

# 光学学报

## 多维度超表面光场调控和全息显示技术

李昕<sup>1,2,3</sup>, 张时飞<sup>1</sup>, 张晓彤<sup>1</sup>, 杨静育<sup>1</sup>, 郑龙昊<sup>1</sup>, 黄玲玲<sup>1\*</sup>, 王涌天<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

<sup>3</sup>北京理工大学光电学院信息光子技术工信部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 超表面器件的亚波长单元结构能够与光产生强烈的相互作用。通过对超原子的优化设计,能够对光场的各个参量进行多维度调控,为包括全息显示在内的众多应用光学领域带来全新的解决思路与方案。针对全息显示中核心光电调制器件能力有限的问题,发挥超表面器件超强的光场控制能力,利用多维度的复用调控,实现对信息通道数量的扩展,提升显示质量与效果。随着对超表面光场调控机制与复用技术的深入研究,超表面自身与相关应用领域都得到了长足发展。本文围绕超表面进行论述,着重介绍本课题组在多维度超表面的光场调控及全息显示中的研究进展。

**关键词** 超表面; 光场调控; 多维度; 全息显示

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230743

### 1 引言

光包含波长、相位、振幅、强度、角动量等参量,可以携带丰富的信息。光场调控是对这些基本参量实现任意调制的过程,在各个应用光学领域中扮演着重要的角色。随着信息技术的发展,人们对光场调控的要求越来越高。对光场进行多维度自由调控一直是研究者努力的方向。然而,传统的光学元器件存在体积庞大、调制能力有限、调制维度单一等缺点,难以实现调控目标。

微纳加工技术的进步促进了以超表面(metasurface)为代表的新型微纳光学元件的诞生与发展。超表面是由人工亚波长的结构单元构成的阵列元器件,这些单元结构被称为超原子(meta-atom)。超表面自由的材料选择与结构设计,为人们提供了巨大的发挥空间,能够以自然材料元器件无法实现的方式调控电磁波。2011年,Yu等<sup>[1]</sup>提出了V形微天线超表面,由此人们开始对超表面进行广泛研究。学者们提出了惠更斯超表面、几何相位超表面、微谐振腔介质超表面等,这些结构能够与电磁波发生强烈的相互作用,通过改变超原子结构的大小、周期、形状、材料等因素实现对电磁参量的任意调制。这展现出超表面对于光场多维度调控的巨大潜力:对超透镜纳米介质柱单元的结构进行单独设计,能够实现光场相位与光谱响应的同时调控,实现校正像差与消除色差的功能<sup>[2]</sup>;作

为一种新型光波调制器件,超表面可以广泛应用于偏振调控<sup>[3]</sup>、光束整形<sup>[4]</sup>、光信息处理<sup>[5]</sup>等领域。利用超表面实现对光场振幅、偏振态、相位和频率的联合多维度调控来获得所需的光学器件,是目前超表面研究的热点方向<sup>[6]</sup>。

超表面在光场多维度调控方面展现出巨大优势,其与全息术的结合对科学技术的发展意义重大。元宇宙承载着万物空间互联的愿景,赋予了显示技术无限的想象与发展空间。全息显示以计算全息术(CGH)为基础,通过再现波前的全部信息(即振幅与相位),再现出与真实场景光学信息一致的全息影像,能够提供人眼所需的聚焦、辐辏、双目视差与运动视差等深度线索<sup>[7]</sup>,带给人们“感觉即真实”的艺术沉浸体验,是一种最具有潜力的显示方式。全息显示能够重建真实的物体和模拟计算虚拟的物体,可以应用于文教娱乐、医疗健康、工业工程等领域。全息显示的实现是通过计算机将显示场景的光波波前编码记录为一幅全息图,再加载到被光源照明的空间光调制器(SLM)进行重建。由此可见,SLM是全息显示的核心器件。现有SLM存在的诸多问题,是制约全息显示发展的瓶颈。超表面全息充分结合了计算全息对复振幅光场信息的自由记录,以及超表面灵活的波前调控,为超表面代替传统的空间光调制器件成为新型全息显示器件带来了可能。超表面能够代替传统电光调制器件对光场的振幅或相位进行调控,还可以利用超原子的多维度调控特

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-05; 录用日期: 2023-05-09; 网络首发日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20140, 92050117)、北京市卓越青年科学家项目(BJJWZYJH01201910007022)

通信作者: \*wyt@bit.edu.cn; \*\*huanglingling@bit.edu.cn

性对光场进行复用调控,实现更加丰富的光信息再现,这是传统全息显示无法比拟的,是突破SLM瓶颈的有效方案。

自超表面被提出以来,其一直是学界与业界关注的焦点,其性能正在得到不断发展,超表面全息更多的复用方式与调制机理也被不断地挖掘。本课题组基于光学超表面开展深入研究工作,提出了多种多维度光场调控与全息显示方法,实现了超表面调控能力的扩展与应用。本文首先介绍利用超表面元件实现光场调控以及超表面元件在新型光束生成、成像和信息感知、片上信息操控等方面的应用;然后,围绕全息显示与多维度超表面全息显示展开介绍;最后,总结多维度超表面光场调控和全息显示技术,对未来的研究工作进行展望。

## 2 超表面光场调控

不同材料和几何形貌的亚波长超原子单元通过与电磁场的相互耦合、单元结构间的耦合,与光产生强烈的相互作用,进而能够对不同光参量进行调控。这一基本原理与传统折反射元器件光程积累的基本原理完全不同,使得超表面能够以超薄的厚度对光进行任意的调控。超表面可以应用于对光场的偏振调控、新型光束生成、光学检测、光场成像、表面波调控等领域。

目前,超表面光场调控的发展趋势主要体现在以下几个方面:1)利用主动可调超表面为光场调控提供更多自由度;2)不只局限于光的单一维度属性,实现多维度调控;3)提高超表面的调制效率(包括模式转换效率);4)实现多通道光场调控,为光场调控增加更多功能;5)实现消色差调制。近年来,本课题组对基于超表面的偏振调控、新型光束生成、光学检测、光场成像以及表面波调控进行了深入研究,逐渐实现高效、多功能的多维度光场调控。

### 2.1 基于超表面的偏振调控与应用

通过对超表面结构的优化设计,可以实现对光束

的偏振属性进行调控,将其作为核心元件丰富光偏振组件的功能应用。与传统的全局控制光偏振的偏振片、波片不同,基于超表面的偏振器主要利用每个纳米柱的双折射效应。超表面可以利用纳米柱的各向异性来实现波片的功能,也可以通过在亚微米尺度上进行逐个像素点的偏振转换来实现偏振调控<sup>[8-14]</sup>、偏振探测<sup>[15-16]</sup>等功能。

由于超表面具有优良的灵活性和紧凑性,利用超表面进行的偏振转换受到了越来越多的关注。使用非手性双镜对称的 $\Omega$ 形天线,利用双折射效应和反射型金属-绝缘体-金属(MIM)结构来优化单元结构,使其在正交方向上产生波长不敏感的相位延迟,可以实现宽带的线偏振到圆偏振的转换<sup>[8]</sup>,如图1(a)所示。除此之外,主动可调的超表面也为偏振调控提供了更多的可能性。使用V形等离子体天线阵列与由锗碲镉(GST)材料制成的间隔调制层作为两组子调控单元,利用GST材料的相变机制,可以实现透射光椭圆度的完全可调,而不依赖于透射光椭圆度的入射线偏振<sup>[图1(b)]<sup>[9]</sup></sup>。将超表面的每一个纳米柱在长轴与短轴方向的相位差设计为 $\pi$ ,因此该超表面可以被看作是快轴和慢轴方向可控的局部半波片,通过元件单元结构对光场进行逐点偏振调控,即能够获得高阶径向和方位角偏振光束<sup>[图1(c)]<sup>[10]</sup></sup>。这种逐点信息的调控灵活性为信息的编码载入提供了新方式,使得超表面的这一功能也可以被应用到光学加密中。利用双折射介质超表面,结合多层立体显示原理与正交线偏振调控,能够实现双通道多层立体显示<sup>[11]</sup>。在双折射非晶硅纳米柱阵列上叠加针对不同偏振通道的扭曲光栅相位,可以实现在两个线偏振方向分别产生 $2\times 5$ 个空间衍射级次。数字微镜器件(DMD)上同时加载的各个层面二维图案,经过在空频域面上双折射超表面器件的调控,可以实现总计20层、全视场角为 $42^\circ$ 的立体显示。

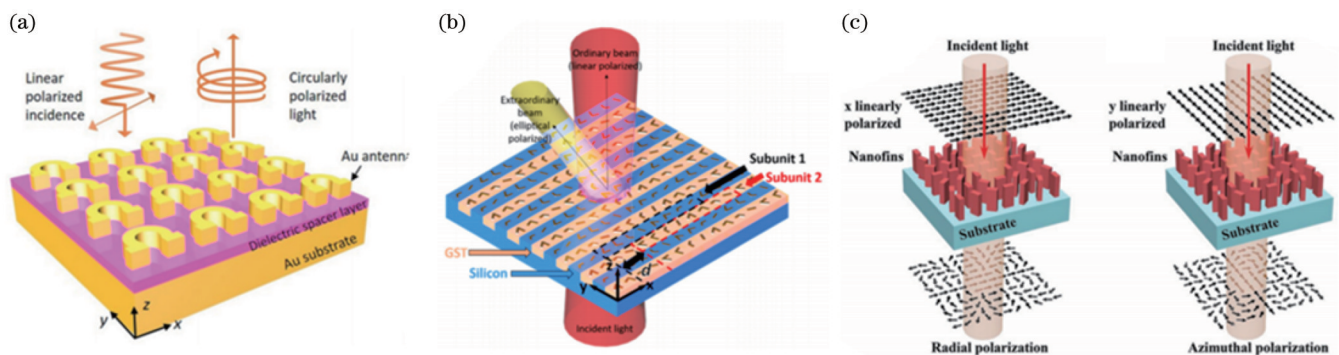


图1 基于超表面的偏振调控。(a)偏振转换<sup>[8]</sup>;(b)主动可调偏振片<sup>[9]</sup>;(c)矢量偏振光生成<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Polarization modulation based on metasurface. (a) Polarization conversion<sup>[8]</sup>; (b) actively tunable polarizer<sup>[9]</sup>; (c) generation of vector polarization light<sup>[10]</sup>

### 2.2 基于超表面的新型光束生成

定制的光学参数可以带来全新的光场形态,包括

强度分布<sup>[17-21]</sup>、相位奇点<sup>[22-24]</sup>、由斯格明子(skyrmion)表示的拓扑奇异态<sup>[25-27]</sup>等。这些新型光束所具有的独



特物理属性,使其广泛应用于目标检测和测距<sup>[18,28-29]</sup>、光场成像<sup>[28,30]</sup>、先进制造<sup>[20]</sup>、光通信和计算<sup>[22]</sup>等领域。近年来,大量基于超表面的新型光束生成方法被提出<sup>[17-34]</sup>。

超表面随机点阵光束的生成依赖于超薄介质超表面的复振幅调制<sup>[17]</sup>,如图 2(a)所示。调整介质纳米柱的长、宽和方位角,可以同时直接调制圆偏振光的相位和振幅信息。通过衍射阶次的选择能够得到目标光场调控信息,并以此确定超表面上每个纳米柱的几何参数,使得超表面可以产生对于圆偏振光的任意二维衍射阶次的控制,生成任意的点阵列。

超表面作为无衍射光束(包括艾里光束<sup>[28,32]</sup>和贝塞尔光束<sup>[19]</sup>)的生成器,可以用于先进制造和深度检测。介质惠更斯超表面以纳米圆柱为单元,通过改变圆柱直径能够调控光场的相位信息,且这种调控与偏振无关。利用达曼光栅的优化方法叠加轴透镜相位,形成贝塞尔光束并生成相位分布,以此来指导纳米圆柱阵列的设计,产生贝塞尔光束阵列[图 2(b)]<sup>[19]</sup>。这一方法不限制光束阵列的大小以及贝塞尔光束的阶数,光束阵列的参数均灵活可调,因此光场携带的信息容量明显提高。该方法在并行激光制造、高效光镊、光通信等领域具有良好的应用前景。之后,本课题组提出一种基于超表面的实空间和 K 空间生成艾里光束阵列的方法<sup>[28]</sup>。通过在双圆偏振通道中独立编码双相位分布,可以分别在左圆偏振光和右圆偏振光入射下的实空间和 K 空间中产生艾里光束。与传统方法相比,该方法为在宽带频谱中产生具有可切换工作模式的大容量艾里波束阵列提供了一种更有效的解决方案。

随着对新型光束的进一步探索,具有多维度和多模式的新型涡旋光束发生器用于光通信和计算。在以

偶极子模型为基础实现的相位超表面上加载涡旋相位信息,能够生成宽带涡旋光束<sup>[32]</sup>。2017年,Huang等<sup>[23]</sup>以达曼涡旋光栅和螺旋达曼波带板为基础,结合选通优化空间中的衍射阶数,产生了具有独立可控拓扑荷数的三维体涡旋光阵列,证明了拓扑电荷分布可以在空间变化。Pancharatnam-Berry(PB)相位超表面提供了宽带相位调控,使得基于该方法设计的超表面光场调控器件能够生成可见到近红外波段的三维体涡旋光束阵列。之后,本课题组与中山大学、南方科技大学、香港理工大学的相关课题组合作,基于几何相位超表面原理,结合涡旋光阵列信息,提出了轨道角动量组合器<sup>[33]</sup>,利用正交相移键控将信息加载到涡旋光束阵列上,实现了 448 Gbit/s 的自由空间光通信。与传统的 OAM 生成方法相比,该方法具有宽带工作波长、高模态纯度、设计灵活、尺寸紧凑等优点。这些工作表明超表面在高容量光通信系统中有很好的应用前景。

此外,本课题组提出了具有可调角向相位梯度的广义涡旋光束(GVB)<sup>[22]</sup>。GVB打破了传统的环形轮廓波包,且在传播方向上的演变过程也与角向调控有关,形成了具有三维空间结构的特异光束,为定制光束形状提供了一种有效的方法。同时设计非晶硅纳米柱作为多维度超表面光场调控单元,可以结合偏振通道生成多个具有独立强度分布的 GVB。之后,通过将 GVB 与达曼涡旋超表面相结合,进一步实现了一种特殊的微分计算器[图 2(c)]<sup>[34]</sup>。衍射多路阵列由不同的基本 GVB 函数的线性组合控制。每个衍射阶数的几何图形依赖于二者的组合模式,并代表了一个特定的数学运算。在不同的衍射阶数下实现的模式生成具有并行化、可扩展和计算速度快等优点,为光学计算提供了便利。

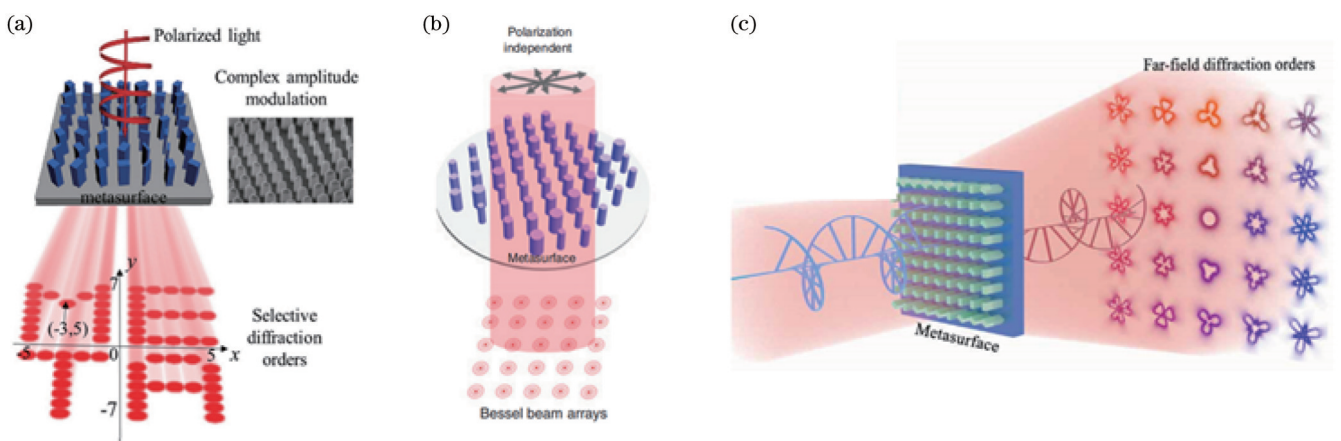


图 2 基于超表面的新型光束生成。(a)点阵光场<sup>[17]</sup>; (b)贝塞尔光束阵列<sup>[19]</sup>; (c)广义涡旋光束阵列<sup>[34]</sup>

Fig. 2 Novel beam generation based on metasurface. (a) Dot array light field<sup>[17]</sup>; (b) Bessel beam array<sup>[19]</sup>; (c) generalized vortex beam array<sup>[34]</sup>

### 2.3 基于超表面的光纤纤端传感

光纤纤端传感器具有体积小、易于集成、耐久性强、系统灵活等优势,适用于原位和介入式测量。将超

表面器件作为光纤纤端传感器的核心器件,能够提高光感知系统的性能,故具有良好的应用前景<sup>[35-37]</sup>。基于超表面的光纤纤端传感主要基于被测理化环境与超

表面微纳单元结构的相互作用引起的光学响应改变,通过光纤将光学信号传输至光电探测器,实现对理化指标的检测。

基于非均匀金槽超表面等离子体共振(SPR)探针,利用多模光纤、超颖表面和丝素蛋白薄膜的结合,实现了对相对湿度的检测<sup>[35]</sup>。通过“接触-分离”转移法将超表面器件转移到多模光纤端面,通过浸渍法在超表面上涂覆一层丝素蛋白薄膜。丝素蛋白薄膜的折射率会随外部环境湿度产生变化,引起 SPR 探针共振波长的偏移,从而完成目标检测。以光纤尖端超表面的局域表面 SPR 磁化响应为基础,可以制出一种紧凑型磁场光纤传感器<sup>[36]</sup>。结合等离子体光纤尖端和磁流体的优势,该光纤磁场传感器在 0~20 mT 范围内具有线性响应和 0.532 nm/mT 的高磁场强度灵敏度。采用 MIM 的法布里-珀罗(Fabry-Pérot)谐振结构,基于钯金与氢气形成氢化钯的化学变化来改变纳米结构的特性,根据单模光纤模场分布优化 MIM 结构的几何参数,可获得高反射率的超表面器件,相比于传统光纤-钯膜结构,超表面器件的反射率提升了近一倍<sup>[37]</sup>。相比于传统侧壁功能化光纤传感器的大尺寸,光纤端面超表面在提升光学感知性能的基础上,其超薄的特性也为集成化的理化检测系统提供了紧凑的光学平台。

#### 2.4 基于超表面的成像

超表面可以控制入射光场的参量,从而实现对其高度定制化操控。利用这一特性,能够实现高分辨率、高速度、高灵敏度的光学成像。超透镜(metalens)直接利用优化的结构单元替代传统透镜和凹/凸面镜,利用超薄的结构实现光学成像<sup>[38-41]</sup>。此外,超表面的光场调控能力也能够被应用于新型成像中,包括相位成像测量<sup>[42-44]</sup>、单像素成像<sup>[45-49]</sup>、三维成像<sup>[50]</sup>等。

基于超原子结构形貌与几何参数对超表面器件频率色散响应的影响,本课题组设计了具有抛物线型相位调控的超表面频率色散器件<sup>[51]</sup>。基于几何相位原理设计二氧化钛纳米矩形柱,将宽波段圆偏振态高效地转化为正交偏振态,并附加携带不同焦距的抛物线型相位,焦点位置与波长成反比。该方法具有设计流程清晰、器件结构简单、工作效率高等优势,可以应用到光谱仪、高光谱成像系统等设备中。

超透镜是基于超表面设计的平面光学成像器件,能够实现与传统光学元件等效的相位调控,这颠覆了以往折射光学镜头基于表面形貌或者光学透明介质的空间折射率变化的原理,具有设计灵活、质量轻、厚度小等优点,可以实现色散可控/消色差成像、可调谐等独特功能。本课题组通过对超透镜相位进行独特设计,将两个不同焦距的超透镜相位进行叠加优化,从而获得偏振不敏感的双焦点超透镜<sup>[38]</sup>,如图 3(a)所示。这一方案采用惠更斯超表面,不依赖于偏振转换即可实现焦距的切换,提高了超透镜的实际效率;为了高保

真重建,还利用压缩重建方法去除孪生像和零级像,抑制噪声。本课题组提出一种新型的超原子结构,将介质结构柱和相位延迟板结合,并将相位色散分解为精细调控与整体调控两个部分,相较于以往的消色差超透镜设计,该设计无需复杂的、极高深宽比的超原子结构,可以在 1100~1500 nm 波长范围内实现消色差聚焦和成像<sup>[39]</sup>。

相位成像技术是一种从强度信息中恢复相位信息的技术。传统的强度传输方程相位成像方法需要沿光场传播方向多次移动机械器具进行测量,以获得不同位置的强度信息,这种多次测量对实际应用提出了较高的要求。基于超表面器件的复用光场信息调控能力,简化了信息记录过程,实现了通过单次拍摄获得光场的相位信息<sup>[42]</sup>,如图 3(b)所示。在几何相位超表面加载光场传播相位因子与梯度相位,可以利用左旋、右旋与零级光场通道,使前、中、后三个位置的光信息同时成像在一个平面上,且三者相互分离。通过单次拍摄记录该平面的强度信息,再利用强度传输方程即可实现相位恢复。与传统方法相比,该系统更加稳定、信息获取速度更快。

单像素成像是一种不同于传统直接成像方法的间接成像方法,不依靠光波的相位和偏振状态,而是利用一系列的掩模图案及对应的光强波动信号之间的相关性来计算物体信息。利用超表面光场调控能力,可以实现单像素成像系统的结构紧凑化与功能集成化。由纳米孔光子筛结构构成的超表面可以作为随机的二值掩模版,通过水平和竖直方向上的机械移动,完成计算掩模的变换,能够实现宽带单像素成像<sup>[45]</sup>。超表面高密度的编码信息承载,为大容量光场信息调控实现提供了可能。纳米孔结构的优化提高了光能透过率,提升了方法的实用性。以此为基础,结合空分复用全息,实现了一种利用基于超表面的单像素成像信息加密技术[图 3(c)]<sup>[46]</sup>。利用半重叠空分复用技术将字符集编码为振幅全息信息,进而制成超表面器件。此时,超表面器件同时起到了伪随机二值掩模和“密码本”的作用。加密时,先将明文信息在“密码本”中对应的地址信息转化为二维码图形,再通过超表面的二值掩模将单像素成像编码为强度序列密文,其中超表面的空间位置与掩模移动方式均记录为密钥。在信息解密时,需要通过密文、密钥获得正确的寻址信息,利用“密码本”读取对应的明文信息。此过程中缺失了任何信息都无法正确获得明文,从而提升了数据的安全性。

基于超表面的三维成像是—种新型的光学成像技术,利用超表面的局域调控能力对光场进行精确控制,形成特定的结构照明光场或者使得入射场携带特殊的光传递信息,进而实现对三维物体的高精度成像。本课题组使用单层超表面在傅里叶空间中投影编码点云,结合提出的匹配算法,只需单次检测即实现三维信息重建[图 3(d)]<sup>[50]</sup>。实验证明了当测量距



离为 300 mm 时, 该系统的深度测量精度小于 0.24 mm。基于超表面轻薄的优势, 该方法可为集成

化的表面形状检测、手势识别和个人认证等应用铺平道路。

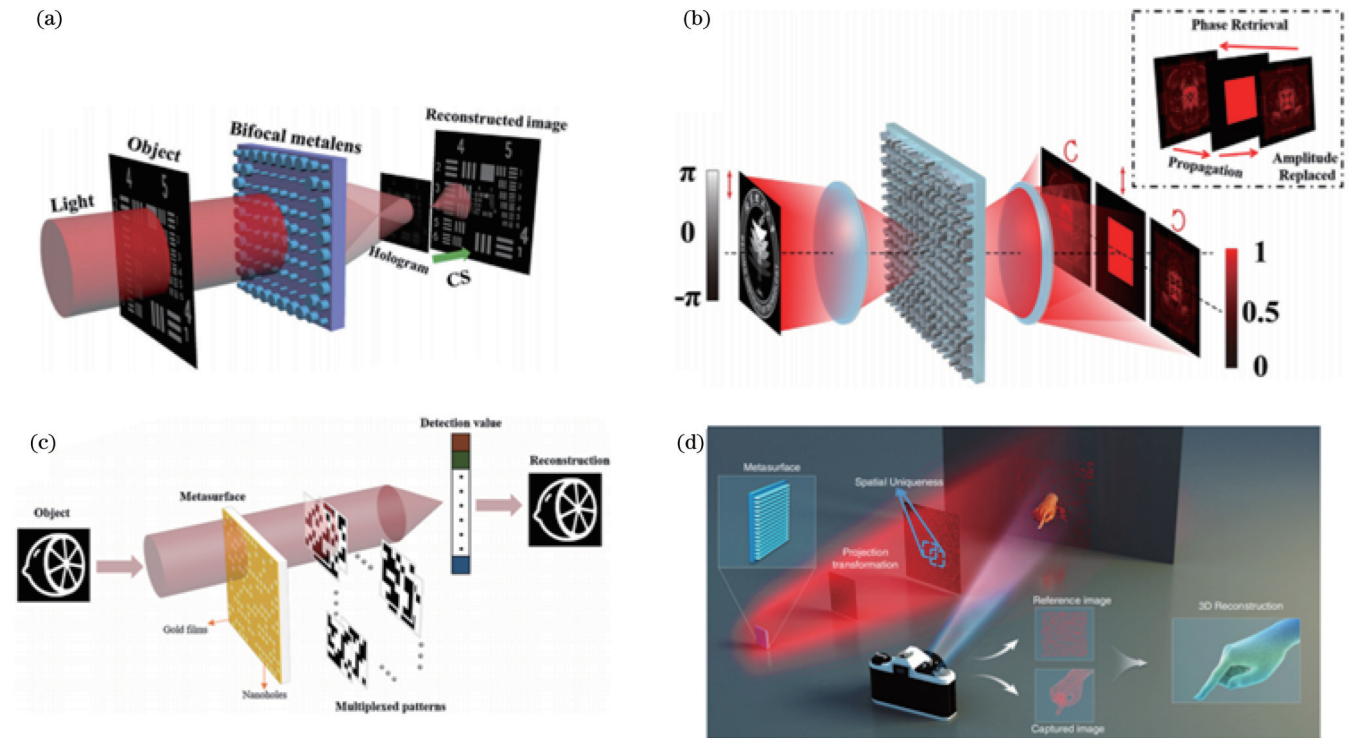


图 3 基于超表面的光场成像技术。(a)超透镜<sup>[38]</sup>;(b)基于超表面的相位成像技术<sup>[42]</sup>;(c)单像素成像信息加密技术<sup>[46]</sup>;(d)基于超表面的三维成像<sup>[50]</sup>

Fig. 3 Light field imaging techniques based on metasurface. (a) Metalens<sup>[38]</sup>; (b) phase imaging techniques based on metasurface<sup>[42]</sup>; (c) single-pixel imaging information encryption techniques<sup>[46]</sup>; (d) three-dimensional imaging based on metasurface<sup>[50]</sup>

## 2.5 基于超表面的片上光场调控

与自由空间光场调控类似, 片上超表面器件的光场调控同样受到学者们的关注与研究, 这一研究可为实现小尺寸、宽波段、低损耗的光子芯片提供思路。片上超表面主要通过平面或者波导上放置散射体<sup>[52-55]</sup>、金属共振结构<sup>[56-57, 31]</sup>, 或者由刻蚀引入额外的相位变化<sup>[58-63]</sup>, 实现表面波模式的激发、自由空间光和导模之间的耦合或者导模之间的耦合。

表面等离子激元(SPP)是金属和介质界面区域的一种由自由电子和光子相互作用形成的电磁模, 超表面通常通过设计亚波长尺寸的金属狭缝来实现 SPP 激发。2013年, Huang等<sup>[56]</sup>基于 PB 相位设计了不同偏转角的金属狭缝, 以满足自由空间光耦合到 SPP 的动量匹配条件, 利用金属狭缝阵列提供不同方向的相位梯度, 从而实现偏振相关的 SPP 定向激发。之后, 本课题组应用曲线多边形与表面波全息结构, 探究了多端口 SPP 的同时激发, 定量分析了不同结构在不同入射条件下 SPP 的聚焦效率, 实现了偏振与波长通道可控的 SPP 激发与聚焦<sup>[57]</sup>。通过设计不同旋转角与尺寸的金属狭缝实现 SPP 的逐像素相位与振幅的精准调控, 获得表面波艾里光束与对称艾里光束<sup>[31]</sup>。该工作中还使用二维等效偶极子仿真方法代替全波模拟方

法, 减少了运算量, 并缩短了计算时间。

近年来, 对于片上超表面调控导模的研究集中于模式转换与波前调控, 通过在原有器件中引入超表面天线结构或者刻蚀, 可以实现相位补偿, 从而提高器件模式的转换效率。本课题组提出一种基于深刻蚀槽阵列的一维分束器<sup>[62]</sup>, 基于狭缝波导结构实现了片上等强度分束器件。该工作中设计了 4 种不同的分束器, 可以将一束光分别分离成 2~5 束等光强光束, 为片上分束器设计提供了一种新的思路。这一设计在信号处理、片上激光调制、片上神经网络等领域具有巨大的应用潜力。本课题组还提出一种基于伴随算法的新型逆设计流程, 在迭代过程中添加逻辑分支来调控各状态的收敛情况<sup>[63]</sup>。此外, 设计了一种基于液晶的片上可调模式转换器, 可以将基模转换为多个高阶模。该设计流程可以生成多功能、结构紧凑、高性能的片上光学器件, 为光通信、光传感和光计算系统提供一系列基于液晶或其他可调材料的多功能器件。

## 3 全息显示与超表面全息

全息术是 1948 年 Gabor<sup>[64]</sup>为了提高电子显微镜的分辨率而提出的一种记录、重建波前的方法。计算全息术的诞生得益于计算机技术与光电技术的发展加速

了光场调控与全息显示技术的进步。近年来,随着人们对显示技术需求的日益提高,不断有全息显示算法优化与系统改进的论文刊登在 *Nature* 等顶级期刊上<sup>[65-71]</sup>。然而,作为核心器件的 SLM,受到调控原理的制约,存在着仅能调控部分波前信息、像素尺寸大、填充率低等不足,直接导致全息显示质量差、显示效果不尽如人意、全息编码复杂度增加等问题,影响了全息显示的应用与发展。

超表面器件可以在亚波长尺度任意调节入射电磁波的振幅、相位和偏振,具有超薄化、制作简易灵活、损耗较低等优点,克服了传统材料器件的许多缺陷。超表面与全息技术的结合具有视场大、信息容量高、可以消除不必要的衍射阶数、直接抑制编码噪声等优点。2013 年, Huang 等<sup>[72]</sup>设计了一种基于几何相位原理的超表面全息图,实现了可见光波段下的高分辨率、大视场、无多级衍射和双像的三维图像重建。本课题组设计了可见光波段内可独立调控振幅和相位的超表面,实验证明该复振幅全息图像的重建质量优于纯相位全息图<sup>[73]</sup>。通过设计超表面的多维度光场与复用策略,如偏振<sup>[74-92]</sup>、轨道角动量<sup>[93-100]</sup>、波长<sup>[101-110]</sup>和非线性效应<sup>[111-123]</sup>等,超表面全息可以进一步提升信息容量、丰富动态全息显示方案。

目前,超表面全息的研究热点主要集中在以下方面:1)增强超表面全息的复用能力,提升复用通道数、寻址灵活性、转换效率与信息密度;2)探索新颖、高性能的超表面全息复用方案与优化算法,丰富动态调控方案;3)结合主动可调材料与器件,实现整体、部分或逐个像素主动可调的超表面全息;4)增强波长、角度、深度复用的超表面全息性能,消除各波长、角度、深度通道间的串扰;5)建立超表面非线性光场调控机理,丰富高效、灵活的非线性复用超表面全息方案。近年来,本课题组对基于偏振、OAM、波长、非线性频率复用的超表面全息进行了深入研究,不断建立、完善高性能的多维度光场复用超表面全息方案;通过分别组合多层超表面、结合传统光学调制器件组建微型光学系统,创新地提出级联超表面全息与码分复用超表面全息;开发全息优化算法,针对部分或逐个像素主动可调的超表面全息提出定制方案。

### 3.1 基于偏振复用的超表面全息

偏振复用技术使用特定偏振通道加载、传送信息,有效增强了信息密度与信息安全性,已被广泛应用于光纤通信、液晶显示、3D 电影等领域。超表面基于传播相位<sup>[74-77]</sup>、几何相位<sup>[77-79]</sup>、迂回相位<sup>[80-82]</sup>、宏像素单元<sup>[79-83]</sup>等设计策略,利用包含琼斯矩阵相位追迹<sup>[84]</sup>、噪声工程算法<sup>[85]</sup>等偏振复用全息优化,可以在不同入射/出射偏振组合通道中再现多样的全息影像。

本课题组研究了双折射超表面全息的设计自由度,厘清了单层超原子所对应琼斯矩阵的相位调控机理<sup>[76]</sup>,如图 4(a)所示。通过变换纳米柱单元的矩形横

截面面积与平面旋转角度,结合全息算法优化,同时在透射琼斯矩阵的  $T_{xx}$ 、 $T_{xy}$ 、 $T_{yy}$  3 个偏振通道中记录了 3 幅独立图像的全息图。结合不同的入射/出射偏振组合通道,在 12 种偏振组合通道中呈现了 7 种不同的全息投影图像,为多偏振通道的超表面全息显示提供了理论基础与技术支撑。为了进一步增强超表面全息的偏振复用能力,本课题组提出了使用亚波长像素编码多偏振通道与全斯托克斯偏振态复用的超表面全息方案,通过加载时序的入射/出射偏振组合通道,动态再现了数十帧连续的全息影像[图 4(b)]<sup>[86]</sup>。根据傅里叶变换的线性性质,将多种偏振态所对应的全息图进行组合叠加,然后分解为两幅具有正交偏振态的全息图,进而逐像素量化到超原子的两个偏振通道上,实现偏振复用的超表面全息。通过联合调控超原子在正交圆偏振转换通道的几何相位与振幅响应,可以编码复振幅全息图,以再现高精度的偏振相关图像<sup>[78]</sup>。通过改进全息优化算法,可以获得两幅具有正交偏振态的纯相位全息图,同时对超原子的几何相位与传输相位进行调控,以在正交圆偏振转换通道中记录两幅独立的纯相位全息图,再现具备高转换效率、更大视场、无孪生像的全息影像<sup>[86]</sup>。根据具有不同半波片偏振响应、灵活相位调制的微纳单元,结合全息优化算法设计超表面,能够在实空间与动量空间(即超表面固有平面与傅里叶光学平面)同时存储偏振加密图像,以提升全息显示的信息密度与安全性[图 4(c)]<sup>[87]</sup>。超表面固有平面所加载的图像是逐像素微纳单元偏振编码的结果,根据马吕斯定律,随着入射或出射偏振态的改变,超表面逐像素地呈现强度变化。动量空间的偏振相关全息图像来源于具有不同偏振调制效果的微纳单元的相位编码。

本课题组基于几何相位调控的圆偏振光选择机制,利用金制偶联极子纳米天线作为超原子,通过三维迭代优化算法将多个平面的图像编码在一个超表面器件上,可以在两个正交圆偏振复用通道中获得 8 层深度图像的投影显示<sup>[88]</sup>。得益于几何相位宽谱段调控的特性,该方法可以在可见光至近红外波段进行全息重建。进一步地,对多层超表面的偏振调控机制进行深入研究,将一层金属偶联极子天线与一层金属 L 形天线逐层制备构成双层超原子,打破光子学器件沿传播方向的对称性,从而在正交的线偏振组合通道中,前向传输与后向传输分别实现全息显示与光隔离器的功能<sup>[12]</sup>,如图 4(d)所示。

此外,本课题组提出了基于各向异性超表面对衍射级次的光场调控方法,可以在不同衍射级次定制丰富的全息光场<sup>[89-90]</sup>。利用 Jacobi-Anger 展开方法分析衍射级次间的数学关系,利用关联优化与迭代算法,将独立光场信息编码至各个衍射级次中,并采用双折射介质超原子结构,为不同偏振通道赋予不同的全息信息,通过优选衍射级次与平衡能量比例,本课题组实现



了在两个偏振通道中对 18 个衍射级次光场的独立调控<sup>[89]</sup>。基于  $2 \times 2$  超像素结构的超表面器件,能够进一步对衍射级次中的复振幅进行调控[图 4(e)]<sup>[90]</sup>。利用琼斯矢量计算与梯度下降优化算法,将不同衍射级次中的目标光场编码为全息信息,通过对出射光的正交偏振通道的复振幅分布进行精确控制,能够使不同衍射级次重建具有不同偏振态的独立图像信息,从而定制多功能全息影像。同时,选用邦加球赤道上均匀分布的偏振态,结合栅常数与各个衍射级次的傅里叶

系数,计算所需编码到超表面正交偏振通道的复振幅分布,能够对超表面全息特定衍射级次中携带的光场相位与偏振态进行同时调控<sup>[91]</sup>。本课题组进一步发展了琼斯矩阵全息术,提出了面向三维全息投影显示的立体琼斯矩阵全息术,以提升光沿传播方向的全息再现能力<sup>[92]</sup>。基于超表面全息术,实验验证了沿传输方向螺旋前进的三维偏振结构光场,为振幅、偏振、相位变化等光参量的立体空间演化提供了研究思路,丰富了多维度结构光的全息生成方案。

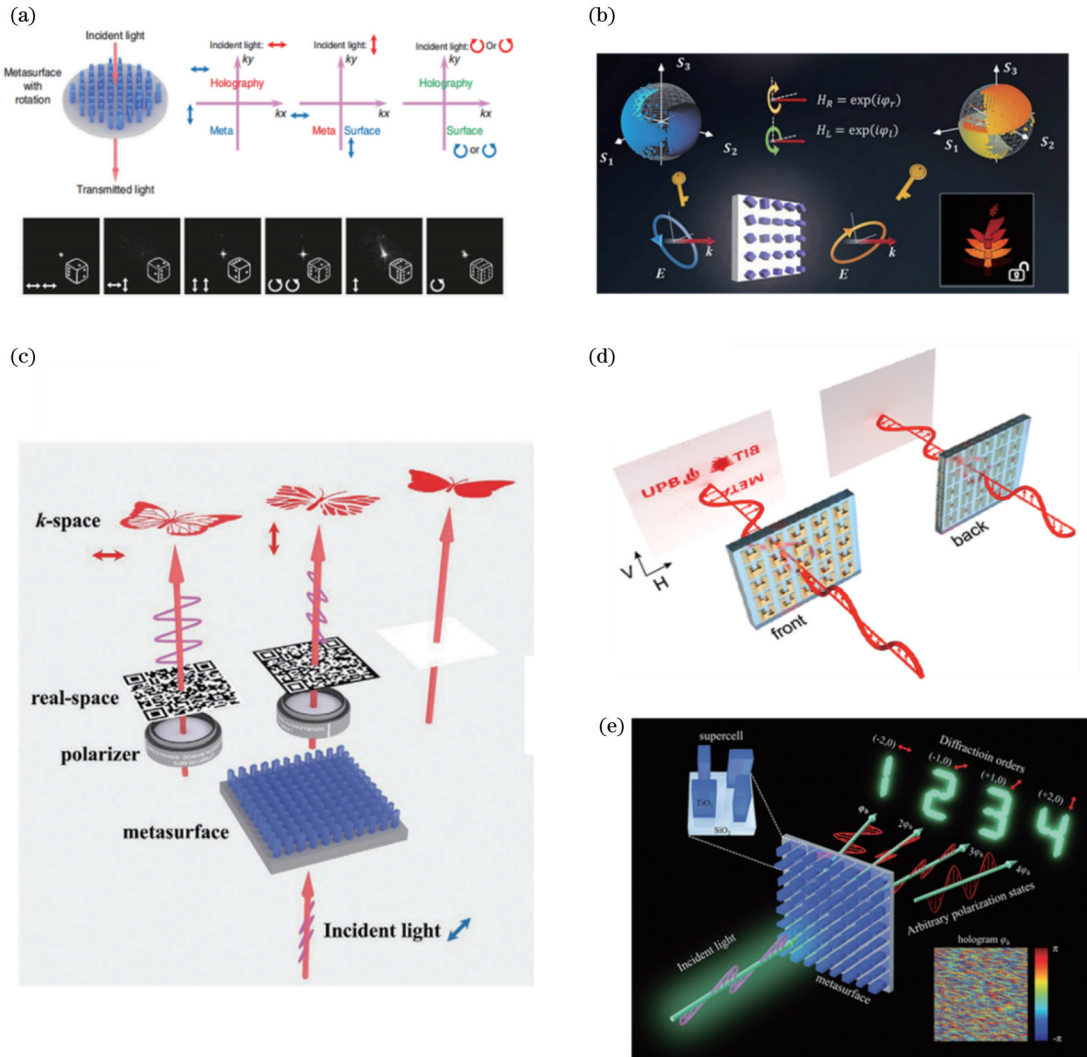


图 4 基于偏振复用的超表面全息。(a)多通道矢量全息显示和加密<sup>[76]</sup>; (b)全斯托克斯偏振复用的时序全息显示<sup>[86]</sup>; (c)实空间与动量空间同时存储不同偏振加密信息<sup>[87]</sup>; (d)双层超表面的偏振调制<sup>[12]</sup>; (e)不同衍射级次的相位分布与偏振同时调控<sup>[90]</sup>  
 Fig. 4 Metasurface holography based on polarization modulation. (a) Multichannel vectorial holographic display and encryption<sup>[76]</sup>; (b) time sequence holographic display based on full-Stokes polarization multiplexing<sup>[86]</sup>; (c) real-space and  $k$ -space store different polarization encryption information simultaneously<sup>[87]</sup>; (d) polarization modulation of bilayer metasurface<sup>[12]</sup>; (e) simultaneous control of phase distribution and polarization of different diffraction orders<sup>[90]</sup>

### 3.2 基于 OAM 复用的超表面全息

OAM 作为光场的重要参量,也被应用于复用全息显示的研究中。基于 OAM 的拓扑正交特性,在传统全息显示中,直接将不同涡旋相位与被复用的图像信息相互叠加,并加载至 SLM 上,通过特定的涡旋相

位板进行信息提取<sup>[93-94]</sup>。但是受制于 SLM 的性能,显示信息的通道数量与信息量难以提升且系统的结构复杂。利用超表面器件实现 OAM 复用,有效地突破了这一制约,相关研究成果被相继报道<sup>[95-97]</sup>。

本课题组与德国马克斯普朗克智能系统研究所、

英国伯明翰大学的相关课题组合作,实现了OAM复用的超表面全息投影<sup>[98]</sup>。基于纯相位光学全息原理,将不同的目标图像信息与对应OAM进行复合编码,制备出几何相位超表面全息器件,并通过另一个金/镁复合超表面器件动态产生的不同拓扑荷数的涡旋光束照明,可以实现全息显示图像切换。充分利用OAM正交机制,结合深度学习,可以实现OAM加密的计算全息数据传输<sup>[99]</sup>。使用训练好的卷积神经网络,准确地传输和解读携带OAM信息的全息图,并快速准确地读出作为附加通道的OAM信息,从而实现了大流量全息显示信息的传递。将偏振与OAM复用相结合,设计非晶硅纳米介质柱,通过对超表面琼斯矩阵的优化形成不同的信息通道,利用迭代优化算法将不同通道的附加相位分布与各自的目标图像一同编码为全息信息,对于携带特定OAM的涡旋光束以及特定的入射/出射偏振通道,可以在探测平面上重建不同的全息图像<sup>[100]</sup>。这种多偏振和多OAM的自由组合带来了更高的信息密度,为全息显示提供了更多的可能性。

### 3.3 级联超表面全息

级联超表面根据特定组合规则集成多个功能性超表面,以实现复杂功能、多维度光参量调制或智能化光学模组,并基于目标功能进行装配、架构。此外,结合轨道角动量、偏振<sup>[124]</sup>等维度,级联超表面可以进一步

提高信息密度,实现多维度联合动态调控。

本课题组与德国帕德博恩大学超快纳米光子课题组合作,基于光学密钥共享的思路,对级联超表面的整体功能与各片超表面独立功能进行优化设计,使得每个超表面全息都对应一个彼此独立的再现像;当两个超表面全息相隔预设距离进行堆叠时,级联超表面系统产生一个全新的再现像<sup>[125]</sup>,如图5(a)所示。该方法不仅能够对两组超表面全息进行组合信息交叉,还能够借助不同种类的纳米天线来实现不同的相位调制原理并引入偏振复用功能。随后,结合全息技术的冗余性特点,利用级联超表面不同旋转组合方式编码全息复用信息,进一步发展了超颖表面的新型信息复用方式<sup>[126]</sup>,如图5(b)所示。该旋转复用级联超颖表面系统由两片超表面全息构成,它们可以在远场中重建出各自的目标图像。当这两片超表面之间的相对面内旋转角为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 时,分别可以在远场重建4幅全新的全息再现像。通过改变级联方式,本课题组又提出一种移动级联超表面的全息复用<sup>[127]</sup>。如图5(c)所示,来自第一片超表面的衍射图案以不同的预设距离传播到第二片超表面时,会在远场中重建不同的全息图像。同时,建立一个物理驱动的神经网络模型来逆向设计该级联超表面。可见,该技术可以提高全息显示的信息密度和灵活性。

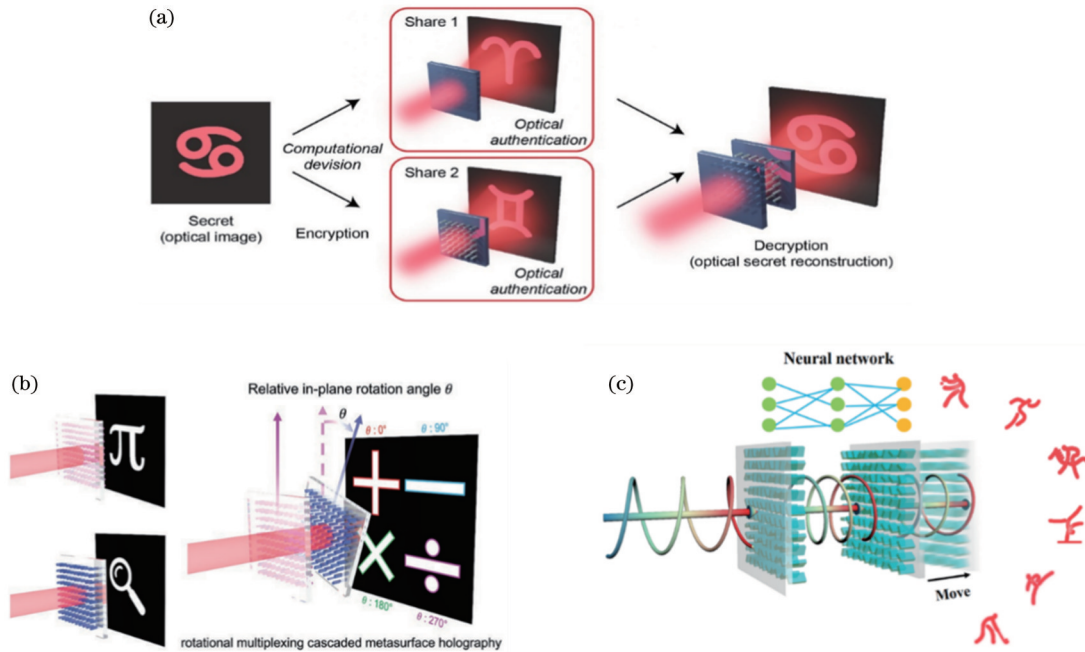


图5 级联超表面全息。(a) 基于密钥共享的级联超表面全息<sup>[102]</sup>; (b) 旋转复用级联超表面<sup>[103]</sup>; (c) 移动级联超表面全息<sup>[104]</sup>  
 Fig. 5 Cascaded metasurface holography. (a) Cascaded metasurface holography based on secret sharing<sup>[102]</sup>; (b) rotational multiplexing cascaded metasurfaces<sup>[103]</sup>; (c) moving cascaded metasurface holography<sup>[104]</sup>

### 3.4 基于波长复用的超表面全息

由于不同波长的光具有正交性,波分复用技术被广泛应用于光通信与传感领域。几何相位超表面结合空分复用<sup>[101,105]</sup>以及迂回相位结合不同空间分割<sup>[102]</sup>的

方案,是最为直接的波长复用超表面全息实现方法。然而,这些方案自身原理也限制了显示范围的扩大与再现效率的提升。近年来,与其他复用方法联合的波长复用超表面全息方法被陆续提出<sup>[57,103-104]</sup>。通过多



种光参量联合调控,优化不同类型微纳结构的排布、引入定量关联机制以及其他信息复用技术,增强了多维度超表面全息器件的信息存储能力,并拓展了其应用范围。

2019年,一种兼具双色打印与双色全息显示功能的超表面设计方案被提出[图 6(a)]<sup>[105]</sup>。通过优化设计,使得红绿两色具有不同光谱响应特性的非晶硅超原子在工作波长处相互独立,从而消除了不同波长通道之间相位编码的串扰;基于双色打印图案,在空间中排布双色超原子,并根据全息显示信息确定每个超原子的相位调控,进而实现双色打印和全息显示功能的集成。

定量关联全息优化超表面,基于不同全息图在像素空间的集合关系,引入可控随机掩模,将两幅独立图像信息分别记录在全息及其子集全息上,并利用优化设计的纳米孔阵列光子筛结构,获得了偏振不依赖、低串扰、宽带的重建图像<sup>[106]</sup>。以该方法为基础,使用两种不同横截面积的纳米天线填充金属光子筛器件,并加入几何旋转结构为部分纳米天线引入几何相位,三

组结构之间有定量的数学相关性,进而能够在 575 nm 和 670 nm 两个同偏振通道中实现独立的振幅全息显示,并在 670 nm 下的正交圆偏振通道中实现独立的相位全息显示[图 6(b)]<sup>[107]</sup>。通过设计基于全介质超表面的“静态像素”(两种分别对工作波长均透过和阻断的各向同性方形纳米柱)与“动态像素”(一种选择性地传输或阻挡同偏振光的各向异性矩形纳米柱),来获得定量相关的三重全息图,可以实现在不同波长处再现基于不同编码方法的全息影像[图 6(c)]<sup>[108]</sup>。该方法通过波长和偏振的灵活组合,实现可定制化的加密和动态显示功能。

码分复用也是通信领域中较为常用的一种复用技术,优选一组结构码作为“基”,对一系列独立的信息进行编码与解码。借鉴该技术,本课题组提出了码分复用超表面全息的概念<sup>[109]</sup>。利用全息术的冗余性与鲁棒性,将多幅独立的图像信息与结构编码参考光混合编码为全息信息,并记录在介质超表面的偏振通道中,只有利用特定的偏振与结构编码照明才能重建出需要的图像。在此基础上,本课题组与哈尔滨工业大学的

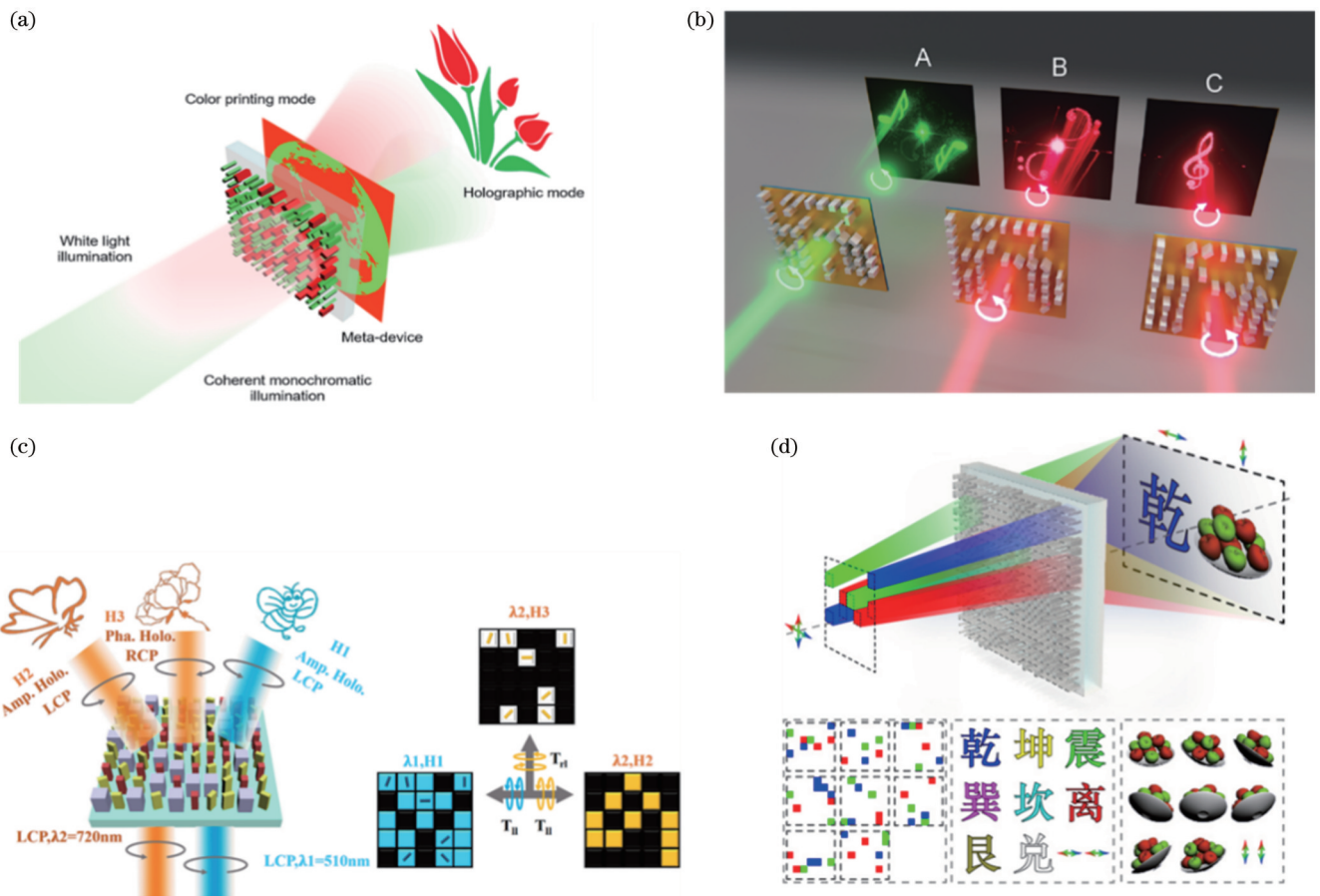


图 6 基于波长复用的超表面全息。(a)同时集成彩色打印与彩色全息超表面<sup>[105]</sup>; (b)双波长与偏振复用的光子筛全息图<sup>[107]</sup>; (c)三重关联振幅和相位全息加密<sup>[108]</sup>; (d)基于多波长码分复用和偏振复用的彩色全息显示<sup>[110]</sup>

Fig. 6 Wavelength multiplexed metasurface holography. (a) Metasurface integrating color printing and holography simultaneously<sup>[105]</sup>; (b) dual wavelength and polarization multiplexed photon sieve holograms<sup>[107]</sup>; (c) correlated triple amplitude and phase holographic encryption<sup>[108]</sup>; (d) color holographic display based on multiwavelength code-division multiplexing and polarization multiplexing<sup>[110]</sup>

微纳光子学实验室合作,发展了多波长码分复用超表面全息技术[图 6(d)]<sup>[110]</sup>。基于二氧化钛双折射超表面器件的设计与优化,记录了 48 通道的图像信息,并利用 DMD 与时分复用彩色照明系统产生的时序彩色编码结构照明,实现了彩色全息视频的投影显示,为多波长超表面动态光场调控提供了可行方案。

### 3.5 主动可调超表面全息

主动可调超表面打破了静态超表面的单一功能限制,能够在外部场作用或自身形变下实现动态可调的全息显示,因此逐渐成为学者们的研究热点。根据调制方式,主动可调超表面可分为电/热调控超表面<sup>[128-129]</sup>、光调控超表面<sup>[130]</sup>、化学调控超表面<sup>[131-132]</sup>以及机械调控超表面<sup>[133]</sup>等。利用主动可调超表面加载不同的全息信息,能够实现对显示图像的切换与改变。

基于液晶材料的动态超表面的主要工作原理是借助向列相液晶分子旋转角度的电可调性,将超表面浸入向列相液晶中,结合二值算法,可以实现新型超薄空间光调制器<sup>[134]</sup>。基于相变材料的动态超表面主要基于相变材料在不同相态下的光学参数差异。相变材料 GST 能够以薄膜形式为超表面天线提供基底,通过环境温度变化实现晶态/非晶态切换,从而再现两幅不同的全息图<sup>[135]</sup>。将相变材料氧化钒与金结合,构筑复合同心环天线阵列,通过改变温度进行半导体态和金属态的切换,从而实现重建光场随温度变化的动态调制<sup>[136]</sup>。结合空间复用策略,将相变材料天线与金天线在空间位置上交错放置,所设计的氧化钒天线在两个状态下具有较大的透射率差异,在半导体状态下只有金天线构成的全息图被观测到,而在金属态下由金天线和氧化钒天线复用的全息图能够全部再现<sup>[137]</sup>。根据磁性材料在不同磁场强度作用下具有较大光学差异的原理,将磁性材料与金属孔结合作为超原子,通过改变磁场强度,可以实现不同偏振通道下的动态可切换全息显示<sup>[138]</sup>。此外,本课题组与德国斯图加特大学、香港中文大学的相关课题组合作,基于导电聚合物聚苯胺,将其与共轭分布的金纳米棒构成的超表面巧妙结合并浸入液体环境中,加电控制聚苯胺的生长体积,以此结合特定光学原理实现了异常折射与全息显示开关<sup>[139]</sup>。

### 3.6 非线性超表面全息

在高能量强激光的作用下,非线性超表面能够产生多种非线性光场,为全息复用提供多个线性和非线性频率通道<sup>[111]</sup>。使用非线性几何相位<sup>[112-116]</sup>和共振相位<sup>[117-119]</sup>,结合全息优化算法,能够同时多个非线性转换频率处编码不同的超表面全息图,再现丰富多样的全息影像。此外,超表面与功能材料结合,能够在非线性频域建立新的光与物质相互作用机制<sup>[120-123]</sup>。

根据超原子的平面旋转对称性与非线性转换阶次,能够预测超表面在不同频率与偏振转换通道中的几何相位。基于具有平面一重旋转对称性的开口环金

属天线,在基频场的正交圆偏振通道、倍频场的相同圆偏振转换通道、正交圆偏振转换通道中获得不同的几何相位调制效果,结合全息优化算法,对三幅全息图同时进行记录,从而实现线性与非线性复用的全息投影显示[图 7(a)]<sup>[112]</sup>。本课题组与德国帕德博恩大学的超快纳米光子学课题组合作,优化了两种分别具有平面二重和三重旋转对称性的金纳米天线,使其具有接近的等离激元共振频率和基频透过率,结合空间复用的全息编码策略,分别对三倍频与二倍频转换所对应的相位全息图进行记录。如图 7(b)所示,该超表面在单一的近红外波长光的照射下,能够在两个可见光波长处重建能量近似相等的双色全息图像<sup>[115]</sup>。为了进一步丰富非线性调控机理与复用维度,本课题组对等离子体超表面的非线性动态相位进行研究,在两个不同的四波混频频率处实现超表面全息图像的记录与再现<sup>[119]</sup>,如图 7(c)所示。所提出的非线性超表面工作在线偏振光入射的情况下,由精心挑选的 4 种孔径结构组成,能够对两个四波混频频率实现独立的二比特振幅调制,从而同时记录了两幅独立的全息图,在不同的出射非线性频率处再现了独立的图像,提升了非线性频率复用的通道自由度。本课题组对全介质超表面的非线性调控机理进行深入研究,发现三次谐波的非线性几何相位与不同基频光场分量之间的波耦合有关,指出超原子的结构对称性与局域光场模式对非线性相位的影响,从而实现了非线性波束转向和非线性全息显示[图 7(d)]<sup>[116]</sup>。对比等离子体超表面,介质超表面具有高损伤阈值,能够显著提升非线性转换效率,可为高性能的非线性超表面全息元器件的设计提供理论依据。

## 4 总结和展望

各种光学现象都来源于光与物质的相互作用。人们要想实现特定的光学功能或者光学现象,就必须借助于光场调控。超表面作为一种新型微纳光学元器件,能够对光场的振幅、相位、偏振等多维度参量进行灵活调控,展现出传统光学元器件所不具备的强大优势。同时,人们对光与物质作用理解的加深,也推动着诸如连续谱束缚态(BIC)、介质拓扑结构等超原子工作机制的发现。超表面全息作为一种新型全息显示器件,在对光场的调控维度、增加信息通道数量等方面具有独特优势,可以提高全息信息密度,优化显示性能。此外,超表面全息也可以应用于防伪、光学加密、信息存储等领域。超表面在光学器件小型化、集成化、轻量化方面具有里程碑式的意义,相关研究给微纳光学领域光学器件未来的研究和发展带来了无限可能。本文立足于超表面波前调控与超表面全息显示技术方面的研究,介绍了超表面光场调控的方式与应用以及多维度复用超表面全息的发展,回顾了本课题在该领域的研究进展。



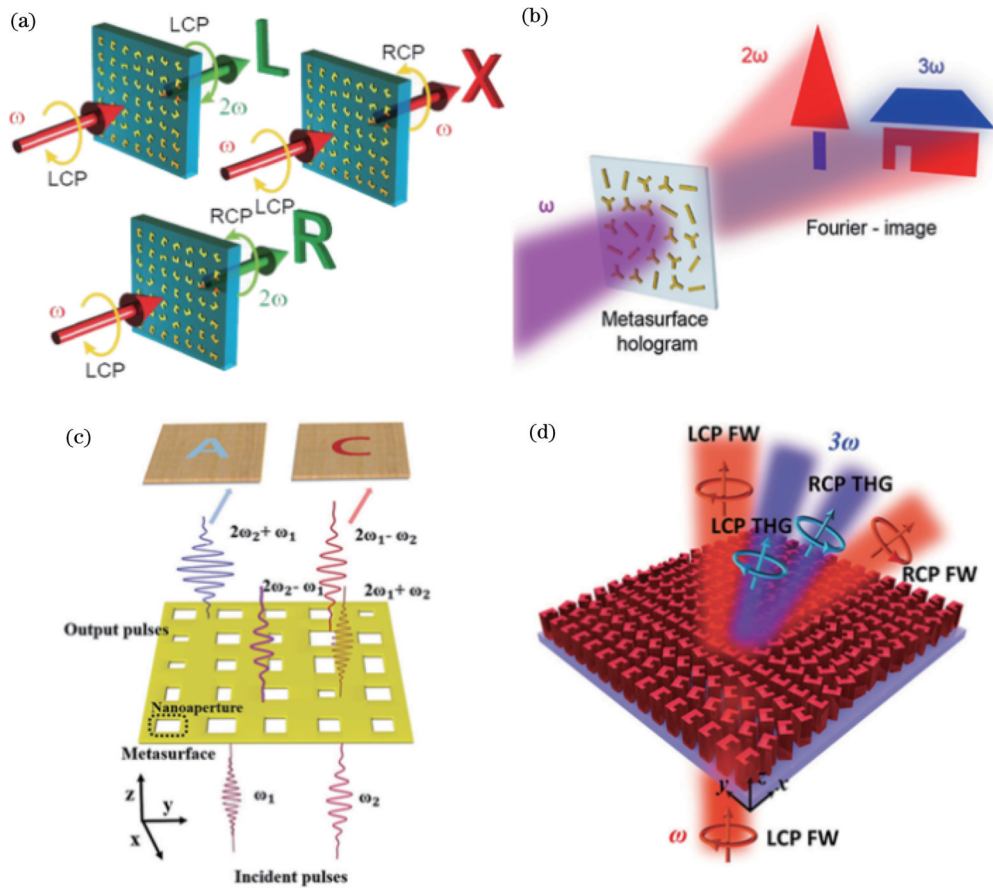


图 7 复用非线性超表面全息。(a)自旋与波长复用非线性超表面<sup>[112]</sup>；(b)双色非线性超表面全息<sup>[115]</sup>；(c)四波混合复用非线性超表面<sup>[119]</sup>；(d)全介质超表面调制非线性三次谐波<sup>[116]</sup>

Fig. 7 Multiplexing nonlinear metasurface holography. (a) Spin and wavelength multiplexing using nonlinear metasurface<sup>[112]</sup>; (b) bicolor holography using nonlinear metasurface<sup>[115]</sup>; (c) four-wave mixing holographic multiplexing based on nonlinear metasurface<sup>[119]</sup>; (d) nonlinear third-harmonic signals controlled by dielectric metasurface<sup>[116]</sup>

在当前的技术下,超表面器件仍然面临着一些挑战,例如:虽然超表面器件能够实现多维度光场调控,但各个维度的调控效率有待进一步提升,超表面亚波长特征尺寸调控结构与光的相互作用机制也需要进一步挖掘;大口径的多维度超表面器件的信息容量高、约束条件多,优化设计过程需要面对海量的数据信息,现有优化方法会落入局部最优解中,限制了器件调控质量,且设计过程耗时较长;大口径超表面调控器件的制备要求在平方毫米乃至平方厘米量级面积的加工中保持纳米级的高精度加工,这对于现阶段微纳加工工艺而言是一个巨大的挑战;目前大部分超表面器件属于静态器件,而主动可调超表面也存在着弛豫时间长或者可变调控单元尺寸过大,在全息显示这类需要逐点实时刷新的应用中难以发挥超表面器件优异的光场调控特性,因此像素级主动可调超表面的研究亟待进一步发展。未来超表面器件的研究将探索新的超表面调制物理机制、研究更加先进的设计与加工方法、创造更多的应用场景,充分发挥超表面器件的优势。随着理论探索、设计优化、器件制备与系统优化的不断突破与发展,超表面器件将进一步代替传统光学元器件,在包

括全息显示的众多光学领域中大放光彩。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. Science, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [3] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. Science, 2014, 345(6194): 298-302.
- [4] Camacho-Morales R, Rahmani M, Kruk S, et al. Nonlinear generation of vector beams from AlGaAs nanoantennas[J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7191-7197.
- [5] Zhu H L, Cheung S W, Chung K L, et al. Linear-to-circular polarization conversion using metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4615-4623.
- [6] Ullah N, Zhao R Z, Huang L L. Recent advancement in optical metasurface: fundament to application[J]. Micromachines, 2022, 13(7): 1025.
- [7] 金国藩, 张浩, 苏萍. 计算机全息图[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
Jin G F, Zhang H, Su P. Computational mechanism hologram [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [8] Zhang T Y, Huang L L, Li X W, et al. High-efficiency broadband polarization converter based on  $\Omega$ -shaped metasurface

- [J]. *Journal of Physics D*, 2017, 50(45): 454001.
- [9] Li T Y, Huang L L, Liu J, et al. Tunable wave plate based on active plasmonic metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4216-4226.
- [10] Zhao R Z, Huang L L, Tang C C, et al. Nanoscale polarization manipulation and encryption based on dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800490.
- [11] Zhang X E, Li X, Zhou H Q, et al. Multifocal plane display based on dual polarity stereoscopic metasurface[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(52): 2209460.
- [12] Frese D, Wei Q S, Wang Y T, et al. Nonreciprocal asymmetric polarization encryption by layered plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3976-3980.
- [13] Yue F Y, Zhang C M, Zang X F, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 17129.
- [14] Bao Y J, Nan F, Yan J H, et al. Observation of full-parameter Jones matrix in bilayer metasurface[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7550.
- [15] Rubin N A, Zaidi A, Juhl M, et al. Polarization state generation and measurement with a single metasurface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21455-21478.
- [16] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. *Science*, 2019, 365(6448): eaax1839.
- [17] Song X, Huang L L, Tang C C, et al. Selective diffraction with complex amplitude modulation by dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701181.
- [18] Wang Q H, Ni P N, Xie Y Y, et al. On-chip generation of structured light based on metasurface optoelectronic integration [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(3): 2000385.
- [19] Lin Z M, Li X W, Zhao R Z, et al. High-efficiency Bessel beam array generation by Huygens metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1079-1085.
- [20] Ni Y B, Chen S, Wang Y J, et al. Metasurface for structured light projection over 120° field of view[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(9): 6719-6724.
- [21] Li Z L, Dai Q, Mehmood M Q, et al. Full-space cloud of random points with a scrambling metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 63.
- [22] Zhang X E, Huang L L, Zhao R Z, et al. Multiplexed generation of generalized vortex beams with on-demand intensity profiles based on metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(3): 2100451.
- [23] Huang L L, Song X, Reineke B, et al. Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(2): 338-346.
- [24] Bao Y J, Ni J C, Qiu C W. A minimalist single-layer metasurface for arbitrary and full control of vector vortex beams [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(6): 1905659.
- [25] Tseses S, Ostrovsky E, Cohen K, et al. Optical skyrmion lattice in evanescent electromagnetic fields[J]. *Science*, 2018, 361(6406): 993-996.
- [26] Deng Z L, Shi T, Krasnok A, et al. Observation of localized magnetic plasmon skyrmions[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 8.
- [27] Du L P, Yang A P, Zayats A V, et al. Deep-subwavelength features of photonic skyrmions in a confined electromagnetic field with orbital angular momentum[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(7): 650-654.
- [28] Lei S W, Zhang X, Zhu S Q, et al. Generation of Airy beam arrays in real and K spaces based on a dielectric metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18781-18790.
- [29] Li Z, Liu W W, Geng G Z, et al. Multiplexed nondiffracting nonlinear metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(23): 1910744.
- [30] Kim G, Kim Y, Yun J, et al. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5920.
- [31] Song X, Huang L L, Sun L, et al. Near-field plasmonic beam engineering with complex amplitude modulation based on metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 073104.
- [32] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [33] Tan H Y, Deng J H, Zhao R Z, et al. A free-space orbital angular momentum multiplexing communication system based on a metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(6): 1800278.
- [34] Zhang X E, Huang L L, Zhao R Z, et al. Basis function approach for diffractive pattern generation with Damman vortex metasurfaces[J]. *Science Advances*, 2022, 8(40): eabp8073.
- [35] Liu Y, Li X W, Chen Y F, et al. Imaging-based optical barcoding for relative humidity sensing based on meta-tip[J]. *Nanophotonics*, 2021, 11(1): 111-118.
- [36] Liu Y, Chen Y F, Zhou S P, et al. Fiber-optic meta-tip with multi-sensitivity resonance dips for humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators B*, 2022, 352: 130957.
- [37] Cai S S, Hu W H, Liu Y M, et al. Optical fiber hydrogen sensor using metasurfaces composed of palladium[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(5): 053601.
- [38] Zhou H Q, Huang L L, Li X W, et al. All-dielectric bifocal isotropic metalens for a single-shot hologram generation device [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21549-21559.
- [39] Chen Y F, Huang L L, Liu B Y, et al. Broadband achromatic metalens and meta-deflector based on integrated metasurface[J]. *Journal of Physics D*, 2022, 55(2): 025107.
- [40] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [41] Fan Z B, Qiu H Y, Zhang H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 67.
- [42] Zhou H Q, Li X, Ullah N, et al. Single-shot phase retrieval based on anisotropic metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(16): 161702.
- [43] Kwon H, Arbabi E, Kamali S M, et al. Single-shot quantitative phase gradient microscopy using a system of multifunctional metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 109-114.
- [44] Engay E, Huo D W, Malureanu R, et al. Polarization-dependent all-dielectric metasurface for single-shot quantitative phase imaging[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3820-3826.
- [45] Yan J X, Wang Y T, Liu Y, et al. Single pixel imaging based on large capacity spatial multiplexing metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(13): 3071-3080.
- [46] Yan J X, Wei Q S, Liu Y, et al. Single pixel imaging key for holographic encryption based on spatial multiplexing metasurface [J]. *Small*, 2022, 18(35): 2203197.
- [47] Zhang Z B, Ma X, Zhong J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [48] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [49] Liu H C, Yang B A, Guo Q H, et al. Single-pixel computational ghost imaging with helicity-dependent metasurface hologram[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701477.
- [50] Jing X L, Zhao R Z, Li X, et al. Single-shot 3D imaging with point cloud projection based on metadvice[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7842.
- [51] Chen Y F, Zhao R Z, He H Y, et al. Spectrum dispersion element based on the metasurface with parabolic phase[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32670-32679.



- [52] Meng Y, Hu F T, Liu Z T, et al. Chip-integrated metasurface for versatile and multi-wavelength control of light couplings with independent phase and arbitrary polarization[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16425-16439.
- [53] Meng Y, Liu Z T, Xie Z W, et al. Versatile on-chip light coupling and (de)multiplexing from arbitrary polarizations to controlled waveguide modes using an integrated dielectric metasurface[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 564-576.
- [54] Guo X X, Ding Y M, Chen X, et al. Molding free-space light with guided wave-driven metasurfaces[J]. *Science Advances*, 2020, 6(29): eabb4142.
- [55] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100638.
- [56] Huang L L, Chen X Z, Bai B F, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3): e70.
- [57] Song X, Huang L L, Wang Y T. Tunable multi-port surface plasmon polariton excitation with nanostructures[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(3): 817-823.
- [58] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7956-7961.
- [59] Guo J S, Ye C C, Liu C Y, et al. Ultra-compact and ultra-broadband guided-mode exchangers on silicon[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 2000058.
- [60] Wang Z, Li T T, Soman A, et al. On-chip wavefront shaping with dielectric metasurface[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3547.
- [61] Fu T Z, Zang Y B, Huang Y Y, et al. Photonic machine learning with on-chip diffractive optics[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 70.
- [62] Li T H, Liao K, Zhou H Y, et al. On-chip metaline for multiport beam splitting[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(7): 2202527.
- [63] Zhou H Y, Liao K, Su Z X, et al. Tunable on-chip mode converter enabled by inverse design[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(6): 1105-1114.
- [64] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [65] Yu H, Lee K R, Park J, et al. Ultrahigh-definition dynamic 3D holographic display by active control of volume speckle fields[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(3): 186-192.
- [66] Park J, Lee K R, Park Y K. Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1304.
- [67] An J, Won K, Kim Y, et al. Slim-panel holographic video display[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5568.
- [68] Peng Y F, Choi S, Kim J, et al. Speckle-free holography with partially coherent light sources and camera-in-the-loop calibration [J]. *Science Advances*, 2021, 7(46): eabg5040.
- [69] Shi L A, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks[J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 234-239.
- [70] Li Y L, Li N N, Wang D, et al. Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 188.
- [71] Li J, Smithwick Q, Chu D P. Holobricks: modular coarse integral holographic displays[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 57.
- [72] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [73] Jiang Q, Hu L Y, Geng G Z, et al. Arbitrary amplitude and phase control in visible by dielectric metasurface[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13530-13539.
- [74] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Vectorial holograms with a dielectric metasurface: ultimate polarization pattern generation[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(11): 2712-2718.
- [75] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [76] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [77] Wang E L, Niu J B, Liang Y H, et al. Complete control of multichannel, angle-multiplexed, and arbitrary spatially varying polarization fields[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(6): 1901674.
- [78] Zhang S F, Huang L L, Li X, et al. Dynamic display of full-Stokes vectorial holography based on metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(6): 1746-1753.
- [79] Song Q H, Baroni A, Sawant R, et al. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase metasurfaces [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2651.
- [80] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [81] Bao Y J, Wen L, Chen Q, et al. Toward the capacity limit of 2D planar Jones matrix with a single-layer metasurface[J]. *Science Advances*, 2021, 7(25): eabh0365.
- [82] Bao Y J, Weng Q, Li B J. Conversion between arbitrary amplitude, phase, and polarization with minimal degrees of freedom of metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(2): 2100280.
- [83] Liu M Z, Zhu W Q, Huo P C, et al. Multifunctional metasurfaces enabled by simultaneous and independent control of phase and amplitude for orthogonal polarization states[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 107.
- [84] Rubin N A, Zaidi A, Dorrah A, et al. Jones matrix holography with metasurfaces[J]. *Science Advances*, 2021, 7(33), eabg7488.
- [85] Xiong B, Liu Y, Xu Y H, et al. Breaking the limitation of polarization multiplexing in optical metasurfaces with engineered noise[J]. *Science*, 2023, 379(6629): 294-299.
- [86] Zhang S F, Huang L L, Geng G Z, et al. Full-Stokes polarization transformations and time sequence metasurface holographic display[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(4): 1031-1038.
- [87] Zhao R Z, Xiao X F, Geng G Z, et al. Polarization and holography recording in real- and  $k$ -space based on dielectric metasurface[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(27): 2100406.
- [88] Wei Q S, Huang L L, Li X W, et al. Broadband multiplane holography based on plasmonic metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(18): 1700434.
- [89] Li X, Zhang X E, Zhao R Z, et al. Independent light field manipulation in diffraction orders of metasurface holography[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2100592.
- [90] Zhao R Z, Geng G Z, Wei Q S, et al. Controllable polarization and diffraction modulated multi-functionality based on metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(8): 2102596.
- [91] Zhao R Z, Li X, Geng G Z, et al. Encoding arbitrary phase profiles to 2D diffraction orders with controllable polarization states[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(1): 155-163.
- [92] Zhao R Z, Wei Q S, Li Y Z, et al. Stereo Jones matrix holography with longitudinal polarization transformation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023: 2200982.
- [93] Li X F, Chu J Q, Smithwick Q, et al. Automultiscopic displays based on orbital angular momentum of light[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085608.

- [94] Chu J Q, Li X F, Smithwick Q, et al. Coding/decoding two-dimensional images with orbital angular momentum of light[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1490-1493.
- [95] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2986.
- [96] Fang X Y, Ren H R, Gu M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 102-108.
- [97] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [98] Yu P, Li J X, Li X, et al. Generation of switchable singular beams with dynamic metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(6): 7100-7106.
- [99] Zhou H Q, Wang Y T, Li X, et al. A deep learning approach for trustworthy high-fidelity computational holographic orbital angular momentum communication[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(4): 044104.
- [100] Zhou H Q, Sain B, Wang Y T, et al. Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5553-5559.
- [101] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Full-colour nanoprint-hologram synchronous metasurface with arbitrary hue-saturation-brightness control[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 95.
- [102] Deng Z L, Jin M K, Ye X A, et al. Full-color complex-amplitude vectorial holograms based on multi-freedom metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(21): 1910610.
- [103] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. On-chip meta-optics for semi-transparent screen display in sync with AR projection[J]. *Optica*, 2022, 9(6): 670-676.
- [104] Yang R, Wan S A, Shi Y Y, et al. Immersive tuning the guided waves for multifunctional on-chip metaoptics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2200127.
- [105] Wei Q S, Sain B, Wang Y T, et al. Simultaneous spectral and spatial modulation for color printing and holography using all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8964-8971.
- [106] Xu Z T, Huang L L, Li X W, et al. Quantitatively correlated amplitude holography based on photon sieves[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(2): 1901169.
- [107] Frese D, Sain B, Zhou H Q, et al. A wavelength and polarization selective photon sieve for holographic applications [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(18): 4543-4550.
- [108] Zhou H Q, Li X, Xu Z T, et al. Correlated triple hybrid amplitude and phase holographic encryption based on a metasurface[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 678-686.
- [109] Li X, Zhao R Z, Wei Q S, et al. Code division multiplexing inspired dynamic metasurface holography[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(35): 2103326.
- [110] Li X, Chen Q M, Zhang X E, et al. Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6: 220060.
- [111] Krasnok A, Tymchenko M, Alù A. Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics[J]. *Materials Today*, 2018, 21(1): 8-21.
- [112] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11930.
- [113] Li G X, Chen S M, Pholchai N, et al. Continuous control of the nonlinearity phase for harmonic generations[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(6): 607-612.
- [114] Tymchenko M, Gomez-Diaz J S, Lee J, et al. Gradient nonlinear Pancharatnam-Berry metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(20): 207403.
- [115] Frese D, Wei Q S, Wang Y T, et al. Nonlinear bicolor holography using plasmonic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(4): 1013-1019.
- [116] Liu B Y, Sain B, Reineke B, et al. Nonlinear wavefront control by geometric-phase dielectric metasurfaces: influence of mode field and rotational symmetry[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(9): 1902050.
- [117] Gao Y S, Fan Y B, Wang Y J, et al. Nonlinear holographic all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 8054-8061.
- [118] Wang L, Kruk S, Koshelev K, et al. Nonlinear wavefront control with all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(6): 3978-3984.
- [119] Lin Z M, Huang L L, Xu Z T, et al. Four-wave mixing holographic multiplexing based on nonlinear metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(21): 1900782.
- [120] Hong X M, Hu G W, Zhao W C, et al. Structuring nonlinear wavefront emitted from monolayer transition-metal dichalcogenides[J]. *Research*, 2020, 2020: 9085782.
- [121] Wang B X, Hong X M, Wang K, et al. Nonlinear detour phase holography[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(4): 2693-2702.
- [122] Wang B X, Wang K, Hong X M, et al. Resonant nonlinear synthetic metasurface with combined phase and amplitude modulations[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(7): 2100031.
- [123] Spreyer F, Zhao R Z, Huang L L, et al. Second harmonic imaging of plasmonic Pancharatnam-Berry phase metasurfaces coupled to monolayers of WS<sub>2</sub>[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(2): 351-360.
- [124] Cai X D, Tang R, Zhou H Y, et al. Dynamically controlling terahertz wavefronts with cascaded metasurfaces[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(3): 036003.
- [125] Philip G, Wei Q S, Basudeb S, et al. Optical secret sharing with cascaded metasurface holography[J]. *Science Advances*, 2021, 7(16): eabf9718.
- [126] Wei Q S, Huang L L, Zhao R Z, et al. Rotational multiplexing method based on cascaded metasurface holography[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(8): 2102166.
- [127] Zhou H Q, Li X, Wang H, et al. Ultra-dense moving cascaded metasurface holography by using a physics-driven neural network [J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 24285-24294.
- [128] Li S Q, Xu X W, Veetil R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface [J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [129] 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.
- [130] Chen P, Shen Z X, Xu C T, et al. Simultaneous realization of dynamic and hybrid multiplexed holography via light-activated chiral superstructures[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(5): 2270024.
- [131] Li T Y, Wei Q S, Reineke B, et al. Reconfigurable metasurface hologram by utilizing addressable dynamic pixels[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 21153-21162.
- [132] Li J X, Kamin S, Zheng G X, et al. Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaar6768.
- [133] Malek S C, Ee H S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3641-3645.
- [134] Zhu S Q, Xu Z T, Zhang H, et al. Liquid crystal integrated metadvice for reconfigurable hologram displays and optical encryption[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9553-9564.
- [135] Zhou H Q, Wang Y T, Li X W, et al. Switchable active phase modulation and holography encryption based on hybrid metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 905-912.



- [136] Lin Z M, Huang L L, Zhao R Z, et al. Dynamic control of mode modulation and spatial multiplexing using hybrid metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18740-18750.
- [137] Dong B W, Zhao R Z, Wei Q S, et al. Terahertz switchable VO<sub>2</sub>-Au hybrid active metasurface holographic encryption[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 20750-20761.
- [138] Bi Y, Huang L L, Zhao R Z, et al. Magnetically controllable holographic encryption based on a magneto-optical metasurface [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 8366-8375.
- [139] Kaissner R, Li J X, Lu W Z, et al. Electrochemically controlled metasurfaces with high-contrast switching at visible frequencies [J]. *Science Advances*, 2021, 7(19): eabd9450.

## Multi-Dimensional Light Field Manipulation by Metasurfaces and Holographic Display Technology

Li Xin<sup>1,2,3</sup>, Zhang Shifei<sup>1</sup>, Zhang Xiaotong<sup>1</sup>, Yang Jingyu<sup>1</sup>, Zheng Longhao<sup>1</sup>,  
Huang Lingling<sup>1\*\*</sup>, Wang Yongtian<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

<sup>3</sup>*Key Laboratory of Photonics Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

### Abstract

**Significance** Metasurfaces are two-dimensional artificial engineered optical elements composed of subwavelength meta-atoms that have highly flexible design freedom. Therefore, metasurfaces have exhibited unprecedented electromagnetic modulations and performance beyond nature materials, opening up new possibilities for compact and versatile wavefront engineering. As a result, many novel, efficient, and versatile devices are emerging, including polarized elements, beam generators, and surface wave modulators, leading to the refinement of intelligent devices and compact integrated systems. Furthermore, cutting-edge technologies, including novel displays, virtual reality, augmented reality, optical anti-counterfeiting, and information encryption and storage, are expected to be empowered by this fantastic optical platform.

With the advent of the metaverse, more vivid display technologies are required. Computer-generated holography provides efficient solutions for whole wavefront reconstruction and is envisioned as one of the most promising display technologies. By providing depth cues required by human eyes, holography can bring an immersive and realistic visual experience. Unlike conventional optical holography, which has limited functions, metasurface holography features subwavelength modulation units, versatile multiplexed capacities, and high spatial bandwidth products. The combination of metasurface and holography enables the development of compact and lightweight holographic displays, cameras, and sensors with a wide range of practical applications in science and industry.

We expound on the advance of metasurfaces and introduce our research group's progress in multi-dimensional light field manipulation using metasurfaces and holographic displays.

**Progress** The use of metasurfaces to achieve multi-dimensional modulations of optical field amplitude, polarization state, phase, and frequency is currently a hot direction in metasurface research. Our research group has conducted in-depth research on polarization modulation, novel beam generation, optical detection, optical field imaging, and surface wave modulation based on the metasurface, so as to continuously achieve efficient and multifunctional multi-dimensional optical field modulation. In the field of polarization modulation, we have achieved the conversion from linear to circular polarization, and actively tunable metasurfaces present further possibilities for polarization modulation. Novel beam generation methods based on metasurfaces have been proposed, enabling random dot beams, diffraction-free beams, novel vortex beams with multiple dimensions and modes, and generalized vortex beams. We have improved the performance of optical sensing systems by using metasurface devices as the core devices of optical fiber-end sensors, and the ultra-thin nature of metasurface devices provides a compact optical platform for integrated physical and chemical inspection systems. We have also applied the optical field modulation capability of the metasurface to novel imaging, including phase imaging measurements, single-pixel imaging, and three-dimensional (3D) imaging. For on-chip metasurfaces, we have achieved mode conversion and wavefront modulation with a slit waveguide structure to enable on-chip equal-intensity beam splitting devices. An on-chip tunable mode converter based on liquid crystals is designed, which can convert fundamental modes to

multiple higher-order modes.

Moreover, based on the abundant properties of metasurfaces, a great deal of work in the holographic display is described in detail, which can realize the reconstruction of multiplexed holographic images combined with polarization, orbital angular momentum, multi-wavelength, and nonlinear effect. In terms of polarization multiplexing, different polarization channels can load various holograms. Our research group has studied birefringent metasurfaces for the complete control of polarization channels. Twelve polarization channels and seven different image combinations are demonstrated. Also, we demonstrate full-Stokes polarization multiplexing, polarization and holography recording in real-space and  $k$  space, non-reciprocal asymmetric polarization encryption, and simultaneous control of phase and polarization of different diffraction orders with metasurfaces. We also verify a polarization-encrypted metasurface based on orbital angular momentum (OAM) multiplexing, and the OAM selective holographic information can only be reconstructed with the exact topological charge and a specific polarization state. The cascaded metasurfaces integrate multiple functional metasurfaces according to specific combination methods. Our research group demonstrates holographic multiplexing of a variety of different cascaded metasurfaces, including the combination, relative rotation, and relative movement of two different metasurfaces, which improves the information density and realizes multi-dimensional dynamic modulation. In terms of wavelength multiplexing, we demonstrate a metasurface integrating color printing and holography simultaneously. Furthermore, we prove dual wavelength and polarization multiplexed photon sieve holograms, correlated triple amplitude and phase holographic encryption, and color holographic display based on multi-wavelength code-division multiplexing and polarization multiplexing with metasurface. In terms of dynamic holographic display, we propose dynamic metasurfaces based on liquid crystal materials, phase change materials, and magnetic materials. By changing the external conditions such as electromagnetic field and temperature, the display image can be switched. According to nonlinear effects, we show spin and wavelength multiplexing, bicolor holography, and four-wave mixing holographic multiplexing based on nonlinear metasurfaces. Besides, we demonstrate nonlinear third-harmonic signals controlled by dielectric metasurfaces.

**Conclusions and Prospects** Metasurface can flexibly manipulate the parameters of electromagnetic waves, including amplitude, phase, polarization, and OAM. By optimization-designed metaatoms, metasurfaces can manipulate light fields in multiple dimensions, which enhance the information density and make metasurfaces more versatile. Hence metasurface holography is promising to expand hologram information density, increase the number of display channels, and improve imaging performance. Metasurfaces have led to breakthroughs in many fields and are of milestone significance in the miniaturization, integration, and lightweight of optical devices, and related research has brought unlimited possibilities for the development of micro-nano optics, but it still faces some challenges. The new principle of the interaction between light and material needs to be further explored, and designing and fabricating large-diameter multi-dimensional metasurface devices are still facing plenty of issues. The research on pixel-level actively adjustable metasurfaces needs to be further developed. In summary, exploring new metasurface modulation physical mechanisms and more advanced design and processing methods can unlock more application scenarios and fully leverage the advantages of metasurface devices.

**Key words** metasurface; light field manipulation; multiple dimensions; holographic display