F, MacDonald K F, et al. An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase-change meta-switch[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(22): 3050-3054.
- [75] Jeong Y G, Bahk Y M, Kim D S. Dynamic terahertz plasmonics enabled by phase-change materials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900548.
- [76] Sámson Z L, MacDonald K F, De Angelis F, et al. Metamaterial electro-optic switch of nanoscale thickness[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(14): 143105.
- [77] Tittel A, Michel A K U, Schäferling M, et al. A switchable mid-infrared plasmonic perfect absorber with multispectral thermal imaging capability[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(31): 4597-4603.
- [78] Zhu M L, Abdollahramezani S, Li C T, et al. Dynamically tunable second-harmonic generation using hybrid nanostructures incorporating phase-change chalcogenides[J]. *Nanophotonics*,

- 2022, 11(11): 2727-2735.
- [79] Karvounis A, Gholipour B, MacDonald K F, et al. All-dielectric phase-change reconfigurable metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 051103.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] Wang T Y, Torres D, Fernández F E, et al. Maximizing the performance of photothermal actuators by combining smart materials with supplementary advantages[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1602697.
- [83] Ma H, Hou J W, Wang X W, et al. Flexible, all-inorganic actuators based on vanadium dioxide and carbon nanotube bimorphs[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 421-428.
- [84] Cavalleri A, Dekorsy T, Chong H H W, et al. Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO_2 : a view from the ultrafast timescale[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(16): 161102.
- [85] Goldflam M D, Liu M K, Chapler B C, et al. Voltage switching of a VO_2 memory metasurface using ionic gel[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(4): 041117.
- [86] Hashemi M R M, Yang S H, Wang T Y, et al. Electronically-controlled beam-steering through vanadium dioxide metasurfaces [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-8.
- [87] Ge J H, Zhang Y Q, Dong H X, et al. Nanolayered VO_2 -based switchable terahertz metasurfaces as near-perfect absorbers and antireflection coatings[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(4): 5569-5577.
- [88] Dicken M J, Aydin K, Pryce I M, et al. Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO_2 phase transition[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18330-18339.
- [89] Kats M A, Sharma D, Lin J, et al. Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(22): 221101.
- [90] Kats M A, Blanchard R, Genevet P, et al. Thermal tuning of mid-infrared plasmonic antenna arrays using a phase change material[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 368-370.
- [91] Zhu Z H, Evans P G, Haglund R F, Jr, et al. Dynamically reconfigurable metadvice employing nanostructured phase-change materials[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 4881-4885.
- [92] Shu F Z, Yu F F, Peng R W, et al. Dynamic plasmonic color generation based on phase transition of vanadium dioxide[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1700939.
- [93] Ou J Y, Plum E, Jiang L D, et al. Reconfigurable photonic metamaterials[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(5): 2142-2144.
- [94] Cao L Y, Yang Z C, Xu Y L, et al. Pillared elastic metasurface with constructive interference for flexural wave manipulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 107035.
- [95] Gutruf P, Zou C J, Withayachumnankul W, et al. Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 133-141.
- [96] Yoo D, Johnson T W, Cherukulappurath S, et al. Template-stripped tunable plasmonic devices on stretchable and rollable substrates[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(11): 10647-10654.
- [97] Kim Y, Yeom B, Arteaga O, et al. Reconfigurable chiroptical nanocomposites with chirality transfer from the macro- to the nanoscale[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(4): 461-468.
- [98] Song S C, Ma X L, Pu M B, et al. Actively tunable structural color rendering with tensile substrate[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(9): 1600829.
- [99] Tseng M L, Yang J, Semmlinger M, et al. Two-dimensional active tuning of an aluminum plasmonic array for full-spectrum response[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6034-6039.
- [100] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.
- [101] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.
- [102] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A nanoelectromechanical tunable laser[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3): 180-184.
- [103] Qiao P F, Li K, Cook K T, et al. MEMS-tunable VCSELs using 2D high-contrast gratings[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 823-826.
- [104] Yoo B W, Megens M, Sun T B, et al. A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19029-19039.
- [105] Yoo B W, Megens M, Chan T, et al. Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beam steering[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [106] 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.
- [107] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-9.
- [108] Han Z Y, Colburn S, Majumdar A, et al. MEMS-actuated metasurface Alvarez lens[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6(1): 1-11.
- [109] Zhu W M, Liu A Q, Bourouina T, et al. Microelectromechanical Maltese-cross metamaterial with tunable terahertz anisotropy[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1-6.
- [110] Lin Y S, Lee C K. Tuning characteristics of mirrorlike T-shape terahertz metamaterial using out-of-plane actuated cantilevers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251914.
- [111] Meng C, Thrane P C V, Ding F, et al. Full-range birefringence control with piezoelectric MEMS-based metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-7.
- [112] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [113] 冯越, 刘海, 陈聪, 等. 基于图案化石墨烯的宽带太赫兹超材料吸收器[J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 0923001.
- Feng Y, Liu H, Chen C, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber based on patterned graphene[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(9): 0923001.
- [114] Ju L, Geng B S, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(10): 630-634.
- [115] Liu P Q, Valmorra F, Maissen C, et al. Electrically tunable graphene anti-dot array terahertz plasmonic crystals exhibiting multi-band resonances[J]. *Optica*, 2015, 2(2): 135-140.
- [116] Gao W L, Shu J, Reichel K, et al. High-contrast terahertz wave modulation by gated graphene enhanced by extraordinary transmission through ring apertures[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1242-1248.
- [117] Zheludev N I, Plum E. Reconfigurable nanomechanical photonic metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 16-22.
- [118] Cencillo-Abad P, Ou J Y, Plum E, et al. Electro-mechanical light modulator based on controlling the interaction of light with a metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-7.
- [119] She A L, Zhang S Y, Shian S, et al. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9957.
- [120] 罗翔豪, 董思禹, 王占山, 等. 超表面 VR/AR 显示技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 2011002.
- Luo X H, Dong S Y, Wang Z S, et al. Research progress of metasurface-based VR/AR display technology[J]. *Laser &*

- Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011002.
- [121] 廖启明, 杨静育, 王涌天, 等. 基于微纳光学元件的增强现实技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011003.
Liao Q M, Yang J Y, Wang Y T, et al. Augmented reality technology based on micro-and nano-optical elements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011003.
- [122] 李洋洋, 张超, 杨宁, 等. 超表面在增强现实近眼显示中的应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011005.
Li Y Y, Zhang C, Yang N, et al. Research progress on application of metasurface concept in augmented reality near-eye displays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011005.
- [123] Fu X J, Shi L, Yang J, et al. Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(19): 22287-22294.
- [124] Deng G S, Hu H L, Mo H S, et al. Liquid crystal-based wide-angle metasurface absorber with large frequency tunability and low voltage[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22550-22561.
- [125] Nauman M, Yan J S, de Ceglia D, et al. Tunable unidirectional nonlinear emission from transition-metal-dichalcogenide metasurfaces[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1-11.
- [126] Baxter J, Pérez-Casanova A, Cortes-Herrera L, et al. Dynamic nanophotonics in epsilon-near-zero conductive oxide films and metasurfaces: a quantitative, nonlinear, computational model[J]. Advanced Photonics Research, 2023, 4(3): 2200280.
- [127] Gioti M, Arvanitidis J, Christofilos D, et al. Plasmonic and phononic properties of epitaxial conductive transition metal nitrides[J]. Journal of Optics, 2020, 22(8): 084001.
- [128] Park J, Kim S J, Sorger V J, et al. Electrically tunable metasurface by using InAs in a metal-insulator-metal configuration[J]. Nanophotonics, 2022, 11(6): 1117-1126.
- [129] Hong Q L, Xu W, Zhang J F, et al. Optical activity in monolayer black phosphorus due to extrinsic chirality[J]. Optics Letters, 2019, 44(7): 1774-1777.
- [130] Li N X, Xu Z J, Dong Y, et al. Large-area metasurface on CMOS-compatible fabrication platform: driving flat optics from lab to fab[J]. Nanophotonics, 2020, 9(10): 3071-3087.
- [131] Nall J R, Lathrop J W. Photolithographic fabrication techniques for transistors which are an integral part of a printed circuit[C]// 1957 International Electron Devices Meeting, October 31-November 1, 1957, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2005: 117.
- [132] Li N X, Yuan H Y, Xu L F, et al. Radiation enhancement by graphene oxide on microelectromechanical system emitters for highly selective gas sensing[J]. ACS Sensors, 2019, 4(10): 2746-2753.
- [133] Tong J C, Zhou W, Qu Y, et al. Surface plasmon induced direct detection of long wavelength photons[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1-9.
- [134] Sell D, Yang J J, Doshay S, et al. Visible light metasurfaces based on single-crystal silicon[J]. ACS Photonics, 2016, 3(10): 1919-1925.
- [135] Phan T, Sell D, Wang E W, et al. High-efficiency, large-area, topology-optimized metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1-9.
- [136] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer[J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 374-377.
- [137] Yang J J, Fan J A. Topology-optimized metasurfaces: impact of initial geometric layout[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3161-3164.
- [138] Jafar-Zanjani S, Inampudi S, Mosallaei H. Adaptive genetic algorithm for optical metasurfaces design[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-16.
- [139] Zhu D Z, Whiting E B, Campbell S D, et al. Optimal high efficiency 3D plasmonic metasurface elements revealed by lazy ants[J]. ACS Photonics, 2019, 6(11): 2741-2748.
- [140] Lalbakhsh A, Afzal M U, Esselle K P. Multiobjective particle swarm optimization to design a time-delay equalizer metasurface for an electromagnetic band-gap resonator antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 912-915.
- [141] Su J X, Lu Y, Liu J Y, et al. A novel checkerboard metasurface based on optimized multielement phase cancellation for superwideband RCS reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12): 7091-7099.
- [142] Sieber P E, Werner D H. Infrared broadband quarter-wave and half-wave plates synthesized from anisotropic Bézier metasurfaces[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 32371-32383.
- [143] Elsayy M M R, Lanteri S, Duvigneau R, et al. Global optimization of metasurface designs using statistical learning methods[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 17918.
- [144] Seada H, Deb K. A unified evolutionary optimization procedure for single, multiple, and many objectives[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2016, 20(3): 358-369.
- [145] Hadka D, Reed P. Borg: an auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework[J]. Evolutionary Computation, 2013, 21(2): 231-259.
- [146] Malkiel I, Mrejen M, Nagler A, et al. Plasmonic nanostructure design and characterization via deep learning[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 1-8.
- [147] Nadell C C, Huang B H, Malof J M, et al. Deep learning for accelerated all-dielectric metasurface design[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27523-27535.
- [148] Jiang J Q, Fan J A. Global optimization of dielectric metasurfaces using a physics-driven neural network[J]. Nano Letters, 2019, 19(8): 5366-5372.
- [149] An S S, Fowler C, Zheng B W, et al. A deep learning approach for objective-driven all-dielectric metasurface design[J]. ACS Photonics, 2019, 6(12): 3196-3207.
- [150] Sajedian I, Badloe T, Rho J. Optimisation of colour generation from dielectric nanostructures using reinforcement learning[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5874-5883.
- [151] Inampudi S, Mosallaei H. Neural network based design of metagratings[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(24): 241102.
- [152] Liu Z C, Zhu D Y, Rodrigues S P, et al. Generative model for the inverse design of metasurfaces[J]. Nano Letters, 2018, 18(10): 6570-6576.
- [153] An S S, Zheng B W, Tang H, et al. Multifunctional metasurface design with a generative adversarial network[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(5): 2001433.
- [154] Jiang J Q, Sell D, Hoyer S, et al. Free-form diffractive metagrating design based on generative adversarial networks[J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 8872-8878.

Advances in Tunable Electromagnetic Metasurfaces

Zheng Haotian, Zhang Song, Xu Ting*

College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210033, Jiangsu, China

Abstract

Significance Metasurface is a two-dimensional planar metamaterial composed of artificial sub-wavelength meta-atoms, and it can manipulate the wavefronts of electromagnetic waves. The rapid development of metasurfaces has spawned a variety of functional devices, including metasurface holography, metalens, vector vortex beam generator, polarization converter, etc. As can be seen, metasurfaces hold considerable promise for planar optical components and devices owing to their unprecedented ability to arbitrarily manipulate the amplitude, phase, frequency, and polarization of light. However, previous research on metasurfaces is based on passive metasurfaces with their intrinsic physical properties and structure parameters fixed and untunable after fabrication, which limits their practical applications such as dynamic control of the wavefront of light. As opposed to passive metasurfaces, the structure, properties, and functions of active metasurfaces can be tuned flexibly through external stimuli such as electricity, magnet, light, heat, and stress. With the help of active metasurfaces, the transmitted, reflected, or diffracted light can be dynamically manipulated by simultaneously or individually controlling the phase, amplitude, and polarization of light.

Progress Recently, many efforts have been devoted to studying various tuning methods-based tunable metasurfaces with multiple functions to dynamically manipulate and control electromagnetic waves as needed. The working principle of tunable metasurfaces mainly involves two mechanisms: one is based on active materials, while the other is based on nano-mechanical structural reconfiguration.

The widely used active materials mainly include liquid crystals (LCs) and phase-change materials. LCs are active materials commonly used in optics owing to their broad tuning range of the refractive index. Recently, the combinations of LCs and plasmonic metasurfaces (Fig. 4) or dielectric metasurfaces (Fig. 5) are demonstrated with different functionalities including beam steering, zoom lens, and dynamic color display. The LC-based tunable metasurfaces have large modulation contrast and can cover the modulation range of $0-2\pi$. In addition, LC-based metasurfaces have advantages such as high efficiency and low bias voltage requirements.

Another commonly used active material refers to phase-change materials including but not limited to chalcogenide-glass and vanadium oxide. Thanks to their tunable optical properties induced by external stimuli, phase-change materials have emerged as a class of active materials integrated into the metasurface. In recent years, various chalcogenide-glass (Fig. 6 and Fig. 7) or vanadium oxide-based (Fig. 8 and Fig. 9) tunable metasurfaces are investigated in the field of tunable optical switch, perfect absorber, and beam steering. The phase-change materials-based metasurfaces have large modulation amplitude and wide phase modulation range owing to a large refractive index change during phase transition.

Apart from active materials, tunable metasurfaces can be also achieved by nano-mechanical structural reconfiguration, such as flexible materials and microelectromechanical systems (MEMS). Recently, flexible materials (Fig. 10) and MEMS-based (Fig. 11 and Fig. 12) tunable metasurfaces are intensively studied, and their applications in zoom lenses, dynamic color display, and dynamic waveplates are explored. The flexible materials-based metasurfaces are relatively easy to be designed and fabricated, and they have several advantages such as a large phase modulation range ($0-2\pi$), large modulation depth, and high device efficiency. The MEMS-based metasurfaces have several advantages such as low loss, large modulation depth, the ability to cover the phase modulation range of $0-2\pi$, high efficiency, and ease of integration with chips.

Conclusions and Prospects Although tunable metasurfaces have made significant progress, they still have low modulation speeds and are unable to control each element. Therefore, researchers need to make efforts in materials, fabrication technology, and design and optimization methods.

First, new optical materials with large refractive index, faster response speed, higher sensitivity to external stimuli such as electricity, heat, light, and mechanical forces, and better compatibility with nanofabrication technologies are needed, so as to achieve faster and more accurate dynamic control of metasurfaces. In recent years, new materials such as conductive oxides, transition metal nitrides, III-V semiconductor compounds, chiral materials, black phosphorus, and conductive polymers have attracted researchers' attention due to their excellent optical properties.

Second, the nanofabrication technologies currently used for metasurfaces (such as electron beam lithography and focused ion-beam etching) are expensive and difficult to fabricate large-area metasurfaces with sub-wavelength-scale

features due to long fabrication time and low yield. Therefore, a new nanofabrication technology that can balance yield, precision, fabrication time, and cost is urgently required. Nanoimprint lithography technology (especially ultraviolet roll-to-roll nanoimprint lithography) and projection lithography technology that can create large-scale nano-patterns in a short time are important research directions for subsequent metasurface fabrication.

Third, the design and optimization of tunable metasurfaces require a system design framework from a single meta-atomic to macroscopic optical systems, which connects all key stages of material characterization, fabrication, and system operation in a coordinated manner. Topological optimization is a typical example of local optical optimization. Global optimization algorithms such as genetic algorithms (GA), ant colony optimization algorithms (ACO), particle swarm optimization (PSO), covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES), and multi-objective optimizers (MOO) have played an important role in the design and optimization of tunable metasurfaces. In addition, the rapid development of machine learning in recent years has provided a promising tool for optimizing optical metasurfaces. Using extracted metasurface structures and their corresponding optical responses to train neural networks can help to study the relationship between geometric structures and optical responses. This approach enables accurate and fast forward prediction of the optical response for a given metasurface, as well as application in inverse design where the desired optical response is used to deduce the device layout and characteristic parameters of the metasurface.

Key words optical design; metasurface; tunability; liquid crystal; phase-change material; nanophotonics