

多维度超表面及其在信息加密防伪上的应用

邓子岚, 涂清安, 李向平*

(暨南大学 光子技术研究院 广东省光纤与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要: 超表面是一种厚度在亚波长或波长量级的人工层状材料。可通过调控超表面单元结构上的大小、形状、转角、位移量等自由度, 实现对电磁波频率、振幅、相位、偏振等特性的灵活有效调控。超表面具有超薄、宽带、低损耗、易加工、灵活设计, 功能强大等特点。文中综述了具有单维度、双维度、多维度光场调控功能的超表面及其在外部激励作用下具有主动可调特性超表面的发展历程, 并特别介绍了这些超表面用于信息加密防伪领域的实现方式与优势特点。相比于传统的信息加密防伪技术, 超表面信息加密防伪术具有亚波长像素, 精密控制, 安全系数高等特点, 展现了全新视角, 拥有广阔的发展前景。

关键词: 超表面; 多维度光场调控; 信息加密; 防伪; 全息

中图分类号: TN209 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201034

Multi-dimensional metasurface and its application in information encryption and anti-counterfeiting

Deng Zilan, Tu Qing'An, Li Xiangping*

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Metasurface is an artificial layered material with a subwavelength or wavelength-scale thickness. By adjusting the size, shape, orientation angle, displacement, etc. of the metasurface nanostructures, dimensions of electromagnetic wave including frequency, amplitude, phase, polarization, wavelength, etc. can be flexibly and effectively controlled. Metasurface has various characteristics including the ultra-thin thickness, broadband, low loss, easy processing, flexible design and powerful functionalities. This paper reviewed metasurfaces capable of one-dimensional, two-dimensional, multi-dimensional, and active light field manipulations and their applications in information encryption and anti-counterfeiting. An outlook was given for the future development trend of multi-dimensional metasurfaces. Compared with the traditional information encryption and anti-counterfeiting technology, the metasurface has the superior advantages in sub-wavelength pixels, precise controlling and ultra-secure factor in information encryption and anti-counterfeiting. Its bright future to replace the traditional

收稿日期:2020-06-01; 修订日期:2020-08-13

基金项目:广东省科学基金面上项目(2020A1515010615);中央高校基本科研业务费专项资金(21620415);广东省珠江人才创新团队项目(2016ZT06D081)

作者简介:邓子岚(1986-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事微纳光子学、超材料与超表面、超表面全息、近远场矢量电磁场调控等方面的研究。Email: zilandeng@jnu.edu.cn

涂清安(1996-),男,硕士生,主要从事超表面全息与信息加密技术方面的研究。Email: tuqingan111@gmail.com

通讯作者:李向平(1979-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事纳米光学、超表面及光存储方面的研究。Email: xiangpingli@jnu.edu.cn

information encryption and anti-counterfeiting technology was envisioned, and its broad application prospects were underpinned.

Key words: metasurface; multi-dimensional light field control; information encryption; anti-counterfeiting; holography

0 引言

采用轻量级光学元件及系统对光场进行多维度全方位调控是光学研究者们不懈追求的目标。光场的基本属性(维度)包括振幅、相位、偏振、波长等,通过特定的光学材料及结构对这些属性进行精准调控,引发各式各样的光学效应,为开发具有独特功能的光学平台及系统提供物理依据,特别对大数据时代海量信息处理、传输、存储、加密等方面发挥着独特的优势。传统的光场调控方式,一般依靠庞大的几何光学元件在空间中的相位积累效应^[1-2],难以适应未来微型化、模块化、系统化的集成光学平台发展趋势。

超材料是人工复合结构或复合材料,通常具有超常的、自然界的材料中所不具备的物理性质,超材料的性质通常不仅取决于构成材料的物理化学本征性质,更取决于结构单元对光波的响应。超材料在光学隐形^[3-4]、负折射率^[5-6]、超分辨成像^[7-8]等领域具有广泛的应用前景。超材料对光场的调控,本质上还是依赖于光在超材料中的传播及相互作用的累积,且超材料可以视为一种等效介质,是一种三维体材料。

超表面是二维形式的超材料,由单层或少层厚度在亚波长或波长量级的人工微纳结构组成,一般表现为周期性、准周期性,或随机排布的阵列形式。其中的单元结构,称作超构原子,对应于传统材料的分子原子结构。超表面具有亚波长特征尺度,且加工工艺成熟,如电子束光刻、聚焦等离子束刻蚀等,为现代光学的发展开辟了新方向。超表面具有超薄、宽带、低损耗、易加工、灵活设计,功能强大等特点。主要的应用器件包括超表面透镜^[9-11]、超表面全息^[12-14]、超表面波片^[15-17]、涡旋光束产生器^[18-19]、微纳结构色显示器件^[20-22]、偏振分束器^[23-24]、超表面激光器^[25-26]等。

光学超表面对光场的调控物理机理,可以从其超构原子的相位调制方式加以分析^[12],其中最常见相位调制方式包括:共振相位、几何相位、传输相位与

迂回相位。(1)共振相位:与超构原子的尺度大小相关,典型的有通过调控 V 型天线^[27]、Y 型天线^[28]、H 型天线^[29]的结构大小和方向,如图 1(a)所示,H 型天线结构通过改变 H 型天线的大小,能够在 $0-2\pi$ 的范围内实现对超表面的突变相位调控。(2)几何(Pancharatnam-Berry)相位:如图 1(b)所示与共振相位超表面不同,几何相位^[30]与超构原子的光谱响应完全解耦,为宽带波前整形提供了理想平台。入射圆偏振光通过各向异性超构原子时,输出光产生几何相位,与各向异性超构原子的转动角度成正比: $\varphi = 2\sigma\psi$,其中, $\sigma = \pm 1$ 表示入射光的螺旋度(Helicity), ψ 表示超构原子的转动角度, φ 表示的是超表面的几何相位。(3)传输相位:如图 1(c)所示,Arbabi 等人^[31]通过调整柱状纳米结构的截面尺寸,实现了传输相位的空间变化,从而改变了波导模式的有效折射率,调整了传输相位。传输相位的表达式为 $\varphi = \frac{\omega}{c}n_{\text{eff}}h$, h 是纳米柱的高度, n_{eff} 是波导模式的有效折射率, ω 是光的角频率, c 是真空中光速且保持恒定不变, φ 是超表面的传输相位。(4)迂回相位:一种通过移动光阑位置调制高衍射级次光场相位的调控方式。如图 1(d)所示,Deng 等人^[32]把这些超构原子排列成超构光栅,通过表面等离激元间隙模式的调控,使得该超构光栅在-1 衍射级次上具有理论上接近 100% 的衍射效率。根据迂回相位调制规则,超构原子可视为有效光阑,其相对位移可直接映射到迂回相位: $\varphi = \frac{2\pi p}{p_0}$,其中, p 是超构原子的相对位移, p_0 是超表面单元结构的周期, φ 是超表面的迂回相位。通过丰富的相位调控机制,以及不同相位机制的无缝组合,超表面能实现光波前不同维度的同时独立调控,特别在光场信息加密、防伪等应用场景中发挥着独特的优势。在以下的章节中,将介绍超表面对不同维度光场进行调控及其在信息加密与防伪应用方面做深入探讨,并对该领域的未来发展做出展望。

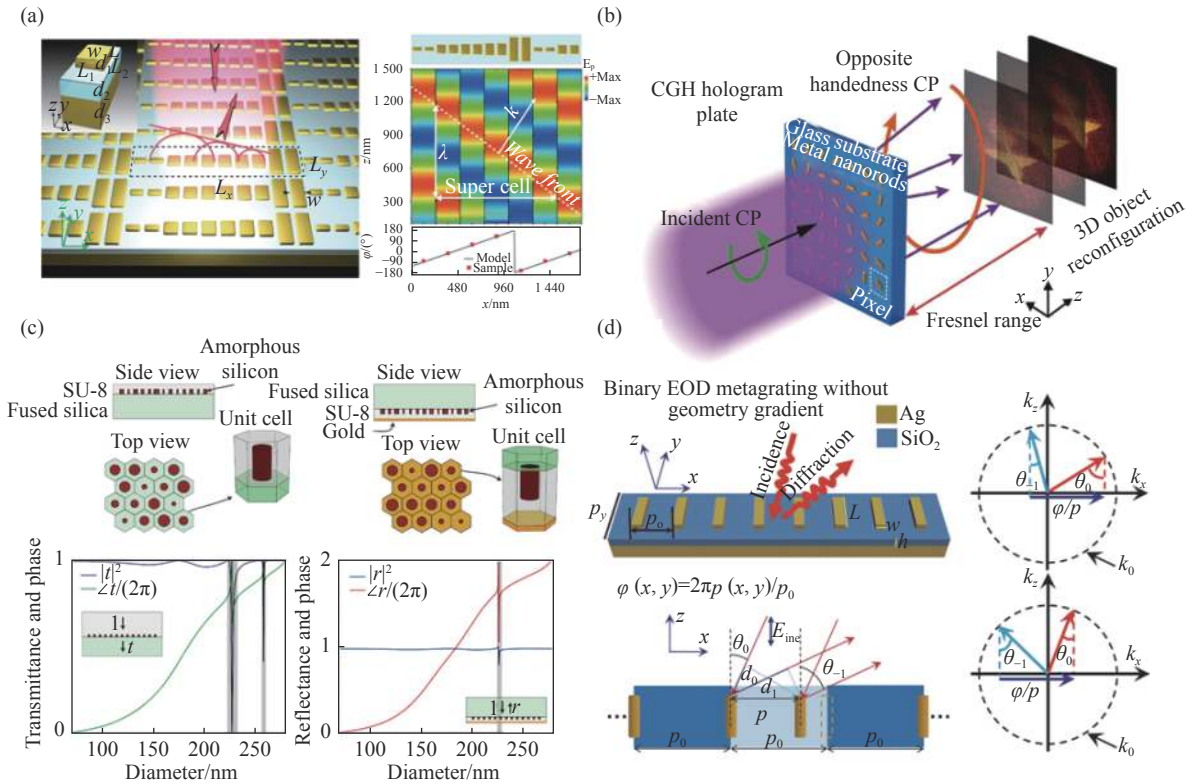


图 1 (a) 基于 H 型天线结构大小的共振相位^[29]; (b) 基于单元周期内超构原子旋转产生的几何相位^[30]; (c) 基于柱状纳米结构尺寸传输相位^[31]; (d) 基于超构原子在单元周期内的相对位移的迂回相位^[32]

Fig.1 (a) Resonance phase based on the size of H-type antenna structure^[29]; (b) Geometric phases based on the rotation of superstructure atoms within a unit period^[30]; (c) Transmission phase based on the size of the columnar nanostructure^[31]; (d) Detour phase based on the relative displacement of the superstructure atoms in the unit period^[32]

1 超表面对光场单维度的独立调控及偏振通道信息隐藏术

人们最初研究的超表面首先实现的是对光场单个维度实现高效独立的调控,即分别对光场的频率、振幅、相位、偏振等属性进行独立调控。超表面对光波的频率进行独立调控的典型例子包括完美吸收体^[33]、Fano 共振^[34]、连续域中束缚态 (BIC)^[35]等,在这里就不做详细介绍。

下面介绍了一种超表面对光场振幅进行调控的研究,即纯振幅全息超表面^[36]。如图 2(a)所示,该工作利用随机超表面光子筛结构,对光波前的振幅空间分布实施了精准操纵,实验实现了均匀、无孪生像、高衍射效率的全息图。通过考虑亚波长纳米孔的衍射问题,采用遗传搜索算法,成功地优化了与偏振无关的二元振幅全息图的性能。它类似于二元振幅调制,能产生较高的图像质量,这在仅调节振幅全息上,

具有里程碑式的意义,为实现具有复杂非周期结构的多功能纳米光子器件开辟了一条新的途径。

超表面对光场相位的独立调控,一个较为典型的应用为纯相位型超表面全息^[38]。图 2(b)所示为首次实现效率高达 80% 的纯相位型超表面全息^[13]。通过设计金属-电介质-金属的三明治结构,在双层金属之间形成 F-P 腔以达到增强反射效率的作用,并找到合适的矩形棒结构,在周期性单元结构内使矩形棒旋转来产生几何相位,考虑到实际相位调制的连续性问题,这里选用了 16 级相位调制覆盖 $0 \sim 2\pi$,并结合 CGH 计算全息技术,CGH 计算全息技术可通过 Gerchberg-Saxton 数值算法^[39]实现,并实验演示了一个爱因斯坦头像与质能方程的全息图像。这种基于三明治结构的几何相位超表面的纯相位全息图,在 825 nm 处其衍射效率高达 80%,具有极低的零阶效率,以及覆盖可见/近红外范围的宽带光谱响应,打破了金属超表面效率低的局限性。

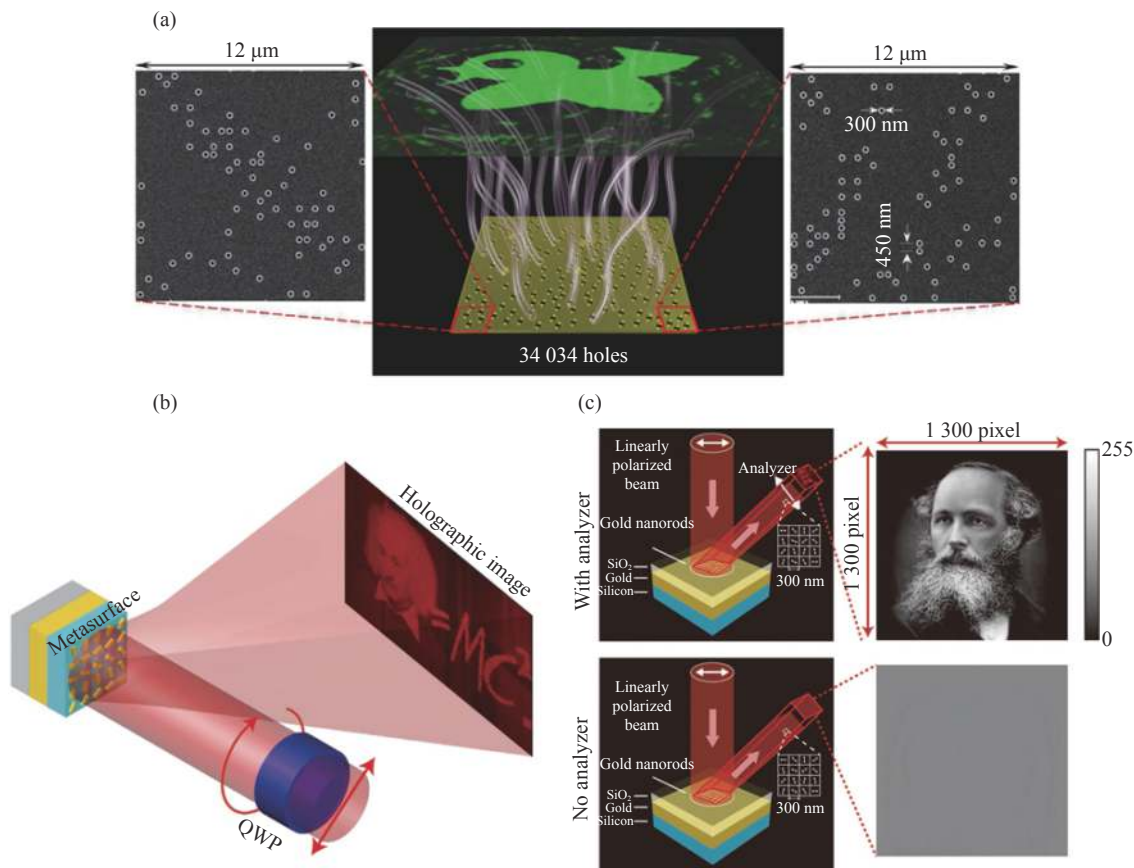


图 2 (a) 基于亚波长纳米孔衍射的纯振幅全息^[36]; (b) 基于几何相位的高效纯相位全息^[13]; (c) 基于马吕斯定律的激光光束内偏振图像隐藏超表面^[37]

Fig.2 (a) Amplitude-only holography based on subwavelength nanopore diffraction^[36]; (b) High efficient phase-only holography based on geometric phase^[13]; (c) Hidden metasurface of the polarized image in the laser beam based on Marius's law^[37]

超表面对偏振的独立调控^[40-42],可以更好地与信息加密防伪结合。图 2(c) 所示为对光场偏振态的独立调控及实现激光束的偏振剖面图像隐藏^[39]的超表面。通过设计特定的超表面结构,线偏振光入射,以及在出射端加上一个检偏仪,根据马吕斯定律 $I = I_0 \cos^2 \theta$ (I_0 表示入射线偏振光强度, θ 表示线偏振光照射到超表面后,出射线偏振光与偏振片分析仪的夹角),可以实现灰度图像显示。实验演示了图像的反射操作和在可见光范围内的宽带图像显示功能。通过检偏仪的设置,可以实现图像的隐藏与显示功能。这种在激光束偏振拓扑中隐藏高分辨率灰度图像的方法,为实现图像隐藏功能提供了一种新的途径。类似地, Zhang 等人^[43] 实现了激光束偏振隐藏快速反应码, Deng 等人^[44] 实现了偏振隐藏图像与添加水印功能, Zhang 等人^[45] 实现了多通道偏振图像加密。

该章节介绍了光场单维度的独立调控及其在信

息加密防伪上的一些应用,并详细介绍了利用随机光子筛的纯振幅型全息,利用几何相位的纯相位型全息,以及利用偏振控制的激光束剖面图像隐藏等。单维度超表面可调控自由度较少,只能在一个维度调控的基础上进行多通道信息编码^[46],限制条件较多。随着光场调控以及应用研究的深入,人们已不再满足于单个维度上的设计与开发,于是发展了在下一节所介绍的双维度光场调控及应用。

2 超表面对光场双维度的同时独立调控及多通道信息编码技术

超表面对双维度光场调控,是指对光场的任意两个自由度进行结合,实现对光波两个维度同时独立调控。在超表面单维度光场调控中,其主要表现为光波在单个功能上的实现,其主要的研究目的是提高基于超表面的光学器件的性能,如高转化效率、宽带宽、

宽角度等。当上升到光波的双维度调控时,将出现更多新奇的特性及功能。

首先,光场振幅与相位两个维度的结合^[47-49],使得光学信息处理方式更加丰富起来。早期的照相机技术,只能记录图像的光强信息,即振幅的平方,对于描绘三维立体图像的景深细节则表现不足。几十年前发展了传统的全息照相术,虽然满足了同时记录物体的振幅和相位信息,但仍然存在器材笨重、拍摄不易、存在噪声等问题。而最近发展起来的超表面全息技术,通过亚波长尺度的超构原子设计,能在超薄微纳平台下精准同时独立调控光场的振幅与相位,形成复振幅全息图^[50]。图 3(a) 为一种基于 X 型结构的几何相位复振幅超表面全息。通过调节 X 型超构原子的转角之和与转角之差,可以解析地得到透过该结构后的交叉圆偏振光的复振幅表达式: $2\cos(\theta_2 - \theta_1) \times e^{i\sigma(\theta_1 + \theta_2)}$, 其中, θ_1 和 θ_2 分别表示 X 型超构原子的两条分支的转角, $\sigma = \pm 1$ 表示圆偏振光的螺旋度。该解析调制公式不依赖于入射光波频率,因此能够实现对振幅和相位的连续和宽带控制。该工作首次在可见波长下实现了在亚波长尺度下的复振幅全息图的实验演示,获得了比一般相位全息图像更高信噪比的优良性能。另外, Liu 等人^[51]、Wang 等人^[52] 及 Adam 等人^[53] 利用不同的结构设计都实现了振幅与相位的同时调控的复振幅全息图。

在超表面平台上实现偏振态与波长的结合^[54], 有很多应用呈现。如图 3(b) 展示了一种同时调控偏振态与波长的超表面平台, 在一个单元周期内, 不同尺寸大小的纳米柱决定了不同的共振波长, 线偏振光入射, 然后纳米柱围绕一个中心旋转, 出射光的线偏振光的方向会发生改变, 然后在出射光处添加一个检偏器, 其透光方向正交于入射时添加的起偏器, 根据马吕斯定律可获得不同偏振角情况下的强度值。利用这种独特的方法, 可以将波长选择性和任意偏振控制结合到单个亚波长像素级别, 并实验验证了编码彩色图像^[55], 此外, 它还可以对对比度和亮度进行精细的控制, 在高密度存储、信息安全以及反误码率等方面都具有重要的应用价值。

偏振和波长这两个自由度的联合调控, 也可应用在信息加密防伪上。如图 3(c) 所示的颜色滤波器^[56], 提出了一种基于周期性亚波长银纳米线的等离子体

颜色滤光片, 它可以通过检偏器的简单旋转来改变输出的颜色。它的入射偏振为具有 45° 偏振角的线偏振光, 出射线偏振角分别为 0°、45°、90°、135°, 这种颜色滤波效应是通过等离子体共振附近的波长相关的相移来实现的, 从而引起入射偏振的波长相关的旋转。检偏器的旋转导致输出四种不同的颜色 (如黄、蓝、紫、红) 及其组合。通过适当的选择制造参数, 等离子体共振本身可以调谐整个可见光谱区域。

超表面对相位与波长的联合调控^[57-58], 其典型应用有平面消色差装置^[11]、彩色全息^[59] 等。利用离轴照明的方法, Luo 等人^[60] 克服了不同颜色间的串扰问题, 实现了三维空间的全彩色全息图像, 不仅得到了优越的图像质量, 信噪比也比之前的全息设计高出了五倍。图 3(d) 所示为另一种同轴彩色全息^[59], 这项工作所涉及到的原理与编码彩色图像^[55] 的工作具有相似之处, 即都选择了不同尺度大小的纳米柱分别来响应不同的共振波长, 不同的是这里设计了三个不同共振波长的纳米柱, 当圆偏振光入射时, 不同共振波长的纳米柱围绕纳米柱中心旋转, 获得了 $0 \sim 2\pi$ 的几何相位覆盖, 因此可以实现对相位和波长的同时调控。在实验中, 其展示了由三种纳米柱在亚波长单元中复用形成的可见光硅介质超表面, 构成了一个大的像素单元, 可以同时红、绿光和蓝光进行波前调控。

超表面对相位和偏振的联合调控^[61-66], 则可广泛应用于信息的加密防伪, Tsai 等人^[67] 实现了具有偏振控制双像高效率宽带全息图, 它使用交叉型纳米金天线来构建超构原子, 在可见光范围内图像对比度高, 用不同线偏振光照射可实现图像切换。Li 等人^[68] 实现了由表面等离子体传播和极化散射的多路复用全息, 通过排列纳米光栅的方向, 可以调制散射偏振态, 并结合表面传播波 SPP 和偏振散射, 实现了具有低串扰的四层全息图, 打破了统偏振多路复用器只有两个正交态的限制。Chen 等人^[69] 提出并实验验证了可同时调控相位和偏振方向的等离子体超表面, 为设计操纵透射光的光学器件带来了新的自由度, 它采用不同尺寸和取向的纳米孔径对, 用于完全控制透射光的偏振和相位, 对于线性偏振光, 超表面可以实现近乎完美的异常折射, 并在圆偏振光入射光中生成了径向偏振光。

下面主要介绍基于相位偏振联合调控的两个工

作, 分别是任意偏振矢量全息产生器^[70] 和矢量全息加密器件^[71]。图 3(e) 所示为一种利用超表面产生任意

偏振矢量全息的全新方案, 这里设计了一个正交的金属双原子结构模型, 金属双原子几何中心在单元周期

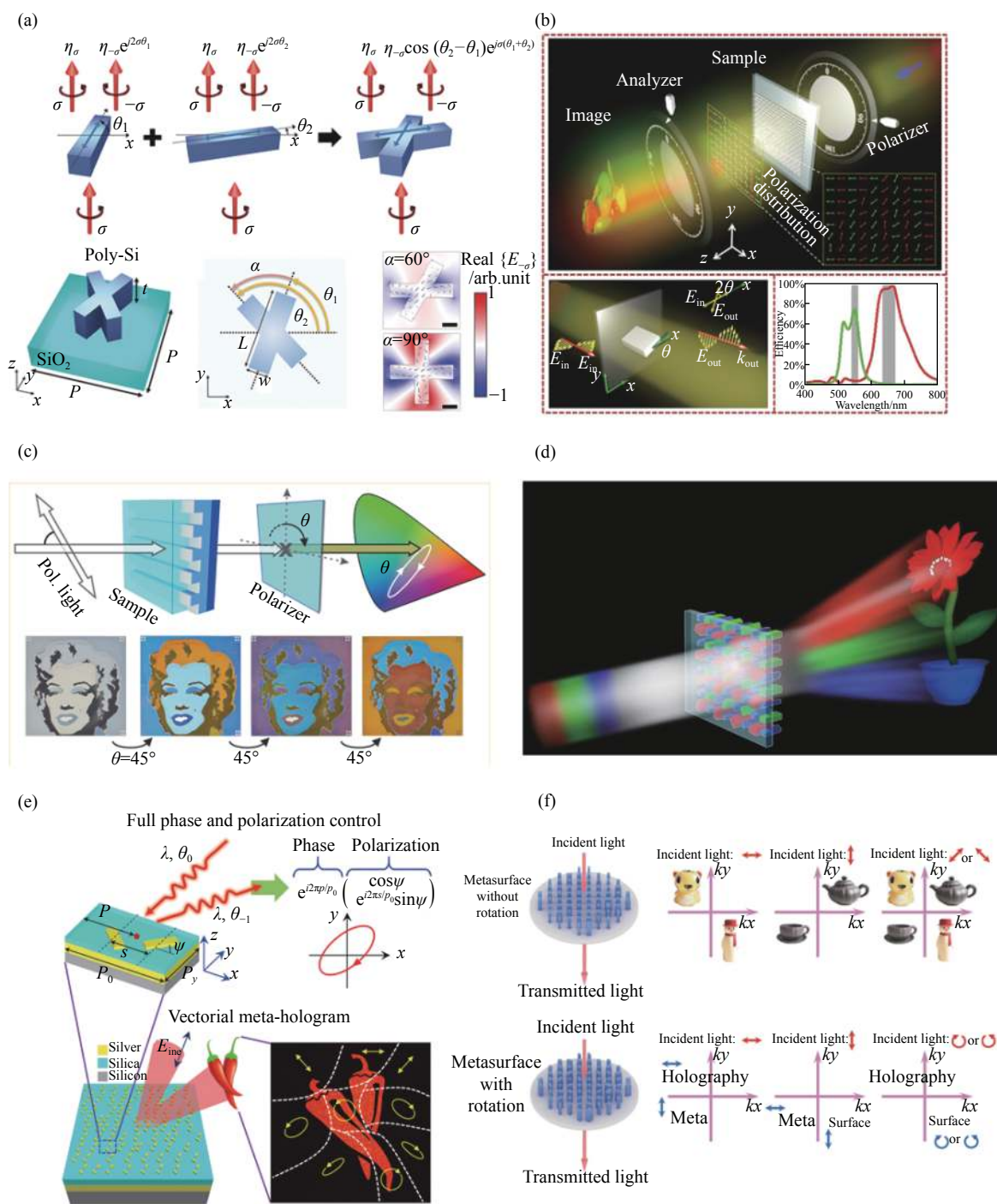


图 3 (a) 基于 X 型原子的复振幅全息显示^[50]; (b) 结合偏振与波长的彩色编码图像^[55]; (c) 结合偏振与波长的颜色滤波器^[56]; (d) 结合相位与波长的彩色全息图^[59]; (e) 基于金属正交双原子的矢量全息及任意偏振态显示^[70]; (f) 结合相位与偏振的矢量全息加密^[71]

Fig.3 (a) Complex amplitude holographic display based on X-type atom^[50]; (b) A color-coded image combining polarization and wavelength^[55]; (c) Color filter combining polarization and wavelength^[56]; (d) Colorful holograms combining phase and wavelength^[59]; (e) Vector holography based on metal orthogonal diatomics and display of arbitrary polarization states^[70]; (f) Vector holographic encryption combining phase and polarization^[71]

内的相对平移所产生的迂回相位用于调控相位, 为 $\varphi = e^{i2\pi p/p_0}$, 其中 p 表示相对位移, p_0 表示周期, 正交金属双原子作为整体在单元周期内旋转与水平轴的夹角用于调控偏振, 第一个偏振态为 $\cos\psi$, 第二个偏振态为 $e^{i2\pi s/p_0} \sin\psi$, ψ 表示整体转动角度, s 表示两个正交双原子的中心距离, 因此正交金属双原子在单元周期内的相对位移和整体转动角度, 可以线性调控相位和偏振, 同时实现了任意偏振态的主动衍射和全息图像的重建。利用这一特性, 该工作在实验上实现了具有任意空间变化偏振状态和双向极化切换功能的宽带矢量全息, 这为消色差衍射元件、偏振光学提供了全新途径。对于矢量全息加密, 如图 3(f) 所示, 这里通过入射和接收不同的偏振光, 避免了图像串扰, 将具有多种空间相位分布的偏振操作通道集成到了一个双折射矢量全息图中。在这个切换偏振的超表面全息图中, 总共有 12 个偏振通道, 在这样一个超表面内实现了多个具有量化相位关系的独立相位剖面分布, 因此入射和出射的不同偏振状态组合可以得到不同的信息, 并且每个偏振通道都有高保真度和大效率的特点。这种多通道极化复用技术可用于动态矢量全息显示, 并能提供光学图像安全的三重保护。

该章节总结了振幅、相位、偏振、波长在两两组合下的超表面双维度光场调控及其在信息加密防伪上的应用。对于振幅与波长两个维度的结合, 常见于频率幅度调制^[72], 结构显色^[73]等, 与信息加密防伪结合的不够紧密, 因此就不作单独讨论, 振幅与偏振两个维度的结合, 目前还没有相关的工作进行报道。与超表面单维度光场调控相比, 超表面对双维度光场的调控提供了更多独立的编码信息通道, 既可以提高信息加密防伪的灵活性和容量, 又可以提高信息处理的便利性。如果进一步开发更高维度调控的编码方法, 将有助于进一步扩展独立的信息编码通道, 增加组合数和加密容量, 提高信息加密防伪的安全级别。

3 超表面对三维及更高维度的光场调控

三维乃至更高维度的超表面光场调控技术, 将利用更多的光场自由度, 并表现出功能更复杂, 性能更突出的特点。如图 4(a) 所示的彩色纳米打印和全彩色全息图像^[74], 是结合纳米打印的波长复用彩色全

息, 可同时对振幅、相位、波长三个维度进行调控。它是由晶体硅纳米柱制成的电介质超表面, 其超构原子由四个不同大小的子双棒结构成, 不仅实现了对三原色红、绿、蓝 (RGB) 的可定制覆盖, 而且还可以控制单个颜色的强度。之前在二维色度饱和度 HS 平面的扩展上, 已经开展了很多工作, 在这个工作中, 可以对一个完整的三维色度饱和度亮度 HSB 空间进行控制。由于对 RGB 强度和相位的独立控制, 单层硅超表面可以同时显示任意 HSB 彩色纳米打印和全彩色全息图像。为高分辨率和高保真度的光学安全设备以及先进的加密方法提供了可能性。此外双波长太赫兹超表面^[75]在太赫兹波段也实现了这三个维度的同时调控。

图 4(b) 所示的彩色编码字母^[76], 是在正交圆偏振模式下复用的彩色全息, 结合了波长、相位、偏振三个维度的调控。其超构单元由四个不同大小的子椭圆柱构成, 经过参数优化, 得到了 633、532、473 nm 处的三个共振波长, 并利用不同旋向的圆偏振光分别进行独立的信息编码。两个圆偏振态 (RCP 和 LCP) 和三个可见波长组成的六个独立通道共有 63 种组合方式, 与三个独立通道在一维模式下的七种组合形成了鲜明的对比。这种正交圆偏振模式下复用彩色全息的编码方式极大地提高了加密的安全性, 为提高多通道信息加密、反加密、光数据存储和信息处理等方面的信息安全水平奠定了新的途径。类似地, Jin 等人^[77]也实现了多路数字状态编码等。

图 4(c) 展示了一种全集成超表面, 以用于微缩印刷品与螺旋复用全息光学实时加密^[78]。该超表面同时调控光波的振幅、相位与偏振, 并实现了微印和螺旋复用全息术的有机结合。它通过将一个可在线编辑的快速响应码编码到微缩印刷品中, 可通过扫描微缩印刷品获得进行试验的密钥, 不同的信息编码表示不同的信息, 设计者可自由设计, 每次通过试验获得的图案都是相应的信息编码, 编码长度为六位数字。发送者将信息转换成信息编码, 接收者通过实验获得了信息编码, 可以查阅密码表解读信息。图中演示了微缩印刷品图像和螺旋复用全息光学实加密解密的通信过程, 在理论设计的实验中, 接收者获得了六段数字信息编码, 翻译成信息是 Name-Yao, Age-39,

Height-226 cm 而实验验证的信息是 Breakfast-Bread, Lunch-Rice, Dinner-Noodles。该集成方案实现了多维信息存储和实时加密解密功能,为超表面器件在光学加密领域的实际应用提供了一种可实现的途径。此外,超表面对光场振幅、相位和偏振的调控,还可应用到诸如多偏振控制图像隐藏^[79]、手性辅助高效超表面^[80]、调控振幅相位偏振的合成天线^[81]等领域。

图 4(d) 所示为一种利用超表面实现的全彩复振幅全息图^[82], 这里的多自由度超表面利用双棒结构的相对转角与位移量调控, 实现了对可见光波振幅、相位和偏振维度的同时独立调控, 并进一步利用波矢空间的相位匹配技术实现了对波长维度的复用, 是目前

为止同时调控光场维度最多的超表面。由于迂回相位是频率无关的, 因此这个双棒结构对振幅、相位与偏振的调控具有宽带的特性。另外, 光场维度与双棒结构的几何参数之间的调制关系为简单的解析关系, 即: 单元结构内的两个金属矩形的两角之差调控振幅 $|\sin(\varphi_1 - \varphi_2)|$, 单元结构内的两个金属矩形的两角之和调控偏振角 $\varphi_1 + \varphi_2$, 单元结构内的两个金属矩形相对于边缘的相对位移调控相位 $\pi(p_1 + p_2)/p_0$, 这大大降低了超表面设计的参数搜寻空间与复杂度。虽然这项工作是在金属反射模式下利用等离子体纳米棒实现的多自由度超表面, 其基本设计思路同样适用于高效率的全电介质超表面中。

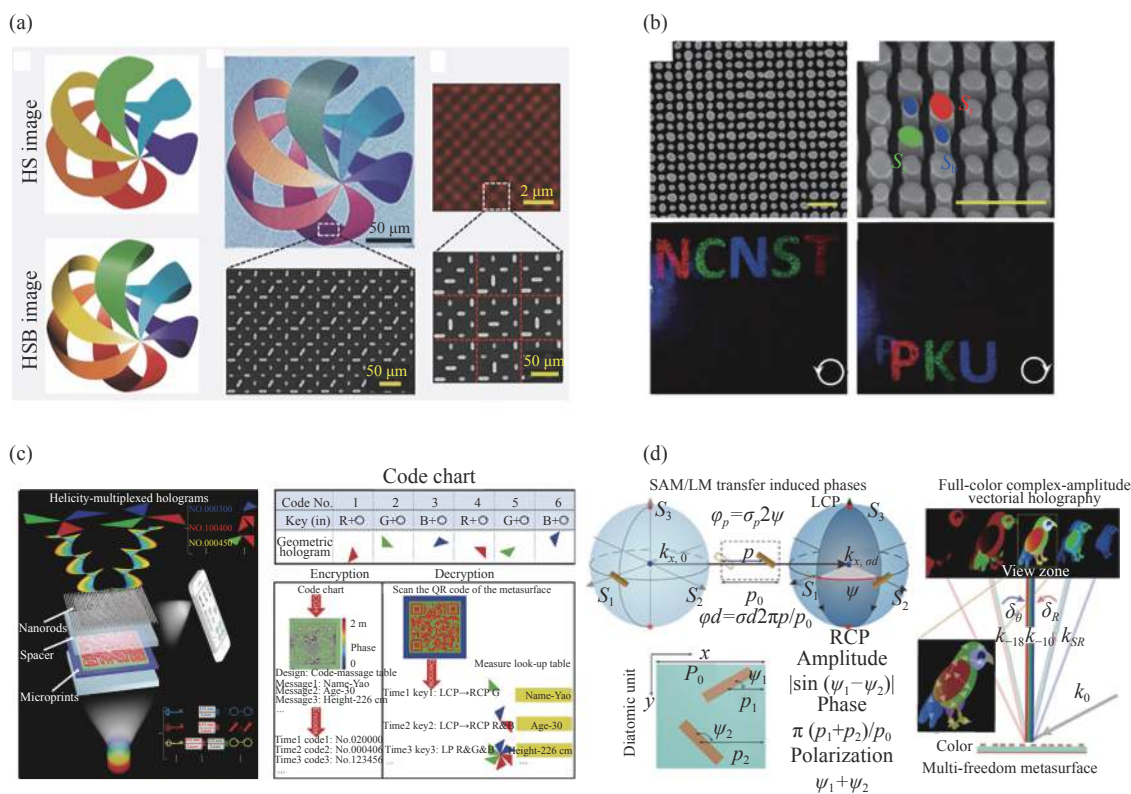


图 4 (a) 同时调控振幅、相位、波长的彩色纳米打印和全彩色全息图像^[74]; (b) 同时调控波长、相位、偏振的彩色编码字母^[76]; (c) 同时调控振幅、相位、偏振的微缩印刷品和螺旋复用的全息光学实时加密装置^[78]; (d) 同时调控振幅、相位、偏振并复用波长的全彩复振幅全息图^[82]

Fig.4 (a) Color nano-printing and full-color holographic images that simultaneously control amplitude, phase, and wavelength^[74]; (b) Color coded letters that simultaneously control wavelength, phase, and polarization^[76]; (c) Holographic optical real-time encryption device for microprints and spiral multiplexing that imultaneously control amplitude, phase and polarization^[78]; (d) Full-color complex amplitude hologram that simultaneously controls amplitude, phase, polarization and multiplexes wavelength^[82]

最近, 光学超表面对多维光场调控还扩展到其它新的自由度。如 Ren 等人^[83] 实现了基于 OAM (Orbital Angular Momentum) 的多路复用全息图, 它由具有强

轨道角动量选择性的离散空间频率分布的氮化镓粒子组成, 由于 OAM 模式在数学上是正交的, 没有拓扑电荷限制, 因此一个高空间分辨率的全息图可以多

路复用大量与 OAM 相关的信息通道, 这为超高容量全息器件和系统提供了广阔的应用前景。Huang 等人^[84]实现了彩色印刷和全息双工作模式的单层介质超表面, 它由两种非晶硅的超构原子组成, 白光照射下可分别过滤颜色并调控相位, 采用改进的并行迭代 Gerchberg-Saxton 算法, 可获得任意形状的全息图, 以适应彩色印刷索引图案。利用轨道角动量这一新自由度的工作, 有偏振编码的轨道角动量多路复用超表面^[85]等。

至此, 文中总结了超表面从单维度到双维度及多维的光场调控方式, 且针对于其他自由度的调控方式, 介绍了一些具有鲜明特色的关于信息加密防伪的工作。然而, 人们对光场调控的深入研究不仅仅可以是光学维度上增加, 而且可以添加一些其他的辅助元素, 以此来扩展信息加密防伪应用的新方法。

4 主动可调型超表面及其信息加密与隐藏功能

主动可调型超表面可根据不同的外部激励, 重新配置超表面并得到不同的响应, 以此来达到动态调控的效果。常见的激励有光激励、热激励、电激励、化学激励、应力激励等, 不同激励方式所对应的响应效果也不同, 可以根据实际中的应用目标进行选择。主动可调型超表面用于信息加密防伪, 能够增强信息隐藏手段的多样性, 大大增强防伪的安全级别。在下面的讨论中, 介绍了几种典型的主动可调型超表面, 阐述其基本原理及其在信息加密与隐藏功能。

相变材料超表面^[86-87] 在一定的热、光或电等外部因素的激励下, 它们的内部原子排列就会在晶态和非晶态这两种状态下发生转化, 在不同的状态下, 材料表现出不同的折射率, 因此拥有灵活多变的光学调控能力。另外, 相变材料的折射率具有可逆性、非易失性等优点。图 5(a) 为利用相变材料构建的可重构超表面^[88], 通过对相变 GST 材料设计两种不同的响应结构, 分别是 GST 扇形柱和 GST 立方体, GST 扇形柱在非晶状态下对相位调制起决定性作用, GST 立方体在晶态下对相位调制起决定性作用, 在线性偏振光照射下, 非晶态的 GST 扇形柱起作用, 可在屏幕上得到字母“A”, 当给 GST 材料加热, 由非晶态转向晶态时, 可在屏幕上得到字母“Z”, 当停止加热, GST 材料

又会由晶态转变回非晶态。利用其他材料实现可重构超表面, 有石墨烯偏振编码^[89]、银-碳混合墨水打印多级灰度图像^[90]、液晶材料可调超表面^[91]、发光二极管集成等离子体偏振器有源显示和编码^[92]等工作。

主动可调化学反应超表面^[93], 如图 5(b) 所示, 它创建了用于高级光学信息处理和加密的动态超表面全息图。在加氢和脱氢这两个过程中, 等离子体纳米棒会表现出不同的化学反应, 因此可构成多路复用的超表面可寻址像素。光波的自旋态, 氢气、氧气的含量和反应持续时间是加密超表面的几个关键因素, 在这种加氢/脱氢的化学反应机制下, 这个单一的超表面平台可定制多个加密的信息, 具有紧凑的数据加密方案和高水平的信息安全性, 因此, 这是一种利用化学反应的保护和传输机密数据的新方法, 且访问信息时受到高度限制。另外, Yang 等人^[94]基于水溶液的可调化学系统也实现了可重构全介质超表面。

弹性衬底超表面^[95], 如图 5(c) 所示, 在可拉伸的聚二甲基硅氧烷弹性衬底上, 使用金纳米棒制作了可视区域内最多的三个图像平面的可重构纯相位型计算机生成的超表面全息图。弹性衬底上添加的是金纳米棒, 基底拉伸时, 金纳米棒的相对位移会发生改变, 随之而来的是像平面位置的改变, 并且全息图像变大。经合理设计, 多个不同的全息图像可由拉伸不同程度的弹性衬底切换所得。如图 5(c) 所示的则是整体拉升超表面使得全息像由哭脸变成了笑脸的动态过程, 这为所需编码信息的动态配置提供了可能。且弹性衬底可重构超表面不受偏振影响, 对未来发展可拉伸非线性超表面、虚拟现实、平板显示等有指导意义。另外, 利用弹性衬底进行主动调控, Kamali 等人^[96]与 Colombi 等人^[97]实现了弹性衬底超透镜等。

非线性超表面^[98-105] 为另一种形式的主动可调超表面。图 6(a) 所示为一种二次谐波非线性超表面实现光学图像编码^[106], 单元结构采用间隔 120°的 Y 型金属结构型元件。设计合适的尺寸, 使其能够响应近红外波段的光并利用其产生的二次谐波编码图像信息。当直接用可见光照射时, 图像是不可见的, 当用基频近红外光入射, 接收端选择二次谐波可见光接收时, 隐藏图像“META”随之显现了出来。这其中的原理是通过控制来自两个相邻的超原子的 SHG 波的相消与相长干扰来实现的。此外, 通过旋转单元结构内

的 Y 型金属结构, 还可以获得不同灰度的 SHG 图像。这种基于空间变光干涉的非线性超表面为多级图像加密、反干扰和无背景图像重建开辟了新的途径。

微扰反监视超表面^[107], 这是一种利用热扰动的复合纳米结构超表面, 在普遍的情况下, 扰动是要尽可能避免和回避的, 然而这里却精心设计, 把热扰动利用起来, 验证了一个不可逆图像加密和反监视策略。如图 6(b) 所示, 当第一次对背景信息和需要加密的信息施加热扰动时, 两种信息被记录到超表面上

去, 这时两种不同的信息的反射率是非常接近的, 很难直接辨别出不同之处, 因为记录背景信息和加密信息是分别由圆孔结构方形圆孔结构记录的, 当第二次施加热扰动时, 两种不同的结构所承载的信息的反射率是不同的, 且对比度明显, 这时可以显示出加密的信息。当然, 这里也存在一种反监视策略, 当第二次施加热扰动时, 加密信息显现, 背景信息也将得到改变, 如果加密信息已经被读取, 实际接收者发现背景信息发生了改变, 则表示信息已经泄露, 可与信息

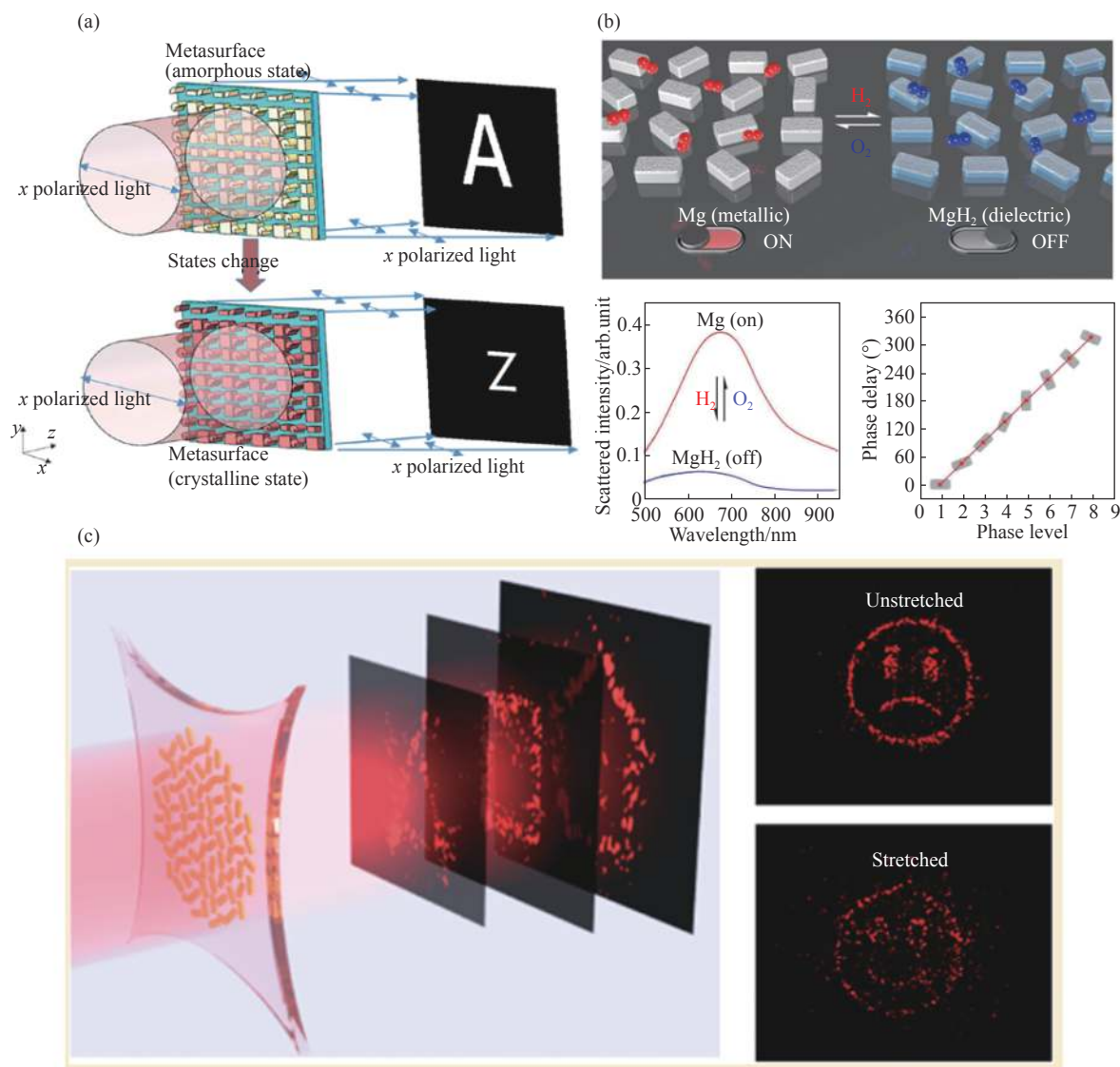


图 5 (a) 基于 GST 相变材料热刺激下晶态与非晶态切换的双重全息显示^[88]; (b) 基于加氢/脱氢化学反应的动态全息和光学信息加密^[93]; (c) 基于聚二甲基硅氧烷弹性衬底的多路复用全息显示^[95]

Fig.5 (a) Dual holographic display based on the switch between crystalline state and amorphous state under thermal stimulation of GST phase change material^[88]; (b) Dynamic holographic and optical information encryption based on hydrogenation/dehydrogenation chemical reactions^[93]; (c) Multiplex holographic display based on polydimethylsiloxane elastic substrate^[95]

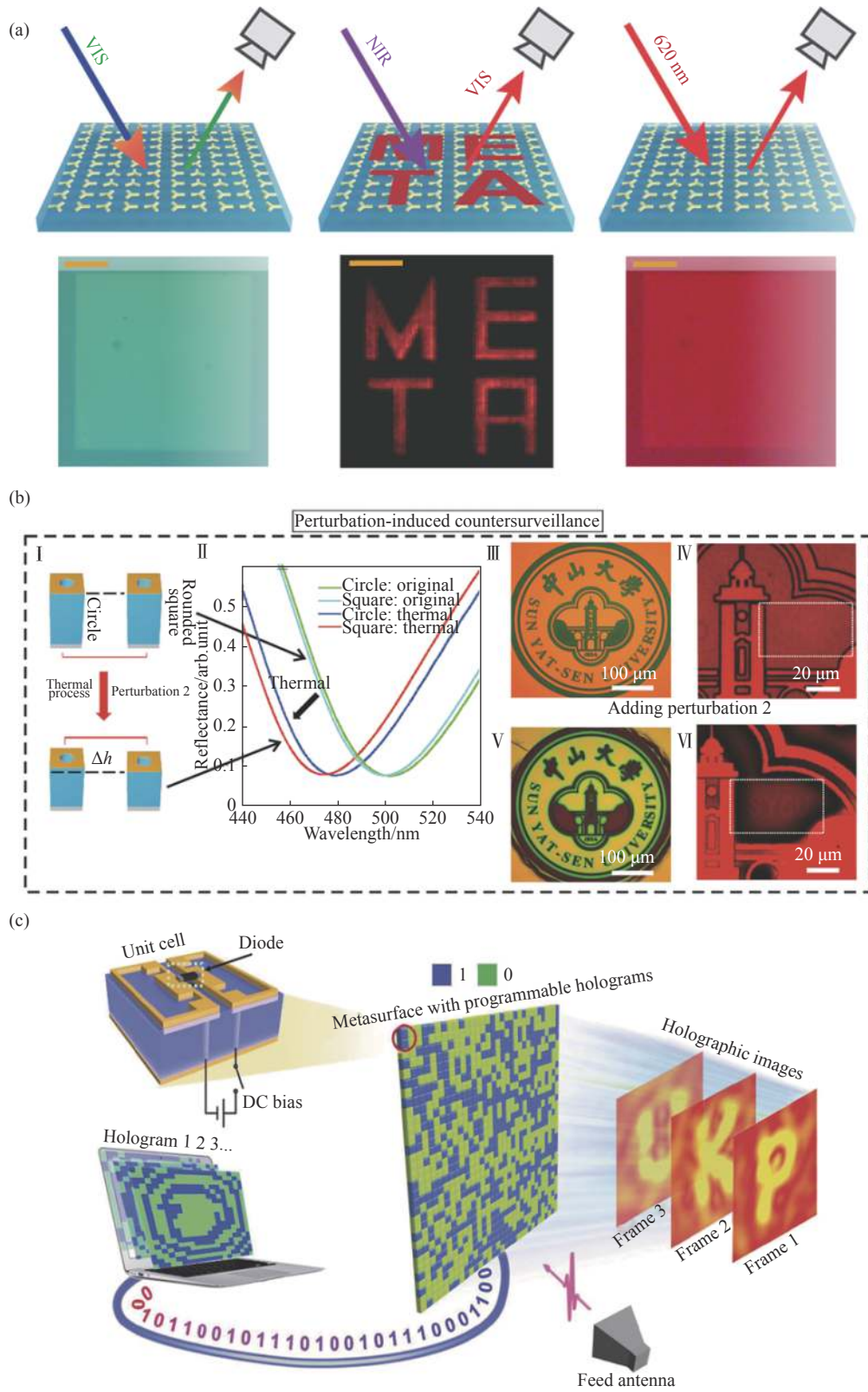


图 6 (a) 基于二次谐波非线性超表面的光学信息加密^[106]; (b) 基于热扰动的反监视超表面^[107]; (c) 电磁可编程超表面全息图^[108]

Fig.6 (a) Optical information encryption based on the second harmonic nonlinear metasurface^[106]; (b) Anti-surveillance metasurface based on thermal disturbance^[107]; (c) Electromagnetic reprogrammable coding metasurface holograms^[108]

发送者中止通讯,以减少更多的损失。微扰反监视超表面通过感应热光谱漂移,加密信息几乎可以完美地隐藏和伪装,以一种更加隐蔽的方式进行信息存储和交换。

电激励的主动可调型超表面,如 Cui 等人开发的电磁可编程超表面全息图^[108],如图 6(c)所示,通过控制加载的二极管,编码超表面的每个单元的状态可以在 1 和 0 之间切换,且只需一个编码超表面,计算机通过动态地改变相位分布(1、2、3)来数字地控制超表面,在馈电天线的激发下,超表面全息图可以将相位分布 1、2、3 的全息图像依次投射到成像平面,显示字母 P、K、U,实时实现多个所需的全息图像,所提出的可重编程全息图可能是使未来智能设备可重配置和可编程功能的关键。另外,Cui 等人还设计了时空调制数字编码超表面^[109],它可同时控制电磁波的传播方向和谐波功率分布。基于二进制粒子群优化算法的时间编码序列设计,使用可编程门阵列控制的装置,该工作演示了不同谐波频率下的波束扫描模式。该方法具有良好的性能,在无线通信、雷达感知、自适应波束形成、全息成像等领域具有潜在的应用前景。

在该章节中,总结了几种主动可调型超表面,以及它们利用各自的特点用于信息加密隐藏技术。主动可调型超表面的形式变化多端^[110],其他的可调型超表面还包括时空光主动调控超表面^[111]、偏振可调结构色^[112]、动态电磁幻象的可重构超表面斗篷^[113]等。这些新奇设计将静态的、简易的信息加密防伪转变为动态的、复杂度高的信息加密防伪,极大地推动了光学信息处理的灵活多样性。

5 总结与展望

文中简要综述了近年来光学科研工作者们在超表面多维光场调控及其在信息加密防伪上的一些研究进展。主要介绍了超表面对光场的振幅、相位、偏振、波长等多个基本维度,及其多种组合方式上的全方位调控,以及在上述调控维度的基础上,进一步施加外部激励或扰动所产生的动态调节功能。基于光场基本维度及外部激励的光场调控,为光信息编码、加密、隐藏技术提供了强大高效轻便的新平台,为开发新一代信息加密防伪器件、新一代信息安全技术提

供了坚实的理论基础与知识储备。

超表面对多维光场的调控及其在信息加密防伪上的应用研究,目前已经取得了长足的发展,但仍然存在诸多进一步亟待解决的科学问题。如新材料的复合功能性问题,更简单实用的调控机制及方法原理,更加精密的大规模大尺度样品的制造加工技术等。笔者等坚信,通过一代又一代光学科研工作者的不懈奋斗,超表面光场调控及信息隐藏加密实用器件必将走向工业化、走向大众日常生活当中,为提升国民经济发展、提升国家核心产业竞争力、提高人民生活水平贡献一定的力量。

参考文献:

- [1] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nat Mater*, 2014, 13(2): 139-150.
- [2] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications [J]. *Rep Prog Phys*, 2016, 79(7): 076401.
- [3] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [4] Leonhardt U. Optical conformal mapping [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [5] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index [J]. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-379.
- [6] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [7] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(18): 3966.
- [8] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [9] Chen X, Huang L, Muhlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. *Nat Commun*, 2012, 3(1): 1198.
- [10] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 812.
- [11] Khorasaninejad M, Aieta F, Kanhaiya P, et al. Achromatic metasurface lens at telecommunication wavelengths [J]. *Nano Lett*, 2015, 15(8): 5358-5362.

- [12] Deng Z L, Li G X. Metasurface optical holography [J]. *Materials Today Physics*, 2017, 3: 16-32.
- [13] Zheng G, Muhlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(4): 308-312.
- [14] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1-6.
- [15] Yu N, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [16] Ding F, Wang Z, He S, et al. Broadband high-efficiency half-wave plate: a supercell-based plasmonic metasurface approach [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4111-4119.
- [17] Liu Z C, Li Z C, Liu Z, et al. Single-layer plasmonic metasurface half-wave plates with wavelength-independent polarization conversion angle [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(8): 2061-2069.
- [18] Yue F Y, Wen D D, Xin J T, et al. Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1558-1563.
- [19] Yi X, Ling X, Zhang Z, et al. Generation of cylindrical vector vortex beams by two cascaded metasurfaces [J]. *Opt Express*, 2014, 22(14): 17207-17215.
- [20] Keshavarz Hedayati M, Elbahri M. Review of metasurface plasmonic structural color [J]. *Plasmonics*, 2016, 12(5): 1463-1479.
- [21] Song M W, Li X, Pu M B, et al. Color display and encryption with a plasmonic polarizing metamirror [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(1): 323-331.
- [22] Yang W, Xiao S, Song Q, et al. All-dielectric metasurface for high-performance structural color [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 1864.
- [23] Khorasaninejad M, Zhu W, Crozier K B. Efficient polarization beam splitter pixels based on a dielectric metasurface [J]. *Optica*, 2015, 2(4): 376-382.
- [24] Cai T, Wang G M, Zhang X F, et al. Ultra-thin polarization beam splitter using 2-D transmissive phase gradient metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5629-5636.
- [25] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions [J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, 15(2): 125-130.
- [26] Xu L Y, Curwen C A, Hon P W C, et al. Metasurface external cavity laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(22): 221105.
- [27] 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.
- [28] Kats M A, Genevet P, Aoust G, et al. Giant birefringence in optical antenna arrays with widely tailorable optical anisotropy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(31): 12364-12368.
- [29] Sun S, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [30] Huang L L, Chen X Z, Muhlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [31] Arbabi A, Arbabi E, Horie Y, et al. Planar metasurface retroreflector [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 415.
- [32] Deng Z L, Deng J, Zhuang X, et al. Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance [J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 78.
- [33] Li J X, Yu P, Tang C C, et al. Bidirectional perfect absorber using free substrate plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(12): 1700152.
- [34] Deng Z L, Yogesh N, Chen X D, et al. Full controlling of Fano resonances in metal-slit superlattice [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 18461.
- [35] Marinica D C, Borisov A G, Shabanov S V. Bound states in the continuum in photonics [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(18): 183902.
- [36] 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(1): 7059.
- [37] Yue F, Zhang C, Zang X F, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam [J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 17129.
- [38] Wang L, Kruk S, Tang H Z, et al. Grayscale transparent metasurface holograms [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1504-1505.
- [39] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.

- [40] Zhao R Z, Huang L L, Tang C C, et al. Nanoscale polarization manipulation and encryption based on dielectric metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800490.
- [41] Intaravanne Y, Chen X Z. Recent advances in optical metasurfaces for polarization detection and engineered polarization profiles [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5): 1003-1014.
- [42] Liu Y, Ling X, Yi X, et al. Realization of polarization evolution on higher-order Poincaré sphere with metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(19): 191110.
- [43] Zhang C, Wen D, Yue F, et al. Optical metasurface generated vector beam for anticounterfeiting [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 034028.
- [44] Deng J, Deng L, Guan Z, et al. Multiplexed anticounterfeiting meta-image displays with single-sized nanostructures [J]. *Nano Lett*, 2020, 20(3): 1830-1838.
- [45] Zhang C, Dong F, Intaravanne Y, et al. Multichannel metasurfaces for anticounterfeiting [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(3): 034028.
- [46] Dong F, Chu W. Multichannel-independent information encoding with optical metasurfaces [J]. *Adv Mater*, 2019, 31(45): e1804921.
- [47] Mühlenbernd H, Georgi P, Pholchai N, et al. Amplitude- and phase-controlled surface plasmon polariton excitation with metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(1): 124-129.
- [48] Chizari A, Abdollahramezani S, Jamali M V, et al. Analog optical computing based on a dielectric meta-reflect array [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(15): 3451-3454.
- [49] Babashah H, Kavehvash Z, Koochi S, et al. Integration in analog optical computing using metasurfaces revisited: toward ideal optical integration [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2017, 34(6): 1270-1279.
- [50] 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.
- [51] Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Adv Mater*, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [52] Wang Q, Zhang X, Xu Y, et al. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 32867.
- [53] 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.
- [54] Chen S, Zeuner F, Weismann M, et al. Giant nonlinear optical activity of achiral origin in planar metasurfaces with quadratic and cubic nonlinearities [J]. *Adv Mater*, 2016, 28(15): 2992-2999.
- [55] Zang X, Dong F, Yue F, et al. Polarization encoded color image embedded in a dielectric metasurface [J]. *Adv Mater*, 2018, 30(21): e1707499.
- [56] Duempelmann L, Luu-Dinh A, Gallinet B, et al. Four-fold color filter based on plasmonic phase retarder [J]. *ACS Photonics*, 2015, 3(2): 190-196.
- [57] Li G, Chen S, Pholchai N, et al. Continuous control of the nonlinearity phase for harmonic generations [J]. *Nat Mater*, 2015, 14(6): 607-612.
- [58] Ye W, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography [J]. *Nat Commun*, 2016, 7(1): 11930.
- [59] Wang B, Dong F, Li Q-T, et al. Visible-frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5235-5240.
- [60] Li X, Chen L, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation [J]. *Sci Adv*, 2016, 2(11): e1601102.
- [61] Li Z, Chen C, Guan Z, et al. Three - channel metasurfaces for simultaneous meta - holography and meta - nanoprinting: A single - cell design approach [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(6): 2000032.
- [62] Deng L, Deng J, Guan Z, et al. Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing [J]. *Light Sci Appl*, 2020, 9: 101.
- [63] Song Q, Baroni A, Sawant R, et al. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase metasurfaces [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 2651.
- [64] 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.
- [65] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(11): 937-943.
- [66] Balthasar Mueller J P, 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.
- [67] 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.
- [68] Chen J, Li T, Wang S, et al. Multiplexed holograms by surface plasmon propagation and polarized scattering [J]. *Nano Lett*, 2017, 17(8): 5051-5055.
- [69] Li J X, Chen S Q, Yang H F, et al. Simultaneous control of light polarization and phase distributions using plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(5): 704-710.
- [70] Deng Z L, Deng J, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography [J]. *Nano Lett*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [71] Zhao R, Sain B, Wei Q, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption [J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 95.
- [72] Zhang J, Wei X, Rukhlenko I D, et al. Electrically tunable metasurface with independent frequency and amplitude modulations [J]. *ACS Photonics*, 2019, 7(1): 265-271.
- [73] Flauraud V, Reyes M, Paniagua-Domínguez R, et al. Silicon nanostructures for bright field full color prints [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(8): 1913-1919.
- [74] Bao Y, Yu Y, Xu H, et al. Full-colour nanoprint-hologram synchronous metasurface with arbitrary hue-saturation-brightness control [J]. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 95.
- [75] Ding J, Xu N, Ren H, et al. Dual-wavelength terahertz metasurfaces with independent phase and amplitude control at each wavelength [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 34020.
- [76] Dong F, Feng H, Xu L, et al. Information encoding with optical dielectric metasurface via independent multichannels [J]. *ACS Photonics*, 2018, 6(1): 230-237.
- [77] Jin L, Dong Z, Mei S, et al. Noninterleaved metasurface for (26-1) spin- and wavelength-encoded holograms [J]. *Nano Lett*, 2018, 18(12): 8016-8024.
- [78] Luo X, Hu Y, Li X, et al. Integrated metasurfaces with microprints and helicity - multiplexed holograms for real - time optical encryption [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(8): 1902020.
- [79] Zhao H, Zhang C M, Guo J Y, et al. Metasurface hologram for multi-image hiding and seeking [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(5): 054021.
- [80] Xu H X, Hu G, Han L, et al. Chirality - assisted high - efficiency metasurfaces with independent control of phase, amplitude, and polarization [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(4): 1801479.
- [81] Minatti G, Caminita F, Martini E, et al. Synthesis of modulated-metasurface antennas with amplitude, phase, and polarization control [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 3907-3919.
- [82] Deng Z L, Jin M, Ye X, et al. Full - color complex - amplitude vectorial holograms based on multi - freedom metasurfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(21): 1910610.
- [83] Ren H, Briere G, Fang X, et al. Metasurface orbital angular momentum holography [J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 2986.
- [84] Wei Q, Sain B, Wang Y, et al. Simultaneous spectral and spatial modulation for color printing and holography using all-dielectric metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(12): 8964-8971.
- [85] Zhou H, Sain B, Wang Y, et al. Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5553-5559.
- [86] 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.
- [87] Karvounis A, Gholipour B, MacDonald K F, et al. All-dielectric phase-change reconfigurable metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 051103.
- [88] Jia S Q, Liu J, Khalid A U R, et al. Composite nanostructured design for dynamic control of metasurface holograms [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2020, 37(3): 658-664.
- [89] Li J, Yu P, Cheng H, et al. Optical polarization encoding using graphene - loaded plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 4(1): 91-98.
- [90] Chanana A, Paulsen A, Guruswamy S, et al. Hiding multi-level multi-color images in terahertz metasurfaces [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1466-1470.
- [91] Sautter J, Staude I, Decker M, et al. Active tuning of all-dielectric metasurfaces [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4308-4315.
- [92] Wang L, Li T, Guo R Y, et al. Active display and encoding by integrated plasmonic polarizer on light-emitting-diode [J]. *Sci Rep*, 2013, 3(1): 2603.

- [93] Li J, Kamin S, Zheng G, et al. Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption [J]. *Sci Adv*, 2018, 4(6): eaar6768.
- [94] Yang X, Zhang D, Wu S, et al. Reconfigurable all-dielectric metasurface based on tunable chemical systems in aqueous solution [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 3190.
- [95] Malek S C, Ee H S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate [J]. *Nano Lett*, 2017, 17(6): 3641-3645.
- [96] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.
- [97] Colombi A, Ageeva V, Smith R J, et al. Enhanced sensing and conversion of ultrasonic Rayleigh waves by elastic metasurfaces [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 6750.
- [98] Rahmani M, Leo G, Brener I, et al. Nonlinear frequency conversion in optical nanoantennas and metasurfaces: materials evolution and fabrication [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(10): 18002101-18002112.
- [99] Liu B, Sain B, Reineke B, et al. Nonlinear wavefront control by geometric - phase dielectric metasurfaces: influence of mode field and rotational symmetry [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(9): 1902050.
- [100] Chen S M, Li G X, Cheah K W, et al. Controlling the phase of optical nonlinearity with plasmonic metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1013-1024.
- [101] Minovich A E, Miroshnichenko A E, Bykov A Y, et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(2): 195-213.
- [102] Celebrano M, Wu X, Baselli M, et al. Mode matching in multiresonant plasmonic nanoantennas for enhanced second harmonic generation [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(5): 412.
- [103] Tang Y T, Intaravanne Y, Deng J H, et al. Nonlinear vectorial metasurface for optical encryption [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(2): 024028.
- [104] Gao Y, Fan Y, Wang Y, et al. Nonlinear holographic all-dielectric metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2018, 18(12): 8054-8061.
- [105] Lin Z, Huang L, Xu Z T, et al. Four - wave mixing holographic multiplexing based on nonlinear metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(21): 1900782.
- [106] Walter F, Li G, Meier C, et al. Ultrathin nonlinear metasurface for optical image encoding [J]. *Nano Lett*, 2017, 17(5): 3171-3175.
- [107] Xue J, Zhou Z K, Lin L, et al. Perturbative countersurveillance metaoptics with compound nanosieves [J]. *Light Sci Appl*, 2019, 8(1): 101.
- [108] Li L, Jun Cui T, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms [J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 197.
- [109] Zhang L, Chen X Q, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 4334.
- [110] Nemati A, Wang Q, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(5): 18000901-18000925.
- [111] Shaltout A M, Shalaev V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces [J]. *Science*, 2019, 364(6441): eaat3100.
- [112] Kim M, Kim I, Jang J, Lee D, et al. Active color control in a metasurface by polarization rotation [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2018, 8(6): 982.
- [113] Huang C, Yang J, Wu X, et al. Reconfigurable metasurface cloak for dynamical electromagnetic illusions [J]. *ACS Photonics*, 2017, 5(5): 1718-1725.