

超表面偏振信息编码

胡孟霞, 王志强, 李向平, 邓子岚*

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 511443

摘要 超表面在光偏振调控方面具有卓越的能力, 利用超表面结构的偏振控制实现信息编码与加密成为一种新兴的光学编码技术。本文旨在介绍超表面偏振光学及其在信息加密领域的最新进展。首先介绍对光束偏振态进行整体调控的各类超表面偏振光学元件, 包括超表面波片、偏振器和偏振分束器, 强调了超表面在偏振操控方面的卓越性能; 接着深入介绍基于不同微型超表面偏振光学元件进行的像素化偏振信息编码, 包括对近场偏振态空间分布进行逐点编码的马吕斯超表面, 以及对远场偏振态进行空间编码的偏振全息和矢量全息超表面; 然后阐述近场与远场像素化偏振空间编码超表面在信息隐藏与加密领域的应用示范; 最后进行简要总结, 并展望超表面偏振信息编码技术的未来发展趋势与应用潜力。

关键词 表面光学; 偏振调控; 超表面偏振光学元件; 马吕斯超表面; 矢量全息; 信息加密

中图分类号 TN209

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230724

1 引言

偏振是描述电磁波性质的重要物理量, 几乎涉及物理学中的每个领域, 从最常见的大气光散射到涉及原子能级跃迁的量子力学都存在它的身影。光的偏振描述了光波中电场分量的振荡方向, 是光波的基本属性之一, 在非线性光学、量子纠缠、液晶显示、生物医学、信息编码与加密等领域被广泛应用。为了调控光的偏振属性, 人们基于双折射晶体设计了诸多具有特定功能的偏振光学元件。例如: 在液晶(LC)显示方面^[1-3], 通过调制偏振光的旋转角来控制像素的亮度和颜色, 从而在基于液晶屏幕的现代电子设备上实现了高质量的彩色图像显示; 在生物医学方面^[4-9], 光学相干断层扫描(OCT)技术利用光的偏振信息可以获取生物组织的高分辨率断层图像。近年来, 人们基于微纳结构对光的偏振响应构建了偏振光栅^[10-12]、偏振全息^[13-15]等超表面偏振光学元件, 使得原本庞大的光学系统微型化, 为开发单片多功能集成化偏光器件提供了便捷有效的平台。本文主要针对超表面偏振光学元件及其在信息编码与加密方面的应用进行简要综述。

超表面自 2011 年被哈佛大学 Capasso 课题组^[16]提出后已经发展了十余年, 最初的超表面利用金属支持的等离子体共振效应对电磁波进行相位调控, 实现了光的异常折射与反射、平面聚焦、特殊光束整形等。随后, 基于全电介质微纳结构米氏散射的超表面被提出, 为平面光学元件的实用化奠定了基础。超表面由周期性谐振单元结构构成, 通过改变材料以及结构参数, 可

以对光波的相位、振幅、偏振等物理属性进行高效、灵活的调制, 从而实现对光波前的灵活操纵。作为一种结构紧凑、重量轻并且具有亚波长微纳结构的二维人工电磁材料, 超表面受到了学术界与工业界的广泛关注^[17-24], 在 VR/AR 近眼显示、多维度计算成像、自动驾驶、车载摄影与显示、信息编码与加密等领域具有广阔的应用前景。

超表面对光场的调控类型大致可分为衍射调控与偏振调控。超表面成像透镜、超表面特殊光束整形器、超表面全息元件等常见的超表面元件均属于衍射光学元件, 这些元件主要通过超表面单元结构对光场相位的调控来控制衍射光波前的形状, 实现波前整形功能。随着超表面光场调控自由度的不断增加, 偏振调控型超表面已逐渐成为另一类典型的超表面光学元件。超表面偏振光学元件是一种用于调控光偏振态的薄片光学元件, 由一系列微纳尺度的金属或介质结构构成, 它基于微纳结构的各向异性及圆二色性对光的偏振态进行转化、引导或投影操作。目前, 基于超表面已实现了偏振投影^[25-31]、偏振分束^[32-33]、偏振测量^[34-41]、偏振成像^[42-45]等多种功能。与传统的波片、偏振器等偏光元件不同, 超表面偏振光学元件对光不同偏振分量的相位或振幅的调控是基于结构的各向异性而非材料的各向异性实现的, 调控更为精确、灵活, 并且能对光偏振态实现亚波长尺度的像素化编码。像素化的超表面偏振光学元件利用微纳尺度单元结构对光场局部的偏振态进行逐点调控, 实现特定的偏振态空间分布编码, 为高密度图像信息加密、防伪与显示提供了新途径。

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-06-16; 录用日期: 2023-06-28; 网络首发日期: 2023-07-07

通信作者: *zilandeng@jnu.edu.cn

2 超表面偏振光学元件对宏观光束整体偏振态的调控

天然的光学偏振材料,例如由双折射材料(非立方晶体、塑料等)组成的光学波片,可以使光在介质内传播时在两个正交偏振电场之间产生特定的相位延迟。但是,天然材料的双折射率($\Delta n = n_e - n_o$,其中 n_e 与 n_o 分别表示非常光与寻常光的折射率)有限,需要波片具有足够的厚度,以提供一个远远大于波长的传播距离,这不符合日益增长的光子器件小型化和集成化要求。除了体积较大以外,传统的光学偏振材料普遍具有功能单一与带宽较窄的问题。相对而言,超表面利用微纳结构各向异性的散射特征为操控器件的偏振响应提供了各式各样的设计自由度,并具有超薄、多功能集成等优势,已成为发展新型偏振光学元件的优质平台^[46-48]。

光学超表面通过合理地设计平面纳米结构的形状、尺寸、转角以及位置^[49-60],拥有了前所未有的在亚波长空间分辨率上对光操纵的能力。特别地,利用具有各向异性散射特征的单元结构,超表面能够在亚波长厚度的超薄空间内,对光的偏振态进行精准及多样化调控,为偏振光学元件带来了紧凑、集成兼容性、宽带等优点^[61-64]。本节将介绍利用超表面实现的典型偏振光学元件,包括波片型超表面、偏振器型超表面以及超表面偏振分束器。

2.1 波片型超表面

波片是一种常见的偏振光学元件,它能对一对正交偏振态分量施加不同的相位延迟,从而实现对光束进行偏振态转换的功能。按所施加的相位延迟量的不同,波片可分为半波片(相位延迟为 π)、四分之一波片(相位延迟为 $\pi/2$)以及相位延迟可调谐波片。基于光在各向异性晶体中传播的累积相位,通过改变波片厚度来调控寻常光与非常光的相位差,可以设计出具有不同相位延迟的波片(波片的厚度较大)。而超表面利用由各向同性材料构成的纳米散射体在结构上的各向异性,在亚波长尺度下实现对不同偏振态的相位响应,从而实现各式各样的超表面波片器件,这种器件具有超薄、宽带、调控灵活等优点。如图 1(a)所示,Ding 等^[65]在 2015 年展示了一种基于带隙表面等离子体的超构半波片,其集成了近红外区域从 x 线性偏振到 y 线性偏振转换和波束导向的功能。当入射电场仅在 x 方向(或 y 方向)线性偏振时,将入射光(E)分解为沿纳米棒长轴和短轴方向的两个垂直分量(E_m 和 E_n),旋转的纳米结构支持失谐的正交电偶极子,它们由沿 u 轴和 v 轴的电场分量激发。定义失谐正交电偶极子的反射系数的幅度在半波片工作波长范围内几乎相同,则相对相位差可达到 π ,此时会导致 90° 的偏振旋转。这里的高偏振转换效率归因于由底部金属平面和最顶部

金属纳米结构阵列形成的类法布里-珀罗腔。腔内的部分正交偏振(相同偏振)反射场叠加,导致干涉相长(相消)和近乎于 $1(0)$ 的正交偏振(相同偏振)反射。此外,偏振转换的工作带宽基本上由长轴和短轴共振的特定波长决定,偏振转换所需的正交偏振场之间的功率比大于 20,此时偏振转换效率大于 95%。这种宽带和高效性能可在高达 40° 的宽入射角范围内保持。在一个超构单元中集成多个具有不同几何形状的结构,该超表面就会产生覆盖 2π 范围的反射正交偏振光的线性相位转变。图 1(b)是最早报道的超表面四分之一波片的示意图,该四分之一波片能够在超宽带的红外波长范围内同时实现线偏振到圆偏振的转换以及波束导向功能^[66]。该超构表面由不同尺寸和旋转角的单元结构构成,在线偏振光入射下可产生两束传播方向一致、振幅相等、偏振态相互正交及相位相差 $\pi/2$ 的透射光。两束光发生相干干涉,从而在第一衍射级次上产生圆偏振的非常光。这种超表面四分之一波片具有超宽带性能。基于 V 字形结构中对称与非对称两个本征模式的联合响应,该超构表面的集体共振具有宽带效应,在该共振范围内该结构的散射效率始终保持平稳,且与相位响应近似呈线性关系。因此,该结构的偏振转化功能对波长变化具有较强的鲁棒性,从而具有宽带波片的功能。

以上所介绍的波片型超表面仅能实现固定的单一形式的偏振转换。基于微纳结构及可调谐材料的灵活调控功能,人们进一步实现了可调谐超表面波片。Shi 等^[67]基于拓扑优化的电介质超表面,实现了双折射偏振基矢下随入射角变化而连续变化的可调型超表面波片。这种设计使得单片超表面可以同时实现不同类型的波片,实现连续可调的多种偏振转换功能,如图 1(c)所示。在不同入射角下,所设计结构的双折射基矢逐渐从线性变为椭圆,从而实现了多功能偏振转换。在正入射情况下,器件的本征偏振态为线偏振,而在斜入射(例如 -60° 和 60°)时,由于打破了结构沿传播方向的镜像对称,其琼斯矩阵的本征偏振态将不受线偏振的限制,可以按需设计成任意形式的椭圆本征偏振态。对于固定的水平线偏振入射,当入射角从 -60° 变化到 60° 时,透射的偏振态从圆偏振连续变为水平线偏振,最后再变成 45° 线偏振。2021 年,Biswas 等^[68]为了增加双折射的可调范围,将具有电可调谐光学二向色性的三层黑磷材料集成到法布里-珀罗(FP)腔中,实现了通信波段内的宽带电光偏振转换,如图 1(d)所示。他们将三层黑磷集成到具有增强偏振转换特性的光学谐振腔几何结构中,设计了用于偏振转换的异质结构。该光学谐振腔结构对两个相互正交的偏振态有着显著不同的复反射率特征。当在反射镜和三层黑磷之间施加电压时,对于线偏振入射光束来说,反射光束可以转换为圆偏振光或椭圆偏振光,转换后的偏振态可以覆盖近半个庞加莱球体。然而,这种电光

偏振转换只能工作在一个狭窄的带宽上,而且其性能对波长非常敏感。基于波长响应敏感的特性,此可微型超表面波片可按需设计成针对不同波长表现出不同

功能的波片。图 1(d)所示便是该器件同时表现为波长为 1442 nm 的四分之一波片及波长为 1444 nm 的半波片的情形。

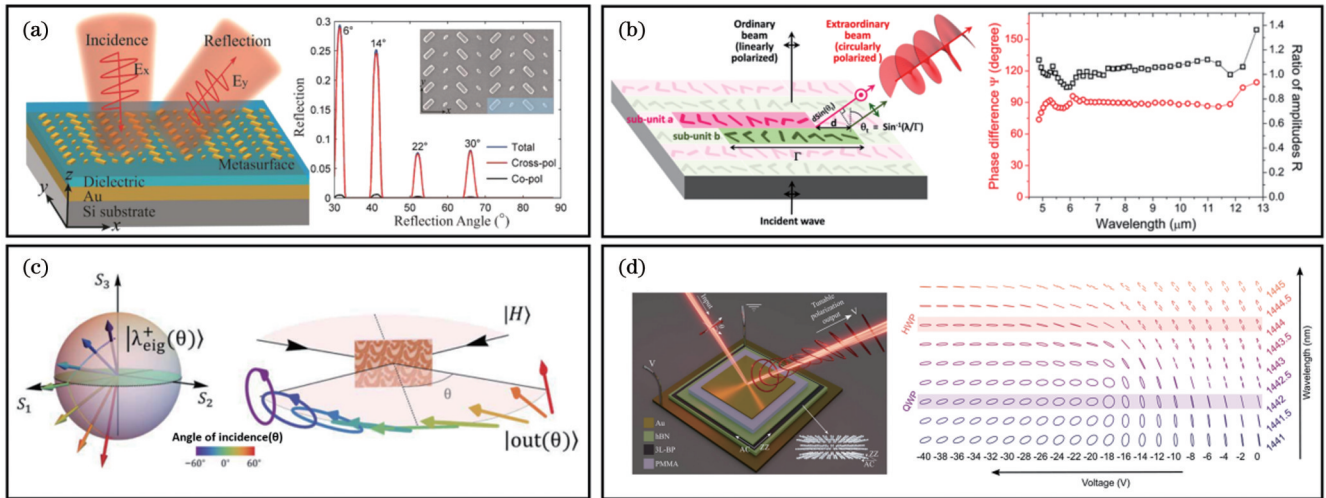


图 1 波片型超表面。(a)自由背景下的半波片超表面示意图,它能够实现正交偏振通道中的偏振转换和异常反射^[65]; (b)左图是两个金 V 形结构子单元组成的四分之一波片超表面示意图,右图是模拟的相位差以及两个散射波的振幅比随波长的变化^[66]; (c)角度可调型波片超表面^[67](左图中的箭头表示与角度有关的器件的本征偏振态 $(|\lambda_{\text{eig}}^+(\theta)\rangle)$);随着入射角变化,器件可以在线性和椭圆双折射之间连续调谐;右图是与入射角度有关的偏振的产生); (d)电可调谐型波片超表面^[68](右图是电可调谐偏振转换示意图,左图是在选定电压和 9 个不同波长下测得的反射偏振椭圆)

Fig. 1 Waveplate metasurface. (a) Schematic diagram of a half-waveplate metasurface in a free background, capable of polarization conversion and anomalous reflection in orthogonally polarized channels^[65]; (b) left panel is a quarter-waveplate metasurface composed of two Au V-shaped antenna subunits, and the right panel is simulated phase difference and amplitude ratio between two scattered waves as a function of wavelength^[66]; (c) angle-multiplexed waveplate metasurface^[67] (the arrows in left panel indicate the angle-dependent intrinsic polarization state $(|\lambda_{\text{eig}}^+(\theta)\rangle)$); the device can be continuously tuned between linear and elliptical birefringence as the incident angle varies; the right panel is the generation of polarization dependent on incident angle); (d) electrically tunable waveplate metasurface^[68] (the right panel is the schematic of electrically tunable polarization conversion and the left panel is measured reflection polarization ellipse for selected voltages and nine different wavelengths)

2.2 偏振器型超表面

偏振器是另一种常见的偏振光学元件,基于超表面的偏振器能实现传统偏振器无法实现的偏振态投影或过滤功能。图 2(a)所示为利用超表面实现线偏振器功能的示意图,即采用金属线栅的形式有效过滤出特定的线偏振光。将不同类型的金属线栅结构组合成微偏振器阵列,并将其与图像传感器集成,可用于偏振探测和偏振成像等应用场景^[69]。2009 年, Gansel 等^[70]采用激光直写的方法加工出了具有三维螺旋结构的圆偏振器,如图 2(b)所示。圆偏振态与具有特定手性螺旋状的金属结构相互作用时被吸收或反射,从而使得只有一种圆偏振态能透射。超表面微纳结构的精细设计使其可进行偏振过滤的基矢不仅仅局限于线偏振态或圆偏振态, Wang 等^[71]提出了一种基于全电介质超表面的全庞加莱球偏振器,这种偏振器的单片就能够实现任意偏振态的投影与过滤操作,如图 2(c)所示。不同于波片型超表面在正交线偏振基矢下沿快轴和慢轴施加不同的相位延迟,这种超表面偏振器由包含两个电介质双折射纳米柱的超构分子阵列组成,通过精

心定制一对纳米柱的长度、宽度与转角,控制从纳米柱发出的散射光的远场干涉,可以实现对任意椭圆态透射的二向色性。Wang 等^[71]基于庞加莱球面上某一偏振态的琼斯矩阵变换,利用两个具有不同尺寸和方向的双折射超构原子,有效实现了基于偏振转换的二向色性,使某一预设的任意偏振态在透射端实现手性转换,同时完全阻断了与所预设偏振态正交的偏振态透过。该超表面偏振器表现出了理论上接近于 1、实验上超过 90% 的超高二向色性^[71]。更进一步,他们采用伴随优化算法对超表面琼斯矩阵进行逆向设计优化,提出了实心庞加莱球起偏器的概念,如图 2(d)所示,实现了对非偏振入射光偏振态与偏振度的同时独立调控,即将非偏振入射光转化为具有任意偏振态和偏振度的偏振光或部分偏振光,这些偏振光和部分偏振光所具有的偏振态与偏振度对应着庞加莱球表面和内部的任意位置。非偏振光束可以被视为具有随机相位差的两个正交偏振态的叠加。输出偏振通过 $\vec{\beta}^-$ 结合一部分正交偏振态 $\vec{\beta}^+$ (振幅为 $|c|^2$) 构建非偏振

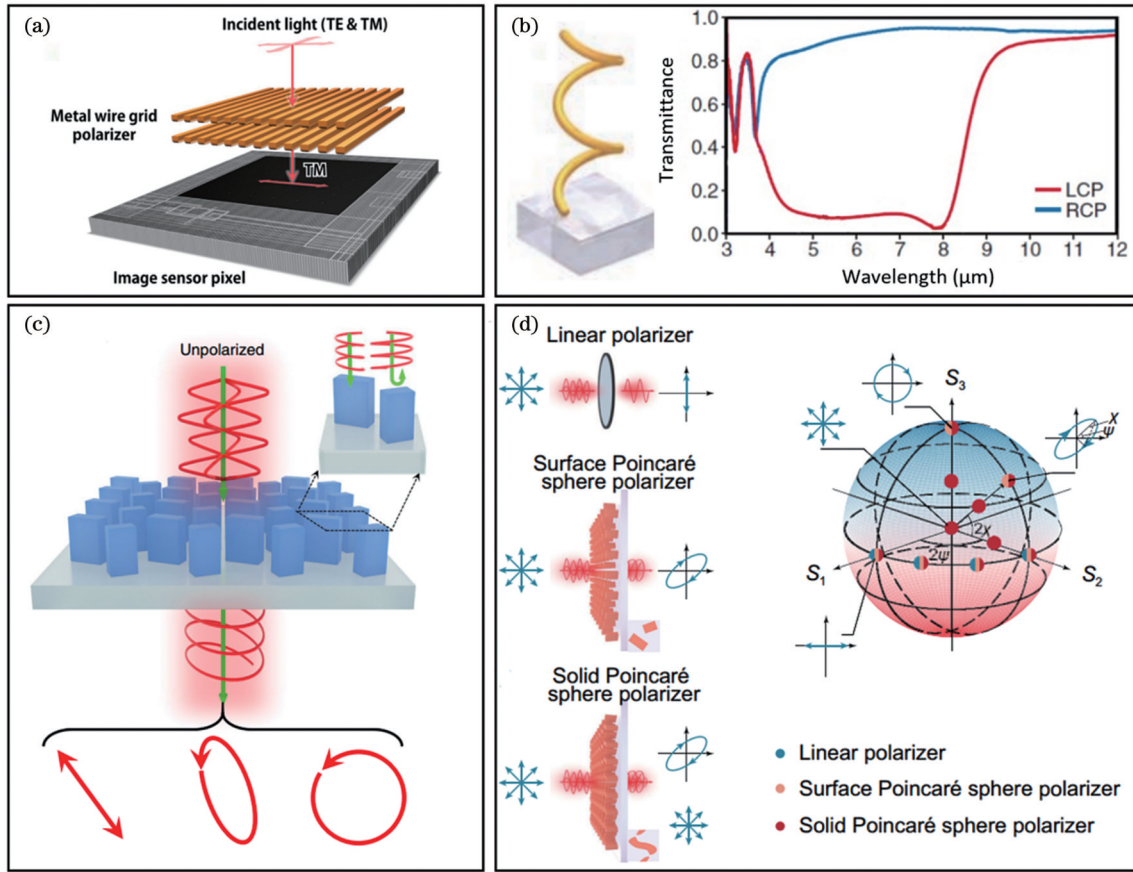


图 2 偏振器型超表面。(a)线偏振器超表面^[69];(b)圆偏振器超表面^[70];(c)全庞加莱球表面偏振器超表面^[71];(d)实体全庞加莱球偏振器超表面^[72]

Fig. 2 Polarizer metasurface. (a) Linear polarizer metasurface^[69]; (b) circular polarizer metasurface^[70]; (c) full Poincaré sphere surface polarizer metasurface^[71]; (d) solid full Poincaré sphere polarizer metasurfaces^[72]

光。 $\vec{\beta}^+$ 的剩余部分是一束振幅为 $(1 - |c|^2)$ 的偏振光。输出光为上述非偏振光和偏振光分量的叠加,比值由系数 c 控制。采用逆向设计伴随方法设计自由形态超表面,能够精准地调控任意正交偏振基矢下的琼斯矩阵分量,从而实现任意偏振态与偏振度的独立调控^[72]。

2.3 超表面偏振分束器

偏振分束器是另一种常见的偏振光学元件,具有将光束按偏振进行分束的功能,常用于对偏振态有特殊要求的光路中,在液晶显示、光纤通信、偏振成像、量子光学等领域发挥着重要作用。传统的偏振分束器基于立方晶体,体积庞大,而且其所分束的偏振态基矢仅仅局限于线偏振态,分束通道数量仅局限于两个,不利于器件的小型化与偏光功能的集成化。基于超表面的偏振分束器在亚波长厚度的超薄平台下便能实现偏振分束功能,而且其不仅仅局限于对正交线偏振态的分束,可以扩展到对任意正交椭圆偏振态的分束。如图 3(a)所示,Mueller等^[73]通过超表面设计实现了对正交圆偏振态及正交椭圆偏振态的分束功能。通过对长方形纳米柱的长、宽、转角进行设计,联立几何相位与传输相位调控设计了偏向角为 β 且偏振依赖的相位梯度

$(2\pi x/\lambda)\sin\beta$,其中 x 为空间坐标, λ 为入射光波长。将此相位梯度进行周期性重复排列,可形成超表面光栅结构,所预设的正交圆偏振态或椭圆偏振态分束到光栅的正负一级衍射级处。该工作设计并实现了 6 组正交偏振态的偏振分束,它们与庞加莱球面上的正十二面体顶点相匹配。通过测量所设计超表面光栅的正负一级衍射级强度,即可确定该器件的最佳偏振态(即消光比最大的偏振态)^[73]。Rubin等^[44]使用 11×11 个单元的多原子超表面,在 532 nm 处实现了将任意入射偏振态同时过滤出一个圆偏振光与三个椭圆偏振光的四偏振分束功能,且每束透射的偏振光都具有 90% 以上的透射效率,如图 3(b)所示。该工作通过引入矩阵傅里叶光学来分析光栅衍射级的偏振响应特征,在光栅的不同衍射级次下并行实现了多组偏振态基矢的过滤功能。此超构光栅是分振幅偏振成像系统的核心部件。Wang等^[74]通过多个偏振分束超表面组合的方式,实现了六通道偏振分束器,并将其应用于多光子量子纠缠态的重构与测量,如图 3(c)所示。根据几何相位与传输相位的调控机理,每个超表面由具有特殊尺寸和转角的纳米柱组成,以分束特定的正交偏振态。在多光子希尔伯特空间中不同的量子态投影到 6 个

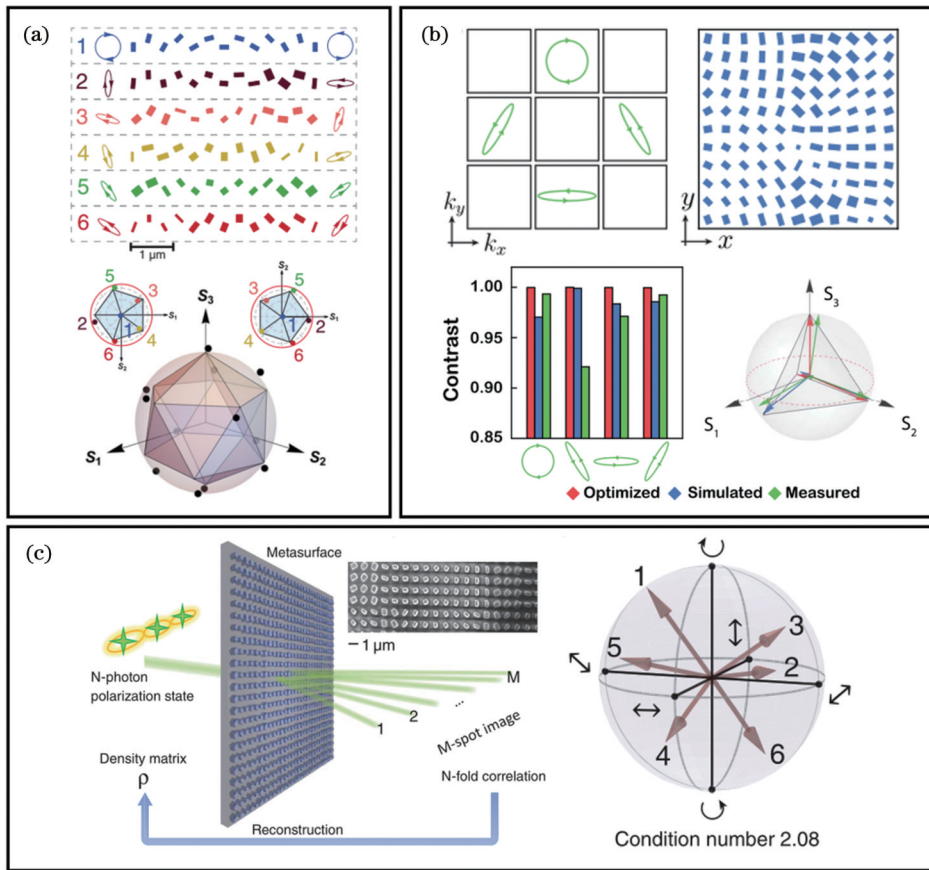


图 3 超表面偏振分束器。(a)超表面椭圆偏振分束器^[73];(b)应用于全斯托克斯偏振成像的四通道偏振分束器^[44];(c)应用于量子纠缠态量的六通道偏振分束器^[74]

Fig. 3 Metasurface polarizing beam splitter. (a) Metasurface elliptical polarization beam splitter^[73]; (b) four-channel metasurface polarization beam splitter applied to full Stokes polarization imaging^[44]; (c) six-channel metasurface polarization beam splitter for quantum entanglement state reconstruction^[74]

成像点(即 6 个输出端口,分别对应着水平、垂直、+45°、-45°、左旋、右旋 6 个偏振态),通过直接测量来自所有通道的所有可能 N -光子相关性(其中 N 是光子数),可重建初始 N -光子密度矩阵,提供有关多光子量子纠缠的完整信息^[74]。

3 像素化超表面光学元件对光束偏振态空间分布的编码

上一节综述的超表面偏振光学元件仅对入射光束整体的偏振态进行单一形式的调控,与传统偏振光学元件的偏光功能是一致的。由于超表面光场调控以微纳散射体为单元结构,其对光场偏振态调控的空间精度为微纳尺度的像素大小,即超表面的每一个单元结构均可以等效为一个微型的波片或偏振器等局部偏振光学元件。通过改变微纳散射体的结构参数,可以按需设计具有一定空间分布的微型偏振光学元件阵列,从而对光场的偏振态空间分布进行像素化编码,实现传统体态偏振光学元件不能企及的像素化偏振调控。接近场与远场像素化偏振态调控之分,这一节将分别对基于马吕斯超表面的近场像素化偏振态编码与基于偏振/矢量全息超表面的远场像素化偏振态编码进行介绍。

3.1 对近场偏振态空间分布进行逐点编码的马吕斯超表面

超表面对偏振态的像素化调控^[75-79]可以更好地与信息加密防伪等功能相结合。将描述偏振-强度投影关系的马吕斯定律与超表面平台设计相结合,通过计算入射光偏振角与输出光强之间的关系可以间接计算光波的振幅,从而可以通过仅改变纳米结构的转角来实现振幅的连续调控。这种基于马吕斯定律进行偏振-振幅映射调控的超表面被称为马吕斯超表面^[80-88]。马吕斯定律主要描述线偏振投影关系,因此,马吕斯超表面通常基于线偏振入射光的光场偏振信息进行调控与编码,这种超表面往往使用单一几何尺寸的纳米结构,大幅降低了仿真优化以及实际加工的难度。更重要的是,马吕斯超表面的振幅大小仅与纳米结构的长轴和入射光偏振角之间的夹角有关,在确定夹角与振幅的一一对应关系之后,可以通过连续改变纳米结构转角来实现振幅的连续调控,而不需要考虑光波波长以及纳米结构尺寸带来的影响。

目前,马吕斯超表面在信息编码与加密^[2,87,89]、图像显示^[86,89]、偏振伪装^[81,90]、矢量全息^[83,91]、信息隐藏^[87]等方面发挥着重要作用。2018年,Yue等^[87]将物理学家麦

克斯韦的高分辨率灰度头像隐藏在边长小于 0.5 mm 的方形激光束中,利用纳米金属棒阵列结构构建像素化微型波片,每个微型波片的大小即为超表面的像素大小,仅为 $300\text{ nm} \times 300\text{ nm}$ 。基于马吕斯定律将微型波片转换偏振态的转角与灰度图像的像素值进行一一映射,即可将图像信息编码在快轴与慢轴随空间位置变化的微型波片阵列上。当入射线偏振光正入射到金属结构的超表面上时,其反射光束强度仍然保持均匀分布,并不能获取任何图像信息,只有在反射光路中加入检偏器进行检偏才能解码出隐藏在激光束中的 256

级连续灰度图像信息,如图 4(a)所示。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^[92]实现了在激光束偏振分布中隐藏快速反应码,Deng 等^[93]实现了双通道偏振隐藏图像与添加水印防伪功能,Zhang 等^[94]实现了多通道偏振图像加密。2019 年,Dai 等^[86]基于谐振电介质超表面设计了一个纳米偏振器,通过连续改变纳米结构转角来点对点地逐一操控线偏振光的强度,实现了一种高分辨率 (84667 dpi) 连续灰度图像的显示方法,如图 4(b)所示。

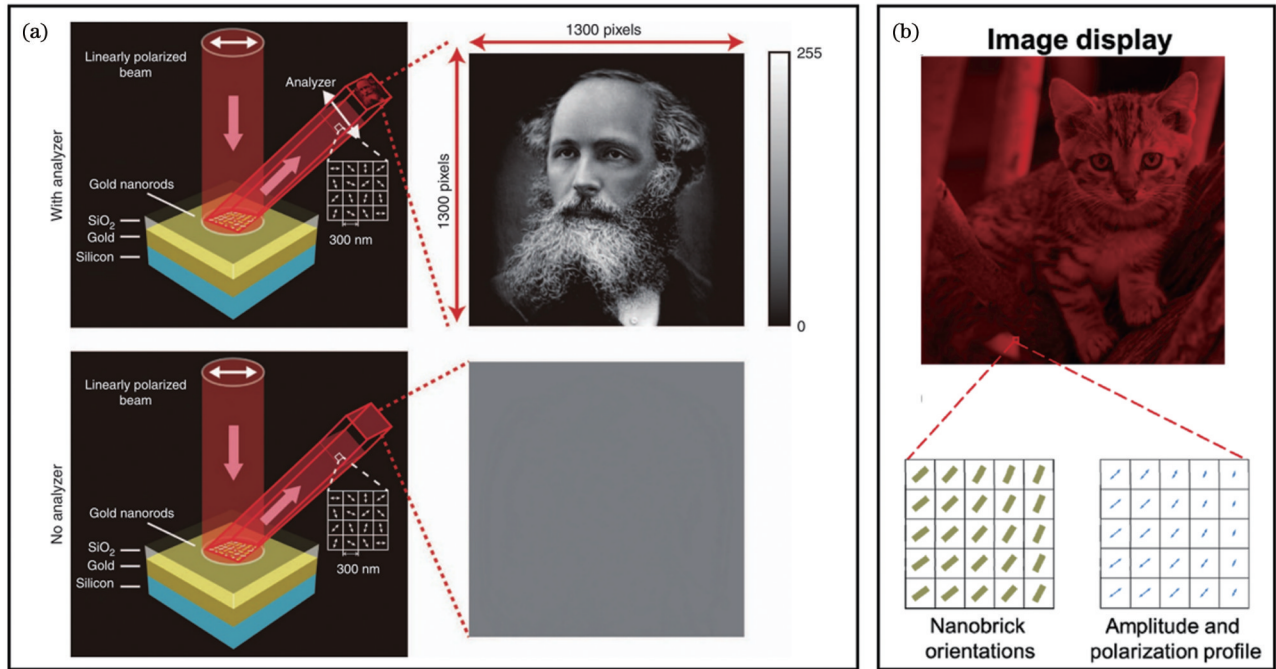


图 4 将灰度图像信息编码在偏振分布中,运用马吕斯定律对图像信息进行加密。(a)基于金属结构实现高分辨率灰度图像的隐藏^[87]; (b)基于电介质纳米结构,实现高分辨率和连续灰度图像的显示^[86]

Fig. 4 Gray image information is encoded in the polarization profile distribution, and the image information is encrypted with Malus law. (a) Realization of high-resolution gray image hiding based on the metal structure^[87]; (b) based on the dielectric nanostructure, high-resolution and continuous gray-scale image display can be realized^[86]

随着应用层次的深入拓展,大数据时代对信息容量的需求不断增加,高容量低串扰的信息复用技术变得尤为重要。多路信息复用技术包括波长复用^[82,95]、空间频率复用^[96]、相位复用^[88,97]和偏振复用^[83]等。将偏振调控型超表面与相位调控、波长调控相结合,可以在不增加成本的前提下,更加高效地利用现有硬件设施,将不同的信息记录到同一个超表面元件上,实现多通道信息的独立操控,从而增加器件的信息容量。

将基于马吕斯定律的偏振调控超表面与波长自由度有机结合^[98-100],可以提高信息编码与加密的自由度和多样性。2018 年,Zang 等^[82]将颜色和强度信息同时编码到与波长相关的偏振态空间分布上,该方法通过优化与波长相关的各向异性纳米结构的尺寸并改变纳米结构转角来实现对颜色和强度信息的同时编码,如图 5(a)

所示。这种独特的方法将波长选择性和任意偏振控制结合到单个亚波长像素级,为彩色图像显示提供了新的方法。马吕斯超表面同样可以与相位信息调控相结合。马吕斯超表面的偏振调控和几何相位超表面的相位调控都源于对各向异性单元结构旋转角的调控。根据马吕斯定律,超构表面中存在的转角简并性为信息复用提供了设计自由度。2020 年,Deng 等^[88]利用具有单一纳米结构的马吕斯超表面,同时实现了对线偏振光的振幅调控以及对圆偏振光的相位调控。这种超构表面可以在近场产生连续灰度图像,而在远场产生二阶或四阶相位型全息图像。这为实现近场图像显示和远场全息两种功能的复用提供了新的途径,如图 5(b)所示,这种调控方式在降低纳米结构复杂性的同时确保了高质量图像显示。2021 年,Deng 等^[83]运用双原子结构,在马吕斯超表面偏振调控的基础上进一步对振幅进行调控。

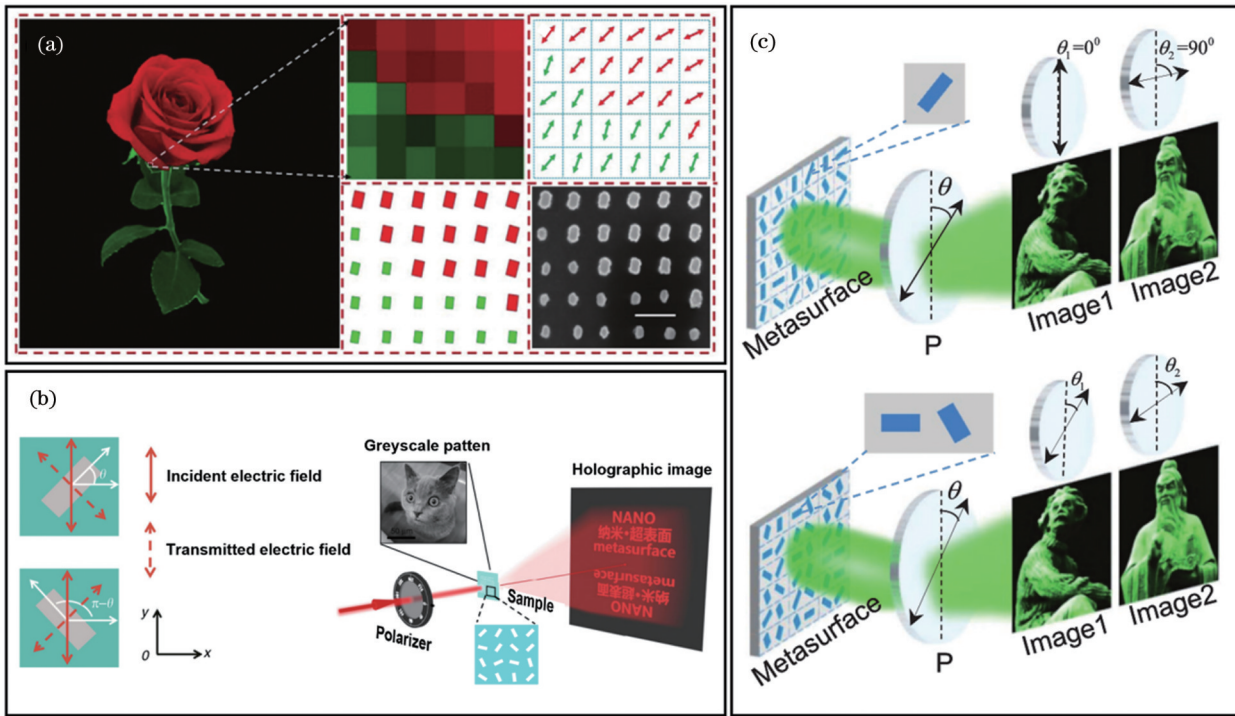


图5 马吕斯超表面与光的其他属性调控相结合。(a)与波长调控相结合^[82];(b)与相位信息调控相结合^[88];(c)与振幅调控相结合^[83]
Fig. 5 Combining Malus metasurface with other properties manipulation of light. (a) Combining with wavelength manipulation^[82];
(b) combining with phase information manipulation^[88]; (c) combining with amplitude manipulation^[83]

该方案通过调节双原子转角的差与和分别独立调控振幅与偏振态,实现了非正交线偏基矢下的连续灰阶图像信息编码以及高保真图像信息隐藏。这种方法为增加编码基矢的可选择性和图像信息加密提供了新的思路,如图5(c)所示。

除了上述详细描述的信息编码与加密、图像隐藏等应用,马吕斯超表面还被广泛应用于多通道信息存储、偏振伪装、光学防伪以及融合计算全息的多通道信息加密等方面。如图6(a)所示,超构表面的每个纳米结构单元都包含着三个通道的信息,能够在不降低各通道信息容量的条件下增加通道数,并且各通道之间的信息传递互不干扰。当线偏振光入射时,将超表面放置在指定位置,可以得到近场的纳米印刷图像;而不同旋向的圆偏振光分别入射至超构表面时,在远场可以得到两幅完全不同的全息图像,从而实现了多通道的信息存储^[85]。在偏振伪装方面,2021年,Xiong等^[81]设计并制备了一种以特殊耦合谐振结构为单元结构的超表面,它能够在不同的环境下激发出不同的共振模式,从而产生特定的相位响应。同时,他们提出了一种动态设计方案,即相位矩阵变换法,用于构建两种环境下结构单元的相位分布。基于该设计思想,他们实现了单波长全息拟态伪装超表面,该超表面能在不同的环境下生成特定的全息图像,如图6(b)所示。除此之外,2019年,Zhang等^[94]将具有不同空间取向的纳米柱组成介电超表面,并将其用于实现多个通道中的不同功能,如图6(c)所示。

通过改变入射光的螺旋度,两幅全息图像可以相互切换,而编码于光束偏振分布中的图像可以通过检偏器进行检偏解码^[94]。马吕斯超表面还可以与计算全息相融合,如图6(d)所示,该方案将双通道马吕斯超表面生成的图像作为单像素成像加密过程中的解码信息^[84]。与超表面的直接成像方法不同,这种方法消除了单像素成像加密中对解码信息数字传输的需要,并且使得单个超表面在不同加密过程中实现重复使用。

总而言之,对近场偏振态进行空间编码的马吕斯超表面结构紧凑简单,能够生成具有更高空间分辨率的连续编码的光学图像,满足了图像加密与编码过程中对图像显示质量、数据存储容量以及器件紧凑度的需求。因此,马吕斯超表面在高容量信息存储、信息隐藏、光学防伪等领域具有广阔的应用前景。

3.2 对远场偏振态进行空间编码的偏振全息与矢量全息超表面

全息图记录了二维平面上的空间振幅和相位分布,能够重现真实三维场景的光波前。全息术是一种重要的三维显示技术。最近,传统的全息技术通过与超表面相结合^[101-108],向单层超表面中引入新的相位调制机制,实现了多功能和高性能的全息应用平台,该平台在信息加密领域展示出了强大的应用能力。

在超表面平台上,超构原子高度可控的偏振响应提供了一种操纵远场光波前偏振态的通用方法^[109-113]。超表面能够实现线偏振复用全息图^[114-116],不同手性的

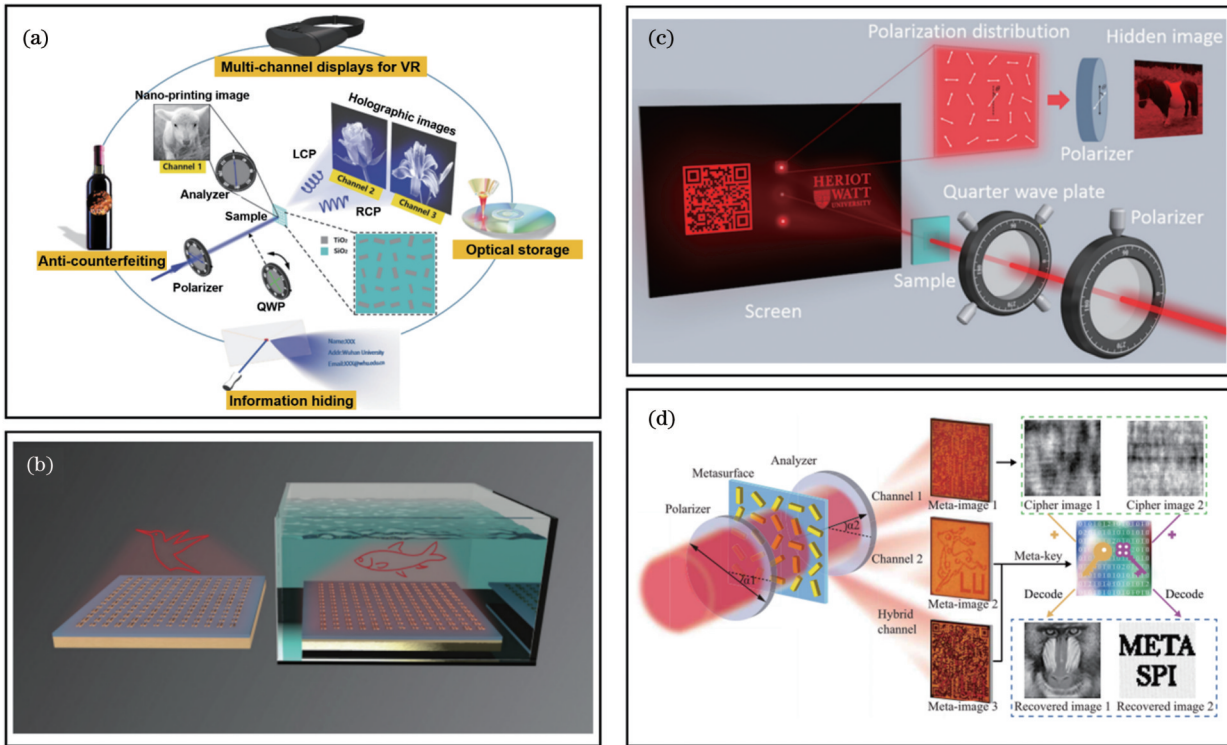


图6 基于马吕斯定律的偏振调控的应用。(a)基于单棒结构的三通道超表面^[85];(b)单波长全息拟态伪装超表面^[81];(c)光学防伪型多通道超表面^[94];(d)融合计算全息加密超表面^[84]

Fig. 6 Application of polarization adjustment based on Malus law. (a) Three-channel metasurface based on single-rod structure^[85]; (b) single wavelength holographic mimicry camouflaged metasurface^[81]; (c) optical security multi-channel metasurface^[94]; (d) cryptographic metasurface fused with computational holography^[84]

圆偏振光可以重建出不同的螺旋度复用全息图^[117-121]，甚至是远场空间偏振态任意分布的矢量全息图。

如图 7(a)所示, Deng 等^[122]利用迂回相位的相位调制方法,实现了线偏振复用的全息图像,同时通过旋转起偏器使不同线偏振态的光照射在超表面上,得到了对应的复用全息图像。迂回相位与超构原子的偏振、光谱响应完全解耦,所以能实现偏振复用的功能。该工作中的超构原子是大小均匀的金属纳米棒,金属纳米棒放置在由局域金属衬底和电介质间隔层组成的多层结构的顶部,单元结构周期与工作波长相当,此时将产生 0 级、1 级等少量衍射级的辐射通道,当局域表面等离子体共振被调节到少级衍射区域时,入射光完全被导入 1 级衍射,而 0 级衍射则完全被抑制。根据迂回相位的位移调相准则,人们可以进一步对单元结构内纳米棒的位置进行编码,从而生成任意波前的全息像。由于位移调相机不改变超构原子的形状、大小与转角,与入射角、波长完全解耦,因此波前整形能力对于大带宽和极大范围的入射角(接近掠入射)具有良好的鲁棒性。传统的迂回相位全息图往往都有孪生像以及强的 0 级衍射,但该工作中的超表面局域表面等离子体模式所诱导的超常光学衍射,可以有效抑制强 0 级衍射与孪生像的出现。最近, Xiong 等^[123]将精心设计的光学响应噪声引入到超表面琼斯矩阵的设计方案中,突破了超表面偏振复用容量的物理极限,并

通过理论演绎和实验证实了利用单一超表面可以获得多达 11 个独立偏振通道。采用不同线偏振态单色可见光照射该超表面,可观测到 11 幅不同的全息图像,如图 7(b)所示。他们的设计策略是在琼斯矩阵元素上引入足够多的噪声设计,以求其近似解,从而克服超表面偏振复用精确解仅有 3 个独立通道的局限性。在实验上, Xiong 等采用反射式超表面结构,具有不同长度、宽度和旋转角度的矩形超构原子支持沿短轴和长轴的两个本征偶极子。首先,在超构原子中引入具有相关噪声的最小二乘解,以创建新的偏振通道,其中目标信号彼此完全不同,然而,已求解的复数输出仍然具有一些相关性,导致全息图像具有适度的串扰;然后,再引入随机非相关噪声,打破不同通道之间的相关性,从而抑制彼此之间的串扰。一般来说,圆偏振复用全息在几何相位超表面中较为流行,因为几何相位与光的圆偏振状态直接相关,几何相位与入射光的方向角、螺旋度成正比。对于具有相反螺旋度的入射光,调制后其几何相位的符号会改变。这意味着,如果在左(右)旋圆偏振下设计一个全息图像,则共轭全息图像会出现在右(左)旋圆偏振光的照明下。图 7(c)展示了分别放置在入射光两侧的花和蜜蜂图像。在左旋圆偏振光照明下,花朵在左侧,蜜蜂在右侧;在右旋圆偏振光照明下,花和蜜蜂的位置相互交换^[124]。更进一步,将几何相位和传输相位相结合,通过琼斯矩阵分

析,可以完全打破圆偏振复用信息的关联性,获得两个完全独立的复用全息像,同时,复用的偏振基矢可以从圆偏振态拓展到任意椭圆偏振态。图 7(d)展示了基

于圆偏振通道与椭圆偏振通道的独立全息信息复用,具体来说就是利用两个独立的相位分布来记录两束具有完全不同弯曲轨迹的加速光束^[125]。

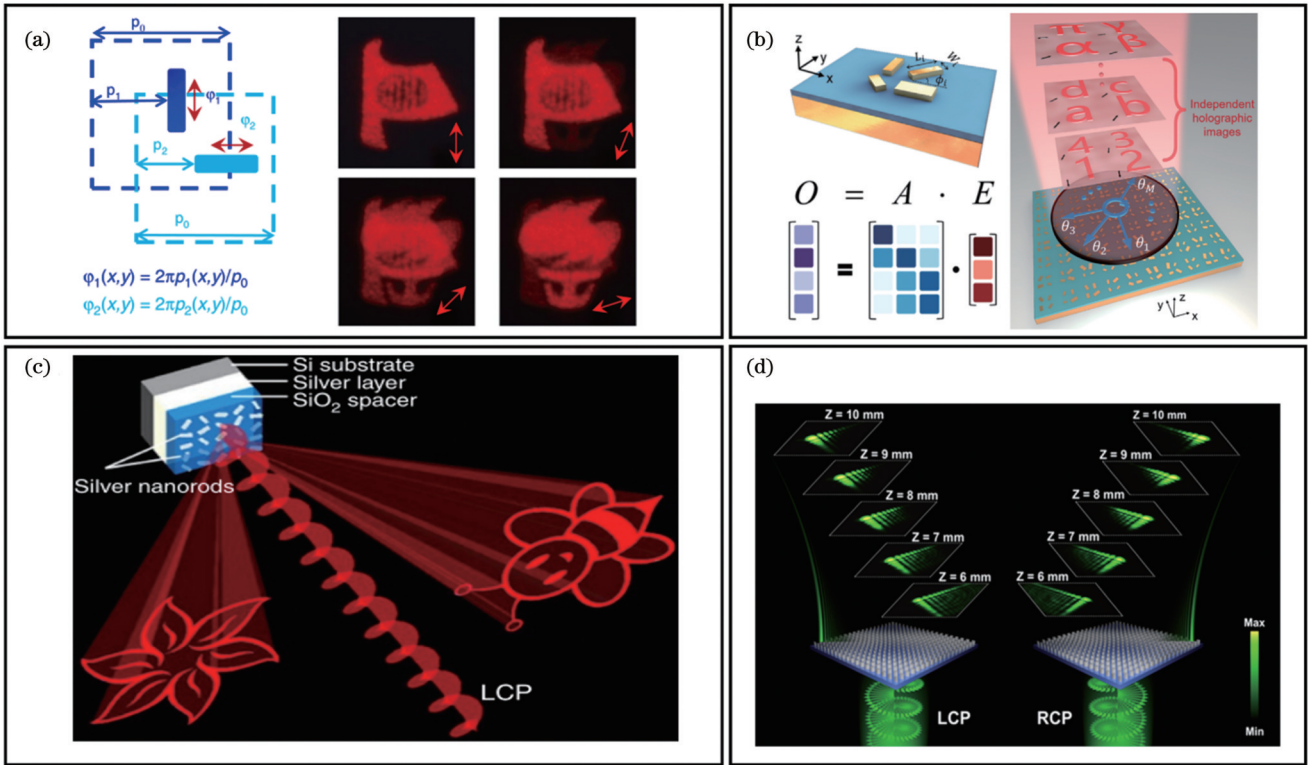


图 7 超表面偏振复用全息。(a)线偏振复用全息^[122]; (b)线偏振复用容量极限^[123]; (c)圆偏振复用全息^[124]; (d)任意偏振复用全息^[125]
 Fig. 7 Metasurface polarization multiplexing holography. (a) Linear polarization multiplexing holography^[122]; (b) linear polarization multiplexing capacity limit^[123]; (c) circular polarization multiplexing holography^[124]; (d) arbitrary polarization multiplexing holography^[125]

偏振复用全息超表面对偏振态的调控局限在对不同入射偏振态信息的复用与呈现上,为了构造出射光场偏振态具有空间变化分布的矢量全息图,需要同时具有相位和偏振同时独立调控的多自由度超表面。2018年,Deng等^[126]采用双原子多自由度超表面构建并实现了矢量全息术。如图 8(a)所示,该超表面的单元结构由两个形状大小相同且取向相互正交的金属纳米棒构成。通过调节它们的相对位移与取向角,可以独立地调控远场光波前的相位和偏振这两个自由度。在特定单一偏振光入射下,该超表面可在远场衍射出预设全息像(辣椒),而且其光场的偏振态空间分布也可按需进行设计,相较于传统的仅基于强度信息编码的全息术增加了偏振编码功能,为信息隐藏与加密提供了更多自由度。同年,Zhao等^[127]通过避免不必要的串扰,将不同空间相位分布的多偏振操纵通道集成到一幅单一的双折射矢量全息图中,在单片超表面上实现了多个独立的目标相位分布,以处理不同偏振状态下的信息。通过选择合适的输入/输出偏振组合,他们展示了具有 12 个偏振通道的高保真度矢量全息图像,如图 8(b)所示。这种多通道偏振复用技术可应用于动态矢量全息显示和信息加密中。2021年,

Song等^[128]在圆偏振基矢上应用改进的 Gerchberg-Saxton(GS)算法,实现了偏振态空间连续变化矢量全息术,如图 8(c)所示。在他们实现的矢量全息图中,局部偏振态的空间分布具有连续变化的特征,其预设偏振态的分布包含偏振方位角与椭圆度两个完整偏振参数的空间分布,即其编码的偏振态覆盖了整个庞加莱球。他们采用的超表面的单元结构由 4 排具有相位梯度分布的超构原子组成。超构单元中上面两行与下面两行的超构原子分别按逆时针方向和顺时针方向排列,方向增量角度相同。全息相位信息分别用左旋圆偏振光和右旋圆偏振光编码,任意偏振态通过具有不同振幅与相位分布的两个圆偏振分量的叠加来实现。

基于矢量全息超表面进一步进行多波长调控,实现多波长或彩色矢量全息,能进一步增强信息编码与加密的自由度。传统的彩色全息术^[129]通常具有图像质量差、色域有限及视角狭窄等问题^[130]。基于灵活光场处理与按需设计光谱响应能力,超表面为彩色全息提供了一种全新的解决方案^[131-135]。在超表面上实现的彩色全息图实际上可以看作是多波长的信息复用。选择三原色(红、绿、蓝)波长的光作为波长复用的基本

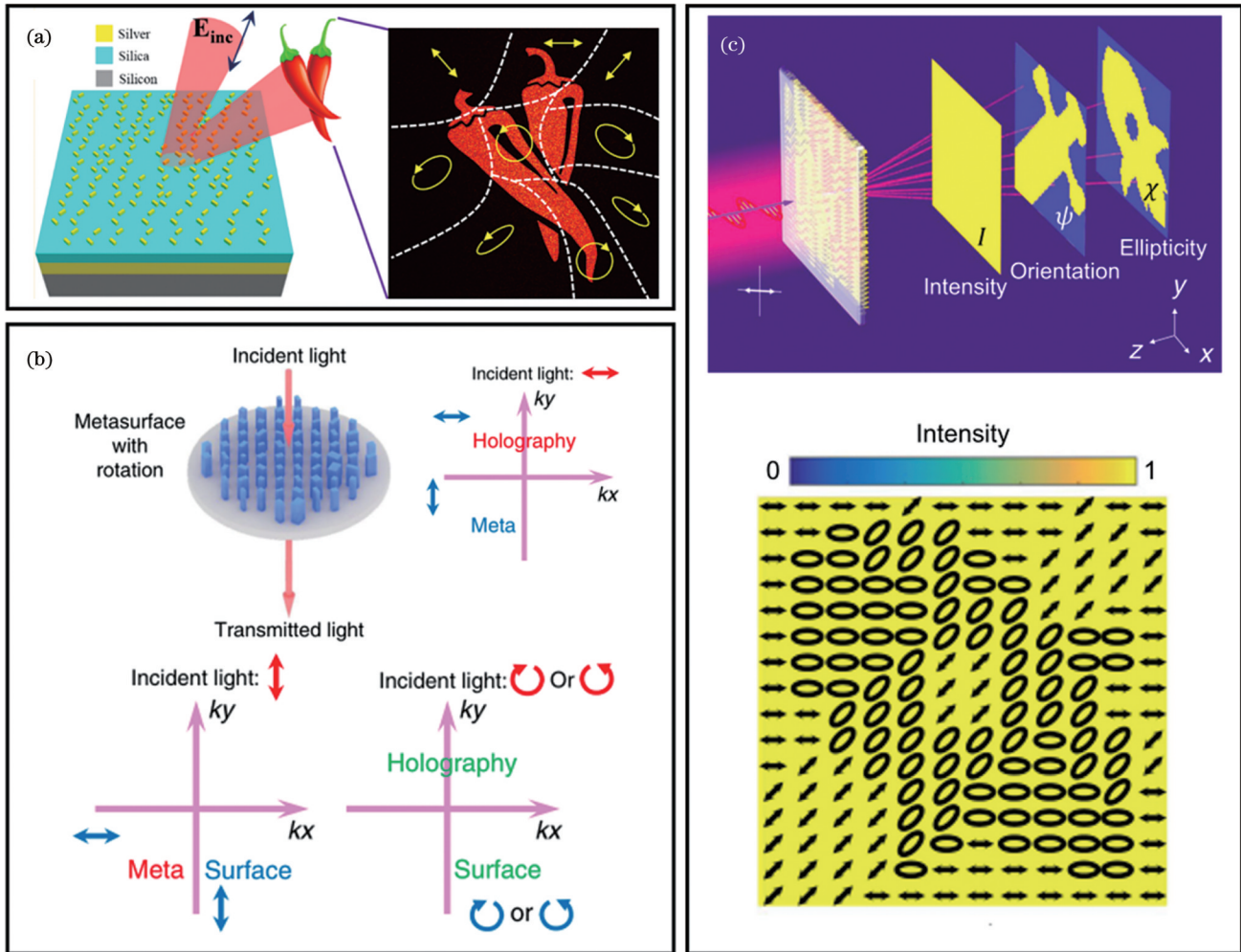


图 8 超表面矢量全息。(a)基于几何相位和迂回相位调制的偏振态空间变化的矢量全息^[126];(b)基于几何相位和传输相位的多通道矢量全息^[127];(c)任意远场光强分布和连续偏振分布的矢量傅里叶全息超表面^[128]

Fig. 8 Metasurface vectorial holography. (a) Vectorial holography of spatially varying polarization based on geometric phase and detour phase modulation^[126]; (b) multi-channel vectorial holography based on geometric phase and propagation phase^[127]; (c) vectorial Fourier metasurface of arbitrary far-field light intensity distribution and continuous polarization distribution^[128]

信息通道,通过超构原子的设计来独立控制不同波长下的偏振态与相位分布,能够为彩色全息图像增添矢量特性,实现超表面彩色矢量全息术。在这方面, Jin 等^[136]展示了一种自旋(偏振)与波长联合编码的方法,该方法允许在偏振和波长维度上对入射光进行 6 bit 的信息编码。如图 9(a)所示,两个圆偏振通道和三个主色通道(红、绿、蓝)都被用来存储基于多波长 GS 算法的全息信息。他们使用“比特”的概念来描述全息编码图像的信息容量。每个基矢都有二元状态,分别为“0”和“1”。为了实现垂直入射的 6 bit,将两个自旋与三个波长(红色 \hat{R} 、绿色 \hat{G} 和蓝色 \hat{B})维度两两组合,最终构建出了 6 个独立的编码基矢 (\hat{R}_{RCP} , \hat{G}_{RCP} , \hat{B}_{RCP} , \hat{R}_{LCP} , \hat{G}_{LCP} , \hat{B}_{LCP}),按比特位计算,最终可以实现 $(2^6 - 1)$ 个信息存储单元。这种方案可以推广应用到彩色显示、光学加密的多波长复用矢量全息器件上。另外, Deng 等^[137]基于双原子单元结构的多自由度超表面提出了一种构建全彩色复振幅矢量

全息的方案,它可以同时控制光的相位、振幅、偏振与光谱响应。由于几何相位和迂回相位均通过使用统一尺寸的超构元件,与光谱响应完全解耦,因此,在该设计方法中,相位、幅度和偏振同时独立调制,适用于宽带光。他们进一步应用光栅的色散效应,利用 k 空间的相移设计,在不同的空间位置分割不同颜色的全息图像,实现了在多个频率下承载多个图像信息的能力,并最终实现了在全彩色全息图像上方构建线偏振空间变化的全彩色复振幅矢量全息,如图 9(b)所示。上述彩色矢量全息的可变偏振态分布仅局限于线偏振,最近, Guo 等^[138]实现了具有全偏振空间变化分布的彩色矢量全息,如图 9(c)所示。在他们的方法中,彩色矢量全息通过四原子超表面的 k 空间设计来实现。在红色、绿色和蓝色(RGB)线偏振光束的入射下,由 k 空间叠加生成了两个具有相反自旋状态和可调振幅、相位分布的全彩色图像,并在第一衍射级次重叠构建出了全彩色矢量全息图像。为了生成全彩色全息图,目标

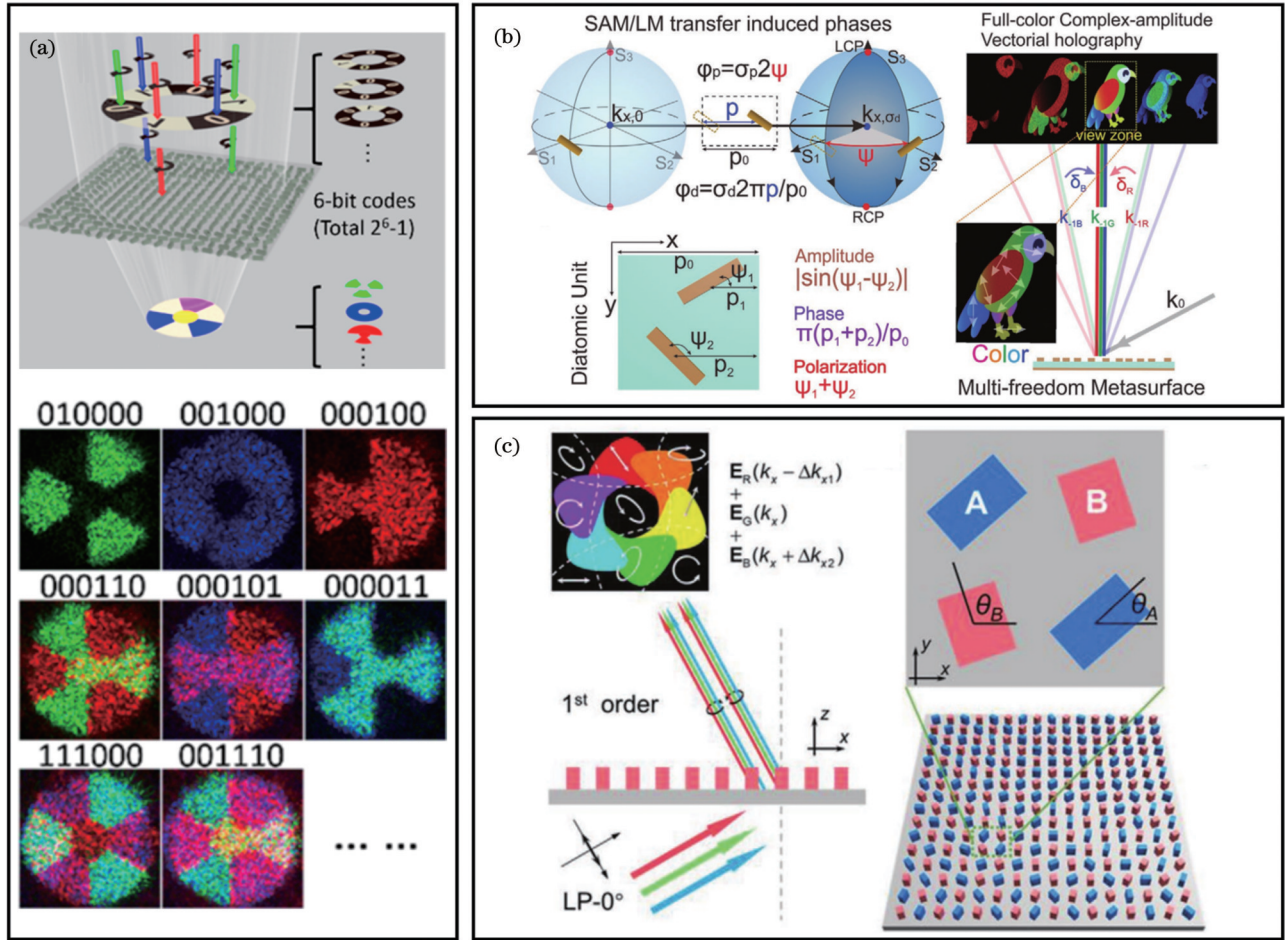


图9 超表面彩色矢量全息。(a)非交错单尺寸硅纳米柱阵列以及最小空间自由度的多任务超表面,它们可以在同时显示彩色和偏振编码的矢量全息图像上展示大量信息^[136]; (b)同时调控振幅、相位和偏振,并实现波长复用的彩色矢量全息图像^[137]; (c)在红、绿、蓝三色线偏振激光入射下产生的全彩色矢量全息图像(左图)以及四原子超表面示意图(右图)^[138]

Fig. 9 Metasurface full-color vectorial holography. (a) Non-interleaved single-size silicon nanopillar arrays and a multitasking metasurface with minimal spatial freedom can display a large amount of information on simultaneously displaying color- and polarization-encoded vectorial holographic images^[136]; (b) a full-color vectorial holographic image that simultaneously controls the amplitude, phase, and polarization, and multiplexes the wavelength^[137]; (c) full-color vectorial holographic image generated by red, green, and blue three-color linearly polarized laser incidence (left panel) and the schematic of a tetratomic metasurface (right panel)^[138]

图像被分成R、G、B三个分量,重新缩放的图案大小与波长成反比。彩色矢量全息图完全控制了偏振态,包括偏振角和椭圆度。由于几何相位调制具有波长无关的特性,所选超构原子在红、绿、蓝波长处遇到恒定的相位延迟,三个重构的颜色分量保持相同的偏振态。因此,该超表面能够重建出具有任意偏振(包括线偏振、圆偏振和椭圆偏振)编码的彩色矢量全息图像。

前面提及的超表面矢量全息产生均需要具有特定偏振态的入射光,超表面单元结构的偏振调控类型属于波片型,即基于入射光特定偏振态进行偏振转换,产生空间分布变化的多样性出射偏振态。更为一般形式的矢量全息需要同时考虑入射偏振态与出射偏振态之间的所有对应关系,其偏振态的调控方式需要用一个 2×2 的琼斯矩阵来完整描述,而不再是前面矢量全息工作中所涉及的仅由两个参数(偏振角与

椭圆率)描述的偏振态。基于琼斯矩阵的方法不仅可以实现波片型矢量全息,还可以实现偏振器型矢量全息。对于不同的入射光(包括非偏振光),偏振器型矢量全息均能产生预设的矢量全息像,只不过由于偏振器与入射偏振态之间的投影关系,全息像局部区域的强度会因入射光偏振态的不同而不同。Rubin研究团队^[139]于2021年提出了一种基于琼斯矩阵的改进GS算法。与以往只处理输出光偏振态的方法不同,琼斯矩阵方法旨在控制入射光与输出光之间的偏振透射函数,从而可以处理任意偏振光入射下的矢量全息问题。因此,各种偏振调控功能,包括偏振器型与波片型功能,均可与全息信息编码相结合,从而形成偏振器型全息与波片型全息。在琼斯矩阵矢量全息迭代过程中,不是更新单个值的标量,而是基于傅里叶变换更新所有的琼斯矩阵元素。在每一个迭代步中,将

琼斯矩阵 J 进行极分解, 得到一个厄米矩阵 H 与一个酉矩阵 U 。这个分解过程类似于复数标量的极分解过程, 即将一个复数分解成振幅与相位两部分。矩阵极分解所得到的厄米矩阵 H 与酉矩阵 U 分别充当振幅与相位的角色。与传统 GS 算法中的振幅均匀化过程类似, 琼斯矩阵的厄米矩阵部分 H 被丢弃, 而酉矩阵部分 U 的整个相位项被添加到描述预先设计的振幅与偏振分布的所需琼斯矩阵中。对于偏振器型全息, 全息图像上的每个像素点均可以看作是一个微小的局部偏振器, 它的滤偏偏振态可以是覆盖整个庞加莱球的任意偏振态。全息图像的局部振幅将根据预先设计的空间变化的局部偏振器对偏振态的检偏而改变, 如图 10(a) 所示。对于波片型全息, 超表面的作用是在均匀光强的远场中将光衍射到圆盘上。圆盘上的每个点都被设计用来实现不同的波片操作, 其阻抗沿径向从 0 到 π 不等, 而快轴方向沿方位角变化^[139]。另外, Bao 等^[140] 通过四原子超构单元结构进一步实现了单片超表面琼斯矩阵上限为 6 个自由度的极限目标, 如图 10(b) 所示。琼斯矩阵中的每个元素均为四纳米柱位置与方向角的函数, 可以由这几

何参数独立控制。由于单片超表面的镜像对称性限制, 琼斯矩阵必须为对称矩阵, 这使得该琼斯矩阵共有 6 个自由度。基于六自由度调控, Bao 等通过实验进一步演示了 3 张振幅相位全息图、3 套纳米压印图与全息图的组合, 它们分别被编码在琼斯矩阵 3 个分量的实部与虚部共 6 个自由度上。进一步, Bao 等在接下来的工作中通过使用双层超表面来打破平面结构的镜像对称, 使得琼斯矩阵不再受对称矩阵的限制。琼斯矩阵中 4 个复数矩阵元的虚部与实部组成的 8 个自由度能够完全由双层四原子超表面独立调控, 如图 10(c) 所示。他们基于梯度下降优化算法计算了双层超表面结构中每个单层结构的琼斯矩阵分布, 然后再将它们组合得到了最终的琼斯矩阵, 优化结果与设计的目标分布基本一致。基于双层四原子超表面对琼斯矩阵 8 个自由度完全开发的能力, 该工作展示了入射偏振态、出射检偏态两两组合四通道偏振复用与近场纳米印刷、远场全息像显示的联合复用, 复用的独立信息通道数达到了 8 个。此外, 该工作还进一步引入两个超表面之间的相对旋转角自由度 (共 4 个), 结合入射偏振态与检偏偏振态之间的组合自由度

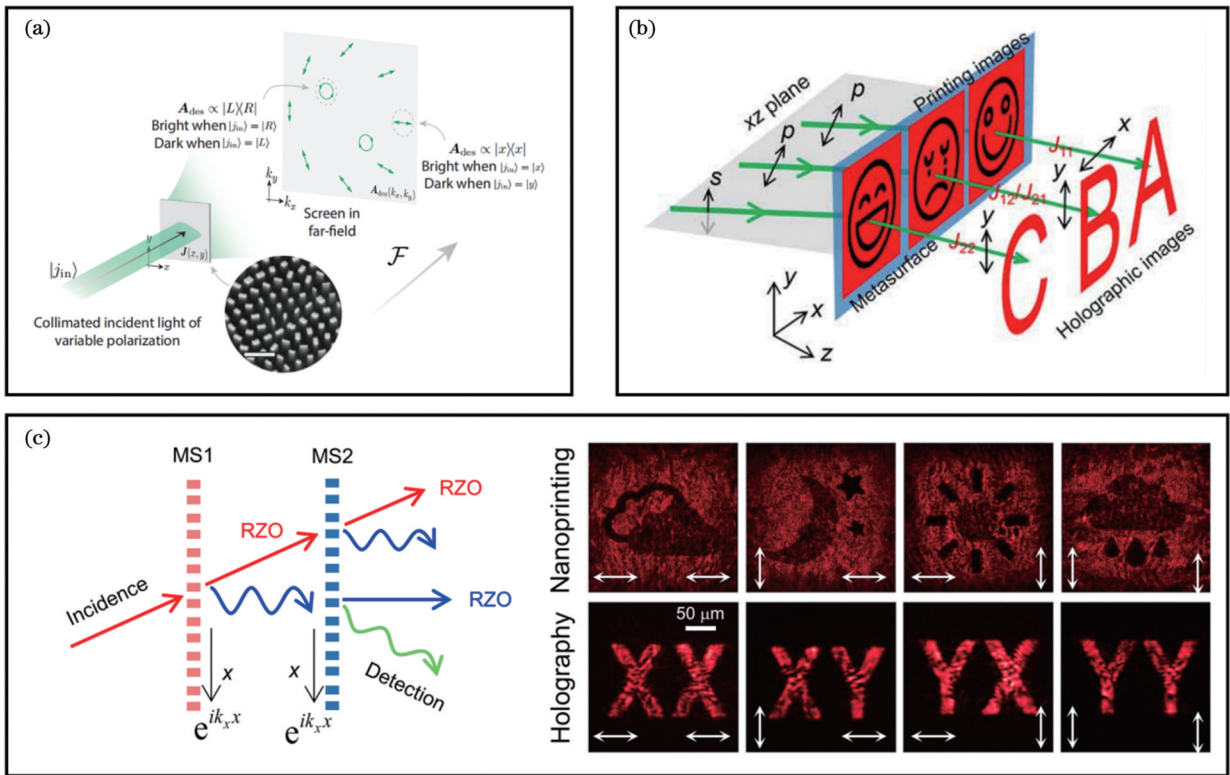


图 10 超表面琼斯矩阵矢量全息。(a) 琼斯矩阵全息图在远场具有所设计的特定的波片或偏振器响应^[139]; (b) 基于 6 个自由度琼斯矩阵的超表面纳米打印与矢量全息图像的结合^[140]; (c) 空间变化的 8 个自由度琼斯矩阵超表面 (左图) 以及纳米打印图像与矢量全息图像的测量结果 (右图), 入射和检偏的偏振态显示在每个子图的左下方和右下方^[141]

Fig. 10 Metasurface Jones matrix vectorial holography. (a) Jones matrix holograms with designed-specific waveplate or polarizer response in the far-fields^[139]; (b) combination of six degree of freedoms (DOFs) Jones matrix-based metasurface nanoprining with vectorial holographic images^[140]; (c) spatially varied Jones matrix metasurface with eight DOFs (left panel) and measurements of the nanoprining image versus the vectorial hologram (right panel), the incident and analyzed polarizations are at the bottom left and right of each subplot^[141]

(各 4 个),将全息信息复用的通道数扩展到 16 个^[44]。

4 结束语

本文简要综述了近年来超表面在偏振调控方面的研究进展及其在偏振信息编码、加密方面的应用进展。相比于依赖各向异性晶体材料构建的传统偏振光学元件,超表面偏振光学元件的构建使用的是各向同性材料,基于微纳结构的各向异性特征即可实现对光偏振态的灵活、多样及集成调控。基于超表面可以构建性能优越、功能多样化的波片、偏振器、偏振分束器等基本的偏振光学元件。超表面波片元件具有超薄、高效、宽带、可调等优点;超表面偏振器的偏振过滤功能不仅仅局限于线偏振态,滤偏范围可以覆盖整个庞加莱球,包括偏振光、部分偏振光及非偏振光;超表面偏振分束器的偏振分束基矢局限于正交的线偏振态,但可以拓展为任意的正交椭圆偏态基矢,偏振分束数量可以从 2 束扩展到 4 束、6 束,甚至更多束。可见,基于超表面的偏振光学元件大大拓展了偏光器件的应用范围。特别地,超表面基于其微纳单元结构的偏振响应实现偏振调控,即每个微纳单元结构等效于一个微型的局部偏振光学元件。通过改变微纳单元结构的参数,可以设计出具有特定空间分布的偏振光学元件像素化阵列,从而对光束的偏振空间分布信息进行编码与加密。偏振态空间分布信息编码包含近场编码与远场编码。实现近场偏振态编码的超表面直接将出射的偏振态与检偏后的强度进行一一映射,映射关系基于马吕斯定律。基于马吕斯超表面的偏振信息编码可被广泛应用于偏振伪装、光学防伪及信息隐藏等领域。基于远场偏振态信息编码的超表面主要是在偏振调控的基础上结合了相位调控,使得经超表面衍射到远场的全息光场信息叠加了偏振态信息,从而形成偏振全息及矢量全息。在矢量全息的基础上,可以进一步增加波长自由度、入射出射偏振组合自由度以及双层超表面之间的相对转角自由度,从而进一步增加了超表面信息编码的容量与多样性。总之,超表面偏振光学为光信息编码、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和新一代信息安全技术提供了坚实的理论与技术基础。尽管超表面偏振光学在信息复用、存储、隐藏、加密、防伪等方面已经展现出巨大潜力,但要使超表面信息编码与加密技术进一步推向量产与工业化应用,仍需要解决超表面制备所涉及的微纳加工的成本问题,利用低成本的纳米压印技术代替电子束光刻技术将是一个可选方案。信息加密与防伪的应用场景涉及日常生活的可穿戴设备等柔性载体,目前实验室所制备的超表面偏振元件大都基于平面坚硬的衬底,进一步发展基于柔性衬底的超表面偏振信息编码技术是未来仍需持续关注的问题。针对动态编码与加密等应用场景,实现偏振信息实时动态调控的超表面尤为重要,将超表面与可调二维材料、液晶

材料、相变材料、光折变材料等结合实现可调谐偏振调控将是未来进一步探究的重要方向。

参 考 文 献

- [1] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [2] Kobashi J, Yoshida H, Ozaki M. Planar optics with patterned chiral liquid crystals[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 389-392.
- [3] Yin K, Hsiang E L, Zou J Y, et al. Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: principles and applications[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 161.
- [4] Tang P J, Kirby M A, Le N, et al. Polarization sensitive optical coherence tomography with single input for imaging depth-resolved collagen organizations[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 237.
- [5] Pierangelo A, Manhas S, Benali A, et al. Multispectral Mueller polarimetric imaging detecting residual cancer and cancer regression after neoadjuvant treatment for colorectal carcinomas[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(4): 046014.
- [6] Pierangelo A, Nazac A, Benali A, et al. Polarimetric imaging of uterine cervix: a case study[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14120-14130.
- [7] He H H, Sun M H, Zeng N, et al. Mapping local orientation of aligned fibrous scatterers for cancerous tissues using backscattering Mueller matrix imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(10): 106007.
- [8] Sun M H, He H H, Zeng N, et al. Characterizing the microstructures of biological tissues using Mueller matrix and transformed polarization parameters[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(12): 4223-4234.
- [9] He H H, Zeng N, Du E, et al. A possible quantitative Mueller matrix transformation technique for anisotropic scattering media/ Eine mögliche quantitative Müller-Matrix-Transformations-Technik für anisotrope streuende Medien[J]. *Photonics & Lasers in Medicine*, 2013, 2(2): 129-137.
- [10] Shi T, Wang Y J, Deng Z L, et al. All-dielectric kissing-dimer metagratings for asymmetric high diffraction[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24): 1901389.
- [11] Ra'di Y, Alù A. Reconfigurable metagratings[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1779-1785.
- [12] Ra'di Y, Alù A. Metagratings for efficient wavefront manipulation [C]//2018 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), August 27-September 1, 2018, Espoo, Finland. New York: IEEE Press, 2018: 325-327.
- [13] Kim I, Jang J, Kim G, et al. Pixelated bifunctional metasurface-driven dynamic vectorial holographic color prints for photonic security platform[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3614.
- [14] Kim J, Jeon D, Seong J, et al. Photonic encryption platform via dual-band vectorial metaholograms in the ultraviolet and visible[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(3): 3546-3553.
- [15] Song Q H, Liu X S, Qiu C W, et al. Vectorial metasurface holography[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(1): 011311.
- [16] 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.
- [17] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [18] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [19] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Propagation*

- Magazine, 2012, 54(2): 10-35.
- [20] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. Nature Photonics, 2015, 9(12): 796-808.
- [21] Cummer S A, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1: 16001.
- [22] Yin X, Ye Z, Rho J, et al. Photonic spin Hall effect at metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6126): 1405-1407.
- [23] Yang Y M, Wang W Y, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation[J]. Nano Letters, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [24] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. Science, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [25] 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.
- [26] Dai Q, Li Z L, Deng L G, et al. Single-size nanostructured metasurface for dual-channel vortex beam generation[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3773-3776.
- [27] Zheng G X, Fu R, Deng L G, et al. On-axis three-dimensional meta-holography enabled with continuous-amplitude modulation of light[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6147-6157.
- [28] Shan X, Li Z L, Deng L G, et al. Continuous amplitude-modulated meta-fork gratings with zero-order extinction[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1902-1905.
- [29] Zhang Y L, Cheng Y, Chen M, et al. Ultracompact metaimage display and encryption with a silver nanopolarizer based metasurface [J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(2): 021105.
- [30] Ye Y Q, Li X A, Zhuang F, et al. Homogeneous circular polarizers using a bilayered chiral metamaterial[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(3): 031111.
- [31] Zhao Y, Belkin M A, Alù A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers[J]. Nature Communications, 2012, 3: 870.
- [32] 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.
- [33] Khorasaninejad M, Zhu W, Crozier K B. Efficient polarization beam splitter pixels based on a dielectric metasurface[J]. Optica, 2015, 2(4): 376-382.
- [34] Espinosa-Soria A, Rodríguez-Fortuño F J, Griol A, et al. On-chip optimal stokes nanopolarimetry based on spin-orbit interaction of light[J]. Nano Letters, 2017, 17(5): 3139-3144.
- [35] Maguid E, Yulevich I, Vekslers D, et al. Photonic spin-controlled multifunctional shared-aperture antenna array[J]. Science, 2016, 352(6290): 1202-1206.
- [36] Wen D D, Yue F Y, Kumar S, et al. Metasurface for characterization of the polarization state of light[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10272-10281.
- [37] Basiri A, Chen X H, Bai J, et al. Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 78.
- [38] Hermon S, Ma A N, Yue F Y, et al. Metasurface hologram for polarization measurement[J]. Optics Letters, 2019, 44(18): 4436-4438.
- [39] Zhang X Q, Yang S M, Yue W S, et al. Direct polarization measurement using a multiplexed Pancharatnam-Berry metahologram[J]. Optica, 2019, 6(9): 1190-1198.
- [40] Balthasar Mueller J P, Leosson K, Capasso F. Ultracompact metasurface in-line polarimeter[J]. Optica, 2016, 3(1): 42-47.
- [41] Chen W T, Török P, Foreman M R, et al. Integrated plasmonic metasurfaces for spectropolarimetry[J]. Nanotechnology, 2016, 27(22): 224002.
- [42] Yan C, Li X, Pu M B, et al. Midinfrared real-time polarization imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(16): 161904.
- [43] Rubin N A, Chevalier P, Juhl M, et al. Imaging polarimetry through metasurface polarization gratings[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 9389-9412.
- [44] Rubin N A, D' Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. Science, 2019, 365(6448): eaax1839.
- [45] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Full-stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018, 5(8): 3132-3140.
- [46] Devlin R C, Ambrosio A, Wintz D, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in dielectric metasurfaces[J]. Optics Express, 2017, 25(1): 377-393.
- [47] Huang Y W, Rubin N A, Ambrosio A, et al. Versatile total angular momentum generation using cascaded J-plates[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7469-7484.
- [48] Rubin N A, Zaidi A, Juhl M, et al. Polarization state generation and measurement with a single metasurface[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21455-21478.
- [49] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6125): 1232009.
- [50] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [51] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076401.
- [52] 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.
- [53] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. Small Methods, 2017, 1(4): 1600064.
- [54] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2018, 81(2): 026401.
- [55] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1041-1068.
- [56] Luo X G. Subwavelength optical engineering with metasurface waves[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(7): 1701201.
- [57] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2019, 11(2): 380-479.
- [58] Shaltout A M, Shalaev V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces[J]. Science, 2019, 364(6441): eaat3100.
- [59] Hu Y Q, Wang X D, Luo X H, et al. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications [J]. Nanophotonics, 2020, 9(12): 3755-3780.
- [60] Rubin N A, Shi Z J, Capasso F. Polarization in diffractive optics and metasurfaces[J]. Advances in Optics and Photonics, 2021, 13(4): 836-970.
- [61] Yoon J W, Lee K J, Magnusson R. Ultra-sparse dielectric nanowire grids as wideband reflectors and polarizers[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28849-28856.
- [62] Hemmati H, Bootpakdeetam P, Magnusson R. Metamaterial polarizer providing principally unlimited extinction[J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5630-5633.
- [63] Bootpakdeetam P, Hemmati H, Magnusson R. Cascaded metamaterial polarizers for the visible region[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6831-6834.
- [64] Tobing L Y M, Wasiaik M, Zhang D H, et al. Nearly total optical transmission of linearly polarized light through transparent electrode composed of GaSb monolithic high-contrast grating integrated with gold[J]. Nanophotonics, 2021, 10(15): 3823-3830.
- [65] Ding F, Wang Z X, He S L, et al. Broadband high-efficiency half-wave plate: a supercell-based plasmonic metasurface approach[J].

- ACS Nano, 2015, 9(4): 4111-4119.
- [66] Yu N F, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [67] Shi Z J, Zhu A Y, Li Z Y, et al. Continuous angle-tunable birefringence with freeform metasurfaces for arbitrary polarization conversion[J]. Science Advances, 2020, 6(23): eaba3367.
- [68] Biswas S, Grajower M Y, Watanabe K, et al. Broadband electro-optic polarization conversion with atomically thin black phosphorus[J]. Science, 2021, 374(6566): 448-453.
- [69] Sasagawa K, Wakama N, Noda T, et al. On-chip polarizer on image sensor using advanced CMOS technology[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8974: 89740I.
- [70] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, et al. Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer[J]. Science, 2009, 325(5947): 1513-1515.
- [71] Wang S, Deng Z L, Wang Y J, et al. Arbitrary polarization conversion dichroism metasurfaces for all-in-one full Poincaré sphere polarizers[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 24.
- [72] Wang S, Wen S, Deng Z L, et al. Metasurface-based solid Poincaré sphere polarizer[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(12): 123801.
- [73] Mueller B J P, 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.
- [74] Wang K, Titchener J G, Kruk S S, et al. Quantum metasurface for multi-photon interference and state reconstruction[J]. Science, 2018, 361(6407): 1104-1108.
- [75] Intaravanne Y, Chen X Z. Recent advances in optical metasurfaces for polarization detection and engineered polarization profiles[J]. Nanophotonics, 2020, 9(5): 1003-1014.
- [76] Wu P C, Tsai W Y, Chen W T, et al. Versatile polarization generation with an aluminum plasmonic metasurface[J]. Nano Letters, 2017, 17(1): 445-452.
- [77] Huang L L, Chen X Z, Bai B F, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity[J]. Light: Science & Applications, 2013, 2(3): e70.
- [78] Shirmanesh G K, Sokhoyan R, Wu P C, et al. Electro-optically tunable multifunctional metasurfaces[J]. ACS Nano, 2020, 14(6): 6912-6920.
- [79] Cong L Q, Pitchappa P, Wu Y, et al. Active multifunctional microelectromechanical system metadvice: applications in polarization control, wavefront deflection, and holograms[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(2): 1600716.
- [80] Dai Q, Zhou N, Deng L G, et al. Dual-channel binary gray-image display enabled with malus-assisted metasurfaces[J]. Physical Review Applied, 2020, 13(4): 034002.
- [81] Xiong B, Xu Y H, Wang J N, et al. Realizing colorful holographic mimicry by metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2021, 33(21): 2005864.
- [82] Zang X F, Dong F L, Yue F Y, et al. Polarization encoded color image embedded in a dielectric metasurface[J]. Advanced Materials, 2018, 30(21): 1707499.
- [83] Deng Z L, Tu Q G, Wang Y J, et al. Vectorial compound metapixels for arbitrary nonorthogonal polarization steganography[J]. Advanced Materials, 2021, 33(43): 2103472.
- [84] Zheng P X, Dai Q, Li Z L, et al. Metasurface-based key for computational imaging encryption[J]. Science Advances, 2021, 7(21): eabg0363.
- [85] 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 Reviews, 2020, 14(6): 2000032.
- [86] Dai Q, Deng L G, Deng J A, et al. Ultracompact, high-resolution and continuous grayscale image display based on resonant dielectric metasurfaces[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27927-27935.
- [87] Yue F Y, Zhang C M, Zang X F, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 17129.
- [88] Deng L G, Deng J, Guan Z Q, et al. Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 101.
- [89] 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.
- [90] Zhu H Z, Li Q, Tao C N, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1805.
- [91] Fu R, Deng L G, Guan Z Q, et al. Zero-order-free meta-holograms in a broadband visible range[J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 723-728.
- [92] Zhang C M, Wen D D, Yue F Y, et al. Optical metasurface generated vector beam for anticounterfeiting[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(3): 034028.
- [93] Deng J, Deng L G, Guan Z Q, et al. Multiplexed anticounterfeiting meta-image displays with single-sized nanostructures[J]. Nano Letters, 2020, 20(3): 1830-1838.
- [94] Zhang C M, Dong F L, Intaravanne Y, et al. Multichannel metasurfaces for anticounterfeiting[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(3): 034028.
- [95] Walther B, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Spatial and spectral light shaping with metamaterials[J]. Advanced Materials, 2012, 24(47): 6300-6304.
- [96] Deng J, Yang Y, Tao J, et al. Spatial frequency multiplexed meta-holography and meta-nanoprinting[J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 9237-9246.
- [97] Mehmood M Q, Seong J, Naveed M A, et al. Single-cell-driven tri-channel encryption meta-displays[J]. Advanced Science, 2022, 9(35): 2203962.
- [98] Rodrigues S P, Lan S F, Kang L, et al. Nonlinear imaging and spectroscopy of chiral metamaterials[J]. Advanced Materials, 2014, 26(35): 6157-6162.
- [99] Chen S M, Zeuner F, Weismann M, et al. Giant nonlinear optical activity of achiral origin in planar metasurfaces with quadratic and cubic nonlinearities[J]. Advanced Materials, 2016, 28(15): 2992-2999.
- [100] Duempelmann L, Luu-Dinh A, Gallinet B, et al. Four-fold color filter based on plasmonic phase retarder[J]. ACS Photonics, 2016, 3(2): 190-196.
- [101] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [102] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2807.
- [103] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2808.
- [104] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. Nano Letters, 2014, 14(1): 225-230.
- [105] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. Science Advances, 2016, 2(11): e1601102.
- [106] Liu L X, Zhang X Q, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. Advanced Materials, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [107] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. Nano Letters, 2015, 15(5): 3122-3127.
- [108] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11930.

- [109] Boroviks S, Deshpande R A, Mortensen N A, et al. Multifunctional metamirror: polarization splitting and focusing[J]. ACS Photonics, 2018, 5(5): 1648-1653.
- [110] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I. Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters[J]. Optica, 2015, 2(8): 716-723.
- [111] Pors A, Albrechtsen O, Radko I P, et al. Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2155.
- [112] Farmahini-Farahani M, Mosallaei H. Birefringent reflectarray metasurface for beam engineering in infrared[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 462-464.
- [113] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves [J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(5): e16076.
- [114] Montelongo Y, Tenorio-Pearl J O, Milne W I, et al. Polarization switchable diffraction based on subwavelength plasmonic nanoantennas[J]. Nano Letters, 2014, 14(1): 294-298.
- [115] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937-943.
- [116] Min C J, Liu J P, Lei T, et al. Plasmonic nano-slits assisted polarization selective detour phase meta-hologram[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(6): 978-985.
- [117] Khorasaninejad M, Ambrosio A, Kanhaiya P, et al. Broadband and chiral binary dielectric meta-holograms[J]. Science Advances, 2016, 2(5): e1501258.
- [118] Wen D D, Chen S M, Yue F Y, et al. Metasurface device with helicity-dependent functionality[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(2): 321-327.
- [119] Wang Q, Plum E, Yang Q L, et al. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 25.
- [120] Zhang F, Pu M B, Li X, et al. All-dielectric metasurfaces for simultaneous giant circular asymmetric transmission and wavefront shaping based on asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(47): 1704295.
- [121] Chen Y, Yang X D, Gao J. Spin-controlled wavefront shaping with plasmonic chiral geometric metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 84.
- [122] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 78.
- [123] Xiong B, Liu Y, Xu Y H, et al. Breaking the limitation of polarization multiplexing in optical metasurfaces with engineered noise[J]. Science, 2023, 379(6629): 294-299.
- [124] Wen D D, Yue F Y, Li G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8241.
- [125] Fan Q B, Zhu W Q, Liang Y Z, et al. Broadband generation of photonic spin-controlled arbitrary accelerating light beams in the visible[J]. Nano Letters, 2019, 19(2): 1158-1165.
- [126] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. Nano Letters, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [127] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 95.
- [128] Song Q H, Baroni A, Wu P C, et al. Broadband decoupling of intensity and polarization with vectorial Fourier metasurfaces[J]. Nature Communications, 2021, 12: 3631.
- [129] Wang T, Yu Y J, Zheng H D. Method for removing longitudinal chromatism in full color holographic projection system[J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 091302.
- [130] Zeng Z X, Zheng H D, Yu Y J, et al. Full-color holographic display with increased-viewing-angle[J]. Applied Optics, 2017, 56(13): F112-F120.
- [131] 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.
- [132] Wan W W, Gao J, Yang X D. Full-color plasmonic metasurface holograms[J]. ACS Nano, 2016, 10(12): 10671-10680.
- [133] Bao Y J, Yan J H, Yang X G, et al. Point-source geometric metasurface holography[J]. Nano Letters, 2021, 21(5): 2332-2338.
- [134] Zhao W Y, Liu B Y, Jiang H A, et al. Full-color hologram using spatial multiplexing of dielectric metasurface[J]. Optics Letters, 2015, 41(1): 147-150.
- [135] Hu Y Q, Luo X H, Chen Y Q, et al. 3D-integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 86.
- [136] Jin L, Dong Z G, Mei S T, et al. Noninterleaved metasurface for (2^p-1) spin- and wavelength-encoded holograms[J]. Nano Letters, 2018, 18(12): 8016-8024.
- [137] Deng Z L, Jin M K, Ye X, et al. Full-color complex-amplitude vectorial holograms based on multi-freedom metasurfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(21): 1910610.
- [138] Guo X Y, Zhong J Z, Li B J, et al. Full-color holographic display and encryption with full-polarization degree of freedom[J]. Advanced Materials, 2022, 34(3): 2103192.
- [139] Zaidi A, Rubin N A, Dorrah A H, et al. Jones matrix holography with metasurfaces[J]. Science Advances, 2021, 7(33): eabg7488.
- [140] Bao Y J, Wen L, Chen Q, et al. Toward the capacity limit of 2D planar Jones matrix with a single-layer metasurface[J]. Science Advances, 2021, 7(25): eabh0365.
- [141] Bao Y J, Nan F, Yan J H, et al. Observation of full-parameter Jones matrix in bilayer metasurface[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7550.

Metasurface Polarization Information Encoding

Hu Mengxia, Wang Zhiqiang, Li Xiangping, Deng Zilan*

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 511443, Guangdong, China

Abstract

Significance Since the successful demonstration of versatile wavefront shaping on metasurfaces by F. Capasso *et al.* at Harvard University in 2011, metasurfaces as a two-dimensional artificial electromagnetic material composed of an array of lightweight nano-scatters at the subwavelength scale have garnered significant attention as an ultra-compact planar optics platform for light-field manipulation. The original metasurfaces utilize the plasmonic resonance effect demonstrated by metals to manipulate the phase of electromagnetic waves, enabling phenomena such as anomalous refraction, reflection, planar focusing, and shaping of special light

beams. Subsequently, metasurfaces based on all-dielectric micro-nanostructures with Mie-type resonances are proposed, which significantly improves their efficiency and lays the foundation for the practical applications of planar optical elements. By altering the material and structural parameters of the unit cell of the a metasurface, various physical properties such as phase, amplitude, polarization, and frequency of light waves can be flexibly modulated, resulting in precise control over the diffraction and polarization properties of light.

Metasurfaces are significant in both academic and industrial communities. They exhibit broad application prospects in various fields, including VR/AR near-eye displays, multidimensional computational imaging, autonomous driving, in-vehicle photography/displays, information coding, and encryption.

According to their functionalities, metasurface optical elements can be classified into two major categories: metasurface diffraction optical elements and metasurface polarization optical elements. Metasurface imaging lenses, metasurface beam shapers, and metasurface holographic elements are examples of diffractive optical elements. These elements achieve wavefront shaping by primarily modulating the phase of the incident light by spatially varying meta-atoms. With the continuous advancement of metasurfaces, the metasurface polarization optical elements have emerged as another prominent class of metasurface optical elements. Metasurface polarization optical elements are thin film optical elements comprising micro-nanostructured metallic or dielectric meta-atoms with local polarization responses. Such meta-atoms typically possess strong anisotropy and circular dichroism, allowing them to perform polarization conversion and projection operations at nanoscale. Unlike traditional polarization optical elements such as waveplates and polarizers, metasurface polarization optical elements manipulate the phase or amplitude of light of different polarization components through the anisotropy in its structure, rather than the anisotropic material. Consequently, they possess more precise and flexible characteristics, allowing for pixelated encoding of the polarization state of light at subwavelength scales.

In recent years, owing to the extension of its applications and the advent of the big data, there is an increase in demand for information security and capacity. In this context, the use of metasurfaces in conjunction with polarization information for precise control of optical field information has garnered significant research interest, particularly in high-density image information coding and anti-counterfeiting encryption. Therefore, we conducted a comprehensive review of recent research articles on metasurface polarization optical elements and particularly focused on polarization information encoding, with the aim of providing valuable insights into the future developments in this field.

Progress First, we explain the various types of metasurface polarization optical elements, such as metasurface waveplates (Fig. 1), metasurface polarizers (Fig. 2), and metasurface polarizing beam splitters (Fig. 3), thus highlighting their exceptional performance in polarization control. Next, we delve into the applications of micro-metasurface polarization optical elements for pixelated polarization information encoding. These applications use the Malus metasurface (Fig. 4) that enables point-by-point encoding of the near-field polarization state spatial distribution: the Malus metasurface (Fig. 5) combined with other degrees of freedom for enhanced control and some applications based on Malus metasurfaces (Fig. 6). Subsequently, we introduce polarization holography and vector holography metasurfaces for spatially encoding far-field polarization states, which encompass metasurface polarization multiplexing holography (Fig. 7), metasurface vectorial holography (Fig. 8), metasurface full-color vectorial holography (Fig. 9), and metasurface Jones matrix vectorial holography (Fig. 10). On the metasurface platform, the highly controllable polarization response of meta-atoms provides a universal method to manipulate the polarization state of the far-field wavefront, thereby achieving multifunctional and high-performance holographic applications and particularly demonstrating significant capabilities in information encryption. Last, we briefly discuss the current challenges in the further development of metasurface polarization optical elements. While metasurface polarization optics has shown immense potential in information multiplexing, storage, hiding, encryption, and anti-counterfeiting, its application for advancements in the large-scale production, industrialization, and practical usability of metasurface information encoding and encryption technologies in everyday life requires intensive research.

Conclusions and Prospects In conclusion, metasurface polarization optical elements offer new avenues for efficient, secure, and flexible optical information coding and transmission. Compared to traditional polarization optical elements relying on anisotropic crystal materials, metasurface polarization optical elements require only isotropic materials for their construction. Through the anisotropic characteristics of the meta-atoms at the subwavelength scale, they achieve flexible, diverse, and integrated control of light polarization states. The metasurface polarization information encoding technology has significant value for application in the fields of information encryption, optical imaging, and display, and it contributes to the advancement of optical devices and systems.

Key words optics at surface; polarization control; metasurface polarization optical elements; Malus metasurface; vectorial holography; information encryption