

新型功能超颖表面波前调制技术的发展与应用(特邀)

黄玲玲, 魏群烁, 王涌天

(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)

摘要: 超颖表面作为一类智能表面, 通常由特殊设计、加工而得到的特征尺寸接近或小于波长的亚波长纳米天线阵列构成。超颖表面能够实现光场的振幅、相位和偏振的人为调控, 具有超薄、超小像素、宽带、低损耗、易加工等优势, 设计灵活, 功能强大。文中针对超颖表面在全息显示、波前调制和偏振转换、主动可调、非线性波前调控等方向进行综述, 并展望未来发展趋势。超颖表面作为一种超薄的、微型化的波前调制器件, 具有极大的信息容量, 且更能适应未来高度集成的微型光电系统的发展要求, 在全息显示、光束整形、涡旋光束的产生、数据存储、加密与防伪、超透镜与色散控制、彩色印刷、非对称传输、非线性光学、光的自旋霍尔效应、光通信与集成光电子学等应用领域提供了潜在的可行性和新的视角, 有望取代传统光电器件, 展现出了广阔的发展前景。

关键词: 超颖表面; 全息显示; 波前调控; 偏振转换; 主动可调; 非线性调控

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1002001

Development and applications of wavefront modulation technology based on new functional metasurfaces(Invited)

Huang Lingling, Wei Qunshuo, Wang Yongtian

(MoE Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As a kind of smart surface, metasurfaces are usually composed of sub-wavelength nano-antenna arrays which are specially designed and processed with characteristic sizes close to or less than their working wavelengths. Metasurfaces can arbitrarily modulate the amplitude, phase and polarization of the light field. It has the advantages of ultra-thinness, ultra-small pixels, broadband, low loss, easy processing, flexible design and great functionality. This paper reviews the research progress of metasurfaces in holographic display, wavefront modulation and polarization conversion, active tunable, nonlinear wavefront modulation, and looks forward to the future development trend of metasurfaces. As an ultra-thin and miniaturized wavefront modulation device, metasurfaces have great information capacity and are more suitable for the future development of highly integrated micro optoelectronic systems. Metasurfaces provide potential feasibility and new perspectives for a plethora of applications such as

收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2019-09-21

基金项目: 北京市卓越青年科学家项目(BJJWZYJH01201910007022); 国家自然科学基金面上项目(61775019);

北京市科技新星(Z171100001117047); 北京市面上项目(4172057); 教育部霍英东高校教师基金(161009)

作者简介: 黄玲玲(1986-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光学、计算全息、表面等离子激元及深度学习等方面的研究。

Email: huanglingling@bit.edu.cn

魏群烁(1993-), 男, 博士, 主要从事超颖表面与全息技术方面的研究。Email: weiqunshuo@bit.edu.cn

通讯作者: 王涌天(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事技术光学和虚拟现实等方面的研究。Email: wyt@bit.edu.cn

holographic display, beam shaping, vortex beam generation, data storage, encryption and anti-counterfeiting, metalens and dispersion control, color printing, asymmetric transmission, nonlinear optics, the spin-Hall effect of light, optical communication, integrated optoelectronics. They are expected to replace the traditional optoelectronic devices and show broad prospects for future development.

Key words: metasurface; holographic display; wavefront modulation; polarization conversion; active tunable; nonlinear wavefront modulation

0 引言

超颖表面具有独特的在亚波长尺度上任意调制入射电磁波的相位、振幅和偏振的能力,能够实现近场或远场的调控,产生各种特殊的光学效应,具有强大的多功能性,近年来吸引了研究人员的广泛关注,成为一个快速发展的研究领域^[1-4]。超颖表面本质上可以理解为周期、准周期或者随机排列的亚波长尺寸的天线阵列,阵列中的天线单元由金属或介质的特定几何结构及其间隙所构成,其波前调控机制并不依赖于光传播过程中的积累作用,而是精心设计纳米天线的几何形状、结构尺寸和空间方位角等,利用其对入射光场的强烈响应来实现相位突变、振幅变化以及其他参量的调控。与传统光学元器件以及体超颖材料相比,超颖表面能有效减小器件尺寸,具有超薄化、超小像素和宽带特性等优点,加工难度和制造成本相对较低,欧姆损耗小,在与片上纳米光子器件集成方面具有显著优势。超颖表面设计灵活,功能强大,为各类光学系统的设计提供潜在的可行性和新的视角,在全息^[5]、涡旋光束的产生^[6-8]、数据存储^[9-10]、加密与防伪^[11-12]、超透镜与色散控制^[13-14]、彩色印刷^[15-17]、非对称传输^[18]、非线性光学^[19-21]、光通信与集成光电子学^[22]等应用领域都极具潜力,为光学元器件向微型化,集成化和多功能化发展描绘了一幅宏伟的蓝图。

目前已报道的超颖表面波前调控大致基于三类设计思想:(1) 光学天线辐射场相位的超前或滞后,通过调节每个光学天线的尺寸和方位角等几何参数,获得对透射或反射电磁波相位的调制能力,典型结构包括 V 型天线^[23]、Y 型天线、C 型天线等;(2) 将超颖表面结构单元对电场和磁场的极化响应等效为次级波源,构建惠更斯超颖表面,通过控制表面电、磁极化率来达到完全消除反射的目的,这种设

计方法首先在微波波段完成了实验验证^[24],之后应用于全息领域的惠更斯超颖表面也被报道了出来^[25];(3) Pancharatnam-Berry 相位(简称贝里相位),特别地,贝里相位是指,同一偏振态的入射光经过不同的偏振态改变过程达到相同的最终偏振态时会产生不同的相位变化,该相位差与邦加球表面划过的路径有关,具有纯几何性质。

随着超颖表面和微纳加工技术的发展与更迭,目前超颖表面领域的研究重点已由原理挖掘向实用化方向推进。为了在实际应用中增加超颖表面的信息容量,将不同的功能整合到一起,或获得独特的光学性质,必须充分利用超颖表面具有的优异的波前调控能力和极高的设计自由度,深入挖掘可行的突破方向。除了针对静态超颖表面的各种复用技术以外,另一个典型的方法是使用相变材料或其他方式,通过光、热、电、磁、力等外部刺激改变超颖表面的电磁场调控特性,避免材料特性和固定结构的阻碍,设计动态可重构超颖表面。此外,利用强光场(例如飞秒激光脉冲)与纳米天线之间的相互作用来产生非线性效应,以此引入新的频率设计自由度,用超颖表面实现电磁波的非线性调控也是当前备受关注的研究领域。根据所选择的不同形状尺寸、不同材料组分的光学天线以及所运用的不同波前调控机制,利用超颖表面可以进行相位、振幅、角动量、偏振、频率及色散调控,实现可设计的光谱响应特性,动态可切换特性,非线性谐波生成及波前调控特性等等独特的光学性质。

文中将主要从超颖表面近年来在全息显示、波前调制和偏振转换等各个领域着眼,对超颖表面的研究进展进行概述,并介绍主动可调、超颖表面非线性波前调控等新兴研究方向,最后对超颖表面潜在的未来发展方向提出了展望。

1 超颖表面计算全息技术

全息技术是利用干涉记录和衍射再现的原理重建真实三维图像的技术。通常,全息图记录的并不是一幅图像,而是看似“随机分布”的一系列振幅和相位的分布。由于全息技术能够有效实现图像深度信息的重建,故具有其他显示技术无法比拟的优势,被认为是终极的三维显示方案。近年来,基于全息技术的应用研究取得很大发展,在立体显示、干涉测量、数据存储、医疗成像、遥感成像、图像处理和识别等方面具有广泛的应用。值得注意的是,全息技术中的一个前沿热点领域是将全息原理与微纳光学结合,把全息图中复杂的振幅和相位分布用二维排布的亚波长结构进行编码。与传统的基于空间光调制器的全息显示技术相比,该方法在保留超颖表面超薄、紧凑特性,极大地促进了全息器件的微型化的同时,还依靠其亚波长像素尺寸和宽带性质克服了传统全息所面临的诸如存在多级衍射级次串扰、视场角小、带宽窄、存在孪生像等挑战,极大地提高了目标图像的再现质量。

为了充分利用超颖表面具有的优异的波前调控能力和极高的设计自由度,各种不同几何形状和材料的纳米天线被设计出来作为超颖表面的基本组成单元,且基于超颖表面实现全息显示的各类方案,如高效率纯反射全息显示^[26]、透射反射双空间全息显示^[27]、矢量全息显示^[28]等也被陆续提出。

由于贝里相位(或称几何相位)调制原理具有宽带无色散特性,相位与振幅独立且连续可调,相位符号与入射/出射偏振态组合相关(手性依赖性),结构设计简单等优点(可用于实现贝里相位的超颖表面结构单元包括棒状结构、矩形柱结构、椭圆柱结构、偶联极子结构等)。以金属棒状纳米天线为例,通过旋转纳米天线的方位角朝向,即可在保持振幅均一的情况下编码出连续可调的局域相位信息,排布出计算全息图所需的相位分布^[29]。在实验中,对某一手性入射光,取相反手性的出射圆偏振光即可获得所需光学再现像。这种方法可以有效增大三维全息的视场角,实现零级光束同轴再现,并可以避免多级衍射像。相比而言,利用依赖于光学天线的谐振响应的超颖表面全息,由于缺乏对光场振幅和相位的独立

调控,需精细设计结构的参数,相关器件的制备需要复杂的微纳加工技术。

对于超颖表面全息技术相关器件来说,信息容量是非常重要的性质,信息容量越高,可以复用的图像就越多。为了提高全息图的信息容量,在不增加像素数目的情况下,用一张全息图同时记录两个或者多个物体的技术称之为全息复用技术,这通常需要构造新的编码单元,引入新的自由度,增加了编码单元设计的复杂性。目前比较常见的超颖表面全息复用技术包括合成谱法、空间复用、位置复用、偏振复用^[30]、波长复用^[31]和角度复用^[32]等,这些方法利用全息算法编写,光学天线的排布方式、结构特征,波前调制机理等不同途径引入了新的自由度,大大增加了超颖表面的信息容量,使其获得了作为低成本、高性能的大容量全息显示和数据存储系统的平台的能力。

常用的一类全息复用方法是将对应不同波前频谱分布的两组光学天线直接空间交错加工于同一个基底上,即使用空间复用的方式合成为一个总的全息图,如使用线偏振光入射结合两组相互正交的亚波长天线进行线偏振复用,或使用圆偏振光入射依靠两组交错分布的亚波长天线进行圆偏振复用等^[33-34]。这些空间复用原理直观,全息图和超颖表面设计方法简单,但只能重构少量的图像,且不可避免地降低了每个全息图可用的空间带宽积,信息容量相对有限,无法满足诸如信息存储和加密等实际应用的需要。为进一步提高全息图信息容量,可以利用合成谱法^[35],如图 1(a)所示,将具有不同相移的多个全息图线性叠加,得到总的合成全息图的复振幅,结合贝里相位超颖表面具有的手性依赖的相位调控特性,并将偏振、位置和角度三种参数集成在一起作为每个原始图像的唯一重建指标,实现三种复用途径单独和混合的全息复用方案。在这一方法中,由于每个原始图像的全息图都可以单独计算,故可以简化数值计算过程,减少时间和内存消耗。该合成谱法需要合理调整再现像的距离间隔和其它相关因素,尽量避免和降低不同再现像之间的串扰;另一方面,单层透射型纳米棒阵列的成像效率往往不够高,若适当优化单元结构,采用金属偶联级子、反射式金属-介质-金属结构、介质谐振腔结构等,则可以获得

更高的转换效率。例如,利用金属偶联极子的缺口处所激发很大的场增强,能显著提高超颖表面的能量利用效率,相比普通的金属纳米棒能够提高偏振转化率约 50%,同时,结合 3D-Fienup 算法实现相位恢复,获得包含不同再现位置的多个物体的全部信息的计算机生成全息图^[36],使用多平面空间复用以及偏振复用两个复用方式,即可使得全息图获得重建八幅或更多的目标图像的能力,极大地增加了超颖全息图的信息容量,如图 1(b)所示。以上工作提供

了一种可见光和近红外波段的亚波长像素、超薄、大视场角、大容量的全息复用方法,该方法能够通过仔细调整迭代算法中的反馈函数以及不同再现像所在平面之间的间隔距离,有效降低不同再现像之间的串扰,通过选择入射圆偏振光和出射圆偏振光的偏振态、再现位置等参数,实现多幅不同的全息图像的同时记录和再现,可作为数据存储、模式识别、信息处理和光学加密的平台,且在三维全息显示等应用领域具有很大的潜力。

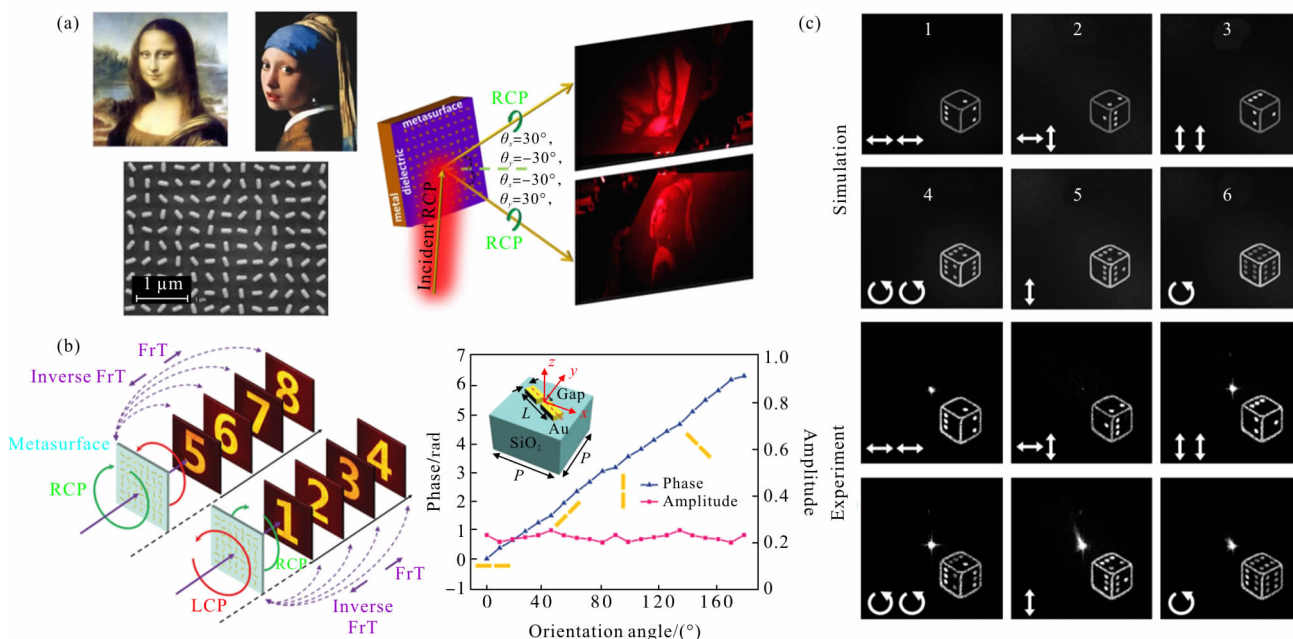


图 1 (a) 全息图频谱合成复用方法示意图;(b) 基于 3D Fienup 算法的偏振和位置复用技术示意图;(c) 将多个偏振态的不同空间相位分布集成到单个双折射矢量全息图中,实现大信息容量的偏振复用超颖表面

Fig.1 (a) Schematic diagram of hybrid holographic multiplexing; (b) Schematic diagram of polarization and position multiplexing based on 3D Fienup algorithm; (c) Integrating different spatial phase distributions of multiple polarization states into a single birefringence vector hologram to realize polarization multiplexing metasurface with large information capacity

另一方面,超颖表面全息器件能够克服自然界材料(如空间光调制器、光刻胶)对偏振不敏感,仅能实现标量全息的限制。利用由介质纳米圆柱或矩形柱构成的双折射介质超颖表面,可以实现高效率的透射型全息偏振复用。利用传播相位和贝里相位两种调控机制相结合的方法,使用具有各向异性矩形或椭圆形横截面的纳米柱超颖表面,即可在任意一对正交偏振态(线偏振光、圆偏振光或椭圆形偏振光均可)上施加两个独立且任意的相位分布^[37]。该方法为偏振复用超颖表面的设计提供了一种崭新的思

路,从而扩展了超颖表面偏振光学的应用范围。在此基础上,为了完全利用所有的入射和出射光的偏振通道,通过分析琼斯矩阵,结合偏振旋转矩阵,可以实现定量关联的相位调制自由度,从而将多个偏振操纵通道的不同空间相位分布集成到了单个双折射矢量全息图中^[38]。如图 1(c)所示,该方法将具有预先确定定量关系的,可以在不同偏振状态下处理不同信息的多个独立的相位分布集成到了同一个超颖表面之上,可以实现十二个不同偏振通道的七种不同偏振图像组合和复用,极大地提高了全息图的信息

容量,且具有高保真度、高效率、可宽频带操作等诸多优势。

实现彩色全息术的主要挑战是独立地记录和重建不同颜色分量上的振幅和相位信息,为此,必须采取改进的编码方法或给予每个超颖表面基本单元额外的设计自由度。实现多色超颖全息图最直观的方法是采取的空间复用的思路,利用彩色显示中的像素分离法,在同一个像素内设置多个亚像素分别布置对应不同波长的多种纳米天线,并将它们合并为一个整体的彩色全息像素,例如将不同几何尺寸的硅纳米块在同一个亚波长单元中进行复用排布,即可同时对多个波长的波前进行调控,实现彩色图像的重建^[39]。此外,还可以利用复合彩色全息编码方法,只使用单一类型的宽带等离子体像素利用不同的离轴照明角度来实现不同波长再现像之间的分离,克服串扰的限制,大大提高全息图的信息容量和再现像的信噪比^[40-41]。但是,普通的超颖表面全息图仅编码相位分布或深度信息,在非相干光的照射下通常呈现为随机的无特征的图案,无法用来调制光谱响应。在现有的光谱调制应用中,基于超颖表面光谱响应的彩色印刷具有很大的潜力,其亚波长的分辨率远远超越了当前的普通颜色显示技术的分辨率极限。为了充分利用超颖表面具有的优异的波前调控能力和极高的设计自由度,迫切需要一种能够通过单个超颖表面同时对波前的空间信息和光谱信息进行调制的方法,以便将微纳全息技术与超颖表面彩色印刷技术相结合,进一步提高超颖表面的信息容量。近年来,仅有很少的相关研究展示了同时实现彩色印刷和全息加密的可能性,如将介质相位片与介质柱阵列整合到一起的方法^[42],利用十字形天线正交偏振选择性^[43]和基于三维集成超颖表面器件的设计方案^[44]等。但这些方法或是存在着制造难度大、加工效率低的缺陷,或是设计复杂,可控性不足,光谱和相位的调制并不完全独立。为了解决上述问题,一种全介质超颖表面彩色印刷和全息加密共同调制方法被提了出来,该方法使用对应不同结构色各自光谱响应的多种介质纳米天线作为基本组成单元来构建全介质超颖表面,通过并行 Gerchberg-Saxton 算法针对超颖表面彩色印刷模式下的彩色图案区域划分进行索引,同时且独立地获得波长复用超颖表

面全息图针对不同波长的不同相位分布,并使用贝里相位调制原理实现相位调制,即可实现彩色印刷和全息加密共同调制。该种全介质超颖表面能够同时调制超颖表面的光谱响应和出射波前的空间相位分布,在白光照射下呈现为显微彩色图像,同时在特定的几个波长的相干单色激光照射下能够在远场分别再现出具有较高效率的不同的全息再现像,实现极低串扰的高质量彩色全息显示。

作为一种二维平面结构,超颖表面在光波传播方向上的非对称性较低,通常遵循互易性定理,因此,在超颖表面光学系统中,背向传播时的透射率往往是与正向相同的。破坏沿传播方向的对称性对于通信系统中的很多光子学器件来说是必不可少的,对于保护激光系统免遭背向反射的破坏等其他许多领域也非常重要。近年来,为了提高偏振转换效率或实现特定偏振状态下的非对称传输特性,多层的级联超颖表面系统被提了出来^[45-47]。但是,这些多层超颖表面通常仅能实现透过率、反射率或吸收率的非对称传输,无法同时调制出所需的相位分布,大大限制了这些多层超颖表面的实际应用前景。基于多层超颖表面的非对称波前调制方法,将全息术和非对称光传播的概念建立在了双层级联超颖表面的结构基础之上^[48]。该方法将计算机生成全息图编码到多层超颖表面的各个像素中,利用不同形状尺寸的双层金属 L 形纳米天线-偶联极子天线实现相位调制,偏振通道的选择性则归因于金属偶联极子天线的级联。样品采用逐层制备工艺,即分次的电子束光刻和剥离工艺加工出级联的多层超颖表面,在金属 L 形纳米天线与金属偶联极子天线之间通过热蒸镀沉积了一层二氧化硅间隔层,并基于全局标记和写入字段标记等不同标记的对准过程实现了较为精确的对准。如图 2(a)所示,该方法将所编码的全息图与级联多层超颖表面的非对称传输特性相结合,使再现像只能在特定的偏振状态和入射方向对应的加密通道中被观察到,即实现了与传播方向相结合的偏振加密全息显示功能。

目前,超颖表面对自由空间传播光束的波前调控通常依赖于相位调制,而作为另一个设计自由度,振幅信息则经常被忽略,这是由于振幅调制超颖表面相对于相位调制超颖表面通常效率较低,且振幅

的定量调控相比相位更为困难。振幅的调控通常利用局部像素的透射或者反射来实现，最常见的振幅调制方法通常是二值的，即利用 0,1 两个值来编码全息面上的振幅信息，并再现出质量合格的重建图像。尽管基于相位全息的动态调控方法已经有了一些相关报导，但适用于超颖表面振幅全息的动态调控方法至今为止仍无所斩获，这是因为在亚波长尺寸下，即使利用可变材料，对单个像素进行任意的振幅信息的擦除和写入都是十分困难的。针对这一处境，基于光子筛的定量相关振幅全息方法被提了出来，该方法通过用振幅形式表现相位信息改进传统的相位检索 GS 算法生成二值振幅全息图，并通过引入“全息掩膜”的概念建立两个独立的二值振幅全息图之间定量的关联关系，通过测量峰值信噪比 SNR 进行评估，循环优化得到成像质量相对较高，

引入的串扰相对较少的一组全息再现图像对应的定量关联振幅全息图作为振幅全息图输出结果。由于上述的两个二值振幅全息图之间可以通过只写入振幅信息或只擦除振幅信息来相互转化，故尽管采用现有的材料技术不能完全对超颖表面所编码的振幅信息进行擦除或者写入，用透明单元编码振幅为“1”的像素，用不透光单元编码振幅为“0”的像素，即可将这两个互相关联的二值全息图分别编码加工到透射型金膜光子筛上，用可见光或近红外入射光照射，即可在傅里叶面上全息复现得到两个完全不同的再现像，如图 2(b)所示。振幅全息的动态调控能够利用一个超表面结构在不同的条件下全息再现出两个完全不同的图像，对于数据存储、信号处理、光学加密防伪以及双模式识别等领域有着巨大的实用价值。

除了常见的平面超颖表面外，带有一层超薄超

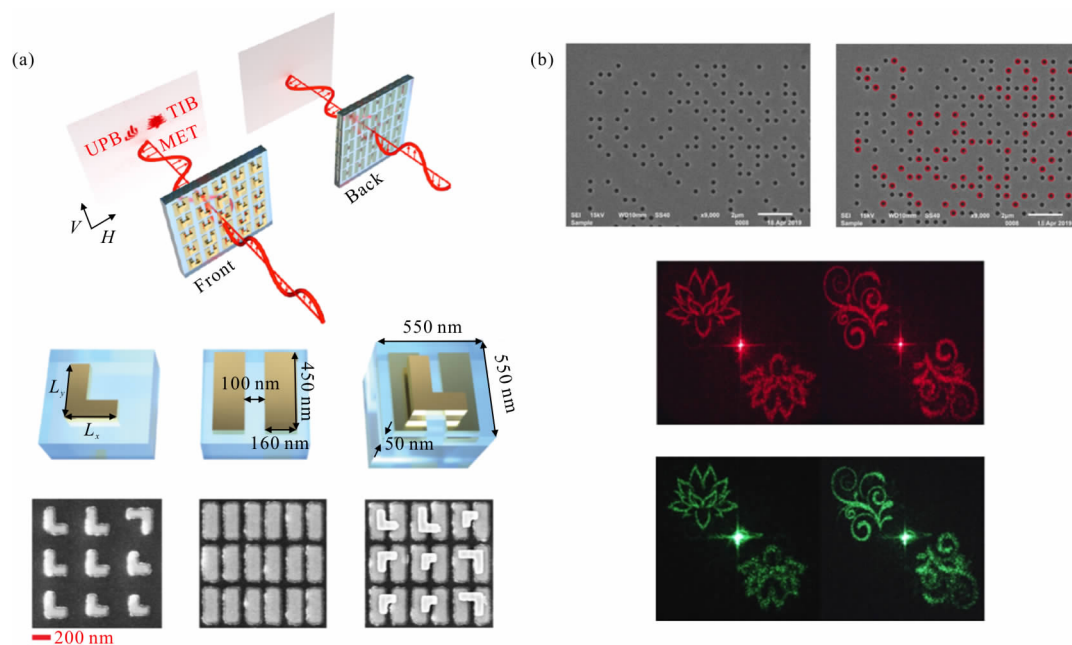


图 2 (a) 基于多层超颖表面的非互易性非对称偏振加密全息图；(b) 基于光子筛的定量相关振幅全息方法实验结果

Fig.2 (a) Non-reciprocity asymmetric polarization encrypted hologram based on multilayer metasurface; (b) Experimental results of quantitative correlation amplitude holographic method based on photon sieve

颖单元的曲面物体被称为共形超颖表面^[49-51]。尽管共形超颖表面仍然面临着一系列的挑战，如当入射光通过具有任意拓扑轮廓的弯曲物体时，散射波前将引入随机相移并向不同方向散射，造成设计困难。现有共形超颖表面的设计理论非常复杂，通常使用广义的薄层跃迁条件、场等效原理或改进的时域有限差分(FDTD)方法。为了简化共形超颖表面的设计

过程，促进其多功能化，一种自适应的共形超颖表面被提了出来^[52]，该共形超颖表面的每个单元是由不同几何尺寸的介质亚波长的二氧化钛纳米圆柱组成，能够通过改变纳米柱单元几何半径和高度，使得相位覆盖 $0\sim 2\pi$ ，同时振幅接近于 1。根据光线追迹的方法或时域有限差分法，通过麦克斯韦方程组，或衍射理论以及全息原理等理论分析方法，计算出具

有特定功能的相位分布,结合曲面散射和目标波前的光程差,即可逐点编码共形超颖表面,对出射光束的相位进行任意地调控,从而在透射方向实现透镜聚焦、异常折射、隐身和基于全息技术的幻象等功能,并且在垂直和微小倾斜角入射的情况下也可以实现相应功能。该共形超颖表面对于偏振不敏感并具有很高的透射效率。因此,这种共形超颖表面可以耦合到例如曲面屏、柔性显示、可穿戴电子产品、医疗设备或光电器件等领域的任意曲面平台上进行实际应用。

2 超颖表面波前调制与偏振转换技术

传统光学元件往往通过光在特定介质中累积传播的光程来实现波前调制,实现复杂功能时的光学系统复杂,体积较大,难以适用于未来集成化、微型化的器件发展趋势。从超颖表面的概念提出开始,其设计和研究不断向着改进和完善实用性的方向发展,对光场波前不同物理参数的操纵是其重要应用。上文所介绍的超颖表面全息技术主要是利用了相位调制的功能,除此以外,通过合理的原理选择和结构设计,超颖表面还可以用于对振幅、波矢、角动量、偏振态等光学参数的波前调控,用于涡旋光束的生成、轨道角动量的复用、光束整形、复振幅调制以及偏振转换等实际应用领域。

超颖表面能够实现角动量调控,例如可用于生成涡旋光束。涡旋光束是一种具有连续螺旋状相位的特殊光束,可携带不同数值的轨道角动量,并具有独特的中间暗,周围亮的“面包圈”状能量分布特征。在光束传播的截面方向,涡旋光束的相位分布可表示为 $\exp(il\varphi)$,其中 l 为涡旋光束的拓扑电荷数。目前已经提出的产生光学涡旋的方法包括螺旋相位板、计算全息图、厄米-高斯模式(HG)到拉盖尔-高斯模式(LG)的转换等。相比而言,利用超颖表面进行相位调制生成涡旋光束的方法能够大大缩小器件尺寸,实现超薄化,且可以具有宽带的特性,相关工作已取得一定程度的进展。目前的方法通常仅适用于生成单个或者有限数量个具有特定拓扑电荷数的光学涡旋^[53],在实际应用中,很多时候需要在有限空间内实现较大数量的具有不同拓扑电荷数的涡旋光束阵列,从而实现空间上的复用。光束阵列的生成通

常采用达曼光栅的设计,达曼光栅是传统光栅基础上的一种改进设计,通过对周期结构中各像素进行相位优化实现一维和二维光束阵列光场强度的均匀分布。传统的生成涡旋光束阵列的方法主要依赖于衍射光学器件或空间光调制器,通过达曼光栅与涡旋相位结构的结合实现,通常光学系统体积较大,光路相对复杂,无法满足实际应用的需要。为了解决上述问题,利用高衍射效率的介质超颖表面,与达曼光栅的优化设计思想相结合,并通过与达曼波带片的结合,将光束阵列扩展为三维结构,结合透镜因子进行集成化设计,利用严格耦合波分析法设计基于硅柱的介质型超颖表面,实现了强度均匀的高效率、大容量的三维涡旋阵列分布^[54]。如图 3(a)所示,三维涡旋阵列可以在可见光和近红外波段产生,各光学涡旋间的距离在微米尺度内,阵列中各涡旋的拓扑电荷数由对应的空间衍射级次,预设基础拓扑电荷数,以及入射光的轨道角动量决定,并可通过调控入射光的角动量以实现主动调控。此外,由于拓扑电荷数的数值理论上可以取任意值,因此,涡旋光束可以具有无穷多个相互正交的本征模,通过引入这一新的自由度,多种利用轨道角动量增加通信容量的新型光通信系统得以成功设计。同时,基于涡旋光束轨道角动量的设计在大容量数据的光学存储、信息编码、提高量子密钥分发系统的可靠性、微观粒子和生物细胞的操纵^[55]、激光加工等方面也具有重要的应用价值。目前,基于涡旋光束轨道角动量的通信系统所面临的主要挑战之一在于通过一种有效、紧凑和灵活的方法实现轨道角动量的复用。为此,提出了一种新颖的基于预先设计的反射式超颖表面芯片来实现不同轨道角动量光束的产生与合成的方法^[56]。与传统的轨道角动量生成方法相比,该方法具有工作波长宽、模式纯度高、设计灵活、体积小等优点。利用这一方法,成功地进行了基于单个超颖表面的自由空间轨道角动量复用通信实验,利用具有不同拓扑电荷数的四种涡旋光,以及两种不同偏振态,通过 28 GBaud 的正交相移编码信号进行了 448 Gbit/s 的数据传输。实验表明,超颖表面在大容量光通信系统中具有很好的应用前景。

贝塞尔光束具有非衍射特性,其形式是第一类贝塞尔函数。传统上,贝塞尔光束的产生方法主要包

括使用柱透镜,衍射光学元件,复合全息图或空间光调制器(SLM)等,但是这些方法通常受制于器件体积、光束质量、传输效率和传播距离,还受到有限数值孔径(NA)、偏振相关等问题的限制。为此,提出了一种基于惠更斯超颖表面产生贝塞尔光束阵列的方法^[57],该方法通过优化算法优化达曼光栅单元相位以实现均一功率的分束功能,并将结合了达曼光栅

相位、贝塞尔光束相位、柱透镜相位的总相位编码到同一超颖表面上。如图 3(b)所示,该种惠更斯超颖表面的每个结构单元仅由单个圆盘纳米柱构成,波前调控能力与入射光的偏振状态无关,能够有效提高所生成贝塞尔光束的质量,实现较长传播距离的高效率贝塞尔光束阵列产生。

通常情况下,振幅调制超颖表面相对于相位调

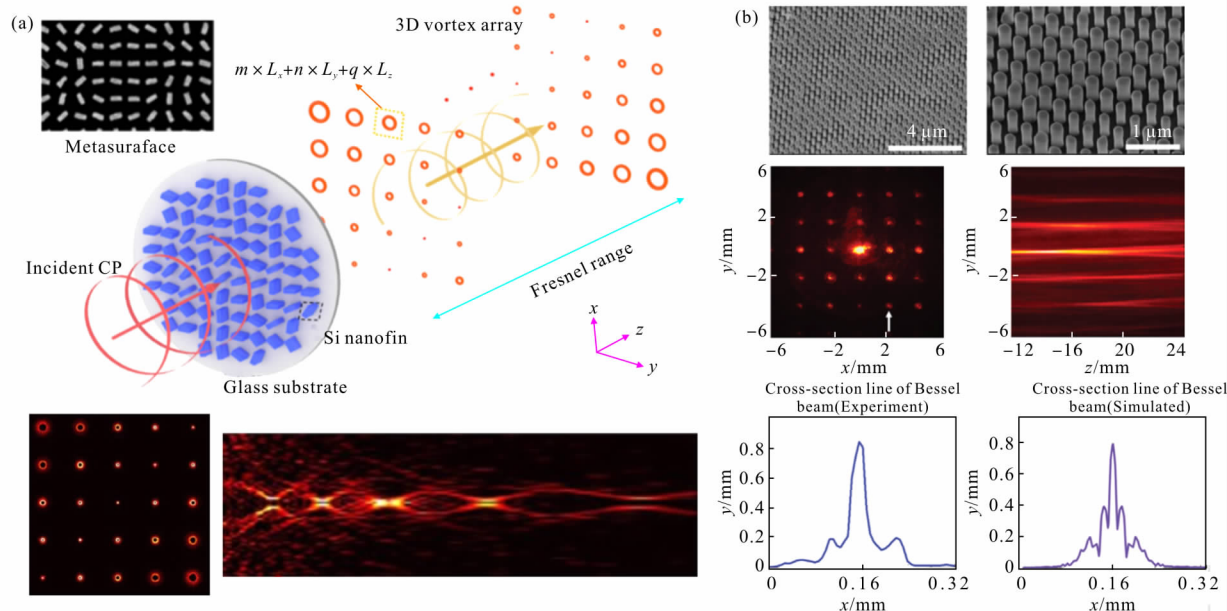


图 3 (a) 基于介质超颖表面的三维涡旋光阵列的生成和重建过程示意图;(b) 基于惠更斯超颖表面产生高效率贝塞尔光束阵列的方法

Fig.3 (a) Illustration of the generation and reconstruction procedure of a 3D vortex array based on a dielectric metasurface;

(b) High-efficiency Bessel beam array generation by Huygens metasurfaces

制超颖表面的效率较低,对于自由空间传播光束,复杂光场的波前调控通常依赖于相位调制。然而,对于某些更复杂的光场分布,如完美的全息成像、再现漫散射表面特性等场合,单一自由度的波前调制往往并不能满足实际需要,因此,需要构造振幅和相位调控相结合的超颖表面,实现完全的复振幅调控。此外,构造振幅和相位调控相结合的复振幅调制超颖表面,也是实现衍射级次独立选择性调控的一种可行的方法。在现有的研究中,用于实现透射光束复振幅调制的超颖表面结构设计有 C 形纳米天线结构^[58],L 形孔径和“回”字形谐振器构成的双层结构^[59]等,但多数相关的研究只限于太赫兹波段和微波波段,难以应用于可见光波段。基于扩展的贝里相位概念,利用 X 形纳米天线可以在可见光波段实现的振幅和相位的同时、连续和宽带控制^[60],尽管如此,X 形纳米天线的结构仍相对复杂,对加工精度要求较高,且一定

程度上限制了复振幅调制的调制范围。为了解决上述问题,基于贝里相位原理,一种利用简单的介质材料矩形纳米棒结构实现振幅和相位独立可调的复振幅调制的方法被提了出来^[61],该方法在强度均匀分布的衍射阵列的基础上,实现了二维衍射级次的选择性激发。在此种介质超颖表面结构中,相位波前调制的最终结果是贝里相位和纳米结构产生的动态相位二者的结合。纳米柱结构的方位角决定了贝里相位,另一方面,由于采用了不同几何尺寸的纳米结构,光束通过不同的纳米柱结构时会产生不同的初始相位变化,当方位角一致时,各结构动态相位延迟仍会有所不同。如图 4(a)所示,为验证设计方法,设计和加工样品中选定的衍射级次构成了“META”的图案,其他所有未选定的衍射级次则同时被抑制。这种复振幅调制超颖表面为衍射级次的选择性生成和独立调控提供了新的途径,在光束整形、并行激光加

工、纳米尺度光学探测等领域有着潜在的应用价值。上述复振幅调制方法除适用于自由空间传播光场的调控外,也可以实现对表面等离激元的调控。例如,可以提出一种通过纳米孔径阵列的超颖表面生成表面等离激元,并通过复振幅调制控制表面等离激元传播,进而形成任意表面等离激元波前分布的方法^[62]。该方法通过设置每个纳米孔径的方位角和几何尺寸,根据贝里相位和透过率参数的变化,同时实现了相位和振幅的调制,如图 4(b)所示,该方法可用于生成表面波艾利光束以及轴对称艾利光束等。这种基于超颖表面复振幅调制进行近场调控的方法在许多领域有着潜在的应用价值,如等离子光束整形、集成光电子系统、表面波全息技术等。

另一方面,偏振是电磁波的基本性质之一,要完全表征电磁波的横波特性不仅要考虑场量复振幅的大小,而且还要考虑其偏振方向。控制电磁波的偏振态,实现不同偏振态之间的转换,在光学传感,光学加密,成像、通信和化学成分分析等领域都具有广泛的应用。调制电磁波偏振态的传统方法主要是利用材料的各向异性特性,如使用晶体和液晶等具有双折射性质的材料,使寻常光和非寻常光之间产生不同的相位改变积累,在出射时形成相位差,从而实现偏振态的转换。这类传统方法的缺点主要包括带宽窄、尺寸大以及可选用材料种类少等,不利于光学设备的微型化和集成化。由于超颖表面能够通过适当设计的各向异性的谐振纳米天线或纳米天线来引入

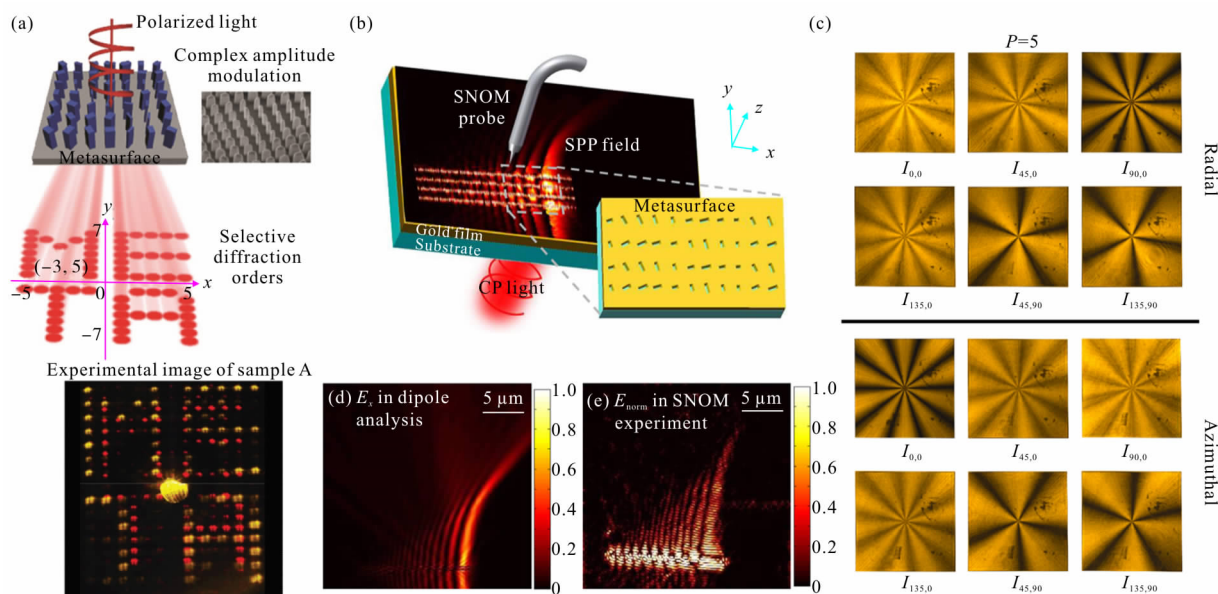


图 4 (a) 用于生成任意二维衍射级次分布的复振幅调制介质超颖表面示意图;(b) 基于复振幅调制超颖表面的近场表面等离激元波前调控;(c) 利用由相同几何尺寸的硅纳米柱阵列构成的超颖表面产生柱矢量光束

Fig.4 (a) Schematic illustration of the complex amplitude modulation for arbitrary 2-D diffraction order distribution with a dielectric metasurface; (b) Near-field plasmonic beam engineering with complex amplitude modulation based on metasurface; (c) Generating cylindrical vector beams based on metasurface consisting of silicon nanofins of the same geometrical size

强烈的双折射现象,使得其在偏振光学中也具有广阔的前景。通过精密设计单层或多层超颖表面结构,已经有多种基于超颖表面的偏振态的调控方案被提了出来,然而在近红外波段工作的高效率超宽带的线-圆偏振转换器鲜少被实现。针对这一缺憾,使用一种精心设计的非手性的镜像对称的 Ω 形天线,利用金属-介质-金属的 MIM 结构,提出并验证了一种针对近红外波段的灵活轻便、超高转换效率和超

宽工作带宽的偏振转换器件^[63],该种超颖表面偏振转换器件是一种全固态、超薄、平面的光学器件,可广泛适用于小型化、集成化光电应用中。除了通常所说的线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光等空间均匀的偏振光束以外,与之相对应的另一类光束是空间不均匀的偏振光束,这类光束在其横截面上的偏振随空间位置变化而变化,也被称为矢量光束。柱矢量光束是矢量光束种非常典型的一类,其光束横截面

上的偏振方向关于光束传播轴对称分布,其中典型的两类光束是径向偏振光束和角向偏振光束。传统产生矢量光束的方法中存在着实验光路复杂或所用到的光学元件的几何尺寸较大等缺点,因此限制了此类方法在微型化、紧凑型的光学系统中的实际应用。致力于解决上述问题,提出了一种利用相同几何尺寸、不同方位角的硅纳米柱阵列构成的超颖表面,产生柱矢量光束的方法^[64]。如图 4(c)所示,该方法通过纳米柱的旋转对出射光场偏振方向进行调控,可用于产生任意阶数的柱矢量光束,并可通过改变入射光的偏振态,实现矢量光束空间偏振态的改变。

3 主动可调超颖表面

尽管超颖表面具有优异的电磁调控特性,但受到加工能力、材料特性、固定结构的限制,设计在近红外和可见光波段工作的可重构超颖表面,实现其光学特性乃至功能的主动可调仍是一项颇具挑战性的任务。当前构建主动可调超颖表面的方法,包括使用可机械拉伸的基底,经过机械拉伸在特定距离上实现重建图像的动态切换^[65],但这一方法对基底材料的物理性质要求较高,且难以保证调制精度。另一类值得注意的途径是通过引入物理性质可调的材料,如相变材料和二维材料等,实现对表面结构谐振性质的调控。相变材料,如 GST、GLS、铋化锗和二氧化钒等,是构建主动可调超颖表面的常用材料,在适当的热、光或电等刺激下,它们的原子阵列会在非晶态和晶态(或半导体态和金属态)之间发生变化,产生较大的折射率差,提供灵活的光学参量控制能力,且其物理性质具有可逆性,非易失性等独特的优良特性,因此在主动可调超颖表面的设计中具有较大潜力。

通过相变材料和超颖表面的结合可以设计出很多新颖的多功能微纳器件,如焦距可变的可调谐超透镜、基于共振 V 天线的可调谐波片、偏振转换器件和彩色/多波长选择性衍射器件、模拟突触等等^[66-70]。基于相变材料与超颖表面复合结构的主动可调偏振转换器件是其中一个非常典型的例子^[71],如图 5(a)所示,通过在 V 型纳米天线超颖表面与基底之间引入周期排布的相变材料 GST 与硅条,利用 GST 在外加激励下的相变特性调节 V 型纳米天线局域表面

等离激元(LSP)的局部介电环境,以改变彼此正交的出射线偏振光之间的相位差,实现了一种中红外波段的,灵活,高速的动态可调偏振转换器件。该方法使用的相变材料 GST 成本较低,在飞秒激光泵浦,热烘烤等外加激励下均可灵活转换晶态和非晶态,并可以多次重复使用,可显著提高器件稳定性,扩展其动态应用范围。另一方面,GST 同样可以用于动态全息显示与信息加密等领域,使用开口谐振环(SRR)微纳天线与 GST 间隔层相结合可以构建一种合成超颖表面,并以此为基础提出了两种实现动态加密的新方法。一种加密策略是通过 GST 间隔层施加外部刺激使其在非晶和晶态之间切换,两种状态分别对应两个完全独立的,具有理想的重建质量的全息图;另一种策略则是将全息术与干涉成像技术相结合,通过目标全息图的相位分布确定 GST 处于非晶态时的目标相位,同时根据二元相位干涉成像的模式确定 GST 处于晶态时的目标相位,对超颖表面上的纳米天线进行选择 and 排列,这种方式除了可以再现一幅全息图外,使透射光中与入射光偏振态相同或正交的两束光进行干涉,即可得到隐藏的二值图像,称之为隐写术。两种加密策略均基于 GST 的动态调制特性,具有很好的图像保真度和隐蔽性。

值得注意的是,虽然不同的相变材料在外部激励下均具有可以调谐的光学性质,它们的工作波长范围和相变条件彼此不同。通常来说,二氧化钒在热激励下具有比 GST 及其他相变材料更低的相变阈值,这使得其适合于集成到诸如互补金属氧化物半导体(CMOS)芯片等低功耗设备中。二氧化钒的工作波段能够到达近红外甚至可见光波段,这有利于为光子器件的设计克服带宽的限制。针对这一情况,使用二氧化钒构造可重构混合超颖表面的光场动态调制和空间复用方法被提了出来^[72]。该种可重构混合超颖表面是由具有不同几何尺寸、不同对称轴的,开口处复合有相变材料的金制开口谐振环结构阵列构成的,通过改变复合圆环结构的几何尺寸(复合圆环结构的内径、外径、金和相变材料的比例)以及对称轴方位角,可以实现对出射光束的振幅和相位的任意调控。根据两种相变状态下目标的光场对可重构混合超颖表面进行编码之后,当二氧化钒处于金属

态或半导体态时, 选取与入射光偏振态正交的出射分量, 此种超颖表面即分别展现出分光或产生涡旋光束的功能, 生成不同的光场模式用以实现模式调制和空间复用。

此外, 基于新型镁材料的主动可调微纳器件为可重构光学元件提供了另一种潜在的解决方案。作为一种活性材料, 镁在光学频率下表现出优异的金属特性, 而当镁被氢化成氢化镁或氢化镁在氧气环境中脱氢变回镁时, 其光学性质变化将发生极大变化。因此, 镁纳米天线的氢化/脱氢动力学非常适合用于构建动态超颖表面光学系统。以此为基础, 使用空间交错排列的金纳米棒与镁纳米棒作为相互独立的亚单元, 利用镁纳米棒构成可动态像素的可寻址贝里相位超颖表面被提了出来^[73]。然而, 由于使用了多个亚单元构成一个基本组成单元, 这一方法属于空间复用, 不可避免地降低了全息图可用的空间带宽积。为了解决这一问题, 可以使用基于复合天线的可寻址动态超颖表面全息显示方法^[74], 利

用可寻址的随机像素半图变换 Fidoc 算法来实现具有定量关系的两幅纯相位全息图的相位恢复, 将所选取的两幅图像对应的两个光场相位分布通过迭代联系在一起, 并使其满足预先规定的定量关系, 即其中一张全息图中随机位置的半数像素点所调制的相位加上或减去一个常数之后将等于另一张全息图, 以获得再现像可切换的可寻址动态超颖表面全息图。选取具有固定散射相位的纯金 V 形天线作为静态像素, 并选取氢化/脱氢后具有可切换散射相位的复合金/镁 V 形天线作为动态像素, 其所调制相位可以根据外部环境变化而变化。通过利用这两组 V 形天线作为基本组成单元来构建可寻址的动态超颖表面全息图, 通过其对入射波前的谐振响应来实现波前调控。如图 5(b) 所示, 利用复合金/镁 V 形天线中镁片独特的加氢/脱氢特性, 通过改变外部环境即可控制全息面相位分布的切换, 分别再现出两幅不同的再现像, 实现可寻址的动态超颖表面全息显示。

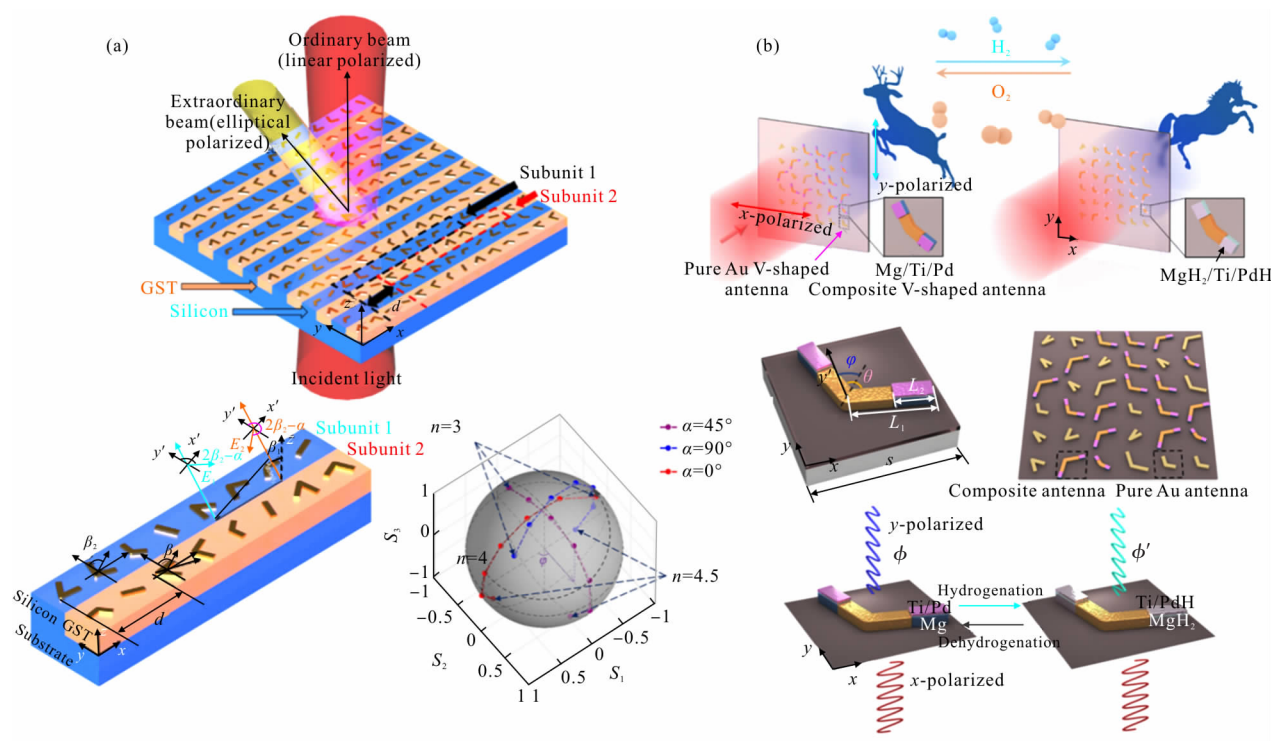


图 5 (a) 用于主动调谐异常衍射光束椭圆度的超颖表面偏振器件示意图; (b) 基于纯金 V 形天线和复合金/镁 V 形天线的可寻址动态超颖表面全息显示方法示意图

Fig.5 (a) Schematic of the metasurface for active tunability of the ellipticity of anomalously diffracted beams; (b) Schematic diagram of addressable dynamic metasurface holographic display method based on pure gold V-shaped antennas and composite gold/magnesium V-shaped antennas

4 非线性超颖表面

如上文所述,超颖表面全息器件具有超小尺寸、亚波长分辨率和大视场等优点。随着光电子技术的发展和进步,为了进一步提高超颖表面的信息容量,人们对复用技术和纳米天线结构设计提出了更高的要求,始终在尝试着以各种方式突破结构、材料以及编码方法以及调控机理的限制,获得新的复用方法和设计自由度。在这一背景下,非线性超颖表面进入了人们的视野,这类超颖表面的利用强光场(例如飞秒激光脉冲)与其自身纳米天线之间的相互作用产生的非线性效应来获得新的频率设计自由度。通过适当地设计超颖表面调制单元以及全息图相位恢复算法,可以使产生的非线性频率处的出射光波前获得可以生成目标再现像的相位分布,或者进一步使线性频率和非线性频率处的出射光波前能够生成完全不同的两种再现像。这一特点让非线性超颖表面获得了一个崭新的复用自由度,并借此进一步提高全息信息存储的容量。

目前已经提出了一些非线性全息的方法。例如, Ye 等^[75]提出的使用非线性贝里相位调制原理的自

旋和波长复用的非线性超颖表面全息技术,可以在具有不同旋向的基频光波和二次谐波中实现多个不同目标图像的分别再现;而 Almeida 等^[76]提出的由 V 形天线组成的双层非线性超颖表面,则可以在相同的空间位置上实现正交线偏振的偏振复用和非线性二倍频复用。与此同时,更普遍的基于超颖表面的四波混频效应未得到充分研究。已报道的针对四波混频非线性效应的研究大多关注复振幅控制,效率增强,频率梳生成方面,很少有工作利用四波混频实现非线性超颖表面全息复用。超颖表面四波混频产生的非线性频率信号能够覆盖多个波长,对于扩展信息容量、实现更高维度的信息加密有巨大应用潜力和前景。据此,提出了基于非线性超颖表面的四波混频全息复用方法^[77],该超颖表面上的每个纳米天线由具备产生并调控非线性响应能力的矩形孔结构构成,通过改变纳米矩形孔结构的几何尺寸,能够使非线性超颖表面对出射非线性频率信号的振幅和相位进行调控。如图 6(a)所示,基于优化 GS 算法计算得到振幅型全息图,并根据比特编码方法将矩形孔结构依据全息图进行编码之后,通过入射两束不同频率的飞秒脉冲实现同一非线性超颖表面结构阵列

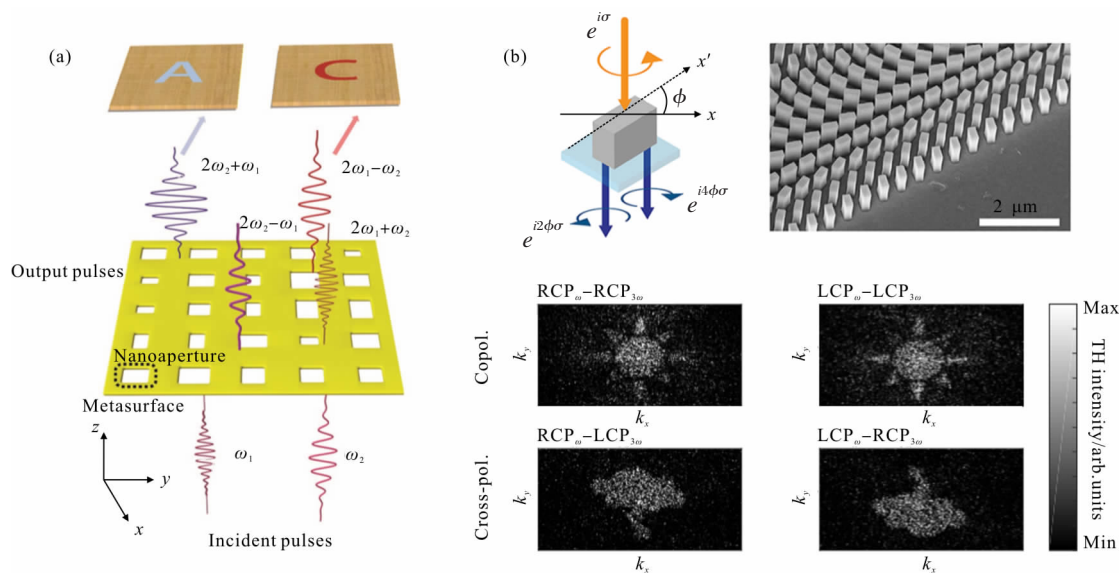


图 6 (a) 基于金纳米孔径超颖表面的四波混频非线性全息术示意图;(b) 贝里相位非线性硅超颖表面的工作原理示意图,以及不同输入和输出偏振组合的复用全息图实验重建结果

Fig.6 (a) Schematic illustration of the four-wave mixing nonlinear holography based on a gold nanoaperture metasurface; (b) Schematic of the working principle of a Berry phase nonlinear silicon metasurface, and measured multiplexed holographic image for different combinations of the input and output polarizations

的非线性全息空间和频率复用。

基于金属超颖表面的非线性频率转换和波前控制的许多方面已经被证明,然而其在非线性纳米光子学中的应用受到许多因素的限制,包括高损耗和低光损伤阈值等等。而高折射率电介质的超颖表面可以提供强的非线性响应,但直接利用介质超颖表面生成的非线性频率实现全波前控制方面取得的进展要少得多。为此,提出了用硅超颖表面产生三次谐波并进行非线性波前调制的方法^[78]。如图 6(b)所示,该方法使用非线性贝里相位调制机理来编码硅超颖表面的相位梯度,实验证明了异常折射的偏振依赖性。进一步,还可以利用此种介质超颖表面三次谐波的非线性贝里相位依赖于偏振态的选择,产生不同相位调制因子,从而实现全息复用和高保真度重建。这一方法大大降低了非线性超颖表面的设计和制造难度,为非线性波前调制领域提供了一个易于使用的“工具箱”。

以上结果表明,非线性超颖表面在任意频率转换、全息复用、光学加密和防伪设计等方面都具有广阔的应用前景。此外,非线性超颖表面还可以用于彩色全息显示,变换光学,数据存储等其他相关领域,具有深厚的发展潜力。

5 结论与展望

文中简要综述了课题组针对超颖表面近年来在全息显示、波前调制和偏振转换、主动可调、非线性波前调控等重要发展方向上的进展,但这些远远涵盖不了超颖表面相关研究的全部。总体来说,设计灵活多变,功能强大多样是超颖表面最为突出的优点之一。此外,级联超颖表面、动态可调超颖表面、非线性超颖表面等较为新颖的超颖表面设计领域还有待于进一步的完善,它们各自面临着不同的挑战与亟待解决的问题,比如级联超颖表面如何实现更精确的对准精度,所级联的各个超颖表面之间如何实现电场的正确耦合或者彼此独立;主动可调超颖表面如何增大调制深度,如何加快相变速度以实现实时调制,如何设计多阶动态可调超颖表面;非线性超颖表面如何进一步提升信息容量,提升效率等等。

此外,作为该领域的新兴材料种类,卤化铅钙钛矿、拓扑绝缘体材料也在近些年被引入到超颖表面

的设计中,分别被用于非线性谐波生成,实现可变且可逆的彩色纳米印刷功能和新型超颖表面全息图等。不同的材料性质将带来截然不同的功能与特性,因此,超颖表面选用材料方面的升级和拓展也将是一大可供深入挖掘的领域。同时,由于加工难度和性价比等因素,超颖表面的实际工程应用受到了一定程度的限制,在未来的研究中,与实际工程应用相结合亦是超颖表面科研人员的努力方向之一。

超颖表面的提出,突破了传统光学和三维体超颖材料的种种限制,表现出强大的波前调控能力,其与生俱来的超薄、紧凑的性质,以及空间逐点光场调控能力为光学器件的微型化和集成化提供了全新的设计思路。随着新颖的结构设计方法和波前调控机理的不断涌现,超颖表面的应用领域必将不断深化,不断扩展。

参考文献:

- [1] Hsiao H, Cheng H, Tsai D. Fundamentals and applications of metasurfaces [J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.
- [2] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications [J]. *Reports On Progress in Physics*, 2018, 81 (2): 26401.
- [3] Sung J, Lee G, Lee B. Progresses in the practical metasurface for holography and lens [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(10): 1701–1718.
- [4] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139–152.
- [5] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress [J]. *Reports On Progress in Physics*, 2015, 78(2): 24401.
- [6] Yang Y, Wang W, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394–1399.
- [7] Huang K, Liu H, Restuccia S, et al. Spiniform phase-encoded metagratings entangling arbitrary rational-order orbital angular momentum [J]. *Light-Science & Applications*, 2018, 7(3): 17156.
- [8] Chen Y, Yang X, Gao J. Spin-selective second-

- harmonic vortex beam generation with babinet-inverted plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800646.
- [9] Pegard N C, Fleischer J W. Optimizing holographic data storage using a fractional Fourier transform [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2551-2553.
- [10] Goh X M, Zheng Y, Tan S J, et al. Three-dimensional plasmonic stereoscopic prints in full colour [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5361.
- [11] Jin L, Dong Z, Mei S, et al. Noninterleaved metasurface for (2(6)-1) spin- and wavelength-encoded holograms [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 8016-8024.
- [12] Liu H, Yang B, Guo Q, et al. Single-pixel computational ghost imaging with helicity-dependent metasurface hologram [J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701477.
- [13] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220.
- [14] Wang S, Wu P C, Su V, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [15] Nagasaki Y, Suzuki M, Takahara J. All-dielectric Dual-color pixel with subwavelength resolution [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(12): 7500-7506.
- [16] Li Z, Clark A W, Cooper J M. Dual color plasmonic pixels create a polarization controlled nano color palette [J]. *Acs Nano*, 2016, 10(1): 492-498.
- [17] Duan X, Kamin S, Liu N. Dynamic plasmonic colour display [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14606.
- [18] Ji R, Wang S, Liu X, et al. Giant and broadband circular asymmetric transmission based on two cascading polarization conversion cavities [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(15): 8189-8194.
- [19] Xiao Y, Qian H, Liu Z. Nonlinear metasurface based on giant optical kerr response of gold quantum wells [J]. *Acs Photonics*, 2018, 5(5): 1654-1659.
- [20] Li G, Wu L, Li K F, et al. Nonlinear metasurface for simultaneous control of spin and orbital angular momentum in second harmonic generation [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(12): 7974-7979.
- [21] Minerbi E, Keren-Zur S, Ellenbogen T. Nonlinear metasurface fresnel zone plates for terahertz generation and manipulation [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(9): 6072-6077.
- [22] Wang J, Yang J, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [23] Yu N, 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.
- [24] Pfeiffer C, Emani N K, Shaltout A M, et al. Efficient light bending with isotropic metamaterial Huygens' surfaces [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2491-2497.
- [25] Wang L, Kruk S, Tang H, et al. Grayscale transparent metasurface holograms [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1504-1505.
- [26] Zheng G, Muehlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [27] Sung J, Lee G, Choi C, et al. Single-layer bifacial metasurface: full-space visible light control [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(8): 1801748.
- [28] Deng Z, Deng J, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [29] Huang L, Chen X, Muehlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [30] Chen Y, Yang X, Gao J. Spin-controlled wavefront shaping with plasmonic chiral geometric metasurfaces [J]. *Light-Science & Applications*, 2018, 7(1): 1-10.
- [31] Franklin D, Modak S, Vazquez-Guardado A, et al. Covert infrared image encoding through imprinted plasmonic cavities [J]. *Light-Science & Applications*, 2018, 7(1): 93.
- [32] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Angle-multiplexed metasurfaces: encoding independent wavefronts in a single metasurface under different illumination angles [J]. *Physical Review X*, 2017, 7(4): 41056.
- [33] Pors A, Bozhevolnyi S I. Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection [J]. *Optics Express*,

- 2013, 21(22): 27438–27451.
- [34] Montelongo Y, Tenorio–Pearl J O, Williams C, et al. Plasmonic nanoparticle scattering for color holograms [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (35): 12679–12683.
- [35] Huang L, Muhlenbernd H, Li X, et al. Broadband hybrid holographic multiplexing with geometric metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(41): 6444.
- [36] Wei Q, Huang L, Li X, et al. Broadband multiplane holography based on plasmonic metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(18): 1700434.
- [37] 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]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [38] Zhao R, Sain B, Wei Q, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption [J]. *Light–Science & Applications*, 2018, 7(1): 95.
- [39] Wang B, Dong F, Li Q, et al. Visible–frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5235–5240.
- [40] Wan W, Gao J, Yang X. Full–Color Plasmonic metasurface holograms [J]. *Acs Nano*, 2016, 10(12): 10671–10680.
- [41] Li X, Chen L, Li Y, et al. Multicolor 3D meta–holography by broadband plasmonic modulation [J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601102.
- [42] Lim K T P, Liu H, Liu Y, et al. Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 25.
- [43] Zhang Y, Shi L, Hu D, et al. Full–visible multifunctional aluminium metasurfaces by in situ anisotropic thermoplasmonic laser printing [J]. *Nanoscale Horizons*, 2019, 4(3): 601–609.
- [44] Hu Y, Luo X, Chen Y, et al. 3D–Integrated metasurfaces for full–colour holography [J]. *Light–Science & Applications*, 2019, 8(1): 1–9.
- [45] Ji R, Wang S, Liu X, et al. Giant and broadband circular asymmetric transmission based on two cascading polarization conversion cavities [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(15): 8189–8194.
- [46] Pfeiffer C, Zhang C, Ray V, et al. High performance bianisotropic metasurfaces: asymmetric transmission of light [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(2): 23902.
- [47] Zhao Y, Belkin M A, Alu A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 870.
- [48] Frese D, Wei Q, Wang Y, et al. Nonreciprocal asymmetric polarization encryption by layered plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3976–3980.
- [49] Cheng J, Jafar–Zanjani S, Mosallaei H. All–dielectric ultrathin conformal metasurfaces: lensing and cloaking applications at 532 nm wavelength [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38440.
- [50] Kamali S M, Arbabi A, Arbabi E, et al. Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11618.
- [51] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction–limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190–1194.
- [52] Han N, Huang L, Wang Y. Illusion and cloaking using dielectric conformal metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31625–31635.
- [53] Mehmood M Q, Mei S, Hussain S, et al. Visible–frequency metasurface for structuring and spatially multiplexing optical vortices [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(13): 2533.
- [54] Huang L, Song X, Reineke B, et al. Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces [J]. *Acs Photonics*, 2017, 4(2): 338–346.
- [55] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343–348.
- [56] Tan H, Deng J, Zhao R, et al. A Free–Space Orbital angular momentum multiplexing communication system based on a metasurface [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(6): 1800278.
- [57] Lin Z, Li X, Zhao R, et al. High–efficiency Bessel beam array generation by Huygens metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1079–1085.

- [58] Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5031–5036.
- [59] Jia S L, Wan X, Fu X J, et al. Low-reflection beam refractions by ultrathin Huygens metasurface [J]. *Aip Advances*, 2015, 5(6): 67102.
- [60] Lee G, Yoon G, Lee S, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(9): 4237–4245.
- [61] Song X, Huang L, Tang C, et al. Selective diffraction with complex amplitude modulation by dielectric metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701181.
- [62] Song X, Huang L, Sun L, et al. Near-field plasmonic beam engineering with complex amplitude modulation based on metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 73104.
- [63] Zhang T, Huang L, Li X, et al. High-efficiency broadband polarization converter based on Omega-shaped metasurface [J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2017, 50(45): 454001.
- [64] Zhao R, Huang L, Tang C, et al. Nanoscale polarization manipulation and encryption based on dielectric metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800490.
- [65] Malek S C, Ee H, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3641–3645.
- [66] Ji R, Hua Y, Chen K, et al. A switchable metalens based on active tri-layer metasurface [J]. *Plasmonics*, 2019, 14(1): 165–171.
- [67] Zhu W, Yang R, Fan Y, et al. Controlling optical polarization conversion with $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ -based phase-change dielectric metamaterials [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(25): 12054–12061.
- [68] Cheng Z, Rios C, Pernice W H P, et al. On-chip photonic synapse [J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1700160.
- [69] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 60–75.
- [70] Hwang C, Kim G H, Yang J, et al. Rewritable full-color computer-generated holograms based on color-selective diffractive optical components including phase-change materials [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(46): 21648–22655.
- [71] Li T, Huang L, Liu J, et al. Tunable wave plate based on active plasmonic metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4216–4226.
- [72] Lin Z, Huang L, Zhao R, et al. Dynamic control of mode modulation and spatial multiplexing using hybrid metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18740–18750.
- [73] Li J, Kamin S, Zheng G, et al. Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption [J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaar6768.
- [74] Li T, Wei Q, Reineke B, et al. Reconfigurable metasurface hologram by utilizing addressable dynamic pixels [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 21153–21162.
- [75] Ye W, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11930.
- [76] Almeida E, Bitton O, Prior Y. Nonlinear metamaterials for holography [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12533.
- [77] Lin Z, Huang L, Xu Z T, et al. Four-wave mixing holographic multiplexing based on nonlinear metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019: 1900782.
- [78] Reineke B, Sain B, Zhao R, et al. Silicon metasurfaces for third harmonic geometric phase manipulation and multiplexed holography [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(9): 6585–6591.