

文章编号:1672-3392(2022)04-0036-21

动态可调谐超构表面在光场调控中的应用研究

王继成^{1,2} 黄仙雨¹ 李雨珂¹ 包志瑀¹

(¹ 江南大学理学院光电科学与工程系, 江苏 无锡 214122;

² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 超构表面可看成二维超构材料,能够在表面空间内控制光场分布。可调谐超构表面作为新的设计需求成为目前热门研究领域。利用动态可调谐的超构表面对光场的相位、偏振、强度等维度精准调控,以及调控光场与物质的相互作用研究是当前基础科学与多学科融合发展的前沿研究。系统介绍了动态可调谐超构表面在结构色、偏振转换、完美吸收、图像处理等光场多维度调控及应用方面取得的最新研究进展,总结了可调谐超构表面的研究前沿与应用前景。

关键词 可调谐超构表面;微纳光子器件;人工微纳结构;光场调控;器件设计

中图分类号 O438 **文献标识码** A

DOI:10.19519/j.cnki.1672-3392.20220410.001

1 引言

超构表面被视为电磁超材料的二维形式,它可以在表面处对电磁波的特性有效调控,从而实现自然材料难以表现的各种奇异的电磁现象^[1-4]。2011年,哈佛大学 Capasso^[5]首次提出超构表面的概念,利用超构表面实现对连续光波的调制,并将光波在超构表面的反射和折射规律总结为广义 Snell 定律。超构表面的紧凑性好,可集成度高,使之可以采用印刷、光刻等生产方式制备,也可直接和其他设备集成应用。

从调控功能上讲,超构表面可以产生空间结构光场,例如涡旋光束^[6]、偏振解析^[7]、相位延迟波片^[8]、超透镜^[9]和全息显示^[10]等。从调控原理上来讲,传统光学元件对光的调控是通过累积传播过程中相位延迟来实现的,这使得器件小型化和集成化变得困难。而超构表面的光场调控则主要基于惠更斯-菲涅尔原理,即每个超构表面

单元对入射光的局域响应可被视为二次波源,因此可以通过优化超构单元的参数和空间排序来进行光场调控。超构表面通过光与物质的相互作用改变入射光的振幅并使其发生相位突变。具体体现在几种不同相位调控原理的超构表面中,例如:共振相位型超构表面^[11]、Pancharatnam-Berry 相位型超构表面^[12]、高对比度型超构表面^[13]、惠更斯型超构表面等^[14]。

超构表面可以通过相位的梯度排布实现任意方向的光束偏转,在可见光和通信波段均已有一定的调制效果^[15,16]。

超构表面还可以通过改变面上相位分布,在预设焦点处对偏转的光进行破坏性的干涉,实现类透镜功能的超透镜(Metalens)。而通过双曲线相位剖面^[17]可以得到焦距 f 的超透镜面上位置 (x,y) 处所需的相位 $\varphi(x,y)$ 。最新研究表明,Metalens 甚至能够有超出衍射极限的表现^[18]。

超构表面的另一个重要应用就是全息图。利用 GS 算法对目标全息图进行计算后可以得

收稿日期 2021-12-30 收修改稿日期 2022-01-26

作者简介 王继成(1980—),男,副教授,硕士生导师,主要从事微纳光电器件、纳米光子学、超构材料与超构表面等方面的研究工作。

基金项目 国家自然科学基金(111811530052),中国科技部政府间科技例会交流项目(CB02-20),中科院长春光机所应用光学国家重点实验室开放课题(SKLAO2020001A04)资助项目

到其在空间上的相位分布,再通过排布对应相位的超构表面单元即可实现全息图的重建^[19-22]。

本文系统地介绍了动态可调谐超构表面在结构色、偏振转换、完美吸收、图像处理等光场多维度调控及应用方面取得的最新研究进展,并总结了可调谐超构表面的研究前沿与可能的应用前景。

2 动态可调谐超构表面

从目前超构表面动态调控实现方法上来看,超构表面动态调控主要有三种方法:1) 超构表面元件本身是静态器件,对前端入射光场进行动态调制,从而使得重构后产生的光学效应发生变化;2) 利用超构表面自身结构的动态可调特性,例如使用 MEMS、可拉伸基底、飞秒激光覆写等多种动态调控结构方案,对超构表面器件产生的光学效果进行动态调节;3) 利用超构表面结构材料本身(折射率、介电常数、磁导率)的动态可调特性,例如使用相变材料、化学反应、电压调

控、温度调控等多种方法动态调控材料的折射率等参数,对超构表面器件产生的光学响应进行动态调节。

2.1 改变入射光源实现动态调控

2.1.1 入射光复用型超构表面

在不改变超构表面结构的情况下,可以利用超构表面对不同性质入射光响应不同的特性,直接调制入射光实现动态调控。对入射光常见的调制方式有调控入射角、波长、偏振态、轨道角动量(OAM)以及空间信道复用等。入射光复用型超构表面因为其调制灵活性高、响应速度快、常被应用于全息成像、光学加密等领域^[23-25]。

在这些入射光调控方案中,入射角的调控是生成图像显示的一种简单方法。然而,由于缺乏角度编码的自由度,独立的角度复用超构表面很少被研究或演示。如图 1 所示,Kamali 等人于 2017 年提出了一种角度选择性超构表面的编码方法,在不同入射角度下对两种不同的全息图进行编码^[26]。

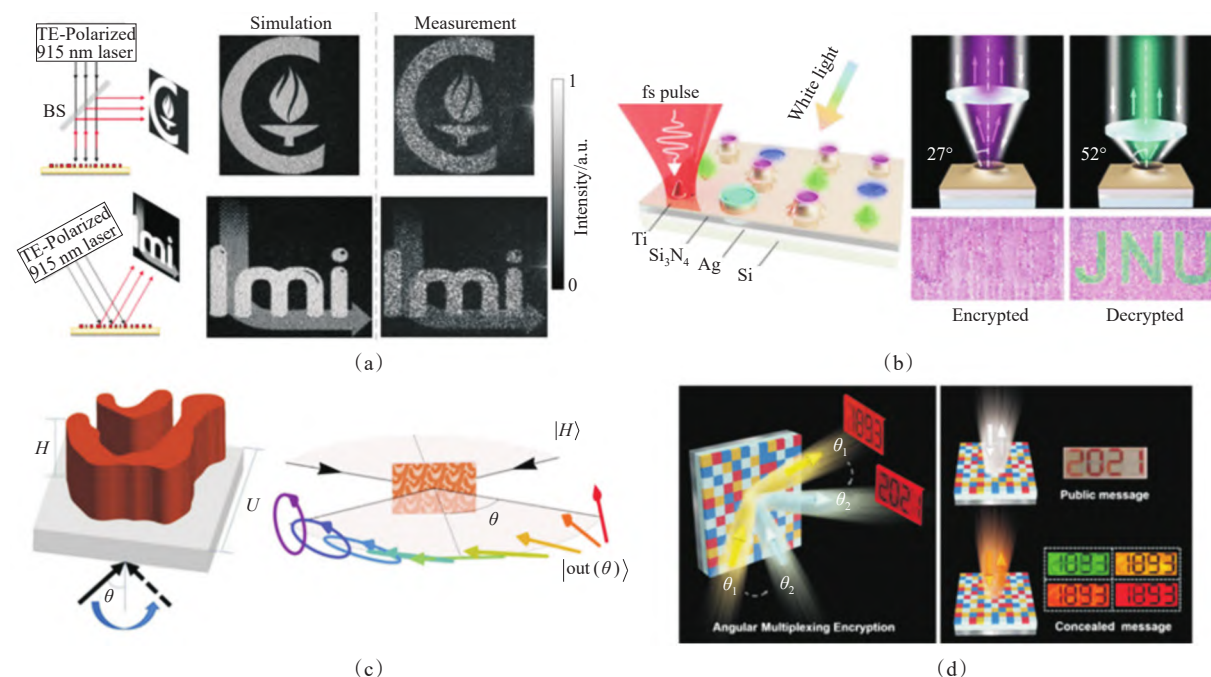


图 1 (a)正常和 30°照明角度下测量装置的简化图(左),右侧显示了在 0°和 30°照明角的 915 nm TE 偏振光下拍摄的模拟和测量反射图像^[26]; (b)在斜角度照明下,通过 fs 脉冲和散射颜色打印的纳米火山结构的示意图^[27]; (c)拓扑优化后的结构单元^[28]; (d)角度复用超构表面的示意图^[29]

Fig. 1 (a) Simplified drawing of the measurement setups under normal and 30° illumination angles (left), simulated and measured reflected images captured under 915 nm TE-polarized light at 0° and 30° illumination angles are shown on the right^[26]; (b) Schematic illustration of printed nanovolcanoes by a fs pulse and scattered color under oblique illuminations^[27]; (c) Topology-optimized structure element^[28]; (d) Schematic illustration of the angular multiplexing metasurface^[29]

Hu 等人则在此基础上,提出了一种基于角度各向异性的隐写方法,并且讨论了这种角度调制在光学加密领域的可行性^[27]。Shi 等人结合拓扑优化,演示了改变入射角连续地从线性双折射调谐到椭圆双折射变化的超构表面。这种角度可调任意双折射扩展了偏振光学的范围,实现了紧凑和多功能的偏振操作,并可能在偏振成像、量子光学和其他领域中得到应用^[28]。Tang 等人提出了一种独立的角度复用可切换纳米打印设计,它可以在单个超构表面的不同入射角度下编码不同的图像^[29]。通过筛选和找到编码中“00”、“01”、“10”和“11”的基本构造块,在入射光以 0° 入射时,显示数字“1983”,当入射角增大到 20° 时显示数字变为“2021”。最终优化设计,实现双通道任意图像加密。作为一种光学信息隐藏/检索的策略,关于角度复用的后续工作可以利用遗传算法或机器学习方法优化超构表面单元模式来扩展到更多的角度通道,实现大角度、更多信息的设计。

为了使超构表面能对更多的信息进行编码,

就需要引入额外的自由度,但是额外的自由度可能会跟已有的自由度耦合,难以解耦。如图 2 所示, Jin 等人的工作将空间自由度最小的非交叉纳米硅柱与不同自旋态的三种入射光进行结合,实现了 6 bit 信息编码的全息图^[30]。电偶极子和磁偶极子之间的干涉使得能够同时操纵入射光的 6 个基来重建 6 位波长和自旋相关的多色图像。基于超构表面的全息技术为包括光学显示、数据存储和光学加密在内的应用提供了机会^[38]。关于这一主题的大多数研究都涉及在不同偏振状态下照明时显示不同图像的设备,很少有研究证明全息图像的偏振在空间上是变化的。Wen 等人首次通过实验演示了一种矢量全息图,该全息图产生了偏振态在空间上连续分布的图像^[31]。在图像中可以实现无限数量的偏振状态。全息图像及其偏振图是独立的,因而可以使用不同的偏振贴图对同一图像进行编码。波长(频率)空间复用的超构表面^[32]和轨道角动量复用的超构表面^[33]如图 2(c)、(d)所示。

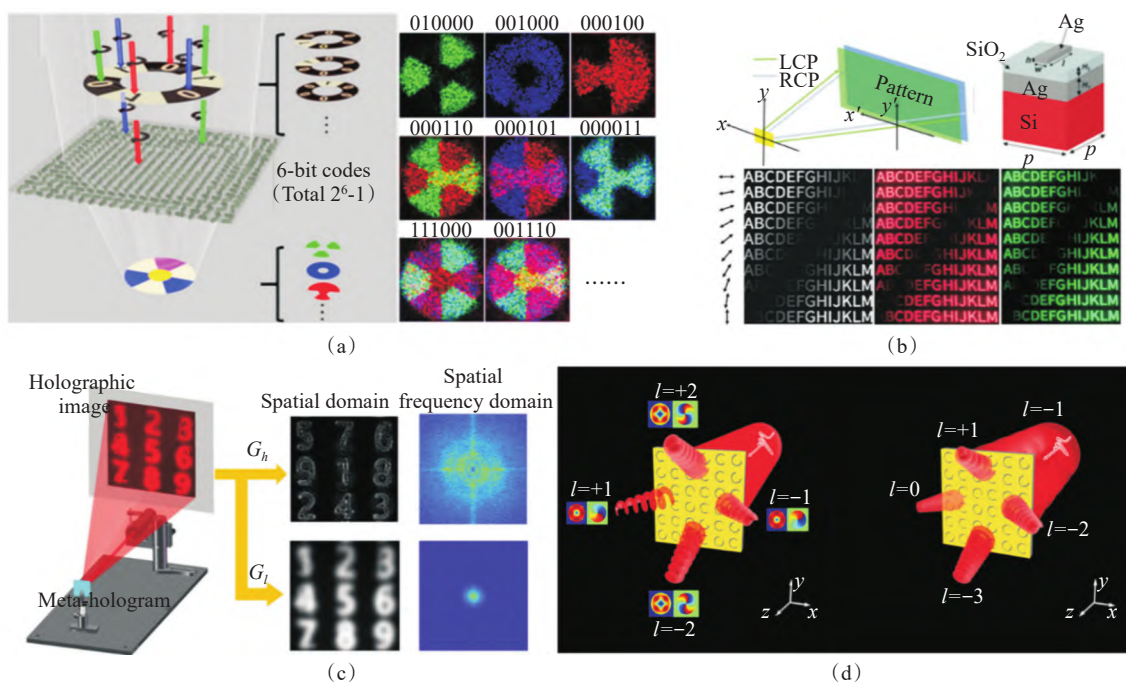


图 2 (a)(2^6-1)自旋和波长编码全息图的非交叉超构表面^[30]; (b)具有空间连续偏振分布的矢量全息超构表面^[31]; (c)空间频率复用超全息与超纳米印刷^[32]; (d)OAM 复用和 OAM 解复用示意图^[33]

Fig. 2 (a)Noninterleaved metasurface for (2^6-1) spin- and wavelength-encoded holograms^[30]; (b)Vectorial holograms with spatially continuous polarization distributions^[31]; (c)Spatial frequency multiplexed meta-holography and meta-nanoprinting^[32]; (d)Schematics of OAM multiplexing and demultiplexing^[33]

超构表面全息图像通常是相互关联的,很难完全解耦。如图 3 所示, Bao 等人^[34]通过合并一

个有效的点源(针孔),打破了这种看似不可避免的耦合关系,点源的自旋、波长和坐标可以在元

全息图中完全解耦。并在实验上演示了自旋解耦、全色超构表面全息术和由点源位置控制的动态全息术。这项工作为点源在现实中实现超光

学的高级功能提供了一条有希望的途径,如单光子全息、荧光全息等。

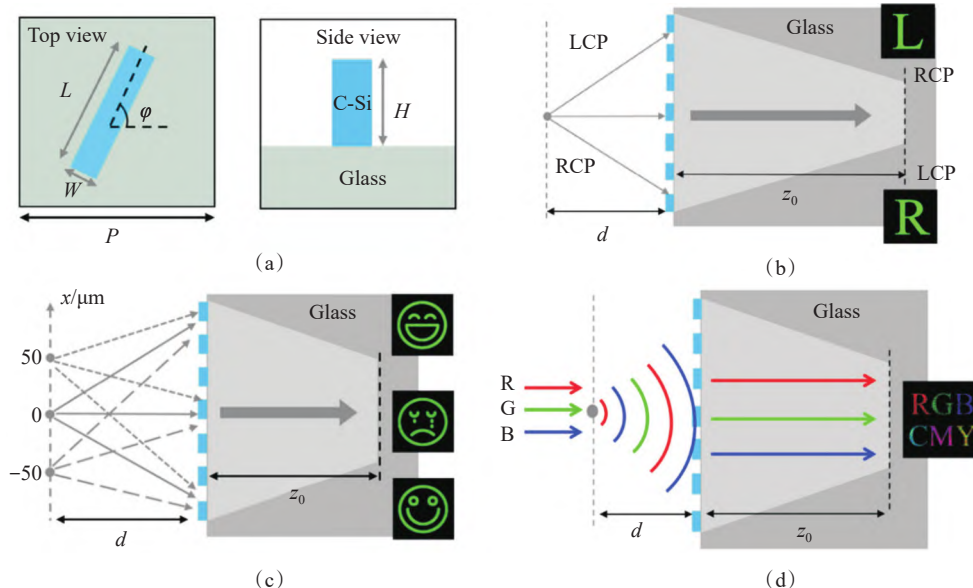


图3 (a) 超构表面单元纳米结构俯视图和侧视图; (b) 自旋解耦点源超构表面全息示意图; (c) 通过移动点源的位置来控制动态超构表面全息术; (d) 点源激发全色超构表面全息术^[34]

Fig. 3 (a) Top-view and side-view images of the designed unit nanoblock structure of the metasurface; (b) Schematic illustration of the metasurface for spin-decoupled holographic images under point-source illumination; (c) Dynamic metasurface holography controlled by moving the position of the point source; (d) Schematic illustration of the metasurface for the reconstruction of the full-color holographic image^[34]

2.1.2 在光学加密方面和全息方面的应用

超构表面对特定波长的响应使其在光学加密方向便于操控。如图4所示, Franklin 等人验

证了一种多光谱等离子体系统, 在保持可见光特性不变的同时, 可以独立调节红外共振^[35]。

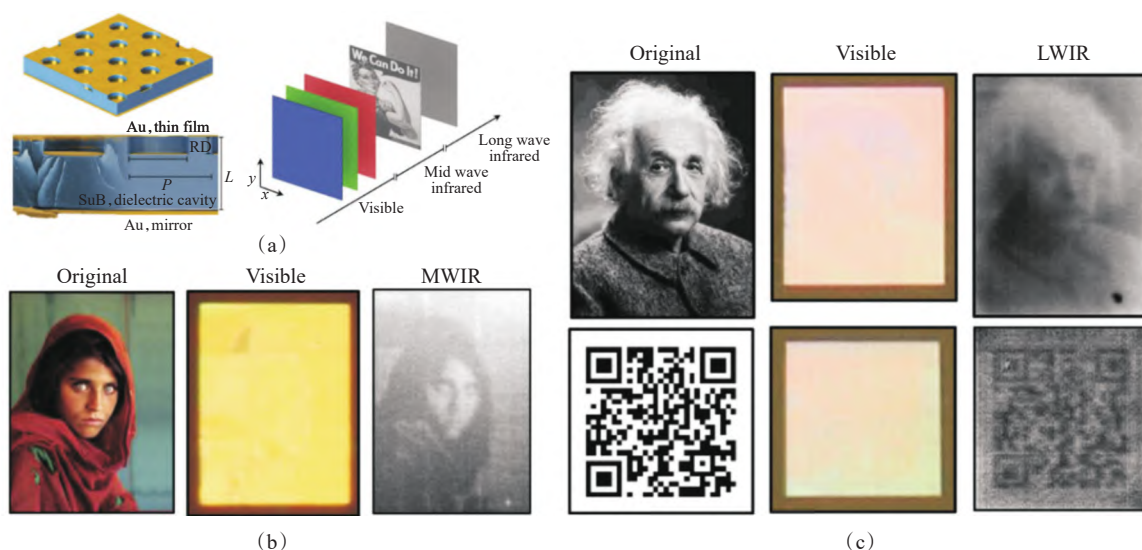


图4 通过压印等离子体腔进行隐蔽红外图像编码(a)图像编码和三能级等离子体系统; (b)编码到等离子体表面的阿富汗女孩的图像, 可见光摄像机拍摄的和编码的 MWIR 表面的红外图像; (c)同样步骤的爱因斯坦和二维码^[35]

Fig. 4 Covert infrared image encoding through imprinted plasmonic cavities (a) Image encoding and the three-level plasmonic system; (b) Image of the Afghan Girl encoded into the plasmonic surface, Visible camera and infrared image of the encoded MWIR surface; (c) Same procedure of Einstein and a QR code^[35]

通过将等离子体系统的孔径映射到相应的像素,将灰度图像和数据编码到表面。结合易于制造和在柔性基板上的兼容性,这项研究可以产生具有多光谱功能的新型等离子体表面,例如用于热管理、伪装和防伪的信息编码。同时,通过设计超构表面单元的几何结构,吸收、反射或透射特定波长的光,可以实现结构着色。如图 5 所

示,Wei 等人提出的超构表面可以在亚波长尺度上同时调制光谱和空间响应,将彩色打印和计算机生成的全息图集成在单层介质超构表面内^[36]。通过利用单个像素水平上的光谱和空间控制,可以将多组独立信息引入单层设备中。这种额外的复杂性和更大的信息容量有望用于信息安全和反盗版等新应用。

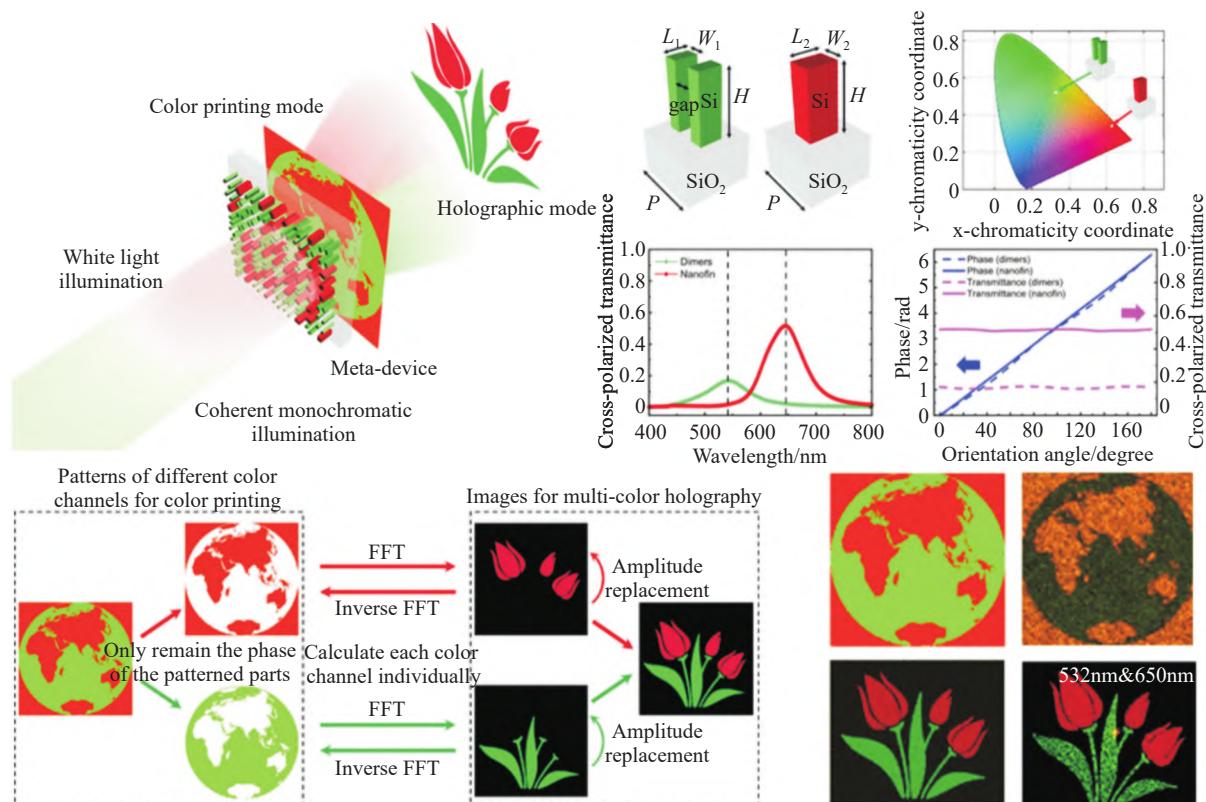


图 5 全介质超构表面的彩色印刷和全息照相的光谱和空间同步调制^[36]

Fig. 5 Simultaneous spectral and spatial modulation for color printing and holography using all-dielectric metasurfaces^[36]

在可见光范围内实现动态元全息长期以来面对帧率低和帧数小的挑战。如图 6 所示,华中科技大学的 Gao 等人利用时空复用的可见入射光,实现了高帧率大帧数的 3D 动态全息技术^[37]。动态空间通道复用元全息图可以显示 2^N 个不同的帧(超过 2×10^8 帧)。动态空间通道选

择元全息图可以在可见光范围内显示复杂的二维和三维全息视频。所有这三种设计都可以实现高帧率(9 523 fps),这远远超出了视觉残留的限制,利用这种方法可以显示超精细平滑的全息视频。

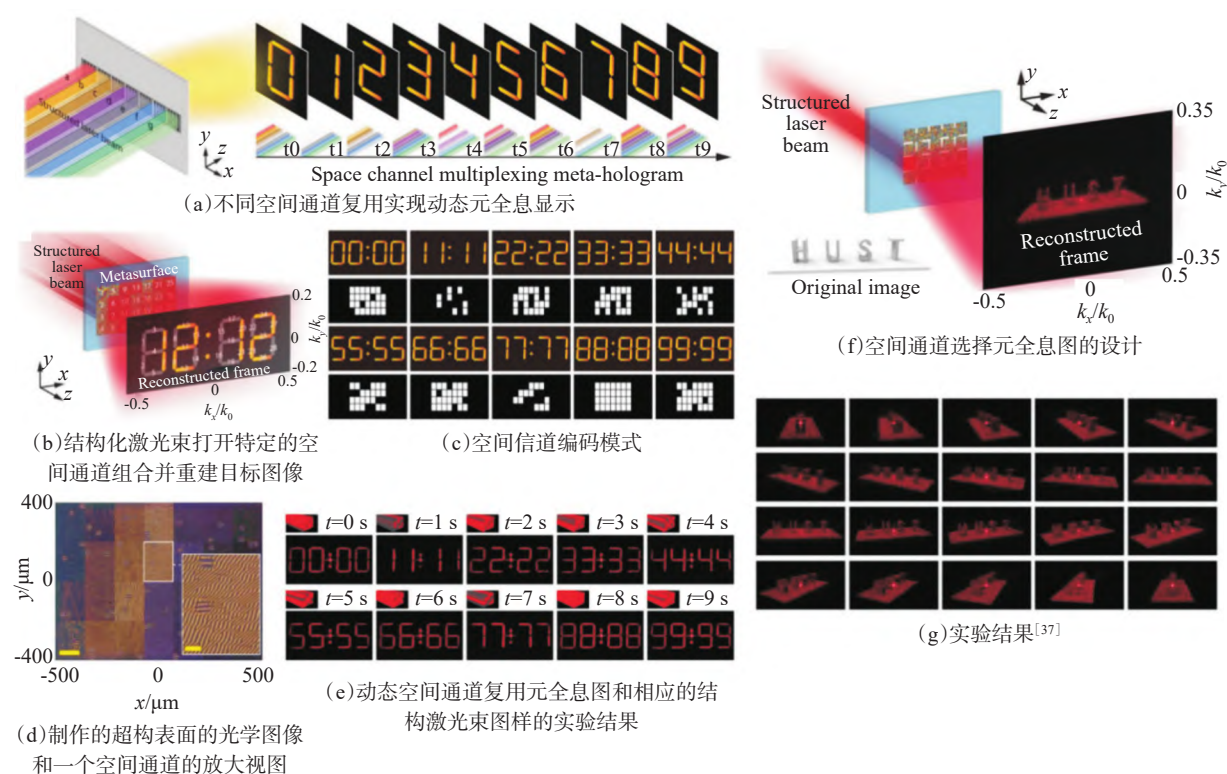


图6 大帧数高帧速可见光动态3D元全息

Fig. 6 Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate

2.2 动态调控结构几何参数

2.2.1 基于 MEMS/NEMS 的可调超构表面及其应用

通过外部机械系统改变超构表面内部结构参数或间距是实现动态调控的可行手段,而微机电系统(MEMS)就是其中之一^[39]。2011年,Zhu等人率先提出结合MEMS的超材料结构,实现入射光的偏振切换^[40],如图7所示。Roy等人提出了一种集成MEMS的超构表面透镜,使用了一个集成了显微操作针的聚焦离子束(FIB)系统,将平面透镜集成到2D微机电系统扫描仪上^[41]。这个装置可以通过电子控制来改变平面透镜的2D角旋转,并使其位置偏离原点几度。这类基于超构表面的平面透镜与2D微透镜的集成设计有扩展到更广泛领域的潜力,如基于微机电系统的显微镜系统、全息和投影成像、激光扫描仪、激光打印等。

将MEMS与超构表面结合的设计目前已经可以达到较为理想的动态调制效果。如图8所示,Han等人采用了Alvarez透镜(一种变焦距复合透镜)的机制,来构建一个MEMS驱动的超构

表面 Alvarez 透镜,并利用 Alvarez 调控原理进行调制^[42]。实验结果表明设计的超构表面透镜可以在20V以下的电压,产生6.3 μm的驱动位移,对应68 μm的焦距调制范围(近10倍)。但是,加工条件较为苛刻:需要将两个互补的超构表面分别与MEMS系统耦合,以及步进光刻(Stepper Lithography)、电感耦合等离子体(ICP)和深反应离子蚀刻(DRIE)等实验设备支持。因此,直接利用MEMS来改变超构表面与超构表面之间、超构表面与外部元件之间的间距成为了更被青睐的调制手段。图8(c)中的结构即是将MEMS改变两个已设计好的超构表面之间的间距,从而达到成像系统焦距动态可调的效果^[43]。当物体和小孔的间距 P 为15 mm且双超构表面透镜未加电压时,图像失焦。将电压增大至85 V,图像变得清晰。此时减小 P 至9.2 mm,为了获得同样清晰的图像需要60 V的电压。而如果不施加电压,则需要将物体移至 $P=4$ mm来保证图像清晰。而在此条件下施加电压图像又会完全失焦。这种设计能够在物距4~15 mm范围内通过电控重新聚焦,有望集成到毫米级的超紧凑

光学系统中。此外,Meng 等人通过将薄膜压电 MEMS 与基于间隙表面等离子体(GSP)的光学超构表面(OMS)相结合,开发了一个电可控

MEMS-OMS 平台,用于实现高效、宽带和快速的反射二维波前成形^[44]。

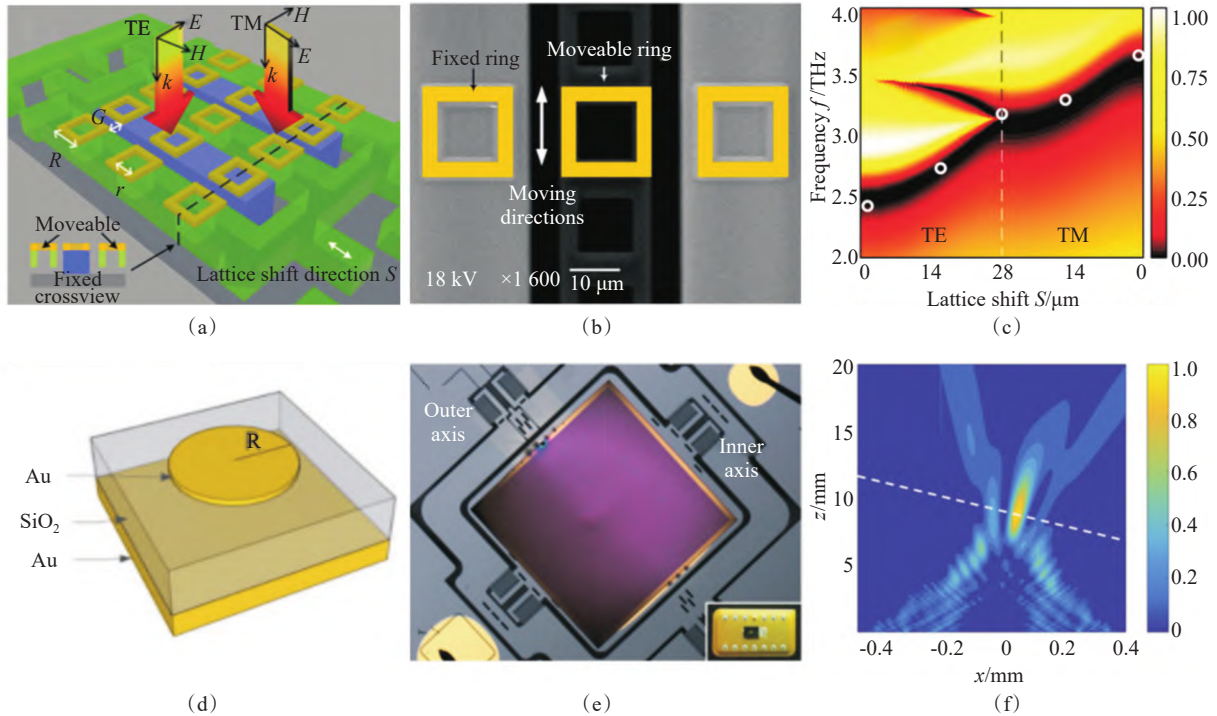
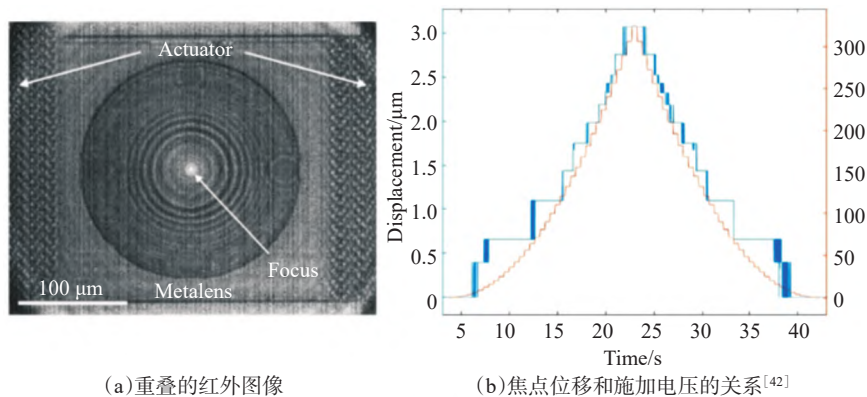


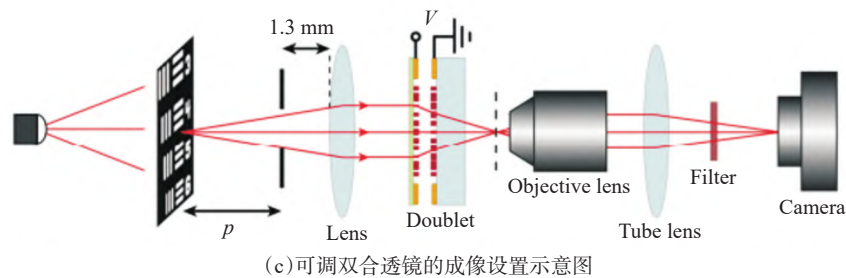
图7 (a)太赫兹微环超材料示意图;(b)金属微环的放大视图;(c)TE 和 TM 偏振入射的透射系数等值线图^[40];
(d)超构表面单元示意图;(e)微机电系统的光学显微镜图像;(f)反射光束的强度分布^[41]

Fig.7 (a)Schematics of the THz micro-ring metamaterial; (b)Zoomed-in view of the metallic micro-rings; (c)Contour map of transmission coefficient for TE and TM polarized incidences^[40]; (d)Schematic diagram of metasurface element; (e) Optical microscope image of MEMS scanner; (f)Distribution of the intensity of the reflected beam^[41]



(a)重叠的红外图像

(b)焦点位移和施加电压的关系^[42]



(c)可调双合透镜的成像设置示意图

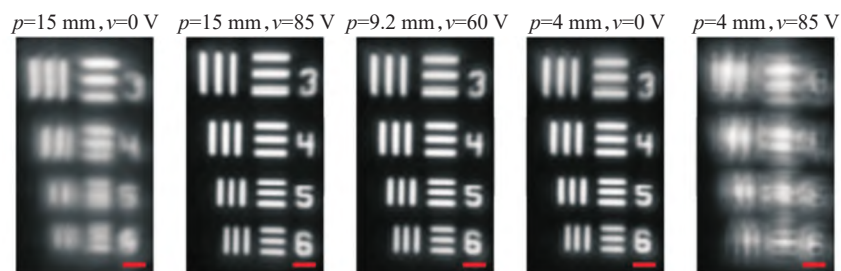
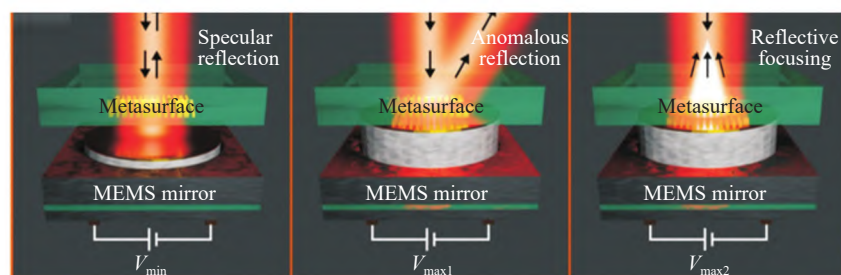
(d) 成像结果^[43](e) 利用 MEMS-OMS 进行二维波前整形, 左、中、右分别是 MEMS-OMS 在启动前的镜面反射示意图、异常反射和聚焦功能示意图^[44]

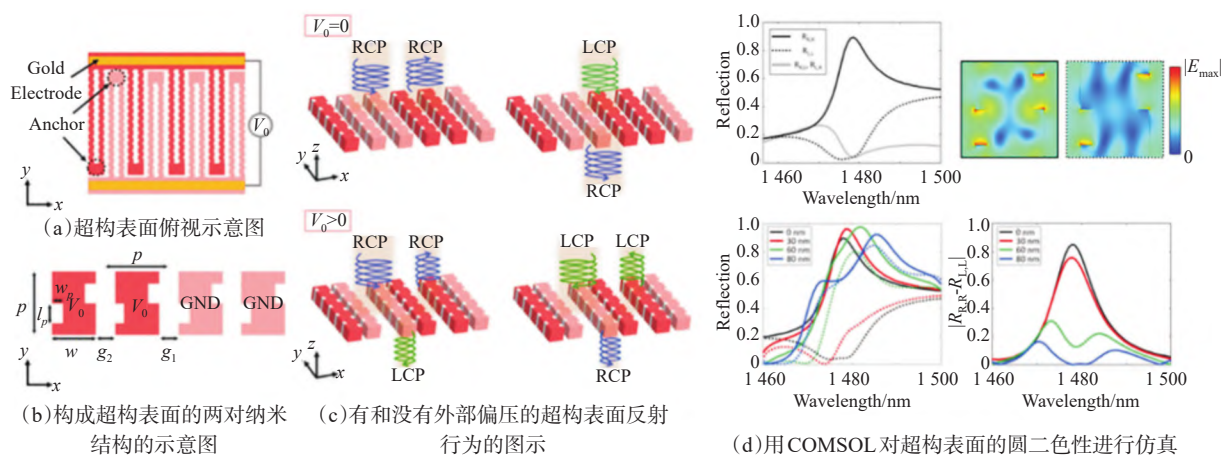
图 8 基于微机电系统超构表面的应用

Fig. 8 Measured electrostatic actuation behavior of the MEMS platform

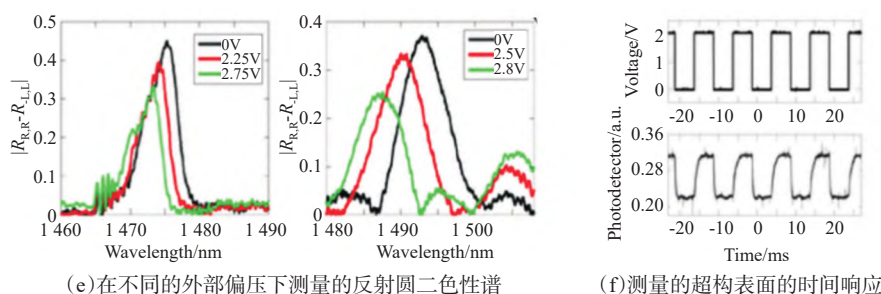
利用 MEMS 在低电压/功率下连续可调的优势,使得开发超紧凑尺寸和低功耗的连续可调/可重构的 MEMS-OMS 组件成为可能。超构表面中手性光学效应的动态控制可以促进新型偏振控制器件的发展,然而在没有额外复杂器件组合的情况下,超构表面本身的像素化重构仍具有挑战性。这就需要通过更小尺度的调控方式如纳米机电驱动(NEMS)来实现。

可重构超构表面在太赫兹和微波领域已经得到了广泛的研究^[45]。最近,通过垂直方向的 NEMS 来主动控制偏振和手性光学响应的工作也已经被证实^[46]。单层电介质超构表面能够实

现近乎一致的圆二色性(CD)反射^[47]。如图 9 所示, Kwon 在实验上展示了电信波长的 NEMS 电介质手性超构表面^[48]。当施加电偏压时,纳米结构之间感应的静电力使得能够作为外部偏压的函数进行连续的机械致动。在图 9(c)中所示,不施加偏压的结构反射右圆偏振光(RCP)而不改变手性,而左圆偏振光(LCP)则以手性反转的方式传输。当施加偏压时,悬浮的纳米结构被激活,其手性光学特性被连续调制,超构表面可表现出可忽略的手性光学响应。因此对于目标波长的 LCP 和 RCP 照明,其共极化和交叉极化的反射和透射变得相同。



(d) 用 COMSOL 对超构表面的圆二色性进行仿真

图 9 NEMS 可调手性介质超构表面^[48]Fig. 9 NEMS-tunable dielectric chiral metasurfaces^[10]

2.2.2 基于可拉伸柔性衬底的可调超构表面及其应用

虽然利用电控 MEMS, NEMS 的超构表面来改变结构参数, 可以实现小范围的精密调控, 但因系统结构的组成复杂, 加工制备需要较高的实验环境, 使得生产成本较高且通常局限于太赫兹波段和红外区域^[49-51]。

事实上, 利用机械拉伸柔性衬底以改变超构表面单元之间的距离不失为一种简单有效的调制手段。聚二甲基硅氧烷(PDMS)具有高弹性、无毒、低光损耗等优点, 在该领域得到了广泛的

应用。柔性和可拉伸衬底与微/纳米结构组合的可调谐性主要体现在结构阵列周期的变化上。如图 10 所示, Gutruf 等人于 2015 年就提出了一种机械可调谐全介质超构表面, 由嵌入弹性 PDMS 中的 TiO_2 柱状谐振器阵列构成^[52]。受单轴应变的影响, 阵列显示出明显的共振位移, 对于垂直于应变方向的激发, 共振峰位移朝向较长的波长; 对于沿应变方向偏振的激发, 共振峰位移朝向较短的波长。当施加的应变仅为 6% 时, 测得的共振峰从原位置红移为 5.08%, 在不同偏振条件下, 共振峰蓝移的比例为 0.96%。

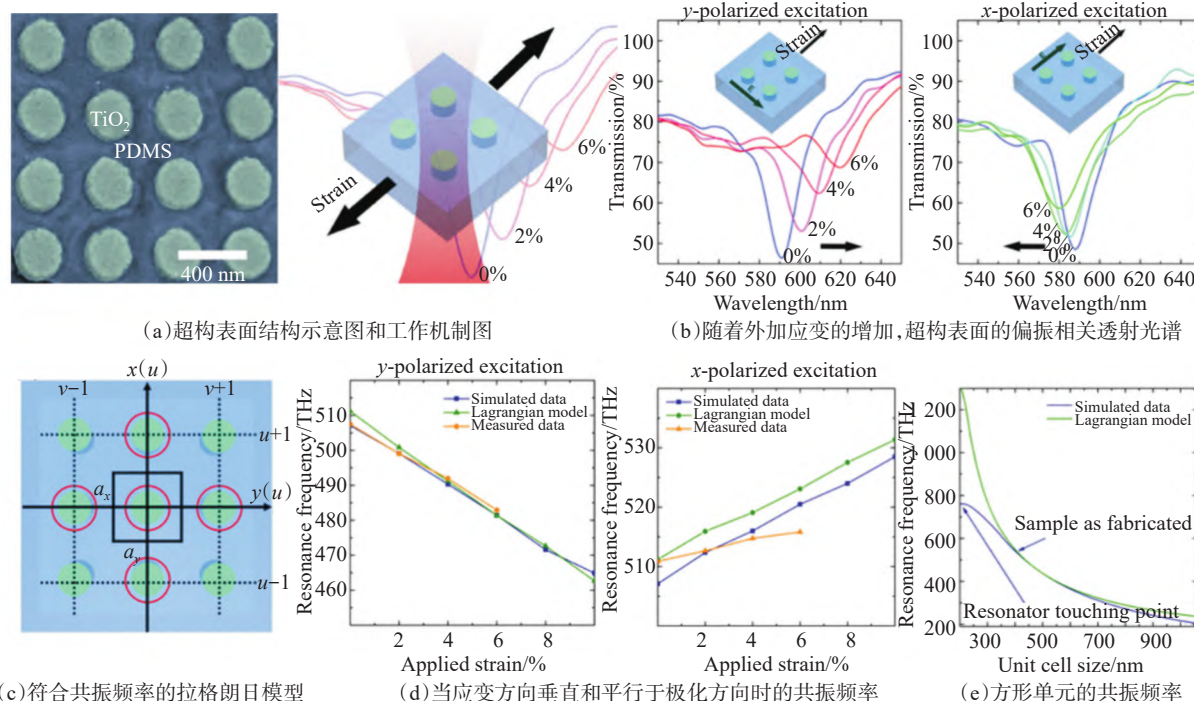
图 10 可见光频率下机械可调谐电介质超构表面谐振器^[52]

Fig. 10 Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies

动态色彩调谐技术在隐身、防伪、显示技术等方面有着广泛的应用, 是结构色彩领域中一个非常重要的研究方向。如图 11 所示, 2017 年,

Song 等人将 PDMS 引入常规等离子体结构中以展示动态可调谐结构色^[53]。随着相位匹配条件的改变, PDMS 上结构的周期将同时改变, 从而

导致表面等离子体共振 (SPR) 波长的动态调谐。此外, 与以前的电介质 PDM 相比, 所提出的方法不需要厚的、高折射率的电介质纳米结构或特定的人射角来产生结构色。此外, 它还可以通过不同入射角度下周期的变化提供宽的颜色范围。为了研究其物理机制, 采用三维时域有限差分 (FDTD) 方法模拟了光的传输行为。可以看出, 如图 11(e) 所示, 随着周期的增加, 共振波长的红移导致结构颜色的变化。与此同时, 金属-绝

缘体-金属 (MIM) 结构可能支持更强的模式耦合^[54-55]。MIM 结构示意图如图 11(f) 所示。介电层 SiN_x 的厚度为 80 nm。顶部铝层将垂直波矢量转换为水平波矢量, 然后水平波矢量耦合到介电层中。最后, 底部铝层将耦合模式转换为透射模式。计算出的传输 CIE 色度图呈现出从黄色到灰色的颜色。因此, 这种巨大的色域变化可以用作外力的颜色调控器^[56]。

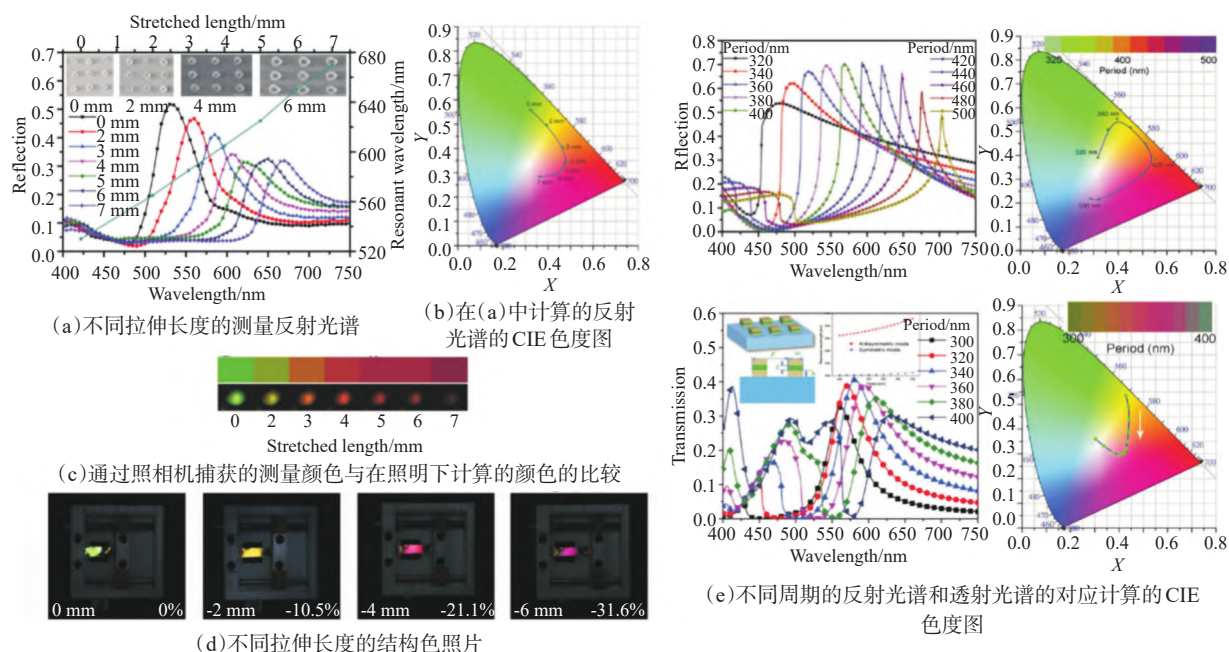


图 11 具有拉伸基底的主动可调结构显色^[53]

Fig. 11 Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies

嵌入柔性或可伸缩衬底的可调谐超构表面也为可变焦透镜、金属透镜、可切换全息成像等应用提供有效的方法。例如, Malek 等人展示了在 PDMS 上用金纳米棒制作的可重构纯相位计算机生成的超构表面全息图, 其中最多有三个像面在可见光区域工作^[57], 如图 12 所示。这项工作作为可伸缩超构表面全息图用作动态可重构光通信和显示的平面器件开辟了可能性。Zhang 等人利用共振效应和超构表面的几何相位来同时塑造光的振幅、相位和偏振, 并重建具有定制图案和偏振的矢量全息图^[58]。通过连续选择所需的偏振组合, 演示了具有 4 倍简并度的矢量元全息图的动态显示。这种方法可以在每一帧同时精确地调制空间相位和偏振分布, 而基于偏振

旋转的动态可调谐性易于实现。Wang 等人设计并验证了一种经济简单的全息复用方法: 使用空间调制飞秒激光脉冲处理可重构全息图^[59]。通过两幅二元全息图的加权叠加, 设计了可重构全息图, 并用调制的四能级多焦阵列脉冲在薄膜上制作了可重构全息图。展示了全息图像从“愤怒的脸”到“笑脸”的变化, 以说明所提出方法的有效性, 该方法在防伪和光学加密方面具有相当大的潜力。Ahmed 等人制备的可重构、柔性的金属传感器, 在理论实验上均表明, 可以精确地映射聚焦波前、带宽和焦距^[60]。综上所述, 基于可拉伸柔性衬底的超构表面有以下优点: 操作简单、成本低、调谐范围广同时不可避免地有调制速度低、稳定性差、合成难度高等不足之

处^[13,61-63]。

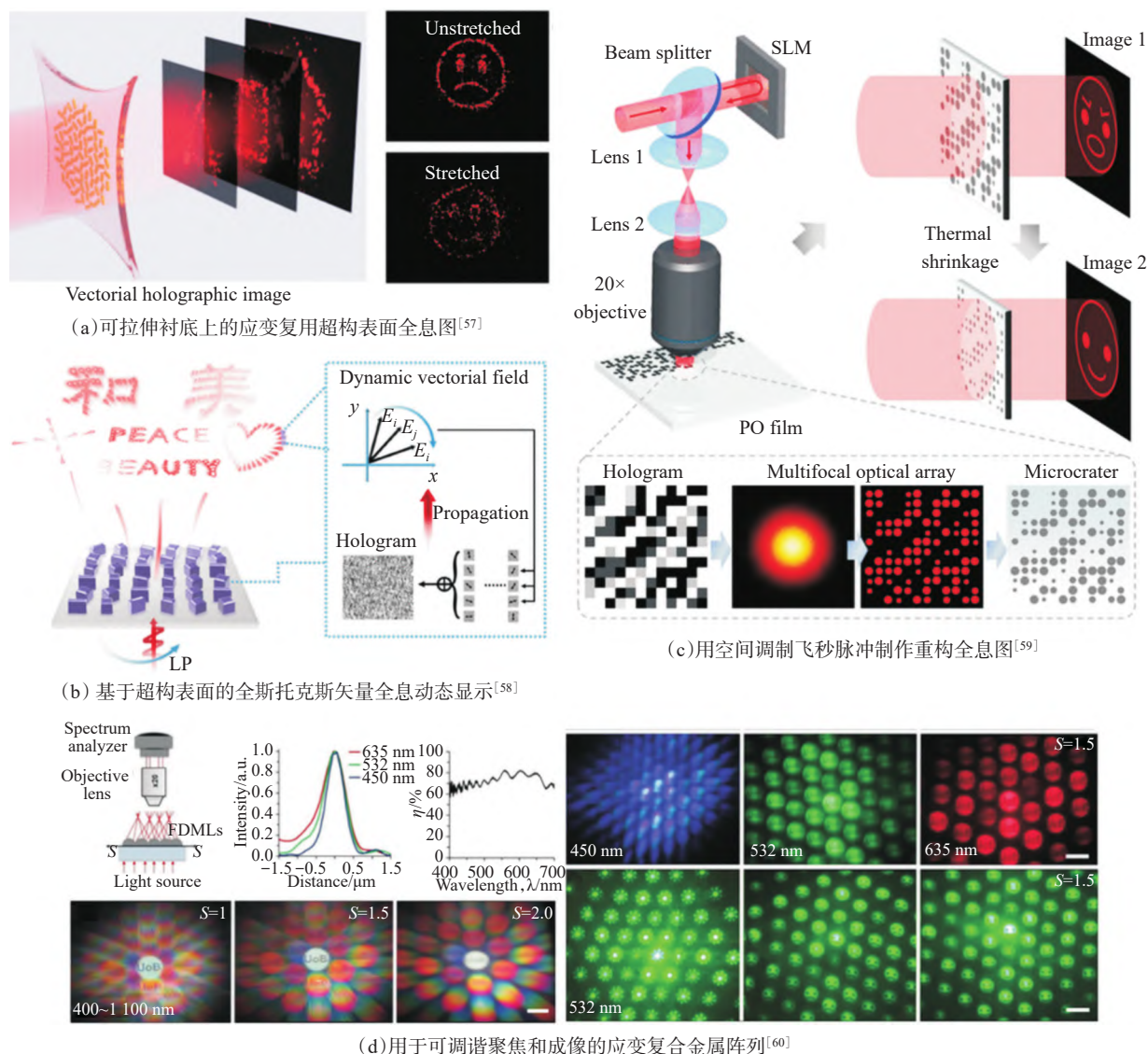


图 12 可拉伸型光学超构表面的应用

Fig. 12 Application of stretchable optical metasurface

2.3 动态调控介质折射率

利用超构表面结构材料本身(折射率、介电常数等)的动态可调特性,例如使用相变材料、化学反应、二维材料、电压调控、温度调控等多种方法动态调控材料的折射率等参数,对超构表面器件产生的光学响应进行动态调节。材料本身动态调节的常用手段,一是通过改变材料的载流子浓度来改变材料的折射率(或介电常数),通常是外加电压方法改变载流子浓度,常用的材料如石墨烯等二维材料、半导体材料、液晶等;二是通过改变温度的热光效应来改变材料的折射率(或介电常数),常用的材料如硅、相变材料(GST、

VO₂)、氮化硅等;第三种是通过化学反应法改变材料的内部化学结构来改变材料的折射率(或介电常数),常用的材料如卤素钙钛矿等。上述折射率(或介电常数)调控方法目前正在广泛研究中,但它们存在材料调节幅度不高的问题,因此如何改变材料本身的晶格特性,更好地提升材料折射率或介电常数的动态变化效果,是未来研究需要解决的重要问题。

2.3.1 石墨烯超透表面

2004年,Geim和Novoselov^[64]通过机械剥离高定向热解石墨,以寻找场效应晶体管的新沟道材料,从而成功得到了单层石墨烯。通过改变

电压均匀地控制石墨烯中的载流子,从而调控石墨烯的介电常数以及折射率,石墨烯最大可提供约 $2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (理论上)的高电荷载流子迁移率^[65],使其介电常数可在介质特性与金属特性之间调控。石墨烯在太赫兹和中红外波段是支持表面等离子体的,且不存在金属表面等离子体能量损失大、载流子密度调制不足等缺点,表现出相对较低的损耗。此外,石墨烯中的费米能量有两种调节方式:化学掺杂、静电门控。这些优异的特性使得石墨烯在动态可调谐超构表面、调制器、光电探测器和传感器的潜在应用中具有广阔的应用前景^[66-71]。石墨烯的动态可调谐光学性质引起了人们的广泛关注,例如石墨烯多层膜在

克尔非线性材料存在下受到高强度的非线性等离子体激振^[72],石墨烯/介电体/石墨烯结构中光学双稳态与多稳态的转变强烈地依赖于石墨烯的费米能量、石墨烯层的厚度和介电层的介电常数^[73-74]。毫无疑问,基于石墨烯的动态可调谐超构表面的发展与研究日渐成熟,在未来的动态器件研究领域将占据重要位置。

如图 13 所示,曼彻斯特大学 Ansell 等人^[67]提出了混合石墨烯动态调制器设计,利用石墨烯费米能级动态可调性,制备了多种混合石墨烯动态调制器,实验结果显示该设计为芯片上实现高效可调谐石墨烯基有源集成器件提供了很好的应用前景。

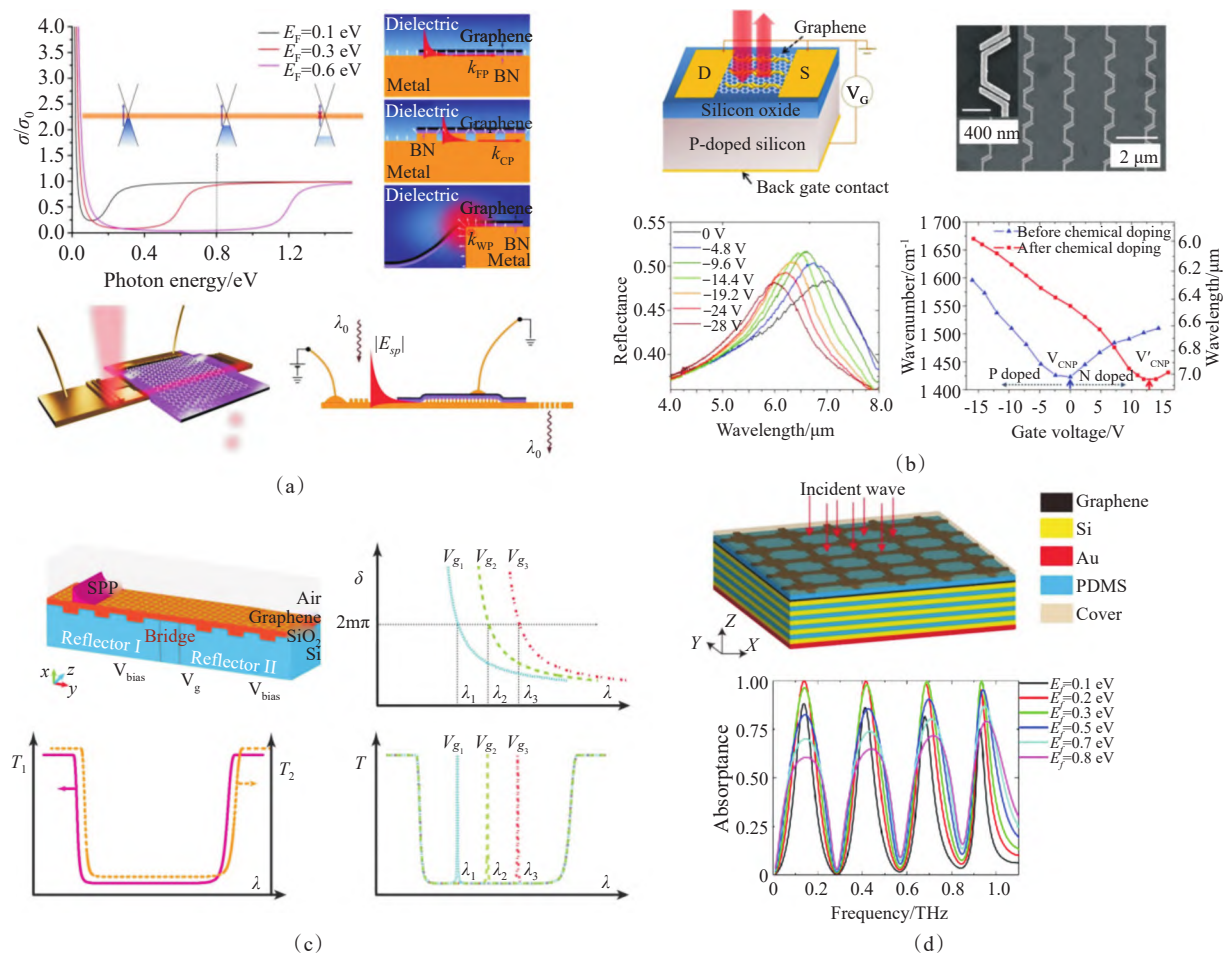


图 13 (a) 混合石墨烯动态调制器工作原理^[67]; (b) 纳秒响应石墨烯宽带可调谐超构表面光学天线^[68]; (c) 动态可调谐硅基石墨烯超构表面法布里-佩罗光谱仪^[69]; (d) 基于石墨烯超构表面的配位多波段完美吸收器^[76]

Fig. 13 (a) Hybrid graphene plasmonic waveguide modulator^[67]; (b) Graphene-based broadband tunable metasurface optical antenna with Nanosecond response^[68]; (c) Active graphene-based silicon metasurface Fabry-Pérot spectrometer^[69]; (d) Coordination multiband perfect absorber with tunable graphene-based multilayer metasurface^[76]

哈佛大学 Capasso 教授课题组^[68]展示了石墨烯结构上的加电可调谐耦合天线阵列,具有较

大的近红外调谐范围(1 100 nm),其时间响应可达纳秒量级。制备器件在 30 MHz 处的截止频

率 3 dB, 并且进一步可增加到千 GHz 范围。新加坡 Chu 等人^[75]基于石墨烯带超构表面阵列设计了中红外动态调控等离子体激元开关, 当费米能级在 0.2~0.25 eV 调控, 四层石墨烯阵列可以实现调制深度 13 dB 和共振波长调制范围 0.94 μm , 而单层石墨烯阵列的调制深度 2.8 dB 和共振波长调制范围可达 1.85 μm 。我们课题组^[69, 70, 76-79]基于石墨烯电荷流子迁移率加电可调特性, 提出了硅基石墨烯超构表面法布里-佩罗光谱仪、硅基石墨烯超构表面的多波段完美吸收器、石墨烯基阵列结构法诺共振调制器、高灵敏度石墨烯基多层阵列结构传感器等动态调谐设计, 实现了动态调控窄带滤波、完美吸收、传感、成像以及偏振等应用。

2.3.2 相变材料超构表面

石墨烯等二维材料通过电控调节石墨烯中载流子浓度调控介电常数以及折射率, 存在材料调节幅度不高的问题。相变材料可以改变材料本身的晶格特性, 相对来说, 可以更好地提升材料折射率或介电常数的动态变化效果。目前常

见的相变材料有 GST (Germanium Antimony Tellurium)^[80]或二氧化钒(VO_2)^[81], 通常通过外加激光、改变温度、电压等进行调控相变材料的晶格状态。因此, 相变材料能够为可控超构表面设计及性能提升带来更多应用空间。GST 是锗锑碲系相变材料, 是目前最成熟的相变材料, 通常有非结晶态和结晶态两种状态。如图 14 所示^[80], 两种状态 GST 的折射率与介电常数有很大的不同, 可以通过控制电压、温度变化 (180~600 $^{\circ}\text{C}$ 切换)、脉冲激光照射 (6 ns) 等调控方式来进行结晶态和非结晶态的相互切换。Cao 等人^[80]研究了 GST 圆孔超构表面阵列中可调谐电磁诱导透明的理论仿真与实验结果, 并且讨论了结晶态与非结晶态的光学可调群速度 n_g 与透射相移 φ 变化情况。浙江大学 Qiu 课题组^[82]设计制备了 GST 纳米盘超构表面阵列, 实验上实现 GST 纳米盘动态可调相变回指态的切换。Capasso 课题组^[83]利用相变材料 GST 研究了纳米光子学的极化子动态可调变化效应。

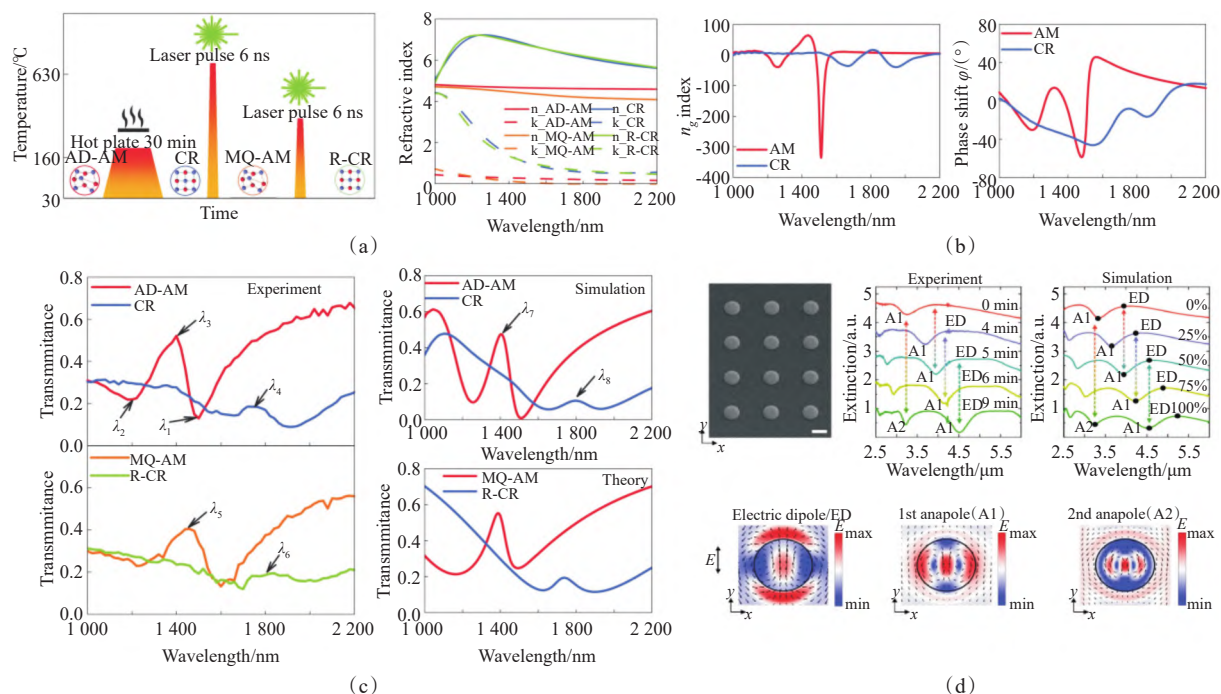


图 14 (a) 相变材料 GST 晶体可逆相变示意图(温度/脉冲激光照射);(b) 结晶态与非结晶态的光学可调群速度 n_g 与透射相移 φ ;(c) GST 超构表面可调谐 EIT 的实验实现与理论仿真比较^[80];(d) GST 纳米盘阵列中动态可调相变回指态的实验实现^[82]

Fig. 14 (a) Schematic illustration of reversible phase change of GST metasurface; (b) Optical tunable group index n_g and phase shift of transmission φ ; (c) Experimental realisation of reconfigurable EIT compared with theory and simulation^[80]; (d) Experimental realization of active tunable anapole state in structured GST nanodisks^[82]

2.3.3 卤素钙钛矿超构表面

卤素钙钛矿是一种带隙可调的半导体材料, 可以通过化学法或电子掺杂调整材料中的卤素原子的比例, 卤素原子的改变会对材料的带隙产生影响。除此之外, 卤素钙钛矿具有很快的载流子迁移速度、很高的光致发光效率、低的制作成本和较高的折射率等优点^[84-87]。卤素钙钛矿具有与传统透明材料相当甚至更高的折射率, 这使得它可以用于设计超构表面, 并且其可调的带隙更使得它在可调谐超构表面的研究中展现出巨大的潜力。卤素钙钛矿发射峰虽然可通过阴离子交换合成进行色彩显示调整, 但是色彩变化时间较长且不易控制, 目前限制了其一步应用发展。利用卤素钙钛矿以及超构表面结构的自由

度来制备理想动态可调器件, 未来有望实现快速、精准调制调控发射峰、色彩动态合成等应用。

如图 15 所示, Tang 等人^[88]提出了基于卤素钙钛矿的可调谐单模激光器, 利用双源化学气相沉积法在水平管式炉中生长了卤素钙钛矿微球用以激发单模激光。通过调节卤素钙钛矿中卤素原子的比例, 可以实现对材料带隙的调节, 进而实现不同波长的单模激光。Gao 等人^[89]的工作中提出了一种利用光子掺杂的可逆彩色纳米打印模式, 该模式由卤素钙钛矿光栅的结构色和光子发射间的相互作用来触发。不同波长的入射光会被其对应的共振结构反射或吸收, 呈现不同的结构色, 且通过化学气相沉积法对卤素钙钛矿中的卤素原子进行替换可以进一步拓展显示色域。

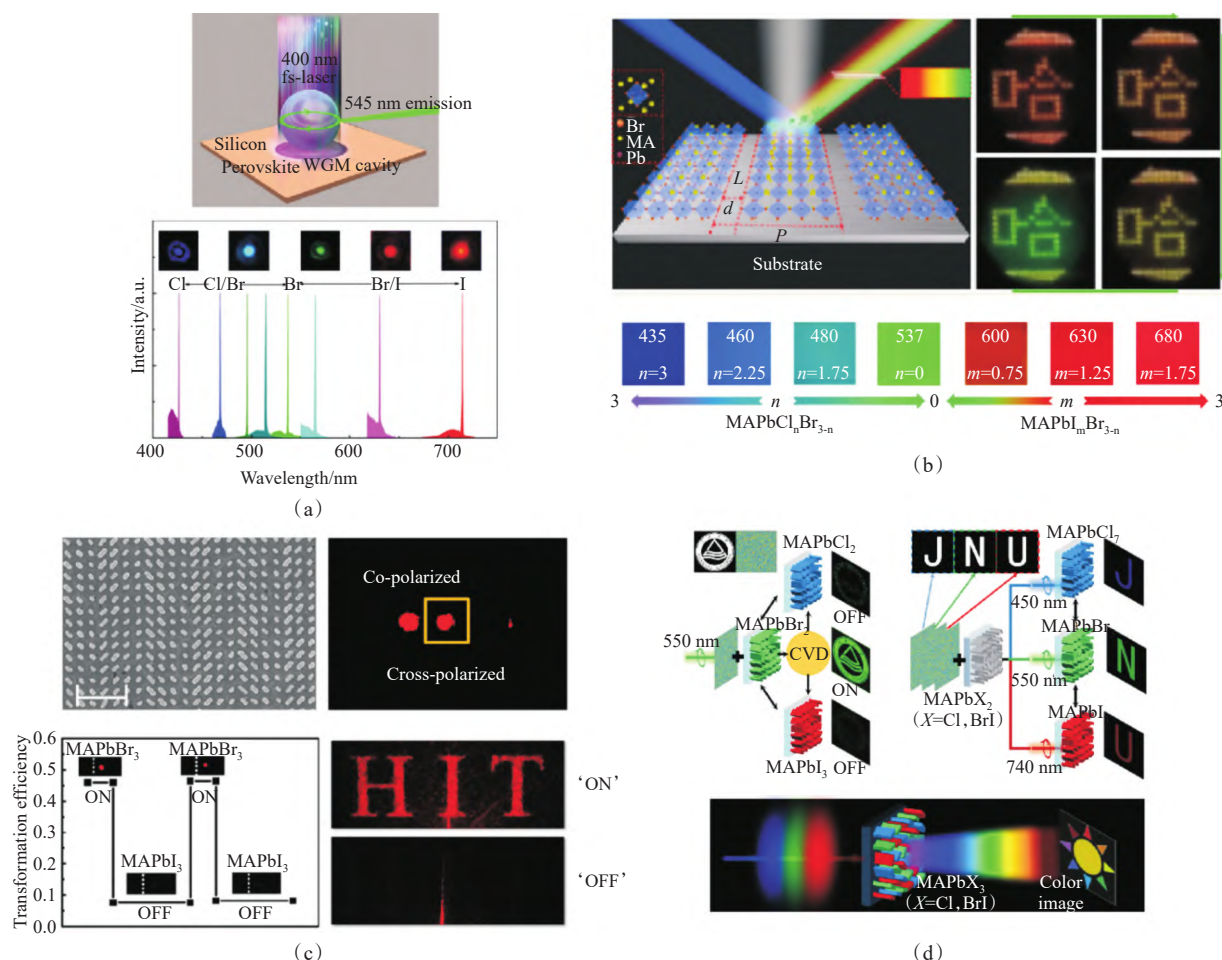


图 15 (a) 激发单模激光的钙钛矿示意图和多色单模激光器发射图^[88]; (b) 基于钙钛矿的彩色纳米打印^[89];

(c) 反射模式钙钛矿可调谐超构表面^[90]; (d) 透射模式钙钛矿可调谐超构表面^[91]

Fig 15 (a) Schematic diagram of halogen perovskite used to excite single-mode lasers and multicolor single-mode lasers with emission images^[88]; (b) Color nano-printing based on halogen perovskite metasurfaces^[89]; (c) Active metasurfaces based on halogen perovskite in reflection mode^[90]; (d) Active metasurfaces based on halogen perovskite in transmission mode^[91]

异性,在液晶单元两侧施加偏置电压可以改变超构表面单元产生的局部相位响应,进而改变金属透镜的焦距,并进一步地演示了一种具有连续变焦能力和高达 20% 总焦移的电驱动 LC 的金属透镜,可在使用 9.8 V 电压偏置时实现两个离散焦距之间的高对比度切换。由于其超薄厚度和适应性强的设计,LC 驱动的电介质超构表面为现代成像应用中的紧凑变焦透镜提供了新的机会。当然,这一研究趋势也遇到了一些挑战,将超构表面结构与液晶相结合的构型,大大提高了器件的复杂度和制备的难度。

3 总结与展望

本文总结了在光场调控应用中的动态可调超构表面的最新研究进展。首先介绍了一些与超构表面相关背景与应用研究。超构表面静态结构只能实现固定光学特性,无法实现动态调

制,限制了进一步应用空间。动态调控超构表面结构更适用于目前广泛的应用需求。动态调控超构表面方法分为入射光调制、材料折射率调制及结构动态调制三种。随后从三种动态调制方法出发,系统地介绍各种调制方法下的调控机制及最新研究进展,并从改变温度、外加电压、化学变化、激光脉冲照射、偏振变换等调控方式具体讨论动态可调谐超构表面在结构色、偏振转换、完美吸收、图像处理、法诺共振效应、可变开关等众多领域的应用研究。目前的动态可调谐超构表面仍然存在调节幅度不高以及振幅、相位、偏振等不能同时动态调控的问题需要解决。因此发展新的光源及超构表面结构与材料,研究新结构的动态调控物理机制,是进一步提升超构表面调控品质的关键问题。发展动态可调超构表面器件为研究纳米光子学与集成光学提供非常有前景的平台。

参考文献

- [1] Hu J, Bandyopadhyay S, Liu Y, *et al.* A review on metasurface: From principle to smart metadevices[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 8: 586087.
- [2] Hsiao H-H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.
- [3] Qiu C-W, Zhang T, Hu G, *et al.* Quo vadis, metasurfaces?[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(13): 5461-5474.
- [4] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: A review of fundamentals and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018, 81(2): 026401.
- [5] Nanfang Yu, Patrice Genevet, Mikhail A Kats, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [6] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, *et al.* Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [7] Z Yang, Z Wang, Y Wang, *et al.* Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling[J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9: 4607.
- [8] Deng Y, Wu C, Meng C, *et al.* Functional metasurface quarter-wave plates for simultaneous polarization conversion and beam steering[J]. *ACS Nano*, American Chemical Society, 2021, 15(11): 18532-18540.
- [9] Aieta F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Lett.*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [10] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4: 2807.
- [11] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427-427.

- [12] Yu C-Y, Zeng Q-C, Yu C-J, *et al.* Scattering analysis and efficiency optimization of dielectric pancharatnam-Berry-phase metasurfaces[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(3): 586.
- [13] Kaissner R, Li J, Lu W, *et al.* Electrochemically controlled metasurfaces with high-contrast switching at visible frequencies[J]. *Science Advances*, 2021, 7(19): eabd9450.
- [14] Decker M, Staude I, Falkner M, *et al.* High-efficiency dielectric huygens' surfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [15] Huang Y, Zhu J, Jin S, *et al.* Polarization-controlled bifunctional metasurface for structural color printing and beam deflection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1707.
- [16] Zhou G-N, Sun B-H, Liang Q-Y, *et al.* Beam-deflection short backfire antenna using phase-modulated metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(1): 546-551.
- [17] Aieta F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, American Chemical Society, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [18] Shalaginov M Y, An S, Zhang Y, *et al.* Reconfigurable all-dielectric metalens with diffraction-limited performance [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1225.
- [19] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308 – 312.
- [20] Lee G-Y, Yoon G, Lee S-Y, *et al.* Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, 2018, 10(9): 4237-4245.
- [21] Sung J, Lee G-Y, Lee B. Progresses in the practical metasurface for holography and lens[J]. *Nanophotonics*, De Gruyter, 2019, 8(10): 1701-1718.
- [22] Cai H, Dolan J A, Gordon G S D, *et al.* Polarization-insensitive medium-switchable holographic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9): 2581-2589.
- [23] Che Y, Wang X, Song Q, *et al.* Tunable optical metasurfaces enabled by multiple modulation mechanisms [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(15): 4407-4431.
- [24] Badloe T, Lee J, Seong J, *et al.* Tunable metasurfaces: The path to fully active nanophotonics [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(9): 2000205.
- [25] Luo S, Hao J, Ye F, *et al.* Evolution of the electromagnetic manipulation: From tunable to programmable and intelligent metasurfaces[J]. *Micromachines*, 2021, 12(8): 988.
- [26] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, *et al.* Angle-multiplexed metasurfaces: Encoding independent wavefronts in a single metasurface under different illumination angles[J]. *Physical Review X*, American Physical Society, 2017, 7(4): 041056.
- [27] Hu D, Lu Y, Cao Y, *et al.* Laser-splashed three-dimensional plasmonic nanovolcanoes for steganography in angular anisotropy[J]. *ACS Nano*, American Chemical Society, 2018, 12(9): 9233-9239.
- [28] Shi Z, Zhu A Y, Li Z, *et al.* Continuous angle-tunable birefringence with freeform metasurfaces for arbitrary polarization conversion [J]. *Science Advances*, American Association for the Advancement of Science, 2020, 6(23): eaba3367.
- [29] Tang J, Li Z, Wan S, *et al.* Angular multiplexing nanoprinting with independent amplitude encryption based on visible-frequency metasurfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, American Chemical Society, 2021, 13(32): 38623-38628.
- [30] Jin L, Dong Z, Mei S, *et al.* Noninterleaved metasurface for (26-1) spin- and wavelength-encoded holograms[J]. *Nano Letters*, American Chemical Society, 2018, 18(12): 8016-8024.
- [31] Wen D, Cadusch J J, Meng J, *et al.* Vectorial holograms with spatially continuous polarization distributions [J]. *Nano Letters*, American Chemical Society, 2021, 21(4): 1735-1741.

- [32] Deng J, Yang Y, Tao J, *et al.* Spatial frequency multiplexed meta-holography and meta-nanoprinting [J]. ACS Nano, American Chemical Society, 2019, 13(8): 9237-9246.
- [33] Zhao H, Quan B, Wang X, *et al.* Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on a metasurface in the terahertz band [J]. ACS Photonics, American Chemical Society, 2018, 5(5): 1726-1732.
- [34] Bao Y, Yan J, Yang X, *et al.* Point-source geometric metasurface holography [J]. Nano Letters, American Chemical Society, 2021, 21(5): 2332-2338.
- [35] Franklin D, Modak S, Vázquez-Guardado A, *et al.* Covert infrared image encoding through imprinted plasmonic cavities [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 93.
- [36] Wei Q, Sain B, Wang Y, *et al.* Simultaneous spectral and spatial modulation for color printing and holography using all-dielectric metasurfaces [J]. Nano Letters, American Chemical Society, 2019, 19(12): 8964-8971.
- [37] Gao H, Wang Y, Fan X, *et al.* Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate [J]. Science Advances, American Association for the Advancement of Science, arXiv:1909.05642.
- [38] Jung C, Kim G, Jeong M, *et al.* Metasurface-driven optically variable devices [J]. Chemical Reviews, 2021, 121(21): 13013-13050.
- [39] Karim M F, Liu A Q, Alphones A, *et al.* A tunable bandstop filter via the capacitance change of micromachined switches [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(4): 851.
- [40] Zhu W M, Liu A Q, Zhang W, *et al.* Polarization dependent state to polarization independent state change in THz metamaterials [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(22): 221102.
- [41] Roy T, Zhang S, Jung I W, *et al.* Dynamic metasurface lens based on MEMS technology [J]. APL Photonics, 2018, 3(2): 021302.
- [42] Han Z, Colburn S, Majumdar A, *et al.* MEMS-actuated metasurface Alvarez lens [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2020, 6(1): 79.
- [43] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, *et al.* MEMS-tunable dielectric metasurface lens [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 812.
- [44] Meng C, Thrane P C V, Ding F, *et al.* Dynamic piezoelectric MEMS-based optical metasurfaces [J]. Science Advances, 2021, 7(26): eabg5639.
- [45] Cong L, Pitchappa P, Wang N, *et al.* Electrically programmable terahertz diatomic metamolecules for chiral optical control [J]. Research, 2019, (1): 1-11.
- [46] Zhang Q, Plum E, Ou J, *et al.* Electrogyration in metamaterials: Chirality and polarization rotatory power that depend on applied electric field [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(4): 2001826.
- [47] Semnani B, Flannery J, Al Maruf R, *et al.* Spin-preserving chiral photonic crystal mirror [J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 23.
- [48] Kwon H, Faraon A. NEMS-tunable dielectric chiral metasurfaces [J]. ACS Photonics, 2021, 8(10): 2980-2986.
- [49] Chen S, Liu Z, Du H, *et al.* Electromechanically reconfigurable optical nano-kirigami [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1299.
- [50] Han Y, Chen S, Ji C, *et al.* Reprogrammable optical metasurfaces by electromechanical reconfiguration [J]. Optics Express, 2021, 29(19): 30751.
- [51] Che Y, Wang X, Song Q, *et al.* Tunable optical metasurfaces enabled by multiple modulation mechanisms [J]. Nanophotonics, 2020, 9(15): 4407-4431.
- [52] Gutruf P, Zou C, Withayachumnankul W, *et al.* Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies [J]. ACS Nano, 2016, 10(1): 133-141.
- [53] Song S, Ma X, Pu M, *et al.* Actively tunable structural color rendering with tensile substrate [J]. Advanced Optical

- Materials, 2017, 5(9): 1600829.
- [54] Xu T, Wu Y-K, Luo X, *et al.* Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging [J]. Nature Communications, 2010, 1(1): 59.
- [55] Christ A, Ekinici Y, Solak H H, *et al.* Controlling the Fano interference in a plasmonic lattice[J]. Physical Review B, 2007, 76(20): 201405.
- [56] Mizuno A, Ono A. Dynamic control of the interparticle distance in a self-assembled Ag nanocube monolayer for plasmonic color modulation[J]. ACS Applied Nano Materials, American Chemical Society, 2021, 4(9): 9721-9728.
- [57] Malek S C, Ee H-S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate[J]. Nano Letters, 2017, 17(6): 3641-3645.
- [58] Zhang S, Huang L, Li X, *et al.* Dynamic display of full-stokes vectorial holography based on metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2021, 8(6): 1746-1753.
- [59] Wang Z, Jiang L, Li X, *et al.* Thermally reconfigurable hologram fabricated by spatially modulated femtosecond pulses on a heat-shrinkable shape memory polymer for holographic multiplexing [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(43): 51736-51745.
- [60] Ahmed R, Butt H. Strain-multiplex metalens array for tunable focusing and imaging[J]. Advanced Science, 2021, 8(4): 2003394.
- [61] Fang Y, Ni Y, Leo S-Y, *et al.* Reconfigurable photonic crystals enabled by pressure-responsive shape-memory polymers[J]. Nature Communications, 2015, 6: 7416.
- [62] She A, Zhang S, Shian S, *et al.* Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. Science Advances, 2018, 4(2): eaap9957.
- [63] Xu Z, Lin Y. A Stretchable terahertz parabolic-shaped metamaterial[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(19): 1900379.
- [64] 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.
- [65] Schedin F, Geim A K, Morozov S V, *et al.* Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene[J]. Nature materials, 2007, 6(9): 652-655.
- [66] Huang S, Song C, Zhang G, *et al.* Graphene plasmonics: physics and potential applications[J]. Nanophotonics, 2016, 6(6): 1191-1204.
- [67] Ansell D, Radko I P, Han Z, *et al.* Hybrid graphene plasmonic waveguide modulator [J]. Nature Communications, 2015, 6: 8846.
- [68] Yao Y, Kats M A, Shankar R, *et al.* Wide wavelength tuning of optical antennas on graphene with nanosecond response time[J]. Nano Letters, 2014, 14: 214-219.
- [69] Wang X, Chen C, Pan L, *et al.* A graphene-based Fabry-Pérot spectrometer in mid-infrared region[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32616.
- [70] Bao Z, Wang J, Hu Z D, *et al.* Coordinated multi-band angle insensitive selection absorber based on graphene metamaterials[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31435-31445.
- [71] Cruz G G. Bulk and surface plasmons in graphene finite superlattices[J]. Superlattices and Microstructures, 2019, 125: 315-321.
- [72] Wang F, Wang Z, Qin C, *et al.* Asymmetric plasmonic supermodes in nonlinear graphene multilayers[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1234-1241.
- [73] Guo L, He Y, Chen Y, *et al.* Controllable transition between optical bistability and multistability in graphene/dielectric/graphene structure[J]. The European Physical Journal B, 2018, 91(5): 79.

- [74] Bao Z, Wang J, Hu Z D, *et al.* Coordination multi-band absorbers with patterned irrelevant graphene patches based on multilayer film structures[J]. *Journal of Physics D*, 2021, 54: 505306.
- [75] Chu H S, Gan C H. Active plasmonic switching at mid-infrared wavelengths with graphene ribbon arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(23): 231107.
- [76] Wang J, Wang X, Hu Z D, *et al.* Peak modulation in multi-cavity-coupled graphene-based waveguide system[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12: 9.
- [77] Wang J, Song C, Hang J, *et al.* Tunable Fano resonance based on grating-coupled and graphene-based Otto configuration[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 23880-23892.
- [78] Wang J, Yang L, Wang M, *et al.* Perfect absorption and strong magnetic polaritons coupling of graphene-based silicon carbide grating cavity structures[J]. *Journal of Physics D*, 2019, 52(1): 015101.
- [79] Hu J, Huang Y, Chen Y, *et al.* High-sensitivity multi-channel refractive-index sensor based on graphene-based hybrid Tamm plasmonic structure[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(11): 3833-3843.
- [80] Liu K, Lian M, Qin K, *et al.* Active tuning of electromagnetically induced transparency from chalcogenide-only metasurface[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2: 19.
- [81] Ligmajer F, Kejik L, Tiwari U, *et al.* Epitaxial VO₂ nanostructures: A route to large-scale, switchable dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(7): 2561-2567.
- [82] Chaudhary K, Tamagnone M, Capasso F, *et al.* Polariton nanophotonics using phase-change materials[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4478.
- [83] Tian J, Luo H, Yang Y, *et al.* Active control of anapole states by structuring the phase-change alloy Ge₂Sb₂Te₅[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 396.
- [84] Wang Z, Yang T, Zhang Y, *et al.* Flat lenses based on 2D perovskite nanosheets[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(30):2001388.
- [85] Berestennikov A S, Voroshilov P M, Makarov S V, *et al.* Active meta-optics and nanophotonics with halide perovskites[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(3):31307.
- [86] Snaith H J. Present status and future prospects of perovskite photovoltaics[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(5):372-376.
- [87] Wang K, Xing G, Song Q, *et al.* Micro- and nanostructured lead halide perovskites: From materials to integrations and devices[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(6):2000306.
- [88] Tang B, Dong H, Sun L, *et al.* Single-mode lasers based on cesium lead halide perovskite submicron spheres[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(11):10681-10688.
- [89] Gao Y, Huang C, Hao C, *et al.* Lead halide perovskite nanostructures for dynamic color display[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 8847-8854.
- [90] Zhang C, Xiao S, Wang Y, *et al.* Lead halide perovskite-based dynamic metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(7): 1900079.
- [91] Zhao S, Zhou J, Hu Z, *et al.* Halogen-perovskite metasurfaces for trichromatic channel color holographic imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26):43316.
- [92] Komar A, Paniagua-Domínguez R, Miroschnichenko A, *et al.* Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1742-1748.
- [93] Chung H, Miller O D. Tunable metasurface inverse design for 80% switching efficiencies and 144° angular deflection[J]. *ACS Photonics*, American Chemical Society, 2020, 7(8): 2236-2243.
- [94] Hu Y, Ou X, Zeng T, *et al.* Electrically tunable multifunctional polarization-dependent metasurfaces integrated with liquid crystals in the visible region[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(11): 4554-4562.
- [95] Wang S, Wu P C, Su V-C, *et al.* A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*,

2018, 13(3): 227-232.

- [96] 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.

Research and Applications of Active Metasurfaces in Optical Modulation

WANG Ji-cheng^{1,2} HUANG Xian-yu¹ LI Yu-ke¹ BAO Zhi-yu¹

(¹ Department of Optoelectronic Science and Engineering, School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

² State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract The metasurfaces can be regarded as a two-dimensional metamaterial, which can control the light field distribution in the surface domain. The research of active metasurfaces as the new design requirements has become the hot research field. Therefore, the precise modulations of the phase, polarization, intensity and other dimensions of the light field by using the active metasurfaces, as well as the modulations of the interactions between the light field and matters, are the frontier research of the integrated development of basic physics and multi-disciplinary science. In this paper, we systematically introduce the latest research progress in the multi-dimensional modulations and applications of light field such as structural color, polarization conversion, perfect absorption and image processing. Finally, some research frontiers and potential applications of active metasurface are prospected.

Key words active metasurface; micro-nano photonic device; artificial nano-structure; spectral control; device design