

DOI: 10.12086/oe.2022.220183

超表面全息术：从概念到实现

许可^{1†}, 王星儿^{1†}, 范旭浩¹, 刘耘呈¹,
余轩¹, 高辉^{1,2*}, 熊伟^{1,2*}

¹华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

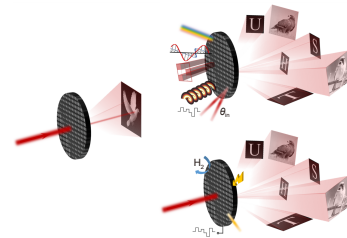
²湖北光谷实验室, 湖北 武汉 430074

摘要: 对实时彩色三维动态显示的追求激发了学术界和产业界巨大的研究热情。随着“元宇宙”概念的提出, 对高性能三维显示设备与技术的需求越发迫切。全息术是一种理想的三维显示方案, 但传统光场调控器件却存在视场角狭窄、信息容量小等问题, 阻碍了全息技术的进一步发展。而超表面作为一种新型光场调控器件, 有望利用其像素尺寸小和光场调控能力强的特点在全息技术领域实现新的突破。本文主要从超表面全息器件的设计流程、调制方式、动态实现、制造技术四个方面给出了超表面全息十余年的概貌, 并提出该领域未来发展的方向。

关键词: 超表面; 计算全息; 三维显示; 光场调制; 微纳制造

中图分类号: TB383

文献标志码: A



许可, 王星儿, 范旭浩, 等. 超表面全息术: 从概念到实现 [J]. 光电工程, 2022, 49(10): 220183

Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization [J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220183

Meta-holography: from concept to realization

Xu Ke^{1†}, Wang Xinger^{1†}, Fan Xuhao¹, Liu Yuncheng¹, Yu Xuan¹, Gao Hui^{1,2*}, Xiong Wei^{1,2*}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Optical Valley Laboratory, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: The pursuit of real-time, full-color, three-dimension (3D), and dynamic display has inspired a rich body of industrial and academic research. With the introduction of "Metaverse", there is an increasing demand for high-performance 3D display devices and technologies. Holographic technology is an ideal approach for future naked-eye 3D display. However, traditional dynamic holographic devices have brought many shortcomings such as small field of view (FOV) and limited information capacity, which hinder the practical applications. As a new class of light field modulator, metasurface is expected to achieve remarkable breakthroughs in the field of holographic display with the advantages of their small pixel size and the emerging ability to manipulate light. This paper gives an overview of the development of meta-holography from four aspects: the design strategy, the modulation principle, the methods for realizing dynamic display and the micro-nano fabrication technologies for optical metasurface. We finally include a brief discussion of the future direction in this field.

Keywords: metasurface; computer-generated holography; 3D display; light field modulation; micro-nano manufacturing

收稿日期: 2022-07-27; 收到修改稿日期: 2022-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0502700); 国家自然科学基金资助项目 (62205117, 52275429); 知识创新专项-曙光计划项目; 光谷实验室创新研究项目

*通信作者: 高辉, Gaohui_wnlo@hust.edu.cn; 熊伟, weixiong@hust.edu.cn。

†同等贡献作者

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

1 引言

视觉是人和动物最重要的感觉, 80% 以上的外界信息需通过视觉获得, 包括视野范围内物体的轮廓、形状、远近、表面细节、颜色等, 由此我们可以在残酷的自然环境下生存进化, 甚至逐渐发展出对“美”的理解、创造和追求。600 万年的人类进化舞台被设定在一个三维空间内, 因此包含着多种生理学、心理学深度线索的三维场景显示能够最大程度上调动人的感知和运算潜能, 从而带给人更为真实的体验。然而传统光学成像系统中的光探测器只能对光的强度信息进行离散采样, 即使在后处理中利用先进的数字图像处理技术, 由于丢失了相位信息, 也无法从根本上挖掘深度线索, 因此不能够完全重建出真实场景中的三维立体多视角图像。

近年来, 随着“元宇宙”概念的提出, 产业界迫切需要一种能够重构真实世界景物的三维显示技术来构建起“真实”和“虚拟”世界间的桥梁。在众多三维显示技术中, 全息术 (Holography) 基于光波的干涉 (波前记录) 和衍射 (波前重建) 原理发展而来, 可以重建整个光波的波前以提供三维场景深度线索。相较于双目视觉显示等其他三维实现方法, 全息术能够提供人眼所需的所有深度感, 包括双目视差、调焦、移动视差、遮挡等^[1], 是一种备受关注的理想裸眼三维显示技术。

随着对计算机技术和光传输理论研究的不断深入, 利用计算机算法来代替传统光学全息中的波前记录过程, 既避免了搭建复杂干涉记录光路又能够通过光波的数学描述重建出虚拟物体, 由此诞生的计算全息 (computer-generated holography, CGH)^[2-3] 技术已被广泛用于光束操纵^[4]、空间滤波^[5]、三维显示^[6] 以及光学元件检测^[7] 等领域。在 CGH 技术中, 光场调控器件替代了传统全息干板对入射光场进行调制, 目前常用的光场调控器件主要为纯振幅调制型, 如数字微镜阵列 (digital micro-mirror device, DMD), 或纯相位调制型, 如部分的空间光调制器 (spatial light modulator, SLM)。受调制原理限制, 两者不能加载理想的复振幅全息光场信息, 导致信息部分丢失、波前计算复杂。同时, 这两种器件的单元结构尺寸往往是可见光波长的十倍以上。大像素尺寸和弱调制能力带来了许多缺点, 如视场狭窄、孪生像、带宽窄和多级次衍射等, 大大限制了计算全息术的进步与发展。

2011 年, Capasso 课题组提出广义斯涅尔定律, 自此超表面作为一种新兴的光场调控器件逐渐进入大众视野。通过单元结构的优化设计和合理排列, 这种新型器件能够同时控制光的振幅^[8]、相位^[9]、偏振^[10] 和色散^[11] 等光参量, 提供了一种强大的光场调控方式。得益于前人对微纳制造技术和材料领域的探索, 由亚波长量级单元结构构成的超表面^[12] 理论上能够提供接近 90° 的衍射角, 远远高于传统的主动式光场调控器件。小像素尺寸和强光场调控能力使超表面在超透镜^[13]、分光器件^[14] 和偏转器件^[15] 等的设计和实现上展露锋芒。利用超表面作为全息图加载的媒介契合了全息技术对高精度复杂光场调控的需求^[16-17], 表现出高设计自由度、高空间分辨率、低噪声、宽带等优点^[18], 为 CGH 技术目前所面临的部分问题提供了一条解决之道。

经过十余年的探索, 超表面全息技术已得到长足发展, 期间经历了调制方式的改进、高性能指标的追求、动态显示方案的探索等阶段, 正向着真三维全息显示的终极目标稳步前进。本文从设计流程、调制方式、动态实现和制造技术四个方面全方位介绍回顾了该领域的发展状况, 阐述了将超表面全息的概念落地于实际应用的设计制造全流程步骤, 并思考了超表面全息未来发展的方向。首先, 梳理了超表面全息器件设计的基本流程; 进一步地, 基于超表面对入射光的作用机制分类介绍了静态超表面全息的基本概念和发展; 随后, 详细介绍了多路复用超表面全息器件和主动式超表面全息器件这两类实现动态全息显示的方式; 最后, 讨论了制备超表面的微纳加工工艺。总之, 本文全面地介绍了超表面从设计到制造的流程, 并提出了目前超表面全息技术发展所面临的问题和可能的解决方法。

2 超表面全息器件的基本设计流程

超表面作为一种光场调控器件应用于全息显示中, 其设计过程与传统的光场调控器件类似, 但也有其独特之处。传统的计算全息一般分为波前计算、波前编码和波前重建三步。以较为普遍的离散化静态超表面全息器件设计为例, 首先计算出全息面的波前分布, 然后通过单元结构的设计和排列将波前分布加载在超表面器件上, 最后利用微纳加工方法制造。简要的设计流程如图 1(a) 所示。

计算全息图的波前计算过程基于光传播的数学

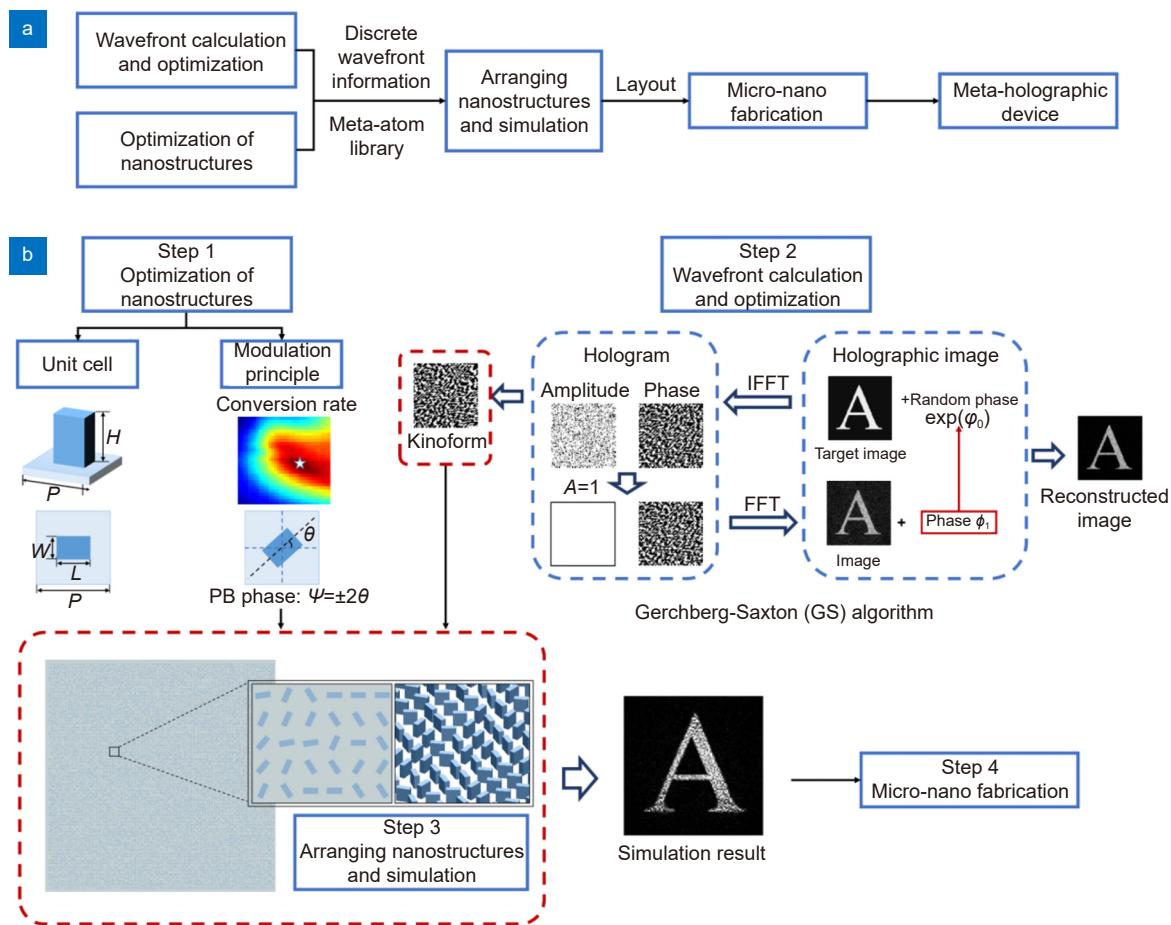


图 1 基于超表面的计算全息器件设计流程。(a) 简要的超表面全息器件设计过程;
(b) 以几何相位调控超表面为例的全息器件设计过程

Fig. 1 Design strategies for CGH devices based on metasurface. (a) Brief design strategy of meta-holographic devices;
(b) Design process of holographic devices using metasurface based on geometric phase as an example

表达实现, 在设计器件前, 首先要明确波前信息的编码方式, 即选择全息图平面上合适的离散化复数光场表达, 这与器件的光场调制原理有关。传统的全息器件一般只能依据器件的调制原理, 加载通过迭代算法 (如 Gerchberg Saxton 算法^[19-20]) 或搜索算法 (如遗传算法^[21-22]) 得到的纯相位调制图 (相息图) 或纯振幅调制图。一些优化的相息图算法目的是寻找合适的全息面相位分布, 在全息面振幅受限的情况下, 使全息像与目标像之间的差别最小。为此, 一般需要特殊的初始像面相位设计以及优化的迭代算法, 可移植性较差^[23]。而搜索算法则存在计算时间长的问题。近年来, 机器学习、深度学习算法^[24-25] 的兴起有望实现快速、高重建图像质量的全息图计算。随着算法的普及和计算设备的发展, 该方法将会成为未来波前计算的一种常用方式。以上算法的复杂

优化过程都是为了弥补器件调制原理的缺陷而产生, 但超表面不仅可以加载纯相位和纯振幅信息, 还可以直接加载复振幅光场调制信息, 不需要复杂的波前计算就可以实现高质量的全息图重建^[26]。因此在波前编码方式的选择上, 超表面凭借纯相位、纯振幅或复振幅的多种全息信息编码方式, 展现了远优于传统器件的灵活多样性。

不同于传统全息器件, 超表面单元结构具有高设计自由度, 其结构参数 (如厚度、形状、长宽等) 变化会导致光场调制量变化, 因此可以根据所选的波前编码方式选择合适的单元结构进行波前调控。目前对于纯相位调控的研究较为广泛, 对谐振相位型超表面、几何相位型超表面、惠更斯原理型超表面、传输相位型超表面和电路原理型超表面都建立了相应的模型和理论^[27]。在结构优化方面, 需要建立一个可以覆盖调

制光场响应需求范围的单元结构库, 一般通过电磁场仿真软件中的参数扫描方法来实现。拓扑优化等智能算法也被用于结构的优化, 可以提供更大的设计自由度、更好的优化结果并减少参数扫描的时间成本^[28-29]。

将离散全息面波前信息和单元结构库结合起来, 如同填色游戏般在对应的波前调制量的位置摆放合适的单元结构, 最终得到微纳加工所需要的版图信息并通过选择合适的加工方式实现器件实体化。值得一提的是, 虽然一般的离散全息光场是通过均匀采样函数产生的, 但是非均匀采样即非周期单元结构和波前优化设计方法的出现, 将会提供更多的设计自由度以实现更加复杂的功能^[15]。

以下举例说明一般的离散化超表面全息器件的设计过程, 如图 1(b) 所示。

第一步: 选择合适的单元结构。如图 1(b) 步骤 1 所示, 以适用于几何相位调控的各向异性单元结构为例, 几何相位又被称为 Pancharatnam Berry 相位 (PB 相位)。当圆偏振光入射时, 一部分光将转换为其正交偏振状态并携带二倍于取向角的附加相位, 因此可以通过改变单元结构的取向角实现相位调制。纳米砖是一种常用的几何相位调制结构, 通过改变几何尺寸来求解其电磁学响应特性, 通常选择具有最高偏振转换效率的单元结构作为基本设计单元。

第二步: 计算全息面相位分布。如图 1(b) 步骤 2 所示, 利用计算机模拟衍射过程, ①将目标图像附加随机相位作为初始状态, 逆向传输到全息面得到全息面的光场复振幅分布。②对于纯相位调制的计算全息图, 入射光将具有均匀且较高的透过率, 正向传输计算时将振幅调制量置一。③令调制过的入射光正向传输至像面, 此时, 重建像的质量受到影响。④保留像面的相位分布, 调整振幅 (如带入目标像振幅分布), 逆向传输到全息面; ⑤重复上述过程。通过多次迭代, 重建像与目标像的均方差趋于稳定, 并在全息面得到目标相位分布, 也就是器件需要对入射光实现的相位调制量分布。

第三步: 结合全息面相位分布与单元结构的电磁响应特性, 在全息面每个像素处选择合适的单元结构, 导入仿真软件验证显示效果。

第四步: 利用微纳制造技术, 如电子束曝光 (electron beam lithography, EBL)、聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 等制造超表面全息器件, 搭建光路并进行实验验证。

3 静态超表面全息

超表面可以利用不同的单元结构实现对入射光波相位、振幅等的任意调控, 从而增大了全息编码方式的可选择性和编码信息容量, 有望实现高质量的图像重建和更新奇多样的功能^[30]。按照超表面对入射光波的作用机制来分类, 静态超表面全息可以分为: 相位调制静态超表面全息、振幅调制静态超表面全息、复振幅调制静态超表面全息、非线性调制静态超表面全息。

3.1 相位调制静态超表面全息

传统折射型光学器件主要依靠面型的变化来调制入射光波的波前, 但受限于自然界中光学材料较小的折射率值 (一般 $n < 2$), 实现目标相位调制需要较大的厚度, 不利于光学系统的集成化。衍射光学元件 (Diffractive optical elements, DOE) 则利用离散深度的台阶来实现相位调制, 但通常存在高级次衍射效应, 调制效率较低。由一系列亚波长人工结构组成的超表面, 可以灵活地调制入射光波的波前相位生成全息图, 具有平面化、集成化、无高阶衍射级次、大视场角等特点。

以几何相位为例, 如第 2 节所述, 当圆偏振光入射时, 通过设计结构的取向角可以赋予正交圆偏振态两倍于取向角的附加相位 (广义几何相位结构可提供其他倍数^[31]), 是一种简单易行的相位调制方法。基于几何相位调制原理的静态超表面全息具有工作波段宽、相位调制深度大、易于实现等特点。2013 年, Huang 等首次在可见光范围内实现三维全息图像重建, 利用具有不同取向角的亚波长等离子体天线来编码相位, 结合 CGH 算法, 生成三维飞机和螺旋线全息图像, 如图 2(a) 所示。由于具有亚波长量级的晶格常数, 该超表面可以实现高分辨率和宽视场的零级同轴三维重建。同时由于几何相位的无色散特性, 该超表面可以在不牺牲图像质量的情况下实现宽带全息成像^[32]。2015 年, Zheng 等实现了一种宽带高效率的反射式超表面全息, 在入射波长为 825 nm 处衍射效率达到 80%, 在 630 nm 和 1050 nm 的工作带宽之间衍射效率在 50% 以上。该设计类似于半波片, 在圆偏振光入射下, 沿纳米棒天线的长轴和短轴反射时具有接近 π 的相位延迟量, 结合金膜作为反射镜, 可实现极高的偏振转换效率^[33]。2016 年, Zhang 等利用纳米矩形孔径阵列组成的超表面在可见光和近红外波段内实现

了相位调制全息图。该孔径是纳米矩形天线的巴比涅结构, 能够容忍约 10% 的制造缺陷噪声, 包括矩形孔径的长度和宽度、矩形孔径的形状变形以及相位噪声^[34]。

除了几何相位, 其他的相位调控方式也可以实现全息功能, 其中一些方式, 如惠更斯型相位调控、传输相位调控, 与单元结构的材料特性高度相关。不同于等离子体金属超表面全息器件的高损耗, 全介电材料具有低损耗、高折射率等特点, 为实现高效率超表面全息显示提供了一个新的思路。2016 年, Wang 等实现了高分辨率的灰度全息图, 在入射波长为 1600 nm 时传输超过 90% 的光, 衍射效率超过 99%, 工作光谱带宽为 375 nm, 在当时实现了宽光谱范围内再现灰度图像的最高效率。该工作基于广义惠更斯原理的多共振响应的概念, 以硅纳米柱作为单元结构, 每个晶格都支持几种电和磁米氏共振。纳米柱具有与尺寸相关的相位延迟, 能够在全息图中实现覆盖 $0 \sim 2\pi$ 的相位变化。该方法适用于其他具有高折射率的材料, 例如 Ge、GaAs、TiO₂、金刚石等^[35]。2016 年, Devlin 等利用自下而上的制造方法, 通过原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 制造了高纵横比、低粗糙度、各向异性的 TiO₂ 单元结构, 并且这种工艺适用于可通过 ALD 加工的任何材料。所制造的超表面全息图在其各自的设计波长下具有当时最高的效率: 82%@480 nm、81%@532 nm 和 78%@660 nm^[36]。

3.2 振幅调制静态超表面全息

振幅作为光的基本参量之一, 同样可以调制入射光波的波前从而生成静态全息图^[37]。传统光学器件通过镀膜等方法调节透射系数和反射系数, 以实现振幅调控。超表面可以基于单元结构的选择透过性, 实现二元振幅调控。2012 年, Butt 等使用垂直排列的多壁碳纳米管 (multiwalled carbon nanotubes, MWCNTs) 阵列作为像素来生成二进制振幅全息图。由于 MWCNTs 的纳米级尺寸, 获得了具有 $\pm 50^\circ$ 视场的低噪声、高分辨率全息图像^[38]。2015 年, Huang 等通过使用随机光子筛和遗传算法实现均匀、无孪生像和高衍射效率的全息图, 并开发了一种光子筛设计方法, 适用于对可见光的振幅、相位和偏振进行高精度控制。由于光子筛的旋转对称性, 全息图具有偏振不敏感的特点, 有利于其在光学成像和光谱学中的应用^[39]。2020 年, Xu 等使用光子筛作为振幅调制结构, 实现了两个具有定量结构相关性的二进制振幅全息图, 如

图 2(b) 所示。研究人员开发了一种改进的 Gerchberg Saxton (GS) 算法以获得两个二进制振幅分布 (由 0 和 1 组成), 将其中一个振幅分布的一部分 1 切换为 0, 可以得到另一个振幅分布, 这种结构相关可以理解为集合关系。进一步地, 这两个不同的振幅分布可以重建两个完全不同的全息图像, 且具有宽带成像和偏振不敏感的特性。基于所开发的算法, 结合活性材料, 使得单片超表面具有实现动态振幅全息的扩展可能性^[40]。

除了二元振幅调控超表面外, 也可利用马吕斯定律 (Malus' law) 来实现振幅的调制。入射光经过与 x 轴夹角为 θ_1 的起偏器后被调制成线偏振光 E_1 :

$$E_1 = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

线偏振光 E_1 入射到取向角为 α 的单元结构上被调制为 E_2 :

$$\begin{aligned} E_2 &= \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{pmatrix} \cdot E_1 \\ &= \begin{pmatrix} \cos(2\alpha - \theta_1) \\ \sin(2\alpha - \theta_1) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

E_2 入射到与 x 轴夹角为 θ_2 的检偏器后被调制成输出光 E_3 :

$$\begin{aligned} E_3 &= \begin{pmatrix} \cos^2\theta_2 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2}\sin 2\theta_2 & \sin^2\theta_2 \end{pmatrix} \cdot E_2 \\ &= \cos(\theta_1 + \theta_2 - 2\alpha) \begin{pmatrix} \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

由上式可知, 通过调节单元结构的取向角 α 可以连续调控入射光的振幅, 这种基于马吕斯定律的振幅调控方法具有设计简单、宽带、高鲁棒性等特点。由于衍射效应, 衍射光学元件的纯相位调制全息图在重建全息图像的中心存在一个闪亮的零级光斑。几何相位超表面全息图由于工作波长的偏离和制造误差, 也会使得零级光斑的强度急剧增加。这种难以避免的零级光斑极大地影响了实际应用中的视觉效果。针对于此, 2020 年, Fu 等基于马吕斯超表面的正、负振幅连续调制特性, 精心设计银纳米砖的取向角, 实现了消除零级衍射 (零级强度为重建图像总能量的 0.7%)、超广角 ($70^\circ \times 70^\circ$)、宽带 (从 520 nm 到 660 nm) 的超表面全息图像重建^[41]。

3.3 复振幅调制静态超表面全息

相位调制超表面在重建光场时, 仅使用衍射面的相位信息, 而忽略了振幅信息, 并且通常使用随机相位扩散低频信息, 这在观察面上不可避免地会带来散

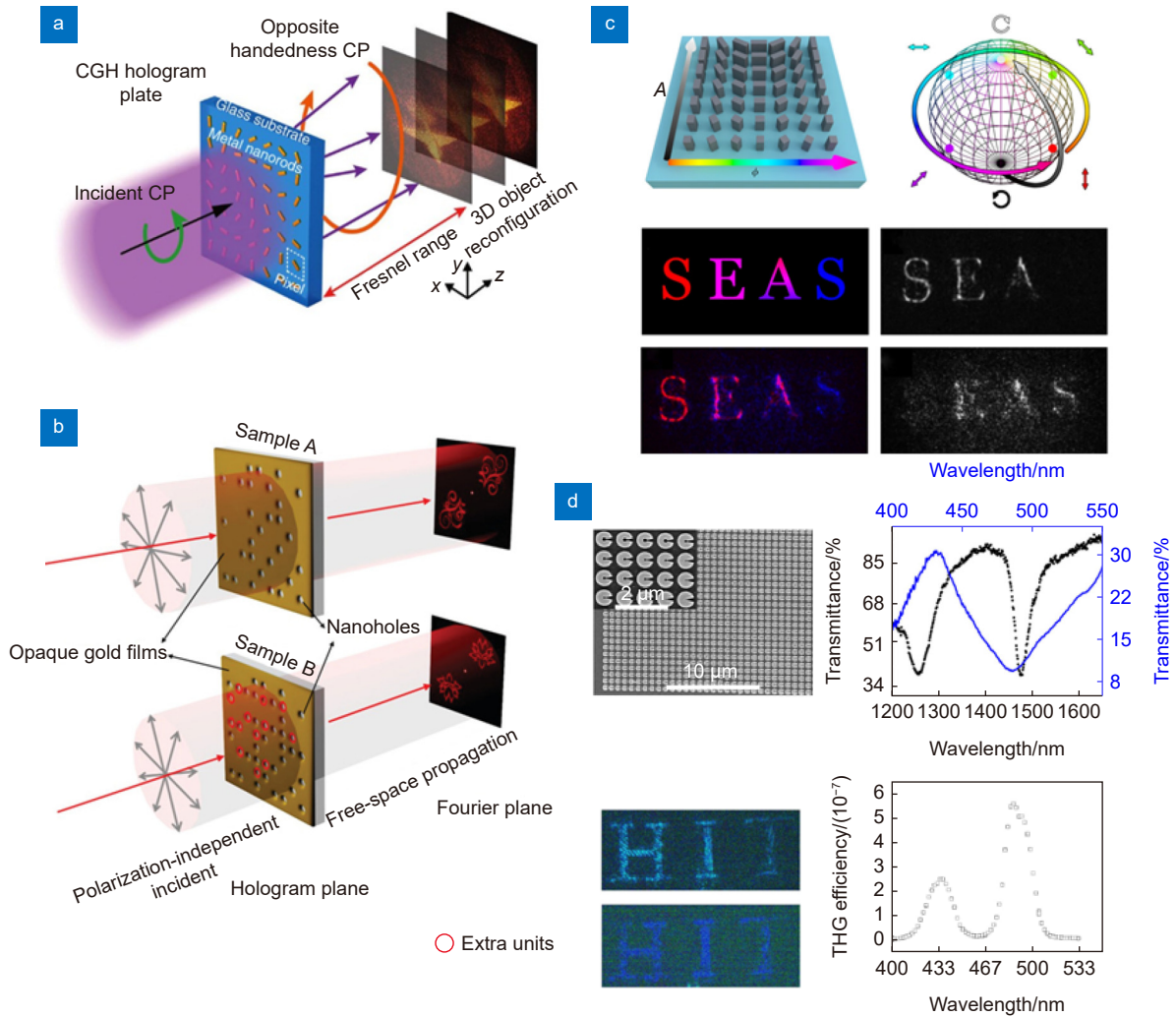


图 2 静态超表面全息。(a) 基于金纳米天线的几何相位调制 3D 轴上透射式全息图^[32]；(b) 两个具有集合关系的纳米筛振幅调制全息图^[40]；(c) 通过调整单元结构的取向角和几何参数来实现复振幅调制，分别重建了波长 1.65 μm 和 0.94 μm 入射下的全息图像^[42]；(d) 基于 C 形 Si 纳米天线的 THG 非线性调制青色和蓝色全息图^[43]

Fig. 2 Static meta-holography. (a) PB phase-modulated 3D on-axis transmission holograms based on gold nanoantennas^[32]; (b) Two amplitude-modulated holograms of photon sieves with set relation^[40]; (c) Complex amplitude modulation is achieved by adjusting the orientation angle and geometric parameters of the cell structure, and the holographic images at the wavelengths of 1.65 μm and 0.94 μm are reconstructed respectively^[42]; (d) THG nonlinear modulated cyan and blue holograms based on C-shaped Si nanoantennas^[43]

斑噪声，影响信噪比，使得全息图像质量下降。而振幅调制超表面减弱了部分区域的振幅，导致一部分入射光能量损失，降低了能量利用率，不利于实际应用。因此需要同时且独立地调控入射光波的复振幅信息，从而提高全息图像的质量，并在不丢失任何信息的情况下重建完美的目标光场。传统的复振幅调制基于 SLM 以双相位分解、相位干涉等方法来实现^[44]，超表面为全息显示的波前复振幅调控和编码提供了一个新的解决方案。

2013 年，Ni 等基于 V 型纳米孔的复振幅调制，

在可见光波段内实现了超表面全息。然而受限于金属等离子体的调控机制，该超表面的工作带宽十分有限^[45]。2016 年，Wang 等基于 C 型裂环谐振器的复振幅调制，在太赫兹波段内实现了宽带超表面全息。通过改变单元结构的半径、分裂角和取向角，实现了太赫兹频率下的五阶振幅调制和八阶相位调制^[46]。2018 年，Lee 等提出了一种 X 型多晶硅单元结构，可以独立叠加两个几何相位的调制效果，通过改变 X 型单元结构的取向角实现对振幅和相位的连续调控，在 532 nm 波长下实现了 40% 效率的全息显示^[26]。

2019年, Overvig 等通过调整纳米柱的偏振转换效率来控制振幅, 调节取向角来控制相位, 如图 2(c) 所示。不仅获得了比纯相位调制超表面全息更好的图像质量, 还实现了一些相位调制超表面全息无法实现的特性: 创建无伪影的二维全息图像, 在物体平面上分别编码相位和振幅分布, 在超表面和物体平面上分别编码强度分布, 以及控制三维全息物体的表面纹理^[42]。2020年, Jiang 等提出了一种十字型单元结构, 通过调整几何尺寸来控制振幅, 旋转单元结构来操纵相位。实验结果表明, 复振幅全息图重建的三维图像质量优于纯相位全息图重建的三维图像^[47]。

3.4 非线性调制静态超表面全息

近年来, 研究人员将非线性光学扩展到了超表面全息领域中, 利用超表面在亚波长尺度改变局部的非线性相位响应和振幅响应, 实现了非线性全息成像^[48-49]。2018年, Gao 等提出了一种 C 形 Si 纳米天线组成的全介电超表面, 如图 2(d) 所示。入射光通过基频共振得到增强, 产生的三次谐波 (third-harmonic generation, THG) 信号通过高阶共振重新分配到气隙区, 显著降低了短波吸收损耗, 增强因子高达 230。在 C 形 Si 纳米天线中引入从 $0 \sim 2\pi$ 的突变相位后, 首次基于 Si 超表面实验生成了高效的青色和蓝色 THG 全息图^[43]。2021年, Frese 等基于两种不同的等离子体单元结构引入了非线性几何相位, 重建双色全息图像。所使用的二重和三重旋转对称单元结构根据二次谐波 (second-harmonic generation, SHG) 和 THG 在正交圆偏振状态下所需的局域相位定向, 并且可以独立地生成颜色信息。同时, 可以调整单元结构的几何参数以及入射光的功率和波长控制两个谐波信号的幅度比^[50]。2022年, Mao 等发现氮化硅超表面修饰的石英晶体可以用于 SHG 的波前整形, 实验演示了非线性涡旋光束的生成和非线性全息^[51]。2022年, Mao 等提出了一种用于非线性矢量全息术的超表面。通过改变具有三重旋转对称性的四个等离子体单元结构的取向角, 能够独立控制生成的 SHG 的相位、振幅和偏振。结合改进的 GS 算法, 设计和制造了用于产生具有单偏振和多偏振状态的非线性全息图像的四原子超表面^[52]。

4 动态超表面全息的实现方式

静态超表面全息器件, 如图 3(a) 所示, 在设计制作完成后无法改变显示图案, 这与快速变化的现实世

界和多样化的功能需求相矛盾, 极大地限制了使用场景。因此, 如何基于超表面全息器件实现动态显示效果是该领域目前亟待解决的一个问题。

超表面全息显示系统主要包含入射光场调制与解调系统、超表面器件两部分, 其中任意一个部分的变化都可以实现动态全息。在此, 我们定义通过改变前端的输入光场来实现动态效果的超表面全息器件为多路复用型超表面, 如图 3(b) 所示。虽然多路复用型超表面本身是静态的, 即其结构及性质不会改变, 但通过设计可以响应入射光的基本参量变化。而在光、电、化学、机械拉伸等刺激下单元结构的折射率、周期等会发生改变的超表面器件则定义为主动式超表面器件, 如图 3(c) 所示。目前, 这两种动态超表面技术都有了一定的发展, 其在全息显示领域的应用有望实现更高的信息容量和更真实的视觉体验, 下面将详细介绍这两种动态全息技术的实现方法和代表性工作。

4.1 多路复用超表面全息

入射光场包含多个基本参量, 如入射角、波长、偏振和轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 等, 可以作为光场编码与解码的“密钥”, 形成出入射光场间一一对应的关系。配合静态的超表面设计, 通过改变前端的入射光场, 就能实现一定程度的“动态”, 从而改善图像信息的传输带宽、器件功能性和显示效果。目前, 超表面的多路复用技术已经在彩色全息显示^[53]、光通信^[54]和光学加密^[55-56]等领域得到了广泛应用。

4.1.1 波长复用的超表面全息

波分复用技术^[57]在光通信领域应用较多, 将其引入超表面全息领域则可将全息图像进一步拓展为彩色 (多色) 全息显示图像。人类眼睛后表面锥状细胞上的不同区域对红色 (R)、绿色 (G) 和蓝色 (B) 光谱的响应给我们的世界带来了缤纷色彩。“RGB 三基色”的概念已经深入人心, 而“RGB”分离方法也广泛应用在彩色图像处理、彩色摄影技术和彩色晶体管显示等领域。彩色全息也同样基于这一概念, 通过设计单元结构对于 RGB 三色光产生独立响应, 再组合全息投影像实现彩色全息像显示。而传统的光场调控器件一般在单波长下工作, 要实现彩色全息, 需要使用多器件组合^[58]、时分复用^[59]、空间复用^[60]、深度复用^[61]或频域复用技术^[62], 系统庞大复杂。相较于传统的光场调控器件, 超表面由亚波长单元结构组成, 能够实现更高自由度的光场调控, 为彩色全息显示提供了更

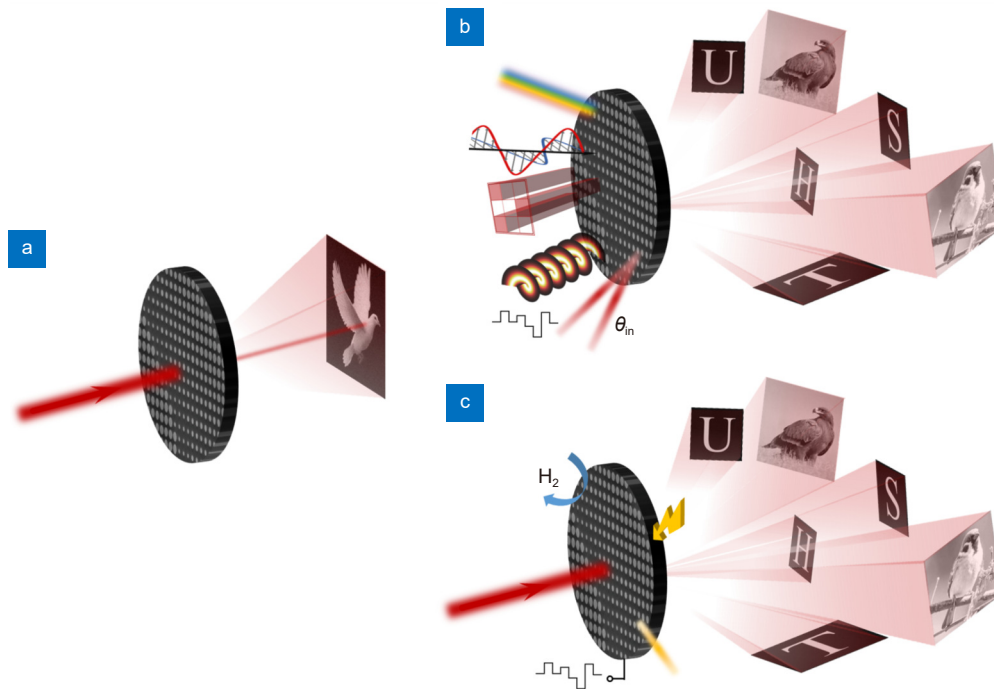


图 3 超表面全息技术示意图。(a) 静态超表面全息器件；(b) 多路复用超表面全息器件，通过改变前端入射光的光参量可以实现动态显示；(c) 主动式超表面全息器件，超表面器件本身可以响应光电热化学等刺激而产生变化

Fig. 3 Schematic of meta-holography. (a) Static meta-holography; (b) Multiplexed meta-holography, which means dynamic display can be realized by controlling the fundamental properties of incident light; (c) Active meta-holography, which means metasurface itself can be changed in response to optical, electrical, thermal, or chemical stimuli

多可能的实现途径。总体来说，超表面单元结构的设计思路和编码方式一般包括以下四种：

① **单元结构的交错排列**。调整单元结构的结构参数可以影响其透射或反射光谱，从而使单元结构起到类似“滤波”的效果，以解耦超表面对三色光的相位调制（一般为几何相位调制）。2016年，Zhao等选择具有窄光谱响应和相对较低的短波长损耗的硅纳米棒作为基本结构，以多晶胞像素单元实现了反射型的全彩色超表面全息图，能够通过空间复用三基色的子单元来重建任意RGB图像^[63]。同年，Wang等用类似的设计思路将优选出的硅单元结构交错排列组成一个大晶胞，当三种颜色的激光同时入射超表面时，不同结构调制对应波长的光场，实现了红花、绿叶、蓝盆的组合显示^[64]，如图4(a)所示。2022年，Zhang等利用等离子体光刻技术制造了一个具有全彩、高纯度和增强信息容量特性的厘米级等离子体超表面，通过银(Ag)等离子体浅光栅的结构参数设计结合几何相位调制实现了彩色全息显示和彩色打印的结合^[65]。这种设计方式在彩色全息领域已较为成熟，进一步结合偏振复用可实现三维彩色全息图像显示和光学加密

分享^[66]。该方法的主要问题是调制效率低和存在信道串扰。目前，基于硅材料的光谱分立结构较为常见，基于氮化钙、卤素钙钛矿材料的结构也有一定的研究，但并不是所有可见光波段的常用材料都可以找到合适的结构，单元结构的寻找通常采用参数扫描的方式来实现，耗时较长。2022年，Ma等提出了一种由神经网络和进化策略组成的混合框架，以逆向设计具有所需共振波长、带宽和相位延迟的单元结构。使用所提出的混合框架，可以通过精确控制每个单元结构的共振波长和带宽来消除不同波长通道之间的串扰。该结构设计框架的实用性通过线性偏振光的多色全息在理论和实现上得到了验证^[67]。

② **多层结构**。该类型超表面通过多层设计将调制过程分开，一般至少包含一个滤光片的微阵列和一个相位调控阵列来分别实现对于光谱和相位的独立调控。2019年，Hu等通过在基于Fabry-Pérot(F-P)腔的单片彩色滤光片微阵列上叠加全息超表面，同时实现低串扰、偏振无关、高效、全彩的全息显示和纳米打印图像显示^[68]，如图4(b)所示。改变所设计的金属-电介质-金属F-P谐振腔(metal-dielectric-metal Fabry-

Pérot, MDM F-P resonator) 的电介质厚度可以改变透过的波长, 而全息图由各向同性的介电单元结构产生, 两者均通过传统的电子束曝光 (EBL) 工艺制造。同年, Lim 等利用激光直写技术制造了一种在相位板上叠加结构色单元的单元结构, 能够同时实现对于光振幅和相位的调控, 通过合理排布像素单元可以在白光下呈现彩色图像, 在红绿蓝三种激光的照射下能够投影出彩色全息图的效果。这些多层超表面结构实现的关键在于振幅、相位等参量的分离调控和器件的制造, 需要三维微纳制造技术在制造效率、良品率、加工分辨率上为其提供制造可行性^[69]。

④ **色散调控**。基于某些特殊单元结构本身的色散特性, 可以在多个目标波长下建立完整的相位库, 实现多波长的独立调制。2018 年, Shi 等利用反射型超表面使得单元结构能够提供更大的相位调制范围, 并且通过在单元设计中引入尖锐的共振实现了不同波长下相位的有效解耦。扫描结构参数所得到的三个不同波长的相位响应曲线产生了折叠, 从而引入了不同波长相位间的非线性映射, 展开量打破了不同波长相位间的一对一关系^[70], 如图 4(c) 所示。

④ **结合其他复用技术**。利用几何相位、迂回相位进行相位调制, 虽然其调制量与波长无关, 但传播过程是与波长相关的, 所以不同波长的重建图像会具有不同的位置、大小、衍射角。2019 年, Hu 等提供了一种非交错的偏振复用三通道彩色全息显示方法^[71]。三个不同的相位分布被编码在三个偏振通道上, 使得彼此的串扰几乎为零。由于通道设计是宽带的, 相应的三个独立构造的重建强度分布被分配给三色 (RGB) 光束, 从而在整个可见光范围内产生高质量和高效率的矢量超表面全息显示。2016 年, Li 等设计了纳米狭缝单元构成的超表面, 不同波长的激光束以不同角度斜射时, 只有在设计的成像位置上输出光束才能够叠加产生多色图像^[72]。类似地, 2020 年, Deng 等利用双铝纳米棒的几何相位和迂回相位结合的方法, 通过反射式超表面产生与波长无关的相位量, 可实现对相位、偏振、振幅多参量的独立调控。对于同一个纳米单元, 不同波长的全息图像会被分离到不同的衍射角上^[73], 如图 4(d) 所示, 只有在特定位置上才能实现三色通道图案的合理叠加。

在彩色超表面全息快速发展的过程中, 多功能集成也被融入器件设计以提供更高的信息容量。超表面彩色打印是一种利用超表面对入射光的光谱响应来实

现超高分辨率彩色图像显示效果的技术^[74]。通过超表面设计实现彩色全息和彩色打印功能的集成, 既能够存储更多信息量, 也能保证极高的分辨率。上述讨论中的第①、②类器件都可以实现这一功能。

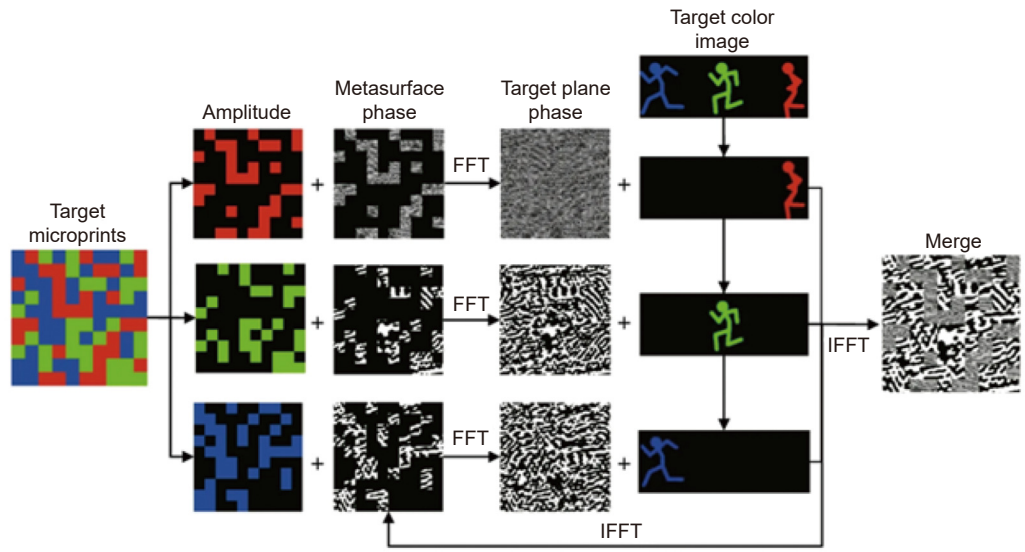
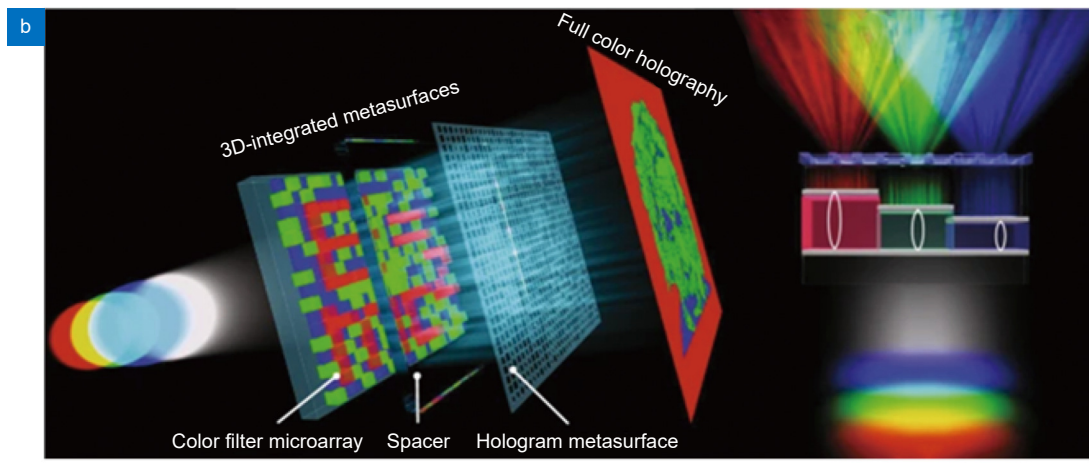
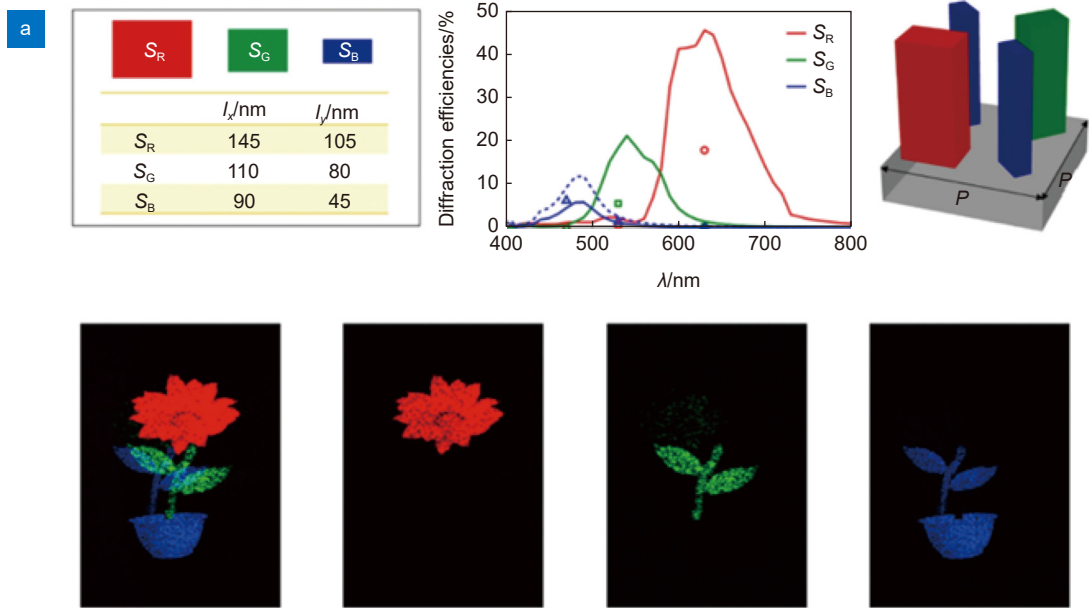
当以晶胞 (晶胞内包含可独立调控 RGB 三波长光的结构单元) 作为像素单元进行超表面设计时, 每一个像素对 RGB 三色的全息图像重建都产生贡献。在单元内, 通过控制结构参数可以调整单波长光的透反射强度和相位, 从而实现任意彩色打印和彩色全息的集成。2019 年, Bao 等通过使用晶体硅纳米砖组成的介质超表面, 将色域从 2D CIE 扩充到了 3D HSB 空间, 并且具有较高的纳米打印分辨率 (~36000 dpi) 和全息保真度^[75]。在每个晶胞像素中, 包含了一个红色单元、一个绿色单元和两个蓝色单元, 每个单元由两个纳米砖组成, 通过改变纳米砖的长度来调控光谱信息, 利用双纳米砖单元的两个取向角差值可以连续调控颜色的强度, 以适当的强度比例混合三色就可以得到宽色域的纳米打印图像。目标的单色全息 (菲涅尔区) 相位可以通过晶胞内该色单元中双纳米砖的任一取向角来控制。当同时入射三色激光时, 三色全息的不同强度图像重叠在一起, 得到期望的彩色图像。

对于非晶胞像素单元的结构, 只有当像素内放置的单元结构对于入射单色光具有一定的响应强度值时, 该像素才对入射单色光的全息图重建有贡献。因此, 在全息图计算的过程中, 需要调整传统的 GS 算法, 使得对分割的全息面区域能够在远场重建出目标图像, 如图 4(b) 所示。2019 年, Wei 等提供了一种以单层超表面同时实现双色全息和双色纳米打印的策略^[76]。多晶硅的纳米砖和双纳米砖单元结构可以分别提供红绿两色的光谱响应, 通过结构的排列可以在近场得到双色纳米打印图像。利用几何相位调制其相位, 对应结构能够分别在目标波长得到可观的光谱响应。在红光和绿光入射下, 利用调整的 GS 算法得到分区相位, 可实现远场的红花绿叶双色全息像。

4.1.2 角度复用的超表面全息

超表面的角度响应建立了输入输出角之间的对应关系, 对于实现光束偏转而言非常重要。通常超表面单元结构在不同角度入射光照射下产生的相位会略有不同, 但在可见光波段角度响应可控的结构仍鲜有报道, 一般的超表面器件只能在几个分立入射角上实现全息等功能的复用^[15,77]。

在角度复用的超表面全息技术方面, 直接通过结



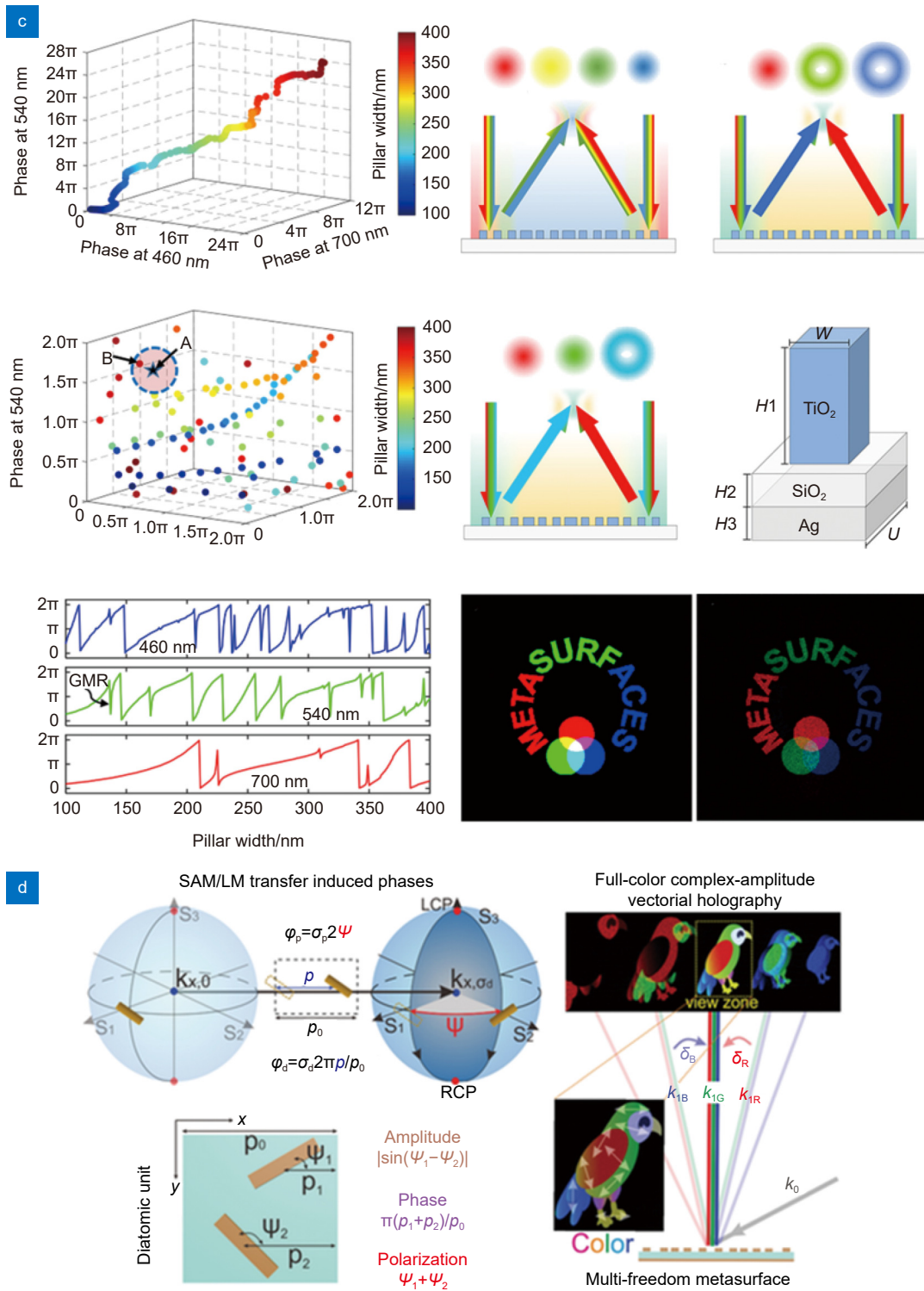


图 4 波长复用的超表面全息器件用于彩色全息的不同实现方法。(a) 空间交错排列型^[64];
 (b) 多层设计及改进的 GS 算法^[68]; (c) 色散调控^[70]; (d) 结合角度复用技术^[73]

Fig. 4 Different methods for wavelength-multiplexed meta-holography to realize color holography. (a) Spatially staggered arrangement^[64];
 (b) Multilayer design and adjusted GS algorithm^[68]; (c) Dispersion phase-based metasurface^[70];
 (d) Combined with angle multiplexing technology^[73]

构单元设计来实现几个分立角度上不同图案的显示是一种较为常用的方法。2017年, Kamali 等设计并制造了一个由 U 型单元结构构成的反射式角度复用超表面, 可以在不同入射角情况下产生不同的响应^[77]。在正入射的情况下, 只有对称模式会被激发; 而在斜入射的情况下对称模式和反对称模式都会被激发, 从而在不同的入射情况下实现独立控制。图 5(a) 中展示了在 0° 和 30° 入射角情况下设计的角度复用超表面全息器件。在对应的入射角条件下, 可以显示加州理工学院徽标或者 LMI 标志。2021 年, Jang 等通过增加晶胞单元的设计复杂度, 实现了将四个通道作为双映射函数处理的独立波前调制^[78]。研究人员在一个像素大单元内排布两个单元结构组以迂回相位的形式实现相位调控, 每组单元结构包含四个小结构用于提供与角度相关的散射特性, 根据入射角不同可以高保真地独立生成四个不同的图像: “东南西北”的英文单词。

虽然超表面具有很高的设计自由度, 但由于散射的复杂性, 选取具有较高响应可控性和角度依赖性的单元结构还较为困难, 目前角度复用超表面全息技术能够实现的复用通道数量较少、功能性受限。因此结合其他复用技术进一步扩展超表面全息的通道数量是一种较为可行的方案。Wang 等通过结合角度复用和圆偏振复用技术建立了四个通道, 实现了全庞加莱光束、正交偏振态图像切换、矢量打印图像和光通信应用^[79]。2022 年, Wan 等利用金属-绝缘体-金属基 (metal-insulator-metal-based, MIM-based) 单元结构, 在反射式超表面设计中以单元结构构成 MIM F-P 腔^[80]。F-P 腔的有效腔长随入射角而变化, 导致单元的光学响应具有角度敏感性。此外, 基于 MIM 的单元结构还可以诱导明显的等离子体响应, 以实现比单个金属层更强的相位和幅度调制。该工作利用表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 和 F-P 纳米腔共振的入射角敏感性, 成功实现了角度加密的超表面设计, 可同时构造四个独立编码通道, 包括双全息图像显示通道和双纳米打印显示通道, 如图 5(b) 所示, 极大地拓宽了信息容量。

超表面角度复用技术不仅可以通过通道复用的方式扩展成像的信息容量, 还可以在离轴照明的情况下将倏逝波转换为传输波, 实现倏逝波信息的远场重建。2017 年, Zhang 等通过在亚波长尺度纳米孔阵列中编码信息, 提出了一种超高信息容量超表面全息图, 可以在设计入射角度下实现图像重建, 将无畸变区域定

义的 2D 全息图的成像信息容量增加 11.5 倍^[81]。

综上, 角度复用的超表面设计可以提供更高的信息容量和功能性, 其中高分辨率、高效、可控的角度敏感单元结构的探索和设计将成为该技术向前迈步的关键。

4.1.3 偏振复用的超表面全息

传统的衍射光学元件或自由曲面光学器件一般只能调控光的振幅和相位, 但超表面器件通过其形状双折射效应 (由构成结构元素各向异性的形状而非材料的各向异性产生的双折射效应) 可以响应入射光的不同偏振态或对光的偏振态进行有效调控^[82]。2013 年, Chen 等通过金纳米棒在光照下所激发的强局域表面等离子体共振, 结合金纳米棒长度变化对反射波的相位调制, 实现了高效的反射全息像显示^[83]。只有在偏振方向与纳米棒方向一致的时候才会显示目标正交偏振下的设计图像, 将其中一个的像素阵列旋转 90°, 利用像素单元内空间重叠的纳米交叉结构, 实现了偏振的复用。同年, Montelonge 等也基于类似的“L”形天线实现了正交线偏振复用的设计, 不同之处在于其通过调制幅度实现^[84]。除了线偏振态, Wen 等利用几何相位和交错排列结构的方式也实现了圆偏振态的复用, 但是左右旋的图案不能独立设计^[85]。2017 年, Mueller 等通过结合几何相位和传输相位实现了对任意一对正交偏振态的独立相位调控^[86], 如图 5(c) 所示。进一步, Li 等通过引入马吕斯超表面的概念, 利用光强和纳米取向角之间的 1-M 映射, 将近场纳米打印图像与远场圆偏振双全息图像结合, 如图 5(d) 所示, 增大了信息的存储容量^[87]。

矢量全息技术在激光加工、量子信息处理等方面具有广阔的应用前景, 并且它的三维显示特性使它成为设计下一代增强/虚拟现实 (augmented reality/virtual reality, AR/VR) 设备的理想选择^[88-89]。利用超表面进行偏振调控也是一种产生任意矢量全息图的可行方案。2018 年, Deng 等以两个正交单元结构组成的晶胞为构筑基础, 通过改变单个单元结构的偏移量和取向角调制相位和偏振, 从而实现主动的多偏振模式衍射以及矢量全息图像重建^[90]。2019 年, 通过使用结构双折射介电超表面, Arbabi 等提出并演示了具有任意偏振态的矢量全息图^[91]。在该项工作中, 图像的颜色信息 (RGB) 被转换为斯托克斯参数 (S_1 、 S_2 、 S_3) 以存储并重建单色全息图像, 结合改进的 GS 算法, 实现了伪彩色的全息像重建。在三维矢量全息技

术方面, Ren 等提出了一种三维矢量全息技术, 如图 5(e) 所示, 使用基于多层感知神经网络的机器学习逆向设计的方法精确重建任意的波前三维矢量场分布^[92]。该技术可以在无透镜的情况下以超大视场角 (94°) 和高衍射效率 (78%) 重建三维矢量全息图像, 适用于浮动显示和加密领域。这项研究首次证明光的三维矢量状态可以作为独立的信息载体, 实现信息的编码和复用, 不仅为下一代超宽带、超大容量、超快速并行处理的光学全息系统奠定了基础, 同时也为人们加深理解光与物质的相互作用 (例如粒子操控) 提供了一个崭新的平台。

超表面控制任意偏振的能力使得多路偏振复用和矢量全息得以实现, 同时也能进一步与其他光场自由度 (如 OAM、波长和空间信道) 结合。2022 年, Guo 等提出了一种由四个单元结构为晶胞单元组成的几何相位超表面, 具有以任意偏振编码全彩色全息图的能力, 大大丰富了矢量全息的应用场景^[66]。然而, 偏振复用超表面全息和超表面矢量全息都存在成本高、制造过程耗时长以及缺乏适用于单元结构的有效动态控制方法的问题。为此, 在科学性上, 对纳米尺度上的光与物质相互作用过程的理解和控制有待于进一步加深; 在实用性上, 机器学习的快速发展将有望提供对无散斑矢量全息图像的新算法, 用于高精度的矢量光束生成和场控制。

4.1.4 OAM 复用的超表面全息

以光的螺旋波前为表现形式的轨道角动量已成为一种新的设计自由度, 用于提高光学和量子信息容量^[93-96], 并在光镊操纵、微纳制造中广泛应用。然而, 传统的全息图设计中缺乏 OAM 选择性, 因为具有准连续空间频率分布的数字全息图会破坏光的 OAM, 使光场在全息重建过程中完全失去 OAM 物理特性^[97]。但是由于 OAM 的模式数在物理上是无限的, 将 OAM 全息技术与高分辨率的超表面相结合可以为超高容量全息设备和系统提供更大的发展空间。

2019 年, Ren 等提出一种 OAM 超表面全息的概念, 通过设计三种离散空间频率分布的超表面全息图分别实现了 OAM 一致、OAM 选择、OAM 复用三种全息显示功能^[98], 如图 6(a) 所示。超表面全息图离散的空间频率分布使得光场在重建过程中保留了 OAM 特性, 从而可以产生像素化的全息图像。基于 OAM 多路复用的方法, 通过 OAM 选择性全息图的叠加, 可以在不同的 OAM 光束入射的情况下, 分别

重建出对应的 OAM 相关全息图像。研究者们设计并展示了一个由 GaN 纳米柱组成的 10 位 OAM 复用超表面全息器件, 可以重建 2^{10} 个具有高信噪比的 OAM 相关全息图像, 展示出将 OAM 自由度用于超高容量全息复用和 OAM 加密的应用前景。在此基础上, 2020 年 Ren 等将纯相位调控的超表面升级为复振幅调控的超表面, 从而减小了通道之间的串扰, 提高了通道数量^[99]。利用双光子聚合 (two-photon polymerization, TPP) 激光直写技术, 研究者将超表面图案三维打印在聚合物介质中, 实现了大面积制造。该超表面单元结构的正交偏振转换效率和传输相位随着纳米柱的高度和长度变化, 结合平面内结构取向角的变化, 可以实现对于振幅和相位的独立调制。通过设计并制造 OAM 复用超表面全息器件, 在不同 OAM 光束的照射下, 实现了 200 个独立的 OAM 通道全息图像的独立显示。作者展示了在两个不同的平面上独立平滑播放的全息视频, 表明该设计具有动态三维全息显示的能力。

除此以外, 2019 年, Jin 等提出了一种介电多动量转换器设计, 可以将具有不同拓扑电荷的 OAM 光束重建为不同的轴上图像^[100], 如图 6(b) 所示。转换器本身具有固定的相位分布, 通过协同光的内在特性 (如 OAM 和线性动量) 以实现动态超表面全息。透射光束的总相位分布是

$$\psi_T(x_0, y_0) = \psi_{\text{OAM}}(x_0, y_0) + \psi_{\text{meta}}(x_0, y_0),$$

其中: $\psi_{\text{meta}}(x_0, y_0)$ 在器件制造完成后就固定了, 其数值由单元结构阵列的取向角编码的几何相位来定义。而 $\psi_{\text{OAM}}(x_0, y_0)$ 是入射 OAM 光束的相位分布, 它可以通过切换拓扑电荷值 l 来改变, 其相位通过开发的多 OAM 相位检索算法来设计。同时, 利用多线性动量的相位检索算法来设计线性动量转换器, 器件分别在红、绿和蓝光照明下展示出了“R”、“G”和“B”重构图案, 证明了其具有在彩色全息显示中应用的可能性。

4.1.5 空间复用的超表面全息

得益于超表面极高的单元密度, 可以通过空间划分的方式将单个超表面分成多个子区域, 通过照射不同区域可实现不同全息图像的重建。2020 年, Izumi 等通过空间复用的方法, 将目标显示的视频内容划分成 48 帧, 分别生成全息图并分区域编码在超表面上, 通过二维位移台移动超表面使得入射光照射不同区域, 成功实现了 30 f/s 帧率的图像显示^[101], 如图 6(c) 所示。

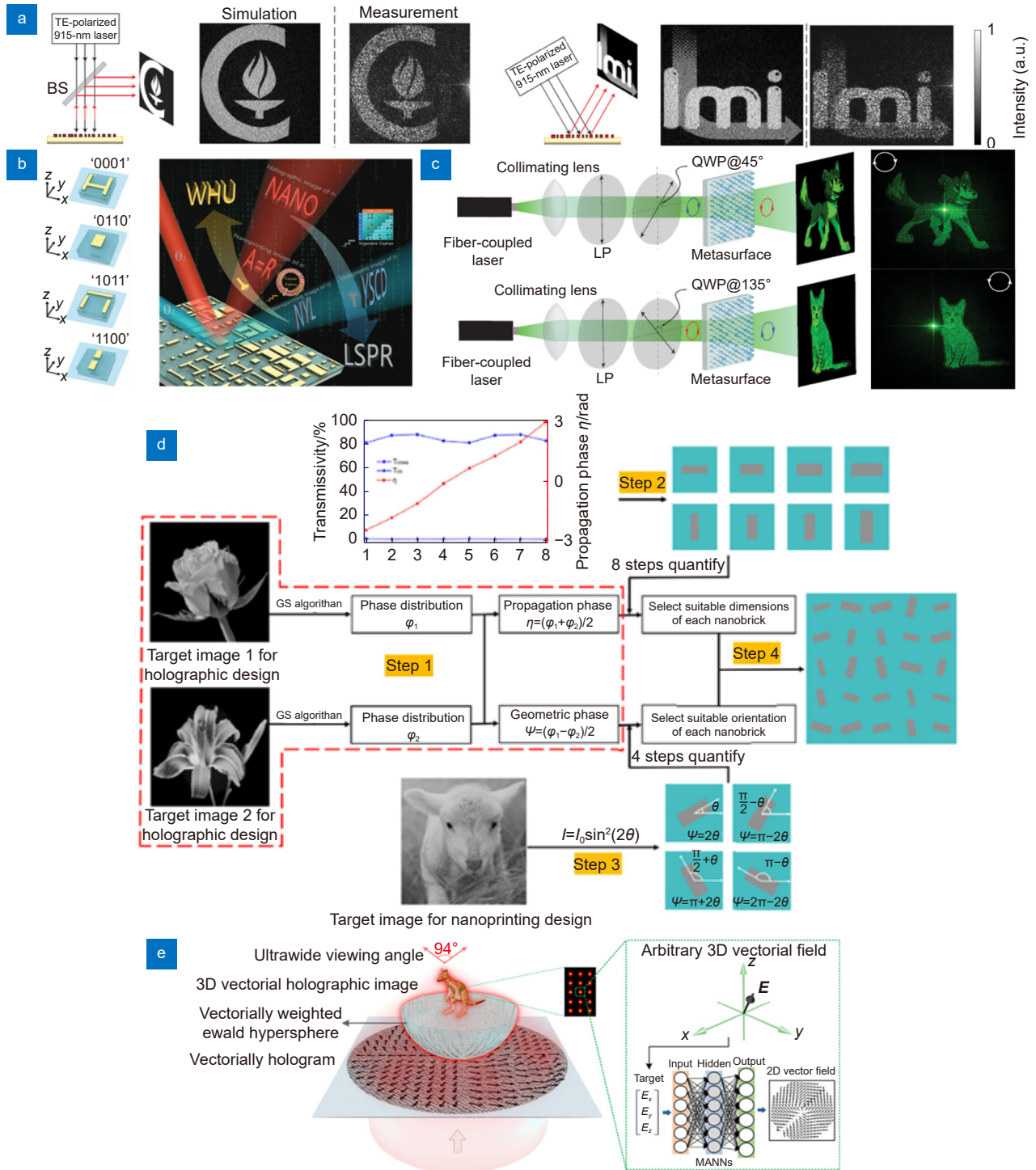


图 5 角度复用和偏振复用型超表面全息术。(a) 角度复用型超表面全息器件, 可以分别在 0° 和 30° 入射角情况下显示不同的全息图案^[77]; (b) 结合纳米打印设计, 可以实现四种不同图像的显示^[80]; (c) 利用传输相位结合几何相位实现左右旋圆偏振复用的设计方案^[86]; (d) 同时, 在近场记录一幅连续的灰度纳米打印图像并在远场投影两幅独立的全息像^[87]; (e) 利用机器学习逆向设计实现以超大视角 (94°) 和高衍射效率 (78%) 重建三维的矢量全息图像^[92]

Fig. 5 Angle multiplexed and polarization multiplexed meta-holography. (a) Angle-multiplexed meta-holography, which can display different images at 0° and 30° incident angles, respectively^[77]; (b) Combined with nanoprining and four different images can be projected^[80]; (c) Combine the propagation phase with the geometric phase to realize the multiplexing of LCP and RCP^[86]; (d) Simultaneously record a continuous grayscale nanoprining image in the near field and project two independent holographic images in the far field^[87]; (e) Three-dimensional vectorial holography with a large field of view (94°) and high diffraction efficiency (78%) based on machine learning inverse design^[92]

但是该工作的帧率受到了位移台的限制, 帧数等于设计的全息通道数目, 需要依靠大规模制造才能够实现更高的帧数, 不利于实际应用。同年, Gao 等提出了大帧数和高帧率的空间复用动态超表面三维全息的设计^[102]。在该项工作中, 除了展示了顺序播放的超表面全息视频, 研究人员还演示了一个 28 位的空间信道选择超表面全息设计。通过将图像划分成多个子图并编码在不同的空间信道中, 利用不同子图的组合, 该超表面全息器件可以显示 2^{28} 个不同的帧, 极大地提高了帧数, 如图 6(d) 所示。通过前端的高速动态空间光束编码模块可以生成高精度编码的结构光束, 使超表面全息系统达到了 9523 f/s 的高帧率。相较于之前的工作, 该工作能够实现较大的帧数和较高的帧率, 但是仍然存在整体系统较大(需要复杂调制光路产生结构光场)、无法控制单个像素等问题。2022 年, Tang 等设计了较为紧凑的空间复用型器件, 利用偏转功能的超表面和全反射巧妙地实现了光路的折叠, 但是能显示的帧较少^[103]。另一方面, 可单像素控制的“相位选择”的空间复用形式已由 Li 等通过模板的方法进行了尝试^[104], 如图 6(e) 所示。该工作将四个不同阶的相位单元结构组成一个晶胞, 利用 EBL 曝光的方法可以写入和擦除单个结构上覆盖的聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA), 从而选择该晶胞像素对应的相位。原则上, 一个超表面模板可以无限次擦除和重写, 以产生各种光学功能, 从而大大降低了制造复杂性。这种可单像素控制的空间选择超表面将有望以光调控的方式实现真正的“动态”, 具有很大的发展探索空间。

4.1.6 传输方向复用的超表面全息

不对称传输现象已广泛应用于光学隔离器、光纤环形器等器件的制作, 对于光路搭建与功能实现具有重要作用^[105]。基于超表面实现不对称传输, 或者称为“非互易传输”, 有利于多功能集成和实现复杂的光场调控, 为未来光计算、光芯片、片上系统等领域的设计和发展打开新思路。

电磁波的偏振转换特性在实现不对称传输中起到了关键作用。上文偏振复用超表面中所描述的各向异性超表面结构, 对于不同偏振态的光具有不同的传输效应, 也被广泛应用于传输方向复用的超表面设计中。2019 年, Frese 等通过设计双层等离子体透射式超表面, 在近红外波段对光进行全相位和幅度调控^[106]。基于 L 型等离子体纳米天线的偏振转换效应和双偏振

器单元结构的偏振过滤特性, 引入局域不对称的设计实现了不对称的超表面全息和非互易光传输。对于设计波长 1150 nm, 在正向传输的正交偏振通道内以 3.3% 的偏振转换效率实现全息图重建, 而在反向传播中, 偏振转换效率衰减到 0.4%。2020 年, Ansari 等使用分区设计的方式实现了单层可见光区域的不对称传输全息显示。将包含两个不同取向角的纳米单元组成大晶胞, 通过控制两个纳米单元的相位差 ($\Delta\Phi = 2\sigma(\vec{\varphi}_1(x,y) - \vec{\varphi}_2(x,y))$), $\vec{\varphi}_2(x,y) = 2\pi - \vec{\varphi}_1(x,y)$, $\vec{\varphi}_1(x,y) = 2\pi - \vec{\varphi}_2(x,y)$, 可以控制前向反向的传输响应, 使得在前向传输光照射的情况下表现为会聚效果, 在反向传输的情况下表现为发散效果^[107]。通过优化材料 (a-Si:H) 提高了效率, 纳米单元的传输透过率为 75%, 偏振转换效率达到了 74%, 全息衍射效率达到 61%。同时由于器件为单层设计, 加工较为简单且与传统的互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 工艺兼容, 但两个传输方向之间存在串扰且需要工作在菲涅尔区。2021 年, Naveed 等通过将传输相位和几何相位相结合的方式实现了不对称的全息图像显示, 图像间完全解耦, 如图 6(f) 所示, 正交偏振光占总输出光的比值达到了 88%^[108]。2022 年, Kruk 等在不对称传输设计时融入了非线性介质谐振器, 在红外光照射下可以产生可见光谱范围内的图像, 通过 THG 的非线性过程, 超表面在两个相反的照明方向下将产生不同的图像, 为新型纳米光子器件提供了一种新的设计思路^[109]。

但是, 目前传输方向复用的超表面全息器件依旧面临着传输效率低、制造工艺复杂、偏振敏感等方面的问题。以几何相位为设计思路的不对称传输超表面实际上是依赖于几何相位的偏振敏感特性, 在信息复用的角度上, 两个自由度 (圆偏振旋向和传输方向) 之间是重叠的^[87], 并且器件总要受到单元结构的偏振转换效率的限制。因此, 偏振无关的不对称传输器件设计将是未来该方向发展的一大难点。另一方面, 超表面的加工制造一直是设计转化成实物的一道难关。在多层级联的设计中, 层与层之间的对准问题、额外增加的损耗问题都会降低超表面的效率。一些单层设计的几何相位不对称传输超表面改进了全息图的算法, 可以实现不对称的全息显示并且避免了多层加工所面临的问题, 但是图像质量较差, 且只能工作在菲涅尔衍射区^[108]。全息图像的显示可以更加直观地展示出这些不对称传输超表面设计的可行性, 但不对称传输

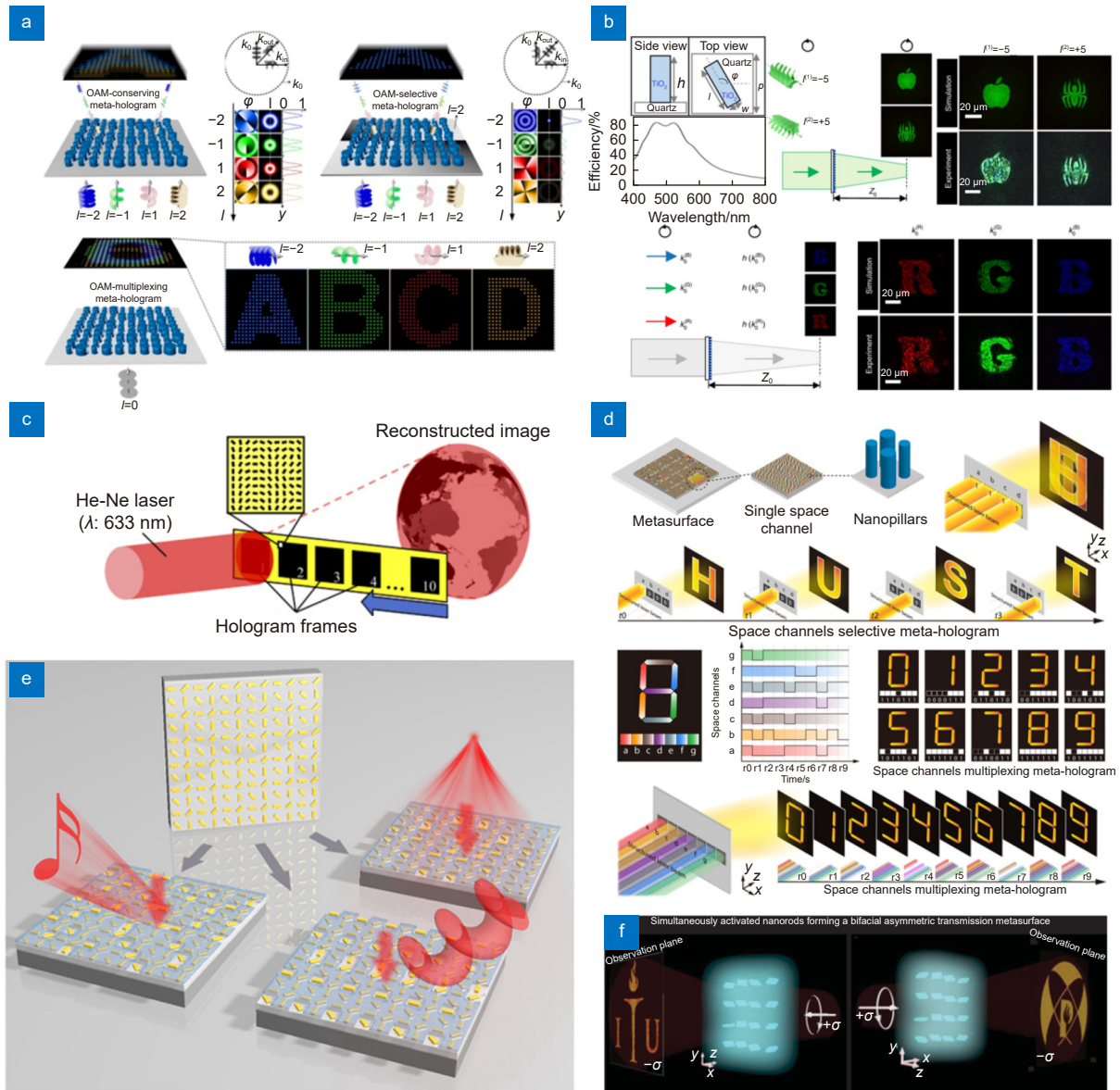


图 6 OAM 复用、空间复用和非互易超表面全息术。(a) 离散空间频率分布的 OAM 复用超表面全息器件设计^[98]；(b) 可见光波段多动量介质超表面转换器^[100]，比例尺：20 μm；(c) 空间复用型超表面器件，以类似电影放映的方式实现动态全息视频显示^[101]；(d) 空间复用型超表面器件，可实现电影放映式动态全息显示或者结合结构光实现 2²⁸ 个不同的帧显示^[102]；(e) 利用模板实现的空间信道选择超表面器件^[104]；(f) 非互易型超表面全息器件^[108]

Fig. 6 OAM multiplexed, space channel multiplexed and nonreciprocal meta-holography. (a) OAM-multiplexed meta-holography with discrete spatial frequency distribution^[98]; (b) Dielectric multi-momentum meta-transformer in the visible^[100], scale bar: 20 μm; (c) Space channel multiplexed metasurface, which can realize dynamic holographic video display in a way similar to cinematography^[101]; (d) Space channel multiplexed metasurface, which can realize cinematography-inspired dynamic holographic display and display 2²⁸ different frames with structured laser beam^[102]; (e) Space channel selecting metasurface realized by a template^[104]; (f) Nonreciprocal meta-holographic device^[108]

全息显示的实用性有待研究者进一步讨论。总体而言，传输方向复用的超表面全息丰富了器件的功能性，将会极大地促进未来光集成、信息安全、光通信等领域的发展。

4.1.7 衍射光场复用的超表面全息

在上述提到的复用手段中，入射光场的偏振、

OAM、角度等信息一般作为全息显示通道的开关信号，而不包含全息显示的实际信息，只以超表面作为信息存储的主要载体。对于衍射光场复用的超表面全息技术，入射光场中也包含部分全息显示信息，通过改变入射光场，改变传输一段距离后的衍射光场，可以基于同一片超表面器件实现复用式动态全息

功能。光与超表面的相互作用可表述为

$$U(x, y, z) = \iint U_{\text{inc}}(x_0, y_0) U_{\text{meta}}(x_0, y_0) h(x - x_0, y - y_0, z) dx_0 dy_0,$$

其中: $U_{\text{inc}}(x_0, y_0)$ 和 $U_{\text{meta}}(x_0, y_0)$ 分别为入射光和超表面的光场函数。2020年, Qu等将加密信息分为上述两个矩阵, 通过入射光的相位矩阵提供了额外的自由度, 使得静态的全电介质超表面“动”起来, 如图7(a)所示, 实现了利用单个超表面传输和解密任意全息图像和视频的效果^[110]。除此之外, 通过设计组合多个超表面, 当级联^[111]、旋转^[112]单个超表面时也可以在几个全息图像间实现图案切换, 提高了信息存储的安全性。2021年, Georgi等将全息图的信息分别编码在两个超表面上, 这些单层的超表面已经可以形成远场全息图像, 而当两个超表面以100 μm的间距被堆叠在一起时, 照射这些级联的器件就会产生新的全息图像^[111], 如图7(b)所示。2022年, Wei等受级联超表

面全息启发, 使用两个级联超表面之间的平面内旋转作为附加设计自由度, 引入旋转复用方法的概念^[112], 如图7(c)所示。为获得每个超表面合适的相位调制分布, 设计者提出了一种基于机器学习的迭代梯度优化方案, 所设计制造的器件可实现单层和级联的双工作模式并成功演示了六种不同的全息图像。超表面旋转自由度的开发使得一组级联超表面可以进一步编码两个或多个任意目标图像, 这提供了两倍或更多的信息容量, 在高安全级别的光加密和防伪方面具有巨大潜力, 并为高密度图像存储、光信息处理、动态显示等许多领域的前沿研究开辟了新的可能性。

4.1.8 基于超表面复用全息器件与应用

除以上所介绍的复用技术外, 透反射全空间复用^[113-114]、衍射级次复用^[115-116]等超表面全息技术也逐步拓展开来, 为动态显示的实现方案增添了多样性。基于这些复用技术, 近年来超表面全息技术在应用方面也不断推进, 以显示为例, 超表面彩色全息、动态

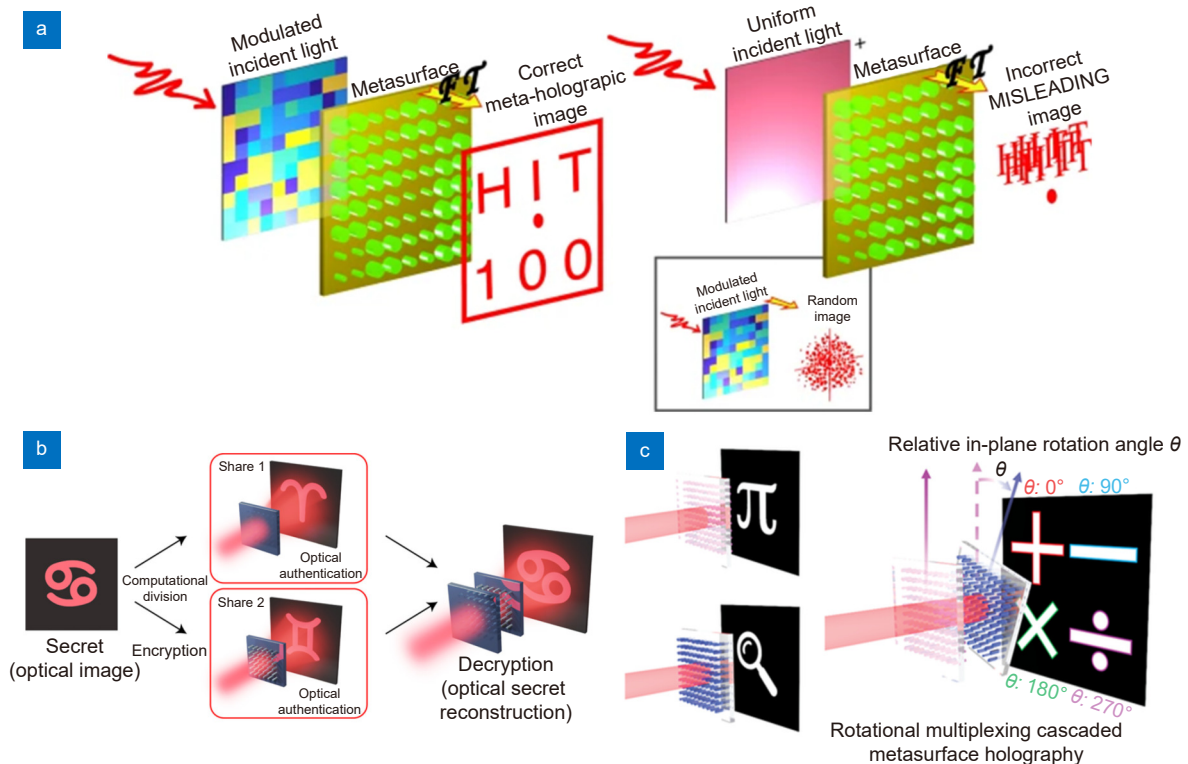


图7 衍射光场复用型超表面全息器件。(a) 衍射光场复用型全息器件, 可以通过利用空间光调制器改变入射光场实现动态显示^[110]; (b) 级联超表面, 可以在单层或多层叠加的情况下显示不同的全息图像^[111]; (c) 利用两个级联超表面的面内旋转, 引入旋转复用的概念, 从而展示不同的图像^[112]

Fig. 7 Diffracted light field multiplexed meta-holography. (a) Diffracted light field multiplexed meta-holography, which can realize dynamic display by changing the incident light field with spatial light modulators^[110]; (b) Cascaded metasurface, which can display different holographic images in the mood of single-layer or multi-layer^[111]; (c) Use the in-plane rotation between two cascaded metasurface to introduce the concept of the rotational multiplexing method and display different images^[112]

全息等技术都希望能够重建更加逼真的现实世界的场景。除此之外, 超表面的显示功能与其他器件结合还能实现传感功能。2021年, Kim等将对气体具有快速反应的液晶(liquid crystal, LC)材料和圆偏振复用全息超表面器件结合起来, 实现了自动探测易挥发性气体并发出全息视觉警报的功能^[117], 如图8(a)所示。所使用的液晶材料对于气体的响应可以反映在对入射光的偏振调节上, 当气体的浓度超过某一阈值时, 出射光的偏振状态就会改变。通过结合传输相位与几何相位, 实现了左右旋圆偏振光入射时分别显示笑脸与警告图像, 从而达到检测和警报的效果。所设计的超表面加工在柔性基底上, 并进一步转移到护目镜上测试, 测试效果与理论设计相符合, 具有较高的器件集成度和较低的机械与电损耗。

通过对全息显示图案的特殊编码, 复用超表面全息器件也有望用于信息安全。2021年, Li等受广泛用于网络和无线数字通信的码分复用(code division multiplexing, CDM)的启发, 设计并实现了一种动态超表面全息图像显示器件, 可由前端结构光束和偏振态控制显示图像^[118], 如图8(b)所示。具体来说, 将两个正交偏振态和16个光照代码库结合起来, 生成32个独立的通道。只有正确的代码才能解码特定通道的目标图像, 为信息传输提供加密效果。同时, 所展示的具有CDM的超表面全息技术可以通过DMD实现主动调制, 可用于实现动态信息显示、数据存储、光学加密和其他光学应用。同年, Wan等通过控制远场全息图像的相位分布来复用矢量全息图像^[119]。通过改进的GS算法精确控制重建图像的相位差, 两个不同的全息图像通过两个空间交错排布的超表面独立设计分别对两个正交圆偏振光响应, 并且在远场灵活地加密了额外的矢量全息图, 如图8(c)所示。通过改变入射的左右旋圆偏振光之间的相位差, 可以调整重叠区域内的图像。

新兴的片上超表面能够支持具有各种功能的表面等离子体基元模式, 可实现光束偏转^[120]、定向发射/耦合^[121]、全息显示^[122-124]等功能, 是芯片级光子系统实用化的一条新途径。2022年, Shi等提出一种超表面片上与自由空间复用的设计方案, 通过实验实现了一种新型的小型化AR全息设备^[125]。结合迂回相位与几何相位设计, 片上超表面可以同时操纵片上导波和自由空间光波, 提升了超表面的信道容量并避免了零级衍射干扰。所提出的基于片上超表面的AR设计与当前的光子集成电路(photonic integrated circuit,

PIC)技术兼容, 因此可以很容易地与可穿戴光子设备集成, 具有小型化、多功能和宽带操作的优势。

综上, 虽然基于复用超表面的全息技术还不能真正实现任意图像或视频显示, 但是它的信息容量已经可以应用于一些只需少量图像显示的专业场景。复用的概念和设计可以从多个维度增大信息存储量和信息的安全性, 其中波长复用、偏振复用等方法在彩色全息、矢量全息、光通信等领域有较大的使用价值。

4.2 主动式超表面全息

除了改变入射光场的各种特性(偏振、波长、入射角度等)来复用单个超表面以实现动态显示, 还可通过改变超表面本身的性质, 实现主动式超表面全息从而达到动态效果, 调制方法主要有以下几种类型: 相变材料调制、化学反应调制、机械调制、介质环境调制、电调制、激光调制和热调制等。

4.2.1 相变材料调制

相变材料(Phase change materials, PCMs)为实现主动式超表面全息提供了一条切实可行的途径, 研究人员已经基于 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_2$ (GST)和 VO_2 实现了多种可切换的全息图像重建, 极大地提高了信息容量。

通过适当的热、光、电等刺激, 可以实现GST晶态与非晶态的灵活切换, 基于这两种状态所表现出不同的折射率和消光系数, 结合超表面可以达到主动可调全息图像的目标。2018年, Zhang等将GST与等离子体超表面结合, 实现了在中红外光谱范围内工作的可切换的自旋霍尔效应、涡旋光束产生和全息术, 如图9(a)所示。所设计的超表面使用金属-绝缘体-金属(MIM)结构, 其中绝缘体层由GST和 MgF_2 薄膜组成, 底层由金组成, 顶部由亚波长金等离子体天线组成阵列, 通过加热实现GST从非晶态到晶态的转化^[126]。2020年, Zhou等利用金裂环谐振器(split ring resonator, SRR)-GST- SiO_2 的单元结构实现了动态全息加密。该方法基于GST的非晶态与晶态的转变, 以改变SRR的振幅和相位响应^[127]。但是, 上述工作仅提供两种可切换的状态, 这限制了全息通道的信息容量。针对于此, 2021年, Choi等通过将单独设计的控制光源应用于非晶态GST超表面, 创建了非晶态和晶态GST单元结构的共存态, 将GST超表面的全息显示扩展为三个通道。此外, 还提出了一种加密方法, 该技术仅在混合状态下生成解密的视觉信息, 而在其余状态下提供加密信息^[128]。

另外一种相变材料 VO_2 会在热、光、电等刺激

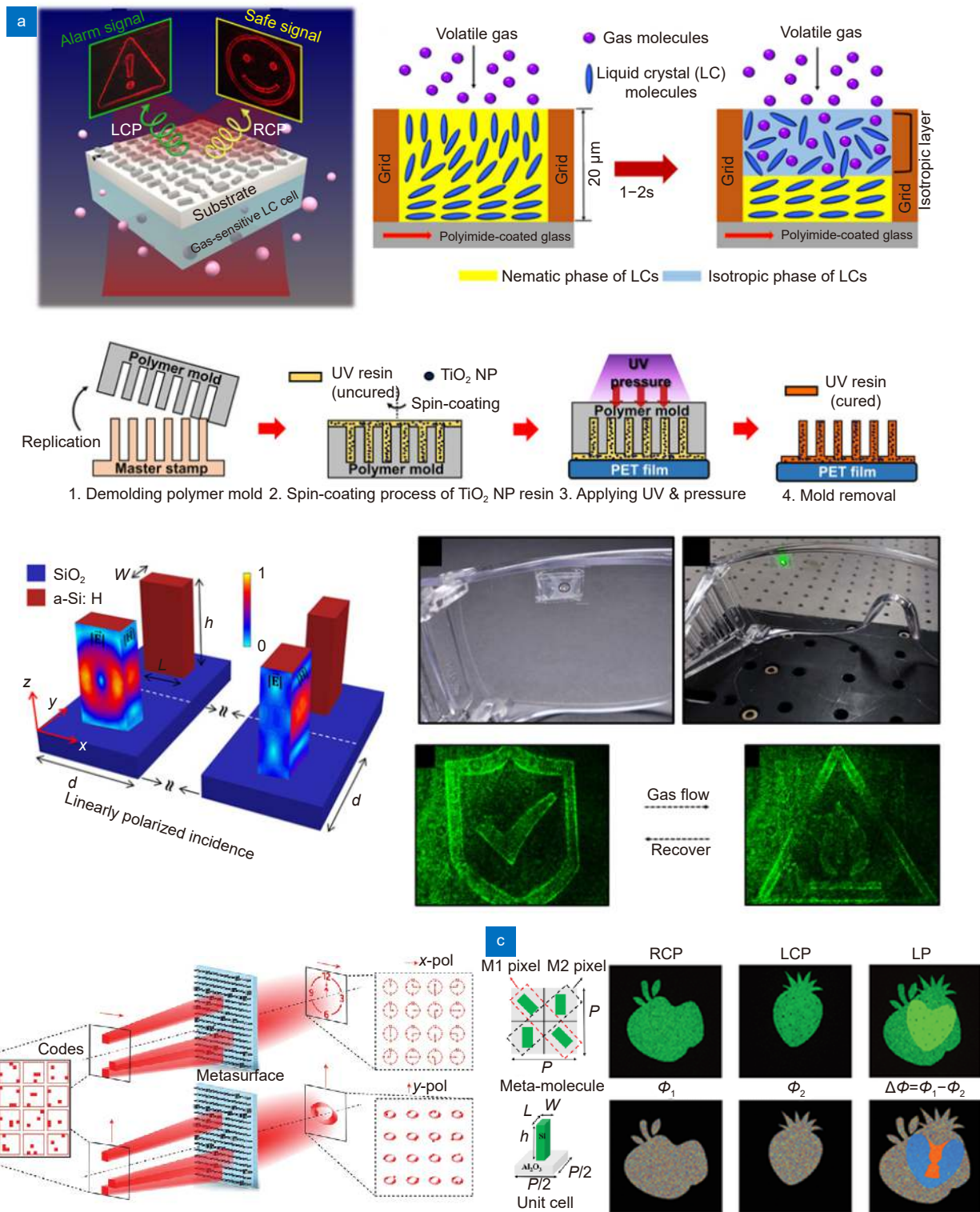


图 8 基于超表面复用全息术的应用。(a) 一种左右旋偏振复用全息器件用于气体传感, 通过结合液晶材料, 可以在不同的气体浓度下改变入射光的圆偏振特性在两个图像之间切换^[117]; (b) 码分复用型超表面器件^[118]; (c) 一种矢量全息器件, 可以控制全息像面的相位信息, 使在特定的输入输出条件下隐藏或显示图像信息^[119]

Fig. 8 Applications based on multiplexed meta-holography. (a) A polarization-multiplexed holographic device for gas sensing by combining liquid crystal materials and the circular polarization of incident light can be switched under different gas concentrations which leads to holographic image switching between two images^[117]; (b) Code division multiplexed metasurface^[118]; (c) A vectorial holographic device can control the phase information of the holographic image plane to hide or display image information under specific input and output conditions^[119]

下, 实现从绝缘体到金属的转变, 其变化的临界温度约为 67 °C。2021 年, Tripathi 等提出了一种米氏共振超表面, 可通过薄 VO₂ 层的绝缘体到金属过渡进行调谐, 在通信波段下具有可逆特性。证明了 VO₂ 的两种可调谐功能: 超表面的透射率可调; 近完美吸收的光谱可调。并且这两种功能都伴随着一种类似滞后的行为, 可以利用这种行为产生多种记忆效应, 为基于全介质共振超表面的纳米级光开关、调制器、神经形态光子学和传感器铺平了道路^[129]。2019 年, Liu 等利用两组谐振单元结构: 无源的 C 形 SRR 和集成 VO₂ 的有源 C 形 SRR 组成一个超表面, 通过升高温度, 改变单元结构的响应特性, 在太赫兹波段实现了全息图像的切换^[130]。2021 年, Yang 等通过在金膜上的 VO₂ 薄膜顶部使用金纳米棒阵列实现可切换反射式超表面, 在可见光波段展示了多种功能: 偏振转换、光束控制、傅里叶全息图和菲涅尔全息图^[131]。

4.2.2 化学反应调制

近期研究人员发现特殊的化学反应也可被用来控制超表面, 实现全息图的动态调控, 但这通常需要较长的反应时间, 限制了该方法的实际应用前景。2018 年, Li 等通过受控的化学反应在可见光波段独立操纵可寻址的亚波长像素, 实现了动态超表面全息图像的重建, 如图 9(b) 所示。该超表面由 Mg 独特的氢化/脱氢特性实现的动态像素组成, Mg 不仅在可见光波段下具有优异的等离子体特性, 在氢气负载时还可以经历从金属到电介质的相变, 形成氢化镁 (MgH₂), 并且这种相变是可逆的^[132]。同样地, 基于 Mg 独特的氢化/脱氢特性, 2019 年, Li 等通过使用复合催化镁-金-纳米天线的氢化/脱氢过程, 展示了一种可切换的超表面全息图。该超表面由具有固定散射相位的纯金 V 形天线和通过氢化/脱氢具有可切换散射相位的复合镁-金 V 形天线组成, 并开发了一种基于 Fido 方法的迭代全息图算法来建立量化的相位关系, 允许选定动态像素的可切换散射相位来重建图像^[133]。进一步地, 2020 年, Li 等展示了一种双功能主动式超表面, 空间排列的阶梯式纳米像素可以精确控制光的振幅和相位, 并基于 Mg 可逆的氢化/脱氢特性实现了动态全息和动态彩色打印之间的双功能切换^[134]。

4.2.3 机械调制

机械拉伸和机械施压的方法也被证明可以用作主动式超表面全息图的调控方式。2017 年, Malek 等利

用可拉伸的聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 基板上的金纳米棒, 实现了多个不同全息图像之间的动态切换显示, 如图 9(c) 所示。超表面的各向同性拉伸改变了位置相关的相位不连续性, 并重新编码了产生的波前, 开辟了可拉伸超表面全息图作为用于动态可重构光通信和平面显示设备的可能性, 还证实了可拉伸基板上的超表面可以作为各种可重构光学设备的平台^[135]。2020 年, Kim 等将超表面和液晶 (LC) 结合, 利用 LC 可以响应表面压力的特性编码不同的全息图。在没有压力的情况下, 该器件展示了为 LCP 编码的自行车全息图, 这是因为穿过 LC 单元的人射 LCP 的偏振没有变化 (相位延迟量约等于 0)。当通过手指触摸施加表面压力时, LC 分子重新定向改变了相位延迟量, LCP 转换为 RCP, 进而实现了全息图像从自行车到火箭的切换^[136]。

在微波波段, 研究人员提出了一种机械旋转控制超表面的方法。2022 年, Xu 等通过步进电机和传动齿轮来控制单个单元结构旋转, 实现圆偏振电磁波入射条件下的几何相位连续控制。通过使用相同的超表面演示了超透镜聚焦位置的调谐、涡旋光拓扑荷值的改变和可切换的全息图像重建^[137]。

4.2.4 介质环境调制

基于超表面所处介质的环境折射率不同, 可以分别设计其响应特性, 进而实现动态全息图像的灵活切换。2021 年, Xiong 等提出了一种实现全息模拟过程的通用数学方法, 称为相位矩阵变换。基于该方法, 设计了动态超表面全息图, 该图在空气中显示“鸟”图像, 以及在环境变为石油时显示“鱼”图像。此外, 该超表面还引入波长作为设计彩色全息模仿装置的额外自由度, 当环境发生变化时, 710 nm 波长的“D”和 890 nm 波长的“C”彩色全息图像会自动分别变成“I”和“U”。该超表面基于 MIM 作为单元结构, 激发的局域表面等离子体激元模式对周围环境非常敏感, 如图 10(a) 所示, 将样品浸入油中后, 由于周围介质的折射率增加, 红色箭头标记的两个共振模式将向更长的波长移动。从工作波长 800 nm 处的模拟电场强度 (蓝色虚线) 可以看出, 空气中的模式是两个纳米棒之间的耦合模式, 而在油中仅是右边纳米棒的电偶极子, 导致两个不同的相位响应分别等于零 (空气中) 和 π (油中)。基于此原理, 找到了在相位矩阵转换过程中其他的映射关系^[138]。类似地, 2021 年, Cai 等通过改变介质环境 (水和空气) 的折射率, 改变 TiO₂ 纳米

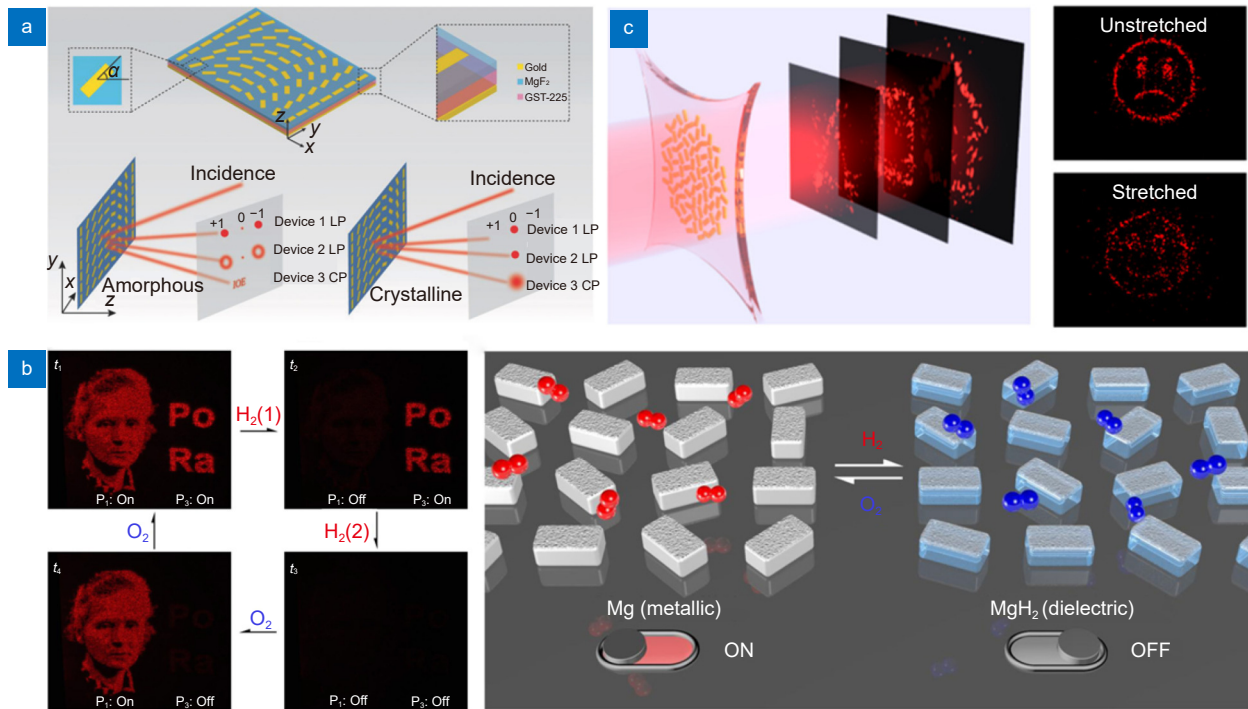


图 9 主动式超表面全息。(a) 基于 GST 相变特性的可切换自旋霍尔效应、涡旋光束产生和全息术^[126]；
(b) 基于 Mg 氢化/脱氢特性的动态超表面全息^[132]；(c) 基于可拉伸 PDMS 基底的全息图像动态切换显示^[135]

Fig. 9 Active meta-holography. (a) Switchable spin Hall effect, vortex beam generation and holography based on GST phase transition properties^[126]; (b) Dynamic metasurface holography based on Mg hydrogenation/dehydrogenation properties^[132]; (c) Dynamic switching display of holographic image based on stretchable PDMS substrate^[135]

柱在空气和水中不同的响应特性，进而独立地编码全息图，演示了可切换全息图像的偏振不敏感主动式超表面^[139]。2022 年，Yang 等将超表面引入到光波导集成中，硅纳米天线沿着片上光波传播路径在 Si₃N₄ 波导和二氧化硅衬底上编码排列，在片上空间投影了具有多个信息通道的三维全息图。此外，通过水中沉浸式调谐方案，实现了片上实时动态调谐的双通道任意编码全息图像显示^[140]。

4.2.5 电调制

LC 具有独特光学双折射特性，即寻常光折射率和非常光折射率存在差异，这种差异通常在 0.2~0.4 左右。通过施加电场，LC 可以在液态和固态之间切换，从而产生可控的双折射现象，用于主动式超表面调谐^[141]。2020 年，Kim 等将偏振复用超表面和 LC 结合，实现了可以电切换的动态超表面全息显示。基于电刺激 LC 层使相位延迟量改变的原理，利用不同的电压值可以动态切换为 LCP 和 RCP 编码的两个全息图像^[136]。2021 年，Hu 等通过将几何相位超表面与 LC 集成，展示了一种用于可见光范围内可寻址器件的可电调偏振相关超表面。底层超表面由包裹

在 PMMA 中的几何相位单元结构组成，与直接包裹 LC 相比，具有更高的折射率对比度和器件效率。上层液晶层束缚在两个对准层中间，通过电调节来控制 LC 分子的取向，可以实现具有不同相位延迟的可变波片功能，进而利用线偏振器来实现两个正交圆偏振光通道的连续强度调谐。演示了可电调单色和多色可切换超表面全息图以及动态变焦超透镜，还实现了电寻址动态超表面^[142]。除此之外，研究人员通过电调的方式来改变超表面周围环境的折射率也实现了主动式超表面全息。2020 年，Li 等展示了用于光投影显示的电控数字超表面设备，如图 10(b) 所示。每个像素包含排列在矩形晶格中的金纳米棒，在一些预选的（奇数或偶数）列中，纳米棒覆盖有介电材料。随后将样品封装在 LC 中。通过在毫秒时间尺度上经由 LC 电控制相邻奇数列和偶数列之间的相对相位，每个像素可以被设计成在远场产生特定的动态全息图案^[143]。基于类似的原理，2021 年，Yu 等演示了用于动态偏振转换的可电调谐超表面，实现了对于线偏振光 90° 的快速可逆偏振旋转。此外，还展示了动态全息和可独立控制的多像素的全息图像生成^[144]。除了

基于 LC 实现电调, 2021 年, Kaissner 等提出了一种在可见光频率下电化学控制的超表面, 使用导电聚合物聚苯胺 (Polyaniline, PANI) 局部共轭在金纳米棒上, 以主动控制超表面的相位分布。通过控制电化学过程中亚波长尺寸 PANI 生长, 可以原位监测和优化超表面的光学响应, 实现了具有良好开关性能的可切换全息图像重建^[145]。

不同于可见光波段, 研究人员在微波波段和 THz 波段提出了可编程单元结构的全息图像重建方案。2017 年, Li 等通过 1 位编码超表面在微波波段实现了可编程的全息图像重建。在超表面的单元结构中加入一个二极管, 通过在二极管上施加不同的偏置电压来控制每个单元结构的散射。结合现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 可以实时生成多个所需的全息图像^[146]。2020 年, Venkatesh 等展示了基于 CMOS 的芯片阵列来创建大规模可编程超表面, 开发了一个由 576 个单元结构组成的 2×2 芯片

阵列, 每个单元结构都可单独寻址, 并可在 GHz 速度下通过 8 位控制进行数字编程。该超表面可以实现振幅和相位调制、约 25 dB 的振幅调制深度、±30° 的动态波束生成、多波束生成和太赫兹波段的可编程全息投影^[147]。

4.2.6 激光调制和热调制

通过激光作用于超表面也可实现主动式可重构的全息图像重建。2015 年, Li 等通过单个飞秒激光脉冲还原氧化石墨烯进行亚波长级多级光学折射率调制, 实现了一次写入的全息图, 用于广角和全彩色 3D 图像, 如图 10(c) 所示。由于飞秒激光脉冲没有累积加热效应, 因此无热光还原反应可以限制在衍射限制区域内。此外, 通过精确控制激光辐照度, 可以获得氧化石墨烯的可逆还原和氧化, 实现主动式调节超表面全息^[148]。

热收缩形状记忆聚合物 (Shape memory polymers, SMPs) 是一种在热、光、磁或超声波等外部刺激下可

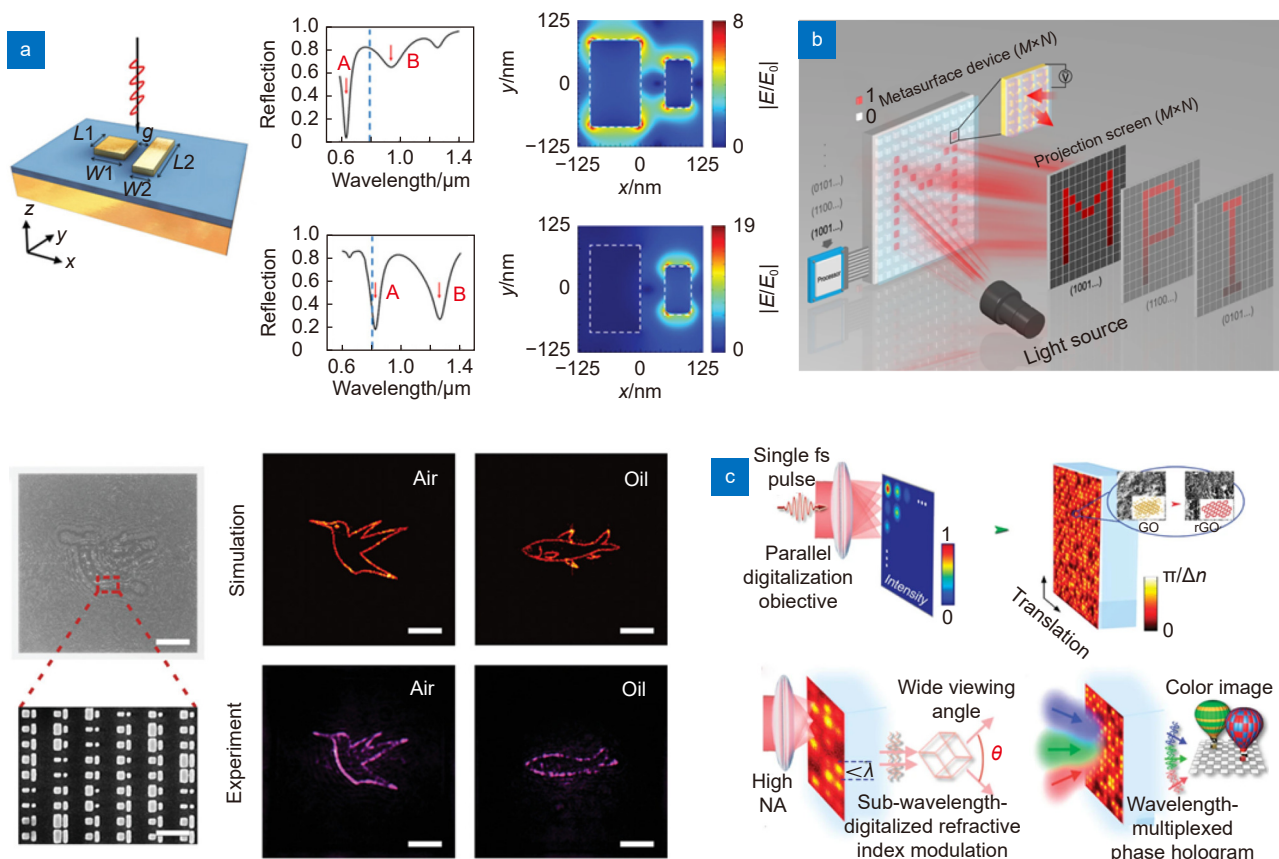


图 10 主动式超表面全息。(a) 基于对环境敏感的 MIM 结构的可切换超表面全息术^[138], 比例尺: 40 μm; (b) 用于光投影显示的电控数字超表面设备^[143]; (c) 通过飞秒激光脉冲还原氧化石墨烯进行折射率调制以实现宽视场角 3D 全息图^[148]

Fig. 10 Active meta-holography. (a) Switchable meta-holographic device based on environmentally sensitive MIM structures^[138], scale bar: 40 μm; (b) Electronically controlled digital metasurface for optical projection display^[143]; (c) Refractive index modulation by femtosecond laser pulse reduction of to achieve wide-FOV 3D holograms^[148]

以改变其形状的刺激响应材料。基于此, 2021年, Wang等利用空间调制飞秒激光脉冲在SMPs上制作了四阶振幅调制超表面, 通过加热触发SMPs的形状恢复使得微坑像素收缩, 改变像素对光的透过率, 进而改变超表面所编码的振幅分布, 实现全息图像的动态切换和信息解密, 实验展示了全息图像从“愤怒的脸”到“笑脸”的变化以及从原始图像“888”对“790”的解密^[149]。

5 超表面制造方法

由一系列人工亚波长单元结构组成的超表面可以对光的振幅、相位、偏振、波长等各种特性实现高自由度的任意调控, 但各种功能的精准实现对单元结构的几何尺寸、形貌结构、周期距离等参数提出了苛刻的要求, 针对于此, 研究者们提出了多种制造方法, 以适应不同场景的需要^[12,150]。目前大多数超表面器件都是基于电子束曝光(EBL)和聚焦离子束(FIB)来生产制造的, 这两种方法具有加工精度高、适用材料范围广、自由度高等优点, 但同样也具有产率小、加工速度慢等缺点, 只适用于实验室阶段的小批量原理验证, 无法满足工业界的大规模批量生产的需求。针对于此, 研究者提出光刻、纳米压印(nanoimprint lithography, NIL)技术来实现批量化生产, 有利于超表面真正落地于实际应用。此外, TPP激光直写技术作为一种微纳尺度的真三维加工方法, 也为制造超表面提供了一种新的解决方案。

5.1 电子束曝光

EBL是利用聚焦的电子束对样品表面的抗蚀剂进行曝光, 若为正性抗蚀剂, 被曝光的区域在后续显影中会被溶解; 若为负性抗蚀剂, 则未被曝光的区域在后续显影中会被溶解, 如图11(a)所示。基于此, 完成图案化结构的制备。对于超表面, 目前的抗蚀剂一般无法直接作为单元结构的材料, 因此需要结合其他工艺来制备超表面图案化结构: 剥离(lift-off)、刻蚀(etching)和原子层沉积(ALD)。得益于EBL技术高分辨率、高自由度的特点, 该技术在超表面的制造加工流程中应用的最为广泛。特别地, EBL在拥有高设计自由度、高集成度、多功能的多层超表面的制造中扮演着重要的角色^[151-153]。此外, 研究人员还报道了一种冰辅助的EBL技术, 利用冰代替抗蚀剂, 具有无污染、工艺简单等特点。加工始于冰的气相沉积, 结束于冰的升华, 成功在光纤端面上制造了等离子体

纳米盘阵列^[154]。

EBL结合剥离的工艺方法主要用来制造由金属等离子体阵列组成的超表面, 制造流程为: ①在基底表面均匀旋涂一层正性抗蚀剂; ②利用EBL曝光显影抗蚀剂, 得到与所设计超表面形状互补的图案化结构; ③利用蒸发或溅射的工艺在样品表面沉积金属薄膜; ④将抗蚀剂及上方的金属剥离, 得到超表面结构。进一步地, 2016年, Chen等提出了一种“Sketch and peel”方法, 其关键思想是仅暴露目标结构的轮廓, 并通过选择性剥离轮廓外部和顶部的金属层来填充中心区域。在制造过程中, 在结构足够大的情况下, 有效曝光面积将减少数百倍, 因此可以最小化总入射电子, 缓解邻近效应, 同时实现了约15 nm的金属结构特征尺寸^[155]。由于金属固有的高损耗问题, 不利于其在可见光波段的进一步应用, 虽然利用反射式结构可以提高超表面的调制效率, 但存在工艺复杂、光路受限等限制。以TiO₂、Si₃N₄、GaN、Si等材料为代表的电介质材料超表面依靠相对较高的折射率、低吸收系数等优势, 在可见光和近红外波段得到了广泛的应用, 而刻蚀和ALD工艺为加工这种电介质材料提供了解决思路。EBL结合刻蚀的制造流程为: ①在基底表面沉积一层电介质材料, 层厚与所设计的单元结构厚度相等; ②在电介质层上方均匀旋涂一层正性抗蚀剂; ③利用上面提到的EBL结合剥离的方法在电介质材料上制备一层掩膜; ④通过反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)或电感耦合等离子刻蚀(inductively coupled plasma, ICP)等干法刻蚀方法, 刻蚀掉非掩膜覆盖的电介质材料, 完成超表面的加工。但是这种刻蚀方法较为复杂, 需要不断迭代改善多种工艺参数才能得到理想的加工效果。研究者们提出了一种EBL结合ALD的加工方法, 制造流程为: ①在基底表面均匀旋涂一层与单元结构厚度相等的正性抗蚀剂; ②利用EBL对抗蚀剂进行曝光显影, 得到与所设计超表面形状互补的图案化结构; ③通过ALD技术填充电介质材料; ④利用刻蚀技术去除上层多余的电介质材料; ⑤去除掉剩余的抗蚀剂, 得到组成超表面的单元结构。

5.2 聚焦离子束

FIB系统的原理与扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)十分类似, 只是将电子束换成了离子束, 如图11(b)所示。制造流程为: ①通过磁控溅射等工艺在基底上镀膜; ②利用镓离子

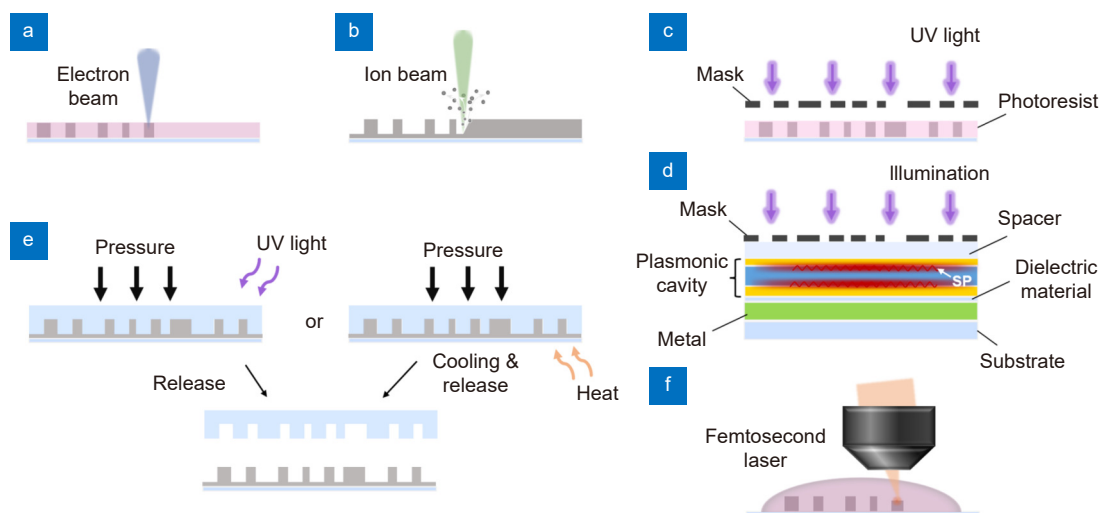


图 11 光学超表面微纳制造方法。(a) 电子束曝光; (b) 聚焦离子束; (c) 光刻; (d) 等离子体腔光刻; (e) 纳米压印; (f) 双光子聚合激光直写技术

Fig. 11 Micro-nano fabrication technologies for optical metasurfaces (a) Electron beam lithography; (b) Focused ion beam; (c) Photolithography; (d) Plasmonic cavity lithography; (e) Nanoimprint lithography; (f) Two-photon polymerization laser direct writing

(Ga⁺)束轰击膜表面去除相应材料, 通过精确控制离子束作用的位置实现图案化单元结构的制备。FIB 具有无材料选择性、工艺简单、自由度高等优点。但同时由于 Ga⁺束直径比电子束要大, 因此分辨率较低, 且加工速度慢、可加工尺寸小、成本高, 这不利于加工大面积的超表面, 限制了 FIB 系统的进一步应用。2016 年, Chen 等将“Sketch and peel”方法与 FIB 结合, 能够快速制造任意等离子体单元结构。图案加工具体流程为: ① 在衬底上蒸发金属; ② 利用 FIB 技术“Sketch”目标图案的轮廓; ③ 将透明胶粘附在金属表面上, 将多余的金属从基底表面剥离, 从而得到目标结构^[156]。

5.3 光刻和纳米压印

上述提到的 EBL 和 FIB 技术已经广泛应用于各类超表面的加工, 对于实验室原理验证阶段, 这两种方法具有加工精度高、无材料选择性等优点。但它们并不适用超表面的工业化大规模生产, 原因是它们的加工速度太慢、一次性加工尺寸太小。针对于此, 研究者们提出了两种解决方案: 光刻和 NIL。

光刻作为半导体制造领域的一项成熟技术, 也同样适用于超表面的加工, 基本原理是利用紫外光将图案从掩模版转移到基底上的光刻胶里, 具有产量大、一致性高等优点, 如图 11(c) 所示。2018 年, She 等利用步进光刻机实现了厘米量级 a-Si (amorphous silicon) 超透镜的规模化制造, 并且提出了一种可以

减小 3 个数量级的超表面版图压缩算法。该制造过程具体表述为: ① 将 a-Si、光刻胶和对比度增强材料依次沉积在晶片衬底上; ② 结合掩模版投影超表面的图案化结构, 通过重复曝光和步进晶片的方法实现快速复制; ③ 利用 RIE 将图案转移到 a-Si 层; ④ 去除残留的抗蚀剂得到超表面阵列; ⑤ 切割晶片获得多个超表面器件^[157]。然而光刻受到光学衍射极限的限制, 通常需要深紫外光或者极紫外光以实现小特征尺寸线宽, 这极大地增加了成本和加工复杂性。2015 年, Luo 等提出一种表面等离子体成像光刻方法, 通过引入反射等离子体透镜来放大和补偿倏逝波, 从而产生具有高保真度、高对比度和大深度的纳米图案化结构, 演示了几何尺寸为 40 nm×120 nm 的纳米掩膜图案在抗蚀剂中生成, 并通过刻蚀转移到金属层中, 最终制造出具有良好聚焦性能的超透镜器件^[158]。进一步地, 2017 年, Liu 等提出了一种等离子体腔光刻技术, 光刻系统由 Cr 掩膜和银-光刻胶-银等离子体腔组成, 腔体可以有效放大倏逝波并调制成像平面上的电场分量, 并演示了一种超表面全息器件的制造与表征^[159], 如图 11(d) 所示。2018 年, Pu 等通过引入反射等离子体透镜来放大和补偿倏逝波, 形成悬链线光场。通过利用两个相反圆偏振光的干涉, 首次提出了一种简单的非均匀超表面制造方法, 打破了传统干涉光刻的限制^[160]。

NIL 是一种利用简单的机械变形来制造单元结构

的技术, 将图案化模具压入聚合物材料制成的树脂中, 从而将纳米图案转移到树脂中^[161], 如图 11(e) 所示。传统的 NIL 分为两种: ① 热 NIL, 当模板压在树脂后, 用先加热再冷却的方式固化聚合物涂层并分离模板, 纳米图案就转移到了聚合物层, 具有工艺简单的特点; ② 紫外 NIL, 使用液态树脂旋涂在基底上, 基于对紫外光透明的模板压印树脂, 接着利用紫外线固化树脂, 实现纳米图案的打印。由于系统简单且响应时间短, 因此通常具有更高的生产率。NIL 方法可以广泛应用于各种材料以制造超表面: 金^[162]、p-Si(Poly-silicon)^[163]、钙钛矿^[164]等, 还具有分辨率高、产量大、成本低等优势。

5.4 双光子聚合激光直写技术

TPP 激光直写作为一种高分辨率、热影响区小、真三维的加工技术, 已经广泛应用于超表面、微纳机器人、细胞支架等领域。该方法基于双光子聚合效应, 即超快激光被高 NA 物镜紧聚焦到光刻胶内部, 当激光强度高于一阈值时, 光刻胶在焦点处发生双光子吸收效应, 产生自由基, 当自由基浓度大于一阈值时, 单体吸收自由基聚合成链并固化, 通过位移台移动样品或振镜扫描的方式实现大面积加工, 如图 11(f) 所示。由于双光子吸收是一种非线性效应, 只在小于紧聚焦点艾里斑的尺度内发生, 可以实现超越衍射极限的微结构加工精度。2017 年, Faniayeu 等针对亚微米量级的三维螺旋超表面结构难加工的问题, 提出了利用 TPP 激光直写技术制造结构模板, 结合溅射的方法实现单元结构的金属化, 快速制造出在 6 μm~11 μm 波段内吸收率为 80% 的完美吸收体超表面^[165]。2020 年, Ren 等展示了一种 OAM 复用全息术, 利用高度变化的几何相位单元结构同时实现了振幅和相位调制。由于 EBL 等方法很难做到不同高度单元结构的高精度制造, Ren 等采用 TPP 技术直写聚合物材料, 制造了长度 780 nm, 宽度 390 nm, 高度 3.4 μm~4.45 μm 的几何相位单元结构, 实现了 64 阶

复振幅调制^[99]。2020 年, Balli 等使用 TPP 技术制造了一种相位板和超透镜结合的混合消色差透镜, 在 1000 nm~1800 nm 的工作带宽内实现了大于 60% 的平均聚焦效率。此外, 基于 TPP 技术的真三维加工能力, 研究人员还展示了一种相位板-空气-超透镜的多层超表面结构, 在保留宽带消色差功能的前提下实现了更高的 NA^[166]。

6 总结及展望

综上, 本文简要介绍了超表面全息器件的基本设计流程, 重点描述了静态超表面全息器件的调制方式和动态超表面全息的实现方式, 最后介绍了超表面器件的不同规模尺度的制造方法。全方位地展示了超表面全息器件从设计、原理、发展和制造等各个方面, 希望为想要进入该领域的研究人员和学习者提供一个该领域全貌的概览。进一步地, 基于超表面全息器件可以实现单色静态全息显示、彩色全息显示、动态流畅全息显示、及其他功能化应用, 如表 1~表 4 所示, 表中分别总结了这几种典型应用场景的代表性工作及其关键技术指标。

虽然超表面全息器件在光场调控能力、视场角方面远优于传统全息器件, 但是目前仍然存在一些挑战, 本文从应用和设计制造两方面提出对该领域未来发展的展望。应用方面: 探索实时动态真三维彩色全息显示的方案; 寻找复用超表面在全息防伪、加密解密、传感显示等功能的落地应用。设计制造方面: 发展先进设计算法; 开发大规模、低成本、高精度的制造工艺。

1) 探索实时动态真三维彩色全息显示的方案。全息显示在理论上可以准确复现三维目标的强度和深度, 能提供所有种类的深度线索, 被认为是三维显示的终极实现方式^[167]。2021 年, Zhang 等利用全彩超像素编码技术和高帧率 DMD 器件, 通过人眼的视觉暂留效应和高速光场调制来扩展空间带宽积 (space

表 1 单色静态全息显示代表性工作

Table 1 Representative works of single-wavelength static holographic display

工作机理	工作模式	波长/nm	材料	效率	参考文献
相位调制	反射式	630~1050	Au-MgF ₂ -Au	80%@825 nm	[33]
振幅调制	透射式	532	Cr	47%	[39]
复振幅调制	透射式	532	p-Si	40%	[26]
非线性调制	透射式	1210	Au	/	[52]

表 2 彩色全息显示代表性工作
Table 2 Representative works of color holographic display

工作机理	工作模式	效率	功能	参考文献
非线性调制	透射式	/	双色全息显示(重建波长645 nm、430 nm)	[50]
	反射式	13.2%@633 nm、11.1%@532 nm、8.9%@465 nm	三色全息像构成的彩色显示	[63]
波长复用	透射式	18%@633 nm、5.2%@532 nm、3.6%@473 nm;	三色全息像构成的彩色显示	[64]
	透射式	10.3%@633 nm、7.8%@532 nm、6.4%@473 nm;	三色全息像构成的彩色显示并与彩色打印技术相结合	[75]
OAM复用	透射式	/	三色全息像构成的彩色显示 (入射波长488 nm、532 nm、633 nm)	[100]

表 3 动态流畅全息显示代表性工作
Table 3 Representative works of dynamic smooth holographic display

工作机理	工作模式	波长/nm	帧数	帧率	参考文献
OAM复用	透射式	633	2 ^N	60	[99]
空间复用	透射式	633	2 ^N	9523	[102]
衍射光场复用	透射式	633	理论上无限制	60	[110]
电调制	透射式	532; 635	2; 2 ^N	/	[142]
	反射式	633	2 ^N	~19	[143]

表 4 其他功能化应用的代表性工作
Table 4 Representative works of other functionalized applications

工作机理	工作模式	波长/nm	材料	功能	参考文献
波长复用	透射式	473、532、633	Si	多功能集成	[75]
角度复用	反射式	915	a-Si	全息加密、多功能集成	[77]
	透射式	405	Au	全息加密、多功能集成	[81]
偏振复用	透射式	480	TiO ₂	全息加密、多功能集成	[87]
	透射式	633; 532	a-Si:H; 功能性UV光刻胶, 包含TiO ₂ 纳米粒子	传感	[117]
OAM复用	透射式	632	GaN	高信息容量存储、全息加密、多功能集成	[98]
空间复用	透射式	633	a-Si	多功能集成	[103]
传输方向复用	透射式	632.8	a-Si:H	全息加密、多功能集成	[108]
衍射光场复用	透射式	740	Si	全息加密	[111]
相变材料调制	透射式	800(控制光)、 1550(探测光)	GST-Al	全息加密	[128]
化学反应调制	反射式	633	Mg/Ti/Pd、Au、Mg/Ti/Pd/Cr	传感、全息加密	[132]
	反射式	633	Mg/Ti/Pd-HSQ-SiO ₂ -Ag	传感、多功能集成	[134]
机械调制	透射式	632.8	Au-PDMS	传感	[135]
介质环境调制	反射式	800; 710、890	Au-SiO ₂ -Au	传感	[138]
热调制	透射式	633	聚烯烃	传感、全息加密	[149]

备注：“/”代表参考文献中没有相关数据。

bandwidth product, SBP), 实现了全彩动态数字全息显示^[168]。相比于传统的光场调控器件: SLM、DMD等, 超表面具有大视场角、无高阶衍射、高空间分辨率、低噪声等优点。基于其强大的振幅、相位、偏振、波长调控能力, 超表面全息成为实现实时动态真三维显示的一种具有竞争力的方案。目前已经基于

复振幅调制、信息复用、主动调控等方法实现了可控的多信道切换三维彩色全息显示效果, 但是仍存在低刷新速率、低帧率、光路复杂等缺点, 限制了超表面全息的实际应用, 因此需要探索基于超表面的实时动态真三维彩色全息显示方案。目前已经有研究人员提出了利用 DMD 结合超表面空间信道复用实现大帧率、

高帧数的全息显示^[102], 但还不是真正的“动态”显示。以光控或电控的形式在保留超表面的优势特点情况下实现单像素、高速、任意光场调控是超表面研究领域不断追求的目标, 这还需要材料、制造技术、光电设计等方面研究人员的共同努力。

2) 寻找复用超表面在全息防伪、加密解密、传感显示等功能的落地应用。超表面多路复用技术的研究已经得到了不断的拓展和深入, 信息容量得以不断提高, 但是复用技术能够实现的信息容量是有限的, 并且会随着容量的增加而导致设计高复杂度和大串扰, 不利于实际应用。与其盲目追求信息容量的扩大, 不如积极寻找能够合理利用有限信息容量的场合, 提高信息传递过程中的准确度。得益于超表面全息独特的调制解调能力, 目前已经展示了多种光学加密^[55-56,169]的方案, 但是这些方案仅仅停留在实验室演示阶段, 未面向实际的市场应用, 结合大规模的微纳制造技术和优化设计, 预计这些超表面器件将在专业防伪领域有落地化应用。

3) 发展先进设计算法。传统超表面设计方法是基于正向设计的思路: ① 利用 GS 等迭代算法计算出所需的相位分布图; ② 基于 CST MICROWAVE STUDIO、Ansys Lumerical FDTD、COMSOL 等软件建立单元结构库; ③ 结合相位分布和单元结构全模仿真验证设计; ④ 制造超表面并测试。这种正向设计存在设计复杂、功能单一、运行效率低等缺点。得益于高性能 CPU 和 GPU 的强大计算能力, 开发新型机器学习、人工智能^[170-171]等算法可以有效拓展设计思路、丰富全息功能、简化设计流程。同时, 拓扑优化算法^[28-29,172]可以将传统规则形状的单元结构拓展成不规则几何形状, 是调控单元结构电磁响应的新方法。因此开发具有普适性的先进设计算法, 可以进一步推动超表面全息领域的发展。

4) 开发大规模、低成本、高精度的制造工艺。传统的 EBL、FIB 等加工工艺具有成本高、耗时长等限制, 这不利于超表面器件的商业化应用。与传统 CMOS 工艺兼容的光刻和 NIL 为实现大规模制造超表面提供了解决方案, 但仍需朝着降低成本、提高精度的方向继续探索。与产业界联合是一条可行的道路, 哈佛大学 Capasso 教授领导的 Metalenz 公司在意法半导体 12 英寸 (inch)(1 inch=2.54 cm) 晶圆代工厂内实现批量生产超透镜, 并应用于意法半导体 FlightSense 系列 ToF 测距传感器 VL53L8。欧洲 NIL

Technology 公司目前已建立一个完整的超透镜生产线, 具有全流程的设计、制作、测试和表征能力。国内迈塔兰斯 (MetalenX) 公司所推出的热成像超透镜已实现量产, 未来全系列超透镜将在国内自主生产。山河光电等公司也陆续开展了超表面产业化工作, 发展迅速。同时, 具有高设计自由度、高集成度、多功能等特点的多层超表面在全息显示领域具有极大的应用潜力, 然而目前适用于多层超表面的制造工艺存在工艺复杂、良品率低、对准难度高等缺陷, 因此急需开发新型多层超表面制造方法为超表面全息领域提供新的解决思路。除此之外, 基于 TPP 激光直写技术的真三维加工能力可以在一些特殊超表面制造领域找到应用: 光纤端面、片上集成、自由曲面等。

超表面的概念自提出以来, 已经经过了十多年的发展, 较为简单常见的光学功能应用已经都可以由超表面来实现, 但是其制造、效率、动态实现等方面还有待开发完善, 这是所有超表面器件迈向实用的关键。传统的 CGH 技术一般常用于防伪、干涉检测等方面, 虽然具有理想的三维显示效果, 但是空间带宽积小、视场角小、调制信息量丢失等问题导致在三维显示实际应用中尚未得到推广。利用超表面器件可以解决以上的部分问题, 并有望在制造技术进一步向前迈进之后, 为未来 6G 时代的图像传输从 2D 到 3D 的跨越提供强大的技术和器件支撑。

参考文献

- [1] Jin G F, Zhang H, Su P, et al. *Computer-Generated Holography*[M]. Beijing: Science Press, 2020. 金国藩, 张浩, 苏萍, 等. 计算机全息图[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [2] Brown B R, Lohmann A W. Complex spatial filtering with binary masks[J]. *Appl Opt*, 1966, **5**(6): 967-969.
- [3] Lohmann A W, Paris D P. Binary fraunhofer holograms, generated by computer[J]. *Appl Opt*, 1967, **6**(10): 1739-1748.
- [4] Samoylenko S R, Lisitsin A V, Schepanovich D, et al. Single atom movement with dynamic holographic optical tweezers[J]. *Laser Phys Lett*, 2020, **17**(2): 025203.
- [5] Casasent D, Rozzi W A. Computer-generated and phase-only synthetic discriminant function filters[J]. *Appl Opt*, 1986, **25**(20): 3767-3772.
- [6] Slinger C, Cameron C, Stanley M. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. *Computer*, 2005, **38**(8): 46-53.
- [7] Reichelt S, Tiziani H. Asphärenprüfung mit computergenerierten Hologrammen (Testing Aspheric Optics by Use of Computer-generated Holograms)[J]. *tm - Tech Mess*, 2006, **73**(10): 554-565.
- [8] Deng L G, Deng J, Guan Z Q, et al. Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing[J]. *Light Sci Appl*, 2020, **9**:

- 101.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 85.
- [12] Hu Y Q, Li X, Wang X D, et al. Progress of micro-nano fabrication technologies for optical metasurfaces[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(9): 20201035.
胡跃强, 李鑫, 王旭东, 等. 光学超构表面的微纳加工技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(9): 20201035.
- [13] Tseng M L, Hsiao H H, Chu C H, et al. Metalenses: advances and applications[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(18): 1800554.
- [14] Chen X Y, Zou H J, Su M Y, et al. All-dielectric metasurface-based beam splitter with arbitrary splitting ratio[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2021, **11**(5): 1137.
- [15] Haghtalab M, Tamagnone M, Zhu A Y, et al. Ultrahigh angular selectivity of disorder-engineered metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(4): 991–1000.
- [16] Larouche S, Tsai Y J, Tyler T, et al. Infrared metamaterial phase holograms[J]. *Nat Mater*, 2012, **11**(5): 450–454.
- [17] Walther B, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Diffractive optical elements based on plasmonic metamaterials[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, **98**(19): 191101.
- [18] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(11): 210030.
- [19] Pang H, Wang J Z, Cao A X, et al. Accurate hologram generation using layer-based method and iterative Fourier transform algorithm[J]. *IEEE Photonics J*, 2017, **9**(1): 1–8.
- [20] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237–246.
- [21] Feldman M R, Guest C C. Iterative encoding of high-efficiency holograms for generation of spot arrays[J]. *Opt Lett*, 1989, **14**(10): 479–481.
- [22] Yoshikawa N, Itoh M, Yatagai T. Quantized phase optimization of two-dimensional Fourier kinoforms by a genetic algorithm[J]. *Opt Lett*, 1995, **20**(7): 752–754.
- [23] Pang H, Wang J Z, Cao A X, et al. High-accuracy method for holographic image projection with suppressed speckle noise[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(20): 22766–22776.
- [24] Liu S C, Chu D P. Deep learning for hologram generation[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(17): 27373–27395.
- [25] Lee J, Jeong J, Cho J, et al. Deep neural network for multi-depth hologram generation and its training strategy[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(18): 27137–27154.
- [26] Lee G Y, Yoon G, Lee S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(9): 4237–4245.
- [27] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 255–275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- [28] Wang E W, Sell D, Phan T, et al. Robust design of topology-optimized metasurfaces[J]. *Opt Mater Express*, 2019, **9**(2): 469–482.
- [29] Xu M F, Pu M B, Sang D, et al. Topology-optimized catenary-like metasurface for wide-angle and high-efficiency deflection: from a discrete to continuous geometric phase[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(7): 10181–10191.
- [30] Wan W W, Gao J, Yang X D. Metasurface holograms for holographic imaging[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(21): 1700541.
- [31] Xie X, Pu M B, Jin J J, et al. Generalized pancharatanamberry phase in rotationally symmetric meta-atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, **126**(18): 183902.
- [32] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2808.
- [33] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(4): 308–312.
- [34] Zhang X H, Jin J J, Wang Y Q, et al. Metasurface-based broadband hologram with high tolerance to fabrication errors[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 19856.
- [35] Wang L, Kruk S, Tang H Z, et al. Grayscale transparent metasurface holograms[J]. *Optica*, 2016, **3**(12): 1504–1505.
- [36] Devlin R C, Khorasaninejad M, Chen W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, **113**(38): 10473–10478.
- [37] Fu R, Li Z L, Zheng G X, et al. Research development of amplitude-modulated metasurfaces and their functional devices[J]. *Chin Opt*, 2021, **14**(4): 886–899.
付饶, 李子乐, 郑国兴. 超构表面的振幅调控及其功能器件研究进展[J]. *中国光学*, 2021, **14**(4): 886–899.
- [38] Butt H, Montelongo Y, Butler T, et al. Carbon nanotube based high resolution holograms[J]. *Adv Mater*, 2012, **24**(44): OP331–OP336.
- [39] Huang K, Liu H, Garcia-Vidal F J, et al. Ultrahigh-capacity non-periodic photon sieves operating in visible light[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 7059.
- [40] Xu Z T, Huang L L, Li X W, et al. Quantitatively correlated amplitude holography based on photon sieves[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(2): 1901169.
- [41] Fu R, Deng L G, Guan Z Q, et al. Zero-order-free meta-holograms in a broadband visible range[J]. *Photonics Res*, 2020, **8**(5): 723–728.
- [42] Overvig A C, Shrestha S, Malek S C, et al. Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase[J]. *Light Sci Appl*, 2019, **8**: 92.
- [43] Gao Y S, Fan Y B, Wang Y J, et al. Nonlinear holographic all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(12): 8054–8061.
- [44] Sui X M, He Z H, Cao L C, et al. Recent progress in complex-modulated holographic display based on liquid crystal spatial light modulators[J]. *Chin J Liq Cryst Dis*, 2021, **36**(6): 797–809.
隋晓萌, 何泽浩, 曹良才, 等. 基于液晶空间光调制器的复振幅全息显示进展[J]. *液晶与显示*, 2021, **36**(6): 797–809.
- [45] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2807.
- [46] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, et al. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 32867.
- [47] Jiang Q, Cao L C, Huang L L, et al. A complex-amplitude hologram using an ultra-thin dielectric metasurface[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(47): 24162–24168.
- [48] Huang T Y, Zhao X, Zeng S W, et al. Planar nonlinear

- metasurface optics and their applications[J]. *Rep Prog Phys*, 2020, **83**(12): 126101.
- [49] Shi M Q, Liu J, Chen Z, et al. Nonlinear optics and quantum optics based on metasurface[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(9): 20201028.
石鸣谦, 刘俊, 陈卓, 等. 基于超构表面的非线性光学与量子光学[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(9): 20201028.
- [50] Frese D, Wei Q S, Wang Y T, et al. Nonlinear bicolor holography using plasmonic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, **8**(4): 1013–1019.
- [51] Mao N B, Tang Y T, Jin M K, et al. Nonlinear wavefront engineering with metasurface decorated quartz crystal[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(4): 797–803.
- [52] Mao N B, Zhang G Q, Tang Y T, et al. Nonlinear vectorial holography with quad-atom metasurfaces[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, **119**(22): e2204418119.
- [53] Deng Z L, Wang Z Q, Li F J, et al. Multi-freedom metasurface empowered vectorial holography[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(9): 1725–1739.
- [54] 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 Rev*, 2019, **13**(6): 1800278.
- [55] Li Z F, He C, Zhu W R. Secret sharing holographic encryption with off-axis dual-channel metasurface[C]//2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020: 815–816. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9330314.
- [56] Li Z F, Premaratne M, Zhu W R. Advanced encryption method realized by secret shared phase encoding scheme using a multi-wavelength metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(11): 3687–3696.
- [57] Xiong Y J, Vandenhoute M, Cankaya H C. Control architecture in optical burst-switched WDM networks[J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2000, **18**(10): 1838–1851.
- [58] Nakayama H, Takada N, Ichihashi Y, et al. Real-time color electroholography using multiple graphics processing units and multiple high-definition liquid-crystal display panels[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(31): 5993–5996.
- [59] Zeng Z X, Zheng H F, Yu Y J, et al. Full-color holographic display with increased-viewing-angle [Invited][J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(13): F112–F120.
- [60] Makowski M, Ducin I, Sypek M, et al. Color image projection based on Fourier holograms[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(8): 1227–1229.
- [61] Makowski M, Sypek M, Kolodziejczyk A. Colorful reconstructions from a thin multi-plane phase hologram[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(15): 11618–11623.
- [62] Kozacki T, Chlipala M. Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(3): 2189–2199.
- [63] Zhao W Y, Liu B Y, Jiang H, et al. Full-color hologram using spatial multiplexing of dielectric metasurface[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(1): 147–150.
- [64] Wang B, Dong F L, Li Q T, et al. Visible-frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(8): 5235–5240.
- [65] Zhang F, Pu M B, Gao P, et al. Simultaneous full-color printing and holography enabled by centimeter-scale plasmonic metasurfaces[J]. *Adv Sci*, 2020, **7**(10): 1903156.
- [66] Guo X Y, Zhong J Z, Li B J, et al. Full-color holographic display and encryption with full-polarization degree of freedom[J]. *Adv Mater*, 2022, **34**(3): 2103192.
- [67] Ma D N, Li Z C, Liu W W, et al. Deep-learning enabled multicolor meta-holography[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(15): 2102628.
- [68] Hu Y Q, Luo X H, Chen Y Q, et al. 3D-Integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. *Light Sci Appl*, 2019, **8**: 86.
- [69] Lim K T P, Liu H L, Liu Y J, et al. Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 25.
- [70] Shi Z J, Khorasaninejad M, Huang Y W, et al. Single-layer metasurface with controllable multiwavelength functions[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(4): 2420–2427.
- [71] Hu Y Q, Li L, Wang Y J, et al. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(2): 994–1002.
- [72] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Sci Adv*, 2016, **2**(11): e1601102.
- [73] Deng Z L, Jin M K, Ye X, et al. Full-color complex-amplitude vectorial holograms based on multi-freedom metasurfaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, **30**(21): 1910610.
- [74] Huo P C, Song M W, Zhu W Q, et al. Photorealistic full-color nanopainting enabled by a low-loss metasurface[J]. *Optica*, 2020, **7**(9): 1171–1172.
- [75] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Full-colour nanoprint-hologram synchronous metasurface with arbitrary hue-saturation-brightness control[J]. *Light Sci Appl*, 2019, **8**: 95.
- [76] 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 Lett*, 2019, **19**(12): 8964–8971.
- [77] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Angle-multiplexed metasurfaces: encoding independent wavefronts in a single metasurface under different illumination angles[J]. *Phys Rev X*, 2017, **7**(4): 041056.
- [78] Jang J, Lee G Y, Sung J, et al. Independent multichannel wavefront modulation for angle multiplexed meta-holograms[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(17): 2100678.
- [79] Wang E L, Niu J B, Liang Y H, et al. Complete control of multichannel, angle-multiplexed, and arbitrary spatially varying polarization fields[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(6): 1901674.
- [80] Wan S, Tang J, Wan C W, et al. Angular-encrypted quad-fold display of nanoprinting and meta-holography for optical information storage[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(11): 2102820.
- [81] Zhang X H, Jin J J, Pu M B, et al. Ultrahigh-capacity dynamic holographic displays via anisotropic nanoholes[J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(4): 1409–1415.
- [82] Wang J Y, Tan X D, Qi P L, et al. Linear polarization holography[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(2): 210009.
- [83] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(1): 225–230.
- [84] Montelongo Y, Tenorio-Pearl J O, Milne W I, et al. Polarization switchable diffraction based on subwavelength plasmonic nanoantennas[J]. *Nano Lett*, 2014, **14**(1): 294–298.
- [85] Wen D D, Yue F Y, Li G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 8241.

- [86] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, **118**(11): 113901.
- [87] Li Z L, Chen C, Guan Z Q, et al. Three-channel metasurfaces for simultaneous meta-holography and meta-nanoprinting: a single-cell design approach[J]. *Laser Photonics Rev*, 2020, **14**(6): 2000032.
- [88] Kuroda K. Theory of polarization holography[C]//2011 10th Euro-American Workshop on Information Optics, 2011: 1–3, doi: 10.1109/WIO.2011.5981446.
- [89] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 95.
- [90] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(5): 2885–2892.
- [91] 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.
- [92] Ren H R, Shao W, Li Y, et al. Three-dimensional vectorial holography based on machine learning inverse design[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(16): eaaz4261.
- [93] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nat Photonics*, 2012, **6**(7): 488–496.
- [94] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, **340**(6140): 1545–1548.
- [95] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, **412**(6844): 313–316.
- [96] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta[J]. *Science*, 2012, **338**(6107): 640–643.
- [97] O’Neil A T, MacVicar I, Allen L, et al. Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**(5): 053601.
- [98] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 2986.
- [99] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, **15**(11): 948–955.
- [100] Jin L, Huang Y W, Jin Z W, et al. Dielectric multi-momentum meta-transformer in the visible[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 4789.
- [101] Izumi R, Ikezawa S, Iwami K. Metasurface holographic movie: a cinematographic approach[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(16): 23761–23770.
- [102] Gao H, Wang Y X, Fan X H, et al. Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(28): eaba8595.
- [103] Tang J, Wan S, Shi Y Y, et al. Dynamic augmented reality display by layer-folded metasurface via electrical-driven liquid crystal[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(12): 2200418.
- [104] Li J X, Yu P, Zhang S, et al. A reusable metasurface template[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(9): 6845–6851.
- [105] Sounas D L, Alù A. Non-reciprocal photonics based on time modulation[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(12): 774–783.
- [106] Frese D, Wei Q S, Wang Y T, et al. Nonreciprocal asymmetric polarization encryption by layered plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(6): 3976–3980.
- [107] Ansari M A, Kim I, Rukhlenko I D, et al. Engineering spin and antiferromagnetic resonances to realize an efficient direction-multiplexed visible meta-hologram[J]. *Nanoscale Horiz*, 2020, **5**(1): 57–64.
- [108] Naveed M A, Ansari M A, Kim I, et al. Optical spin-symmetry breaking for high-efficiency directional helicity-multiplexed metaholograms[J]. *Microsyst Nanoeng*, 2021, **7**: 5.
- [109] Kruk S S, Wang L, Sain B, et al. Asymmetric parametric generation of images with nonlinear dielectric metasurfaces[J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(8): 561–565.
- [110] Qu G Y, Yang W H, Song Q H, et al. Reprogrammable meta-hologram for optical encryption[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 5484.
- [111] Georgi P, Wei Q S, Sain B, et al. Optical secret sharing with cascaded metasurface holography[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(16): eabf9718.
- [112] Wei Q S, Huang L L, Zhao R Z, et al. Rotational multiplexing method based on cascaded metasurface holography[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(8): 2102166.
- [113] Zhang X H, Pu M B, Guo Y H, et al. Colorful metahologram with independently controlled images in transmission and reflection spaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, **29**(22): 1809145.
- [114] Zheng G X, Zhou N, Deng L G, et al. Full-space metasurface holograms in the visible range[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(2): 2920–2930.
- [115] Zhao R Z, Geng G Z, Wei Q S, et al. Controllable polarization and diffraction modulated multi-functionality based on metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(8): 2102596.
- [116] Li X, Zhang X, Zhao R Z, et al. Independent light field manipulation in diffraction orders of metasurface holography[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(8): 2100592.
- [117] Kim I, Kim W S, Kim K, et al. Holographic metasurface gas sensors for instantaneous visual alarms[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(15): eabe9943.
- [118] Li X, Zhao R Z, Wei Q S, et al. Code division multiplexing inspired dynamic metasurface holography[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, **31**(35): 2103326.
- [119] Wan W P, Yang W H, Feng H, et al. Multiplexing vectorial holographic images with arbitrary metaholograms[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(20): 2100626.
- [120] Ding F, Deshpande R, Bozhevolnyi S I. Bifunctional gap-plasmon metasurfaces for visible light: polarization-controlled unidirectional surface plasmon excitation and beam steering at normal incidence[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**(4): 17178.
- [121] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nat Mater*, 2012, **11**(5): 426–431.
- [122] Huang Z Q, Marks D L, Smith D R. Polarization-selective waveguide holography in the visible spectrum[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(24): 35631–35645.
- [123] Huang Z Q, Marks D L, Smith D R. Out-of-plane computer-generated multicolor waveguide holography[J]. *Optica*, 2019, **6**(2): 119–124.
- [124] Ha Y L, Guo Y H, Pu M B, et al. Monolithic-integrated multiplexed devices based on metasurface-driven guided waves[J]. *Adv Theory Simul*, 2021, **4**(2): 2000239.
- [125] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing[J]. *Laser Photonics*

- Rev*, 2022, **16**(6): 2100638.
- [126] Zhang M, Pu M B, Zhang F, et al. Plasmonic metasurfaces for switchable photonic spin-orbit interactions based on phase change materials[J]. *Adv Sci*, 2018, **5**(10): 1800835.
- [127] 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.
- [128] Choi C, Mun S E, Sung J, et al. Hybrid state engineering of phase-change metasurface for all-optical cryptography[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, **31**(4): 2007210.
- [129] Tripathi A, John J, Kruk S, et al. Tunable Mie-resonant dielectric metasurfaces based on VO₂ phase-transition materials[J]. *ACS Photonics*, 2021, **8**(4): 1206–1213.
- [130] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, et al. Thermally dependent dynamic meta-holography using a vanadium dioxide integrated metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(12): 1900175.
- [131] Yang J K, Jeong H S. Switchable metasurface with VO₂ thin film at visible light by changing temperature[J]. *Photonics*, 2021, **8**(2): 57.
- [132] Li J X, Kamin S, Zheng G X, et al. Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption[J]. *Sci Adv*, 2018, **4**(6): eaar6768.
- [133] Li T Y, Wei Q S, Reineke B, et al. Reconfigurable metasurface hologram by utilizing addressable dynamic pixels[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(15): 21153–21162.
- [134] Li J X, Chen Y Q, Hu Y Q, et al. Magnesium-based metasurfaces for dual-function switching between dynamic holography and dynamic color display[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(7): 7892–7898.
- [135] Malek S C, Ee H S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(6): 3641–3645.
- [136] Kim I, Ansari M A, Mehmood M Q, et al. Stimuli-responsive dynamic metaholographic displays with designer liquid crystal modulators[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(50): 2004664.
- [137] Xu Q, Su X Q, Zhang X Q, et al. Mechanically reprogrammable Pancharatnam–Berry metasurface for microwaves[J]. *Adv Photonics*, 2022, **4**(1): 016002.
- [138] Xiong B, Xu Y H, Wang J N, et al. Realizing colorful holographic mimicry by metasurfaces[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(21): 2005864.
- [139] Cai H G, Dolan J A, Gordon G S D, et al. Polarization-insensitive medium-switchable holographic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, **8**(9): 2581–2589.
- [140] Yang R, Wan S, Shi Y Y, et al. Immersive tuning the guided waves for multifunctional on-chip metaoptics[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(8): 2200127.
- [141] Badloe T, Lee J, Seong J, et al. Tunable metasurfaces: the path to fully active nanophotonics[J]. *Adv Photonics Res*, 2021, **2**(9): 2000205.
- [142] Hu Y Q, Ou X N, Zeng T B, et al. Electrically tunable multifunctional polarization-dependent metasurfaces integrated with liquid crystals in the visible region[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(11): 4554–4562.
- [143] Li J X, Yu P, Zhang S, et al. Electrically-controlled digital metasurface device for light projection displays[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 3574.
- [144] Yu P, Li J X, Liu N. Electrically tunable optical metasurfaces for dynamic polarization conversion[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(15): 6690–6695.
- [145] Kaissner R, Li J X, Lu W Z, et al. Electrochemically controlled metasurfaces with high-contrast switching at visible frequencies[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(19): eabd9450.
- [146] Li L L, Jun Cui T, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 197.
- [147] Venkatesh S, Lu X Y, Saeidi H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nat Electron*, 2020, **3**(12): 785–793.
- [148] Li X P, Ren H R, Chen X, et al. Athermally photoreduced graphene oxides for three-dimensional holographic images[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 6984.
- [149] Wang Z P, Jiang L, Li X W, et al. Thermally reconfigurable hologram fabricated by spatially modulated femtosecond pulses on a heat-shrinkable shape memory polymer for holographic multiplexing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(43): 51736–51745.
- [150] Hsu W L, Chen Y C, Yeh S P, et al. Review of metasurfaces and metadevices: advantages of different materials and fabrications[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2022, **12**(12): 1973.
- [151] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**: 13682.
- [152] Zhou Y, Kravchenko I I, Wang H, et al. Multilayer noninteracting dielectric metasurfaces for multiwavelength metaoptics[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(12): 7529–7537.
- [153] Groever B, Chen W T, Capasso F. Meta-lens doublet in the visible region[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(8): 4902–4907.
- [154] Hong Y, Zhao D, Wang J Y, et al. Solvent-free nanofabrication based on ice-assisted electron-beam lithography[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(12): 8841–8846.
- [155] Chen Y Q, Xiang Q, Li Z Q, et al. “Sketch and peel” lithography for high-resolution multiscale patterning[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(5): 3253–3259.
- [156] Chen Y Q, Bi K X, Wang Q J, et al. Rapid focused ion beam milling based fabrication of plasmonic nanoparticles and assemblies via “sketch and peel” strategy[J]. *ACS Nano*, 2016, **10**(12): 11228–11236.
- [157] She A L, Zhang S Y, Shian S, et al. Large area metalenses: design, characterization, and mass manufacturing[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(2): 1573–1585.
- [158] Luo J, Zeng B, Wang C T, et al. Fabrication of anisotropically arrayed Nano-slots metasurfaces using reflective plasmonic lithography[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(44): 18805–18812.
- [159] Liu L Q, Zhang X H, Zhao Z Y, et al. Batch fabrication of metasurface holograms enabled by plasmonic cavity lithography[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(21): 1700429.
- [160] Pu M B, Guo Y H, Li X, et al. Revisitation of extraordinary young’s interference: from catenary optical fields to spin–orbit interaction in metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(8): 3198–3204.
- [161] Oh D K, Lee T, Ko B, et al. Nanoimprint lithography for high-throughput fabrication of metasurfaces[J]. *Front Optoelectron*, 2021, **14**(2): 229–251.
- [162] Atighilorestani M, Jiang H, Kaminska B. Electrochromic-polymer-based switchable plasmonic color devices using surface-relief nanostructure pixels[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(23): 1801179.
- [163] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for

- augmented reality[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4562.
- [164] Makarov S V, Milichko V, Ushakova E V, et al. Multifold emission enhancement in nanoimprinted hybrid perovskite metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(4): 728–735.
- [165] Faniayeu I, Mizeikis V. Realization of a helix-based perfect absorber for IR spectral range using the direct laser write technique[J]. *Opt Mater Express*, 2017, **7**(5): 1453–1462.
- [166] Balli F, Sultan M, Lami S K, et al. A hybrid achromatic metalens[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 3892.
- [167] Cao L C, He Z H, Liu K X, et al. Progress and challenges in dynamic holographic 3D display for the metaverse (*Invited*)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2022, **51**(1): 20210935.
曹良才, 何泽浩, 刘珂瑄, 等. 元宇宙中的动态全息三维显示: 发展与挑战(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(1): 20210935.
- [168] Zhang C L, Zhang D F, Bian Z P. Dynamic full-color digital holographic 3D display on single DMD[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(3): 200049.
- [169] Zheng P X, Li J X, Li Z L, et al. Compressive imaging encryption with secret sharing metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(15): 2200257.
- [170] Ma D N, Li Z, Cheng H, et al. Multi-dimensional manipulation of optical field with metasurfaces and its optimization based on machine learning[J]. *Chin Sci Bull*, 2020, **65**(18): 1824–1844.
玛地娜, 李智, 程化, 等. 超表面多维光场调控及基于机器学习的优化[J]. *科学通报*, 2020, **65**(18): 1824–1844.
- [171] Shi L, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks[J]. *Nature*, 2021, **591**(7849): 234–239.
- [172] Shi Z J, Zhu A Y, Li Z Y, et al. Continuous angle-tunable birefringence with freeform metasurfaces for arbitrary polarization conversion[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(23): eaba3367.

作者简介



许可 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事超表面全息器件等研究。

E-mail: m202173389@hust.edu.cn



王星儿 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事超表面全息器件、激光微纳加工等研究。

E-mail: xinger_wang@hust.edu.cn



【通信作者】高辉 (1991-), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳光学、超表面、全息显示等研究。

E-mail: Gaohui_wnlo@hust.edu.cn



【通信作者】熊伟 (1982-), 男, 博士, 教授, 主要从事激光微纳极端制造、智能激光制造、全息显示、微纳光学等研究。

E-mail: weixiong@hust.edu.cn

团队介绍

华中科技大学武汉光电国家研究中心微纳光电子实验室团队由国家级人才计划入选者熊伟教授领衔, 由三位教授、一位副教授及四十余位博士生、硕士生及科研助理组成。团队依托武汉光电国家研究中心和湖北光谷实验室, 多年来致力于激光微纳加工、极端激光制造、微纳光学、全息显示等领域研究, 开展了一系列开拓性工作, 承担包括国家重点研发计划、国家自然科学基金面上项目在内的多项项目, 相关成果在 *Science Advances*、*Nature Communications*、*Advanced Materials*、*Light: Science & Application*、*Nano Letters* 等国际权威期刊发表论文 140 余篇, 共申请和授权国内外发明专利 40 余件。

团队教师简介如下:

熊伟教授, 国家级人才计划入选者, 武汉光电国家研究中心激光功能实验室主任。在本领域国际会议如 Photonics West、MRS、ICALEO 等报告 20 多次, 曾获美国激光协会 ICALEO 国际会议最佳论文奖, 并曾担任美国激光协会 ICALEO 会议激光纳米加工与制造的分会主席、POEM 国际会议激光分会的共主席、中国机械工程学会极端制造分会委员会委员, 目前担任《中国激光》和《光电子学前沿》(FOE) 编委、《极端制造》(IJEM) 青年编委, 以及湖北和武汉激光学会副理事长。

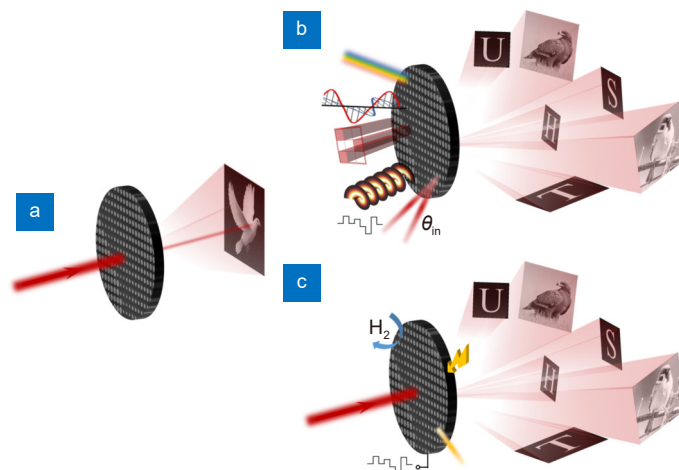
邓磊敏研究员, 湖北省“百人计划”入选者, 在激光先进制造技术领域开展了一系列开拓性工作, 解决了舰船防腐、大尺寸晶体切割等方面多项难以克服的问题。在本领域具有重大影响力的国际会议如 Photonics West、ICALEO 等报告 6 次, 并获得美国激光协会 ICALEO 国际会议最佳论文奖。部分专利以华中科技大学为第一单位成功转化, 共计 500 余万元。

段军教授, 致力于激光微加工新工艺和新设备, 作为负责人共进行 16 项课题的研究, 相关研究成果已直接应用于生产实际并产生了巨大经济效益, 创造产值近四千万美元。先后获省科技进步一等奖 1 项, 省科技进步二等奖 1 项。曾作为负责人主持承担了包括 863 计划项目等多个国家重大科研项目, 研制用于制备第 x 代战机隐身雷达罩的《三维激光刻蚀设备》负责人之一。

高辉副教授, *Opto-Electronic Advances* 武汉办公室主任, 中国仪器仪表学会全国优秀博士论文奖获得者。主持国家自然科学基金、湖北省科学基金等多项国家及省部级项目, 并入选武汉市“曙光计划”项目, 多次在 APNFO、AOMATT 等国际会议作邀请报告。同时担任中国仪器仪表学会科普专家、北京科学中心特邀审核专家、Light 科普坊科学家顾问团成员、《科学世界》等杂志撰稿人, 知乎“科学盐究员”, 腾讯新闻、搜狗科学等机构科学顾问。

Meta-holography: from concept to realization

Xu Ke^{1†}, Wang Xinger^{1†}, Fan Xuhao¹, Liu Yuncheng¹, Yu Xuan¹, Gao Hui^{1,2*}, Xiong Wei^{1,2*}



Schematic of meta-holography. (a) Static meta-holography; (b) Multiplexed meta-holography, which means dynamic display can be realized by controlling the fundamental properties of incident light; (c) Active meta-holography, which means metasurface itself can be changed in response to optical, electrical, thermal, or chemical stimuli

Overview: As an ideal 3D display technology, holography can reconstruct the wavefront of the whole light wave, and can provide all the 3D depth cues required by the human eyes, including binocular parallax, motion parallax, accommodation, occlusion, etc. Due to the limitation of the modulation principle, DMD and most SLM cannot optically reconstruct the complex amplitude of a wavefield, resulting in partial information loss and complex wavefront calculation. At the same time, the two devices have a pixel size larger than $6\ \mu\text{m}$, which is much larger than the wavelength of visible light. The limitation of large pixel size and modulation principle brings many disadvantages, such as narrow field of view, twin-image, narrow band, and multi-order diffraction, which greatly restrict the development of CGH. As a new class of light field modulators, metasurface can control the amplitude, phase, polarization and dispersion of the light simultaneously by optimizing the design and arrangement of the elements. Thanks to the previous exploration of micro-nano manufacturing technology and materials for metasurface, the size of the unit cell can be reduced to the order of sub-wavelength. According to the grating equation, the smaller the pixel size is, the larger the diffraction angle is. Therefore, metasurface can provide a diffraction angle close to 90° . As the loading medium of holograms, metasurface meets the requirements of holograms for high-precision and complex light field modulation and has the advantages of high design freedom, high spatial resolution, low noise, broadband and so on, providing a solution to some problems currently faced by CGH. In this paper, the basic process of designing meta-holography devices is discussed. Furthermore, the basic concepts and development of static meta-holography are introduced based on the principles of metasurfaces, including phase modulation, amplitude modulation, complex-amplitude modulation, and nonlinear modulation. However, such static meta-holography devices cannot change the display patterns after design and manufacture, which is inconsistent with the rapidly changing real world and requirements of diverse functions, limiting its applications. Therefore, the two methods of realizing dynamic meta-holography are introduced in detail. Finally, the micro-nano fabrication technologies for metasurface are discussed. In conclusion, this paper presents the design, principle, development, and manufacturing implementation of meta-holographic devices in an all-around way, and puts forward problems and possible solutions for the development of meta-holography at present.

Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220183; DOI: 10.12086/oe.2022.220183

Foundation item: National Key R&D Program of China (2021YFF0502700), National Natural Science Foundation of China (62205117, 52275429), Knowledge Innovation Program of Wuhan-Shuguang, and Innovation Research Project of Optics Valley Laboratory.

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; ²Optical Valley Laboratory, Wuhan, Hubei 430074, China

* E-mail: Gaohui_wnlo@hust.edu.cn; weixiong@hust.edu.cn

†These authors contributed equally to this work.