

轨道角动量超表面全息复用研究进展

高心越, 宋清华*

清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055

摘要 光子的轨道角动量(OAM)由于理论上的无限模式数而被广泛用于提高数据传输的信道容量。由光学薄膜和亚波长结构阵列组成的超表面可以操纵光学维度,实现高性能的光子集成,而利用超表面实现OAM复用有利于光学器件向小型化、多功能化方向发展。通过设计超表面的幅度与相位分布可以实现OAM全息,将OAM与偏振、波长、角度等其他光学维度结合可以获得多自由度大容量OAM复用全息。本综述将从这些方向展开,论述近年来利用超表面实现OAM复用全息的研究进展。提高OAM复用全息的自由度并改善成像质量,实现安全性、集成度更高的光学元器件,是未来OAM全息的发展方向。

关键词 全息; 轨道角动量; 超表面; 多通道; 复用

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230709

1 引言

近年来,通信技术的爆炸式发展对信息容量和安全性的要求日渐提高,实现信息的多通道传输成为目前的研究热点。“全息显示”这一概念于1948年由英籍匈牙利科学家丹尼斯盖伯(Dennis Gabor)提出^[1],目前已被应用到各个领域。全息术提供了重建物体三维光场的方法^[2-6]。传统的光学全息术记录反射的物体光与参考光束的干涉图样,当相同的参考光束照射干涉图时,三维光场可以被重建。作为传统光学全息的突破,计算机生成全息术利用算法代替传统光学全息中的波前记录过程,避免了复杂的干涉记录光束,同时也能通过数字的方式生成全息图案从而重建虚拟物体^[7-12]。

根据计算全息获得全息板信息的形式,可将全息板分为振幅型、相位型和复振幅型三类。为了最大限度地提升全息的效率,通常通过调控全息板的相位分布(即相位型全息)来构建全息图。传统光学系统通常利用光在介质中传播累积的相位来调制波前,如相位型空间光调制器(SLM),但是其分辨率低、像素尺寸较大、视野较小的缺陷限制了它的实际应用。超表面通过结构与光的强相互作用来调控相位^[13-18],其单元结构通常在亚波长尺度,因此可以获得高分辨率、超薄的厚度等优异性能,使得光学设备进入平面光学时代^[19-34]。另外,通过合理设计超表面的结构,不仅可以调控相位,还可以独立地调控振幅^[35-39]、偏振^[40-45]、角

度^[46-48]、频率^[49-51]等。这些物理维度之间相互结合可以被用于设计大容量全息多通道复用的独立信息通道^[52-64],然而,近年来对已有维度的开发几乎已经达到极限。光波空间维度的开发为光场调控提供了新思路,具有不同空间结构特征的光场增加了光场存在形式的多样性,丰富了可调控的物理维度,而轨道角动量(OAM)由于其相位分布随空间变化而成为多自由度复用全息新的研究方向。

OAM全息将光的OAM作为自由度实现信息加密,只有入射携带特定拓扑荷数的光时,才能解码出正确的图像。将OAM这一自由度与其他维度结合,可以实现大容量全息多通道复用。如图1所示,根据OAM与其他光学自由度复用的形式,本文将OAM复用分为两类:外在自由度复用全息和内在自由度复用全息。外在自由度复用全息是OAM全息与OAM特性之外的其他光学自由度复用,主要包括偏振复用OAM全息、频率复用OAM全息、时空复用OAM全息、手性光场复用OAM全息;内在自由度复用全息是OAM全息与OAM本身的特性复用,主要包括相位跃变梯度因子复用OAM全息、角度复用OAM全息、椭圆度复用OAM全息、径向-角度复用OAM全息等。

本文围绕OAM复用超表面全息展开讨论,介绍了实现几种OAM复用全息的方法,最后讨论了OAM超表面复用全息目前存在的困难与挑战并对其未来发展进行了展望。

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-05-28; 录用日期: 2023-06-19; 网络首发日期: 2023-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(12204264)、深圳市高等院校稳定支持计划(WDZC20220810152404001)

通信作者: *song.qinghua@sz.tsinghua.edu.cn

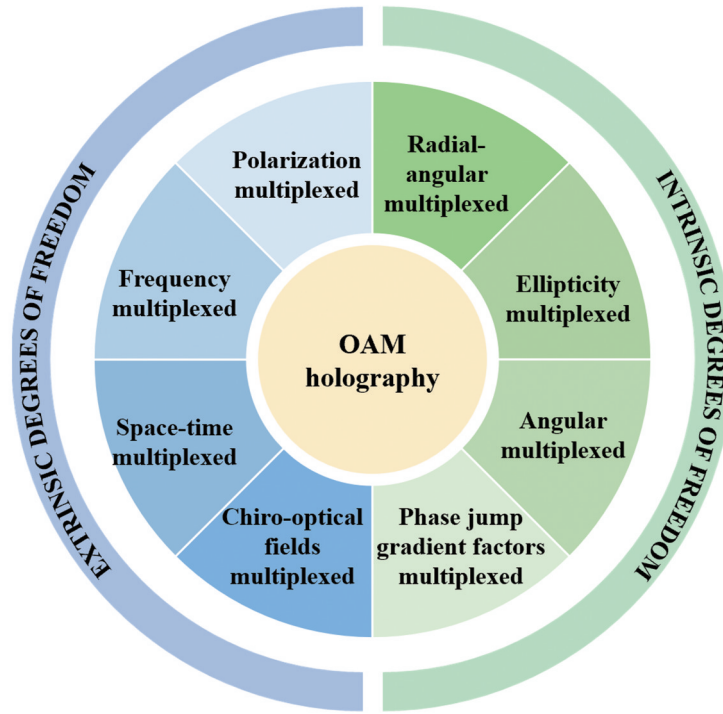


图 1 OAM 复用全息分类

Fig. 1 Classification of OAM multiplexing holography

2 OAM 全息

2.1 OAM

动量是物理学中的一个基本物理量。结构光除了可以携带线性动量外,也可以携带角动量。角动量又分为自旋角动量(SAM)和轨道角动量(OAM)。将 OAM 光束的空间维度作为信息载体,可以独立地传输信息。1992 年,Allen 等^[65]通过实验得出 OAM 由具有螺旋相位的波前光束携带,相位因子为 $\exp(il\varphi)$,其中: l 代表螺旋波阵面的螺旋模式指数,即拓扑荷数; φ 代表方位角。涡旋光的相位呈螺旋分布,中心处的电场强度为零,因此涡旋光束在横截面上呈“甜甜圈”状。无限螺旋模式数和不同阶数之间的正交性使得 OAM 成为一种备受关注的光学自由度^[66-71],可以用于增大光学和量子的信息容量。多个 OAM 模式可以实现复用/解复用。将 OAM 全息与高分辨率超表面结合起来实现数字全息已经成为目前研究的热点,为超高容量全息设备和系统开辟了新路径。

2.2 OAM 全息

传统的数字全息具有准连续的空间频率分布^[72]。波的干扰会破坏 OAM 光束的螺旋波前和相关物理特性,为了实现将光的螺旋相位或波前作为信息载体的 OAM 全息,在重建全息图像时需要保持 OAM 的特性并使之呈现选择性。空间频域分析为操纵复杂光束提供了物理方法^[73]。如图 2(a)所示,以 OAM 光束空间频率分布作为采样周期对目标图像进行采样,可以避免空间波阵面的重叠,保留入射光的 OAM 特性,从而

实现依赖 OAM 的数字全息。

由于光束的对称性,复杂的螺旋波阵面的傅里叶变换^[74]可以表示为

$$E(\rho, \varphi) = \mathcal{F} \left[\exp(il\varphi) \right] = \frac{(-1)^{l+1} k}{f} \exp(il\varphi) \int_0^R J_1 \left(\frac{k}{f} r \rho \right) r dr, \quad (1)$$

式中: $\mathcal{F}(\cdot)$ 代表空间傅里叶变换; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是入射光波矢的大小; f 是傅里叶透镜的焦距; r 和 ρ 分别代表全息面和图像面的半径; φ 代表方位角; l 表示拓扑荷数; R 表示螺旋相位板的半径; $J_1(\cdot)$ 表示一阶贝塞尔函数。螺旋波阵面的空间频率由图像面上的圆形环强度分布表示,如图 2(a)所示。

入射 OAM 光束后,图像平面和全息平面之间的电场关系^[75]为

$$E_1^{\text{OAM}}(k_x, k_y) = E_1(x, y) \otimes \mathcal{F} \left[\exp(il\varphi) \right], \quad (2)$$

式中: $E_1^{\text{OAM}}(k_x, k_y)$ 表示图像平面的电场; $E_1(x, y)$ 表示全息平面的电场; \otimes 代表卷积操作。图像平面的 OAM 重建电场是全息图像的重建电场与螺旋波阵面傅里叶变换后的卷积。螺旋波阵面的傅里叶变换作为被卷积的核函数,会被复制到全息图的每个像素中,使其携带特定的 OAM 光束信息。

实现 OAM 复用全息流程如下:具有不同拓扑荷数 l 的 OAM 光束在傅里叶域呈现不同的分布, l 越大,采样间隔 d 就越大。使用狄拉克梳状函数阵列依据 OAM 光束的空间频率分布在空域进行采样,将目标图像与图像平面的采样阵列相乘,迭代后得到 OAM

保存全息图,如图 2(b)所示。OAM 选择性全息图是在频域内通过将迭代出的全息图叠加相位为 l 的螺旋相位板得到的,如图 2(c)所示。只有当入射 OAM 光束具有 $-l$ 的拓扑荷时,才会出现相应的全息图像。将多个 OAM 选择性全息图叠加,便可实现 OAM 复用全息^[75],如图 2(d)所示。如图 2(e)所示,当入射编码相应图案的 OAM 光束到超表面时,可以得到相应 l 编码

的图案,实现复用。

Ren 等^[75]设计了氮化镓纳米柱,并通过有限时域差分(FDTD)对其相位分布进行了模拟,以实现超表面的相位调制。由于串扰较大,复用通道数存在限制,无法实现多个通道下的高质量成像。因此,将 OAM 与其他光学维度(如偏振、频率等)进行结合,是提高 OAM 全息通道数的重要方法。

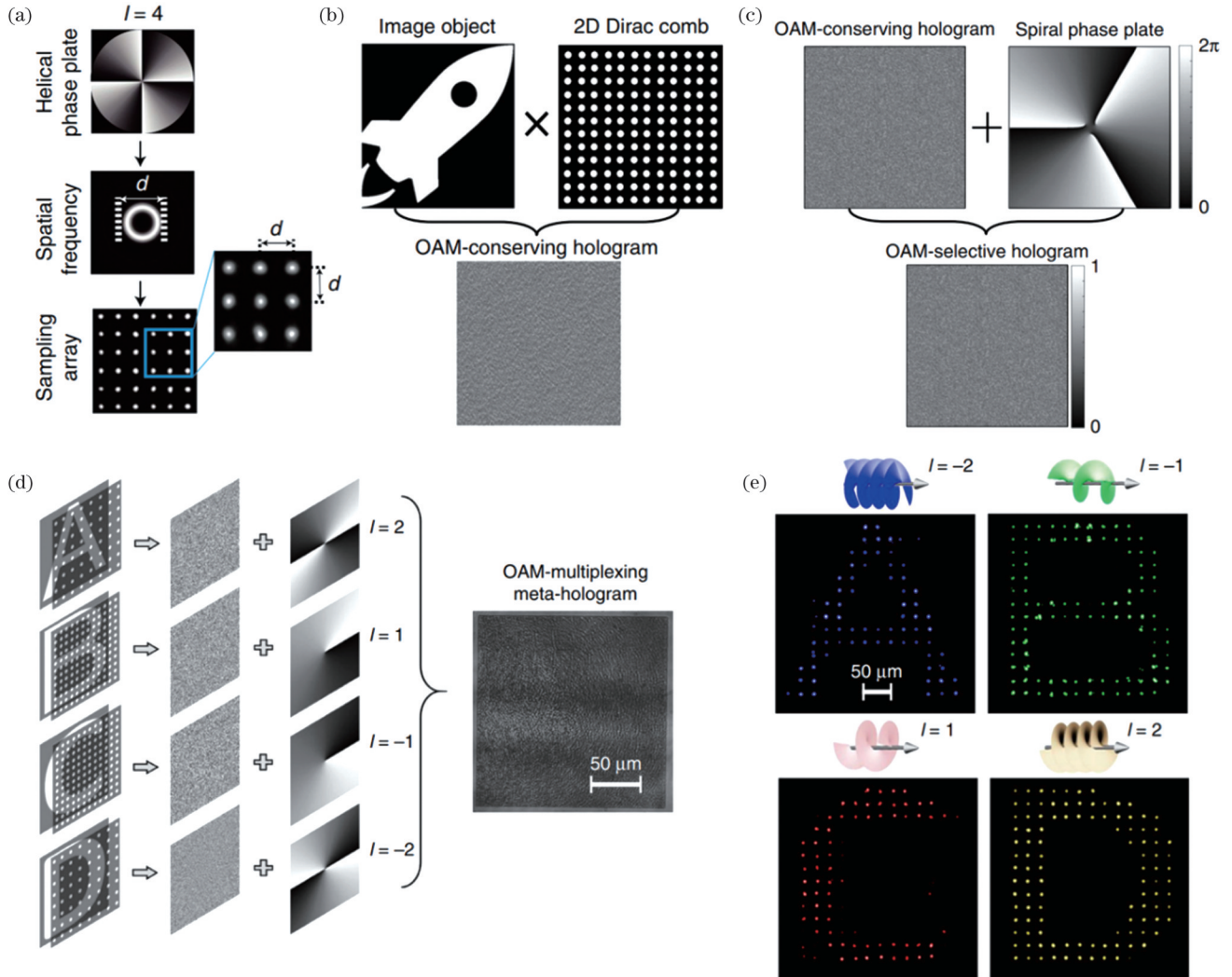


图 2 OAM 全息。(a)像平面的空间频率分析^[75]; (b)OAM 保存全息的设计原理^[75]; (c)OAM 选择性全息的设计原理^[75]; (d)OAM 复用全息的设计原理^[75]; (e)入射 OAM 光束对 4 种不同 OAM 相关全息图像的实验重建^[75]

Fig. 2 OAM holography. (a) Spatial-frequency analysis of helical phase plates in the image plane^[75]; (b) design principle of an OAM-conserving meta-hologram^[75]; (c) design principle of an OAM-selective meta-hologram^[75]; (d) design principle of an OAM-multiplexing meta-hologram^[75]; (e) experimental reconstruction of four distinctive OAM-dependent holographic images^[75]

3 外在自由度复用 OAM 全息

3.1 偏振复用 OAM 全息

将 OAM 与其他维度结合,可以提高信息的安全性,同时增加复用通道。偏振是一种最常用的光学自由度,超表面单元结构的偏振敏感性可以改变相互作用光的偏振态。因此,在多通道超表面的设计中大多通过偏振进行多路复用。

偏振加密 OAM 复用全息在不同的偏振通道下实

现 OAM 复用(将偏振与 OAM 结合,实现了更多的通道数),而且图像只能在精确的拓扑荷和特定的偏振态下才可重建。Zhao 等^[76]利用超表面实现了不同偏振通道下的 OAM 复用,原理如下:

超表面上的每个纳米柱可以用琼斯矩阵表示,如式(3)所示,用于连接输入电场和输出电场^[77]。

$$J = V \begin{bmatrix} \exp(i\varphi_{xx}) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_{yy}) \end{bmatrix} V^T = R(\theta) \Delta R(-\theta), \quad (3)$$

式中： V 代表酉矩阵； Δ 代表琼斯矩阵的特征值矩阵； $R(\bullet)$ 代表方位角为 θ 的旋转矩阵； φ_{xx} 和 φ_{yy} 代表相移。

为了在 4 个线性偏振通道中实现复用，设计了传输振幅为 A 的琼斯矩阵，即

$$J=A \begin{bmatrix} \exp[i(\varphi_{xx}-l_1\varphi)] & \exp[i(\varphi_{yy}-l_2\varphi)] \\ \exp[i(\varphi_{yy}-l_2\varphi)] & \exp[i(2\varphi_{yy}-\varphi_{xx}+\pi-l_3\varphi)] \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此可得到交叉偏振通道中另一个相位调制的自由度为 $\varphi_{yy}-l_3\varphi=2(\varphi_{yy}-l_2\varphi)-(\varphi_{xx}-l_1\varphi)+\pi$ 。在不同的偏振通道下可以独立地选择不同的拓扑荷数，利用偏振通道和拓扑荷数这两个参数实现信息重建。此时，OAM 不仅可以作为复用的维度，还可以重塑图像信息，揭示更多细节，如图 3(a)所示。

2021 年，Xiao 等^[78]进一步加大对超表面的利用，设计了两个超表面，一个用来产生涡旋光，另一个用来

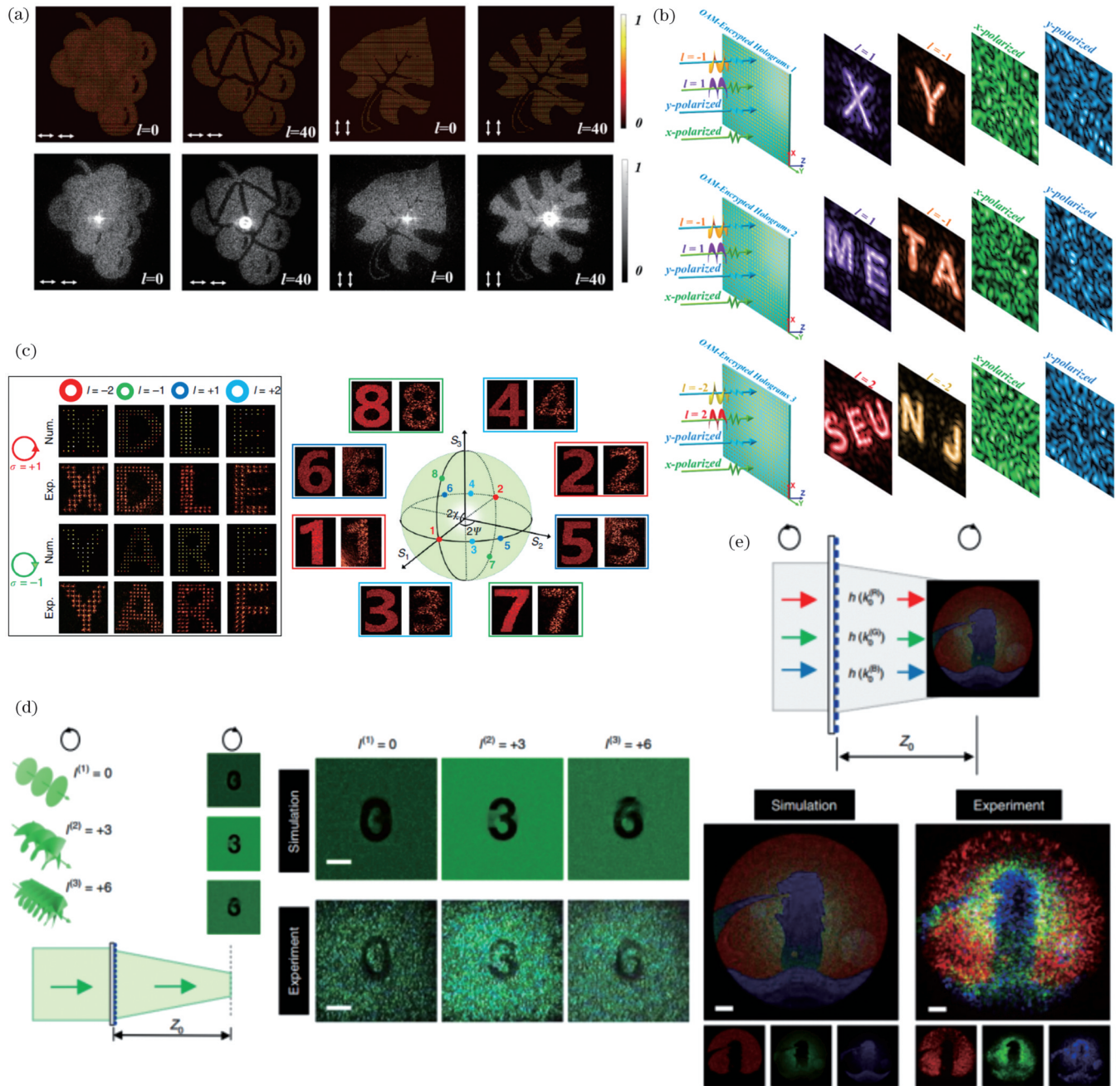


图 3 偏振加密 OAM 复用全息。(a)平面光和涡旋光照射的全息图^[77]；(b)偏振加密 OAM 复用超表面全息^[78]；(c)特定圆偏振涡旋光束入射 8 个不同的全息图像的数值和实验重建^[79]；(d)基于三种 OAM 状态设计的 OAM 元变压器原理图^[80]；(e)彩色图像重建^[80]
 Fig. 3 Polarization-encrypted OAM- multiplexed metasurface holography. (a) Hologram with plane wave and vortex beam illumination^[77]; (b) schemes of OAM-encrypted holography^[78]; (c) numerical and experimental reconstructions of eight distinctive OAM holographic images through incident circularly polarized vortex beams^[79]; (d) schematic of the OAM meta-transformer designed based on three OAM states^[80]; (e) reconstruction of color images^[80]

实现偏振加密 OAM 复用全息。在定义的偏振态的入射下,超表面被携带有反向拓扑荷数的 OAM 光束照射时,预设图像才会出现。当入射 x 方向偏振光或 y 方向偏振光时,出现无序的图像,而仅当 x 方向和 y 方向分别具有 $l=1$ 和 $l=-1$ 的 OAM 光束入射时才能出现编码图像,如图 3(b) 所示。

SAM 通常表现为圆极化偏振, Yang 等^[79] 提出的角动量复用全息实现了在亚波长尺度内任意调节 SAM 和 OAM 这两个本征维度,如图 3(c) 所示。利用 SAM 和 OAM 两个维度实现复用,只有当携带着特定 SAM 和 OAM 本征态的光束照射到超表面时才能精确地重建目标图像,而两个 SAM 本征态叠加可实现任意偏振态,从而实现了任意偏振加密 OAM 复用全息。

2019 年, Jin 等^[80] 提出了多动量变换超表面(即元变压器)设计。将 OAM、线性动量与超表面结合,可以实现 OAM 状态的识别,如图 3(d) 所示。此外,利用线性动量可以形成彩色全息,不仅能实现红黄蓝三色,还能实现具有梯度颜色的复杂图案,重建彩色图像,如图 3(e) 所示。这使得超表面具有更多的功能,并可能在三维成像、防伪、光通信和实时检测等方面实现应用,反映出超表面 OAM 复用全息的广阔前景。

3.2 频率复用 OAM 全息

频率也是光子的一种基本自由度,而非线性是实现频率复用的方式。随着对非线性晶体的研究逐渐深入,全息术已推广至非线性领域^[81],通过对非线性晶体进行设计,形成了一种操纵任意谐波的方法^[82-83],以此来实现频率和 OAM 的复用。利用不同阶数的 OAM 对全息图进行编码,可以实现全息图像在二次谐波中的可控切换,从而实现基于 OAM 的非线性全息成像。当满足相应 OAM 匹配条件的入射光束照射钽酸锂(LiTaO₃)光子晶体时,编码在二维非线性光子晶体 χ^2 分布中的三幅独立图像将分别出现在二次谐波中^[84],如图 4(a) 所示。Fang 等^[85] 对前人工作进行了改进与创新,实现了波长复用非线性全息术。同时,他们进一步利用 OAM 为每个波长编码多个图案,将波长复用与 OAM 复用相结合,如图 4(b)~(c) 所示,增加了复用通道数,同时利用三次谐波实现了 OAM 全息。在非线性 OAM 全息中,仅相位调制的全息图与复振幅全息图像的成像质量相比差异不明显。非线性超表面是另一个在不同机制下实现非线性全息术的有前途的方式^[86-87],未来有望实现非线性 OAM 超表面复用全息。比如,当 OAM 复用全息的通道足够多时,利用时间和空间自由度可以实现动态 OAM 全息。

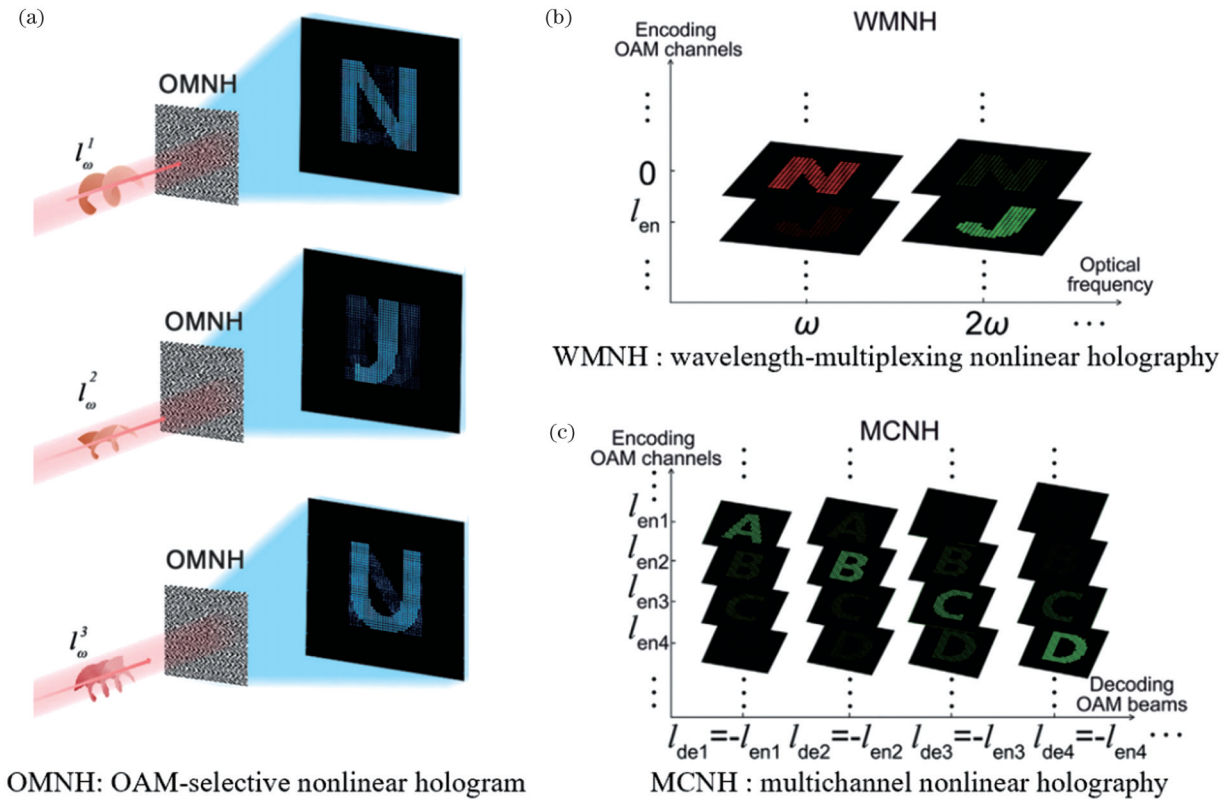


图 4 非线性 OAM 全息。(a) 基于 OAM 多路非线性全息术的多通道非线性全息显示^[84]; (b) 波长复用非线性全息术的概念^[85]; (c) 多通道非线性全息术的概念^[85]

Fig. 4 OAM nonlinear hologram. (a) Multichannel nonlinear holographic display based on the OAM multiplexing nonlinear holography^[84]; (b) concept of wavelength-multiplexing nonlinear holography^[85]; (c) concept of multichannel nonlinear holography^[85]

3.3 时空复用 OAM 全息

时空复用 OAM 全息利用时间和空间两个维度可以实现动态 OAM 全息或在不同平面上实现 OAM 全息。动态全息在实时调控的光学显示设备中具有重要应用。目前实现动态 OAM 全息主要有两种方法：复用通道切换和超表面折射率变化。在前人的研究中，超表面的几何形状在制备时便被固定下来，无法实时改变。2017 年，Duan 等^[88]提出了一种基于催化镁超表

面的动态等离子体显示技术，镁在氢化和脱氢时具有等离子体重构性：镁氢化后变成氢化镁(MgH₂)，即从金属变成电介质。Yu 等^[89]将其应用于超表面中，超表面的每个结构单元包含一个金纳米棒和两个镁纳米棒，不同偏振态的可切换矢量光束和不同拓扑荷的可切换涡旋光束可以通过超表面的简单氢化和脱氢实现。超表面扫描电镜(SEM)图和相应的切换光束如图 5(a)所示。将动态超表面产生的不同的光入射到

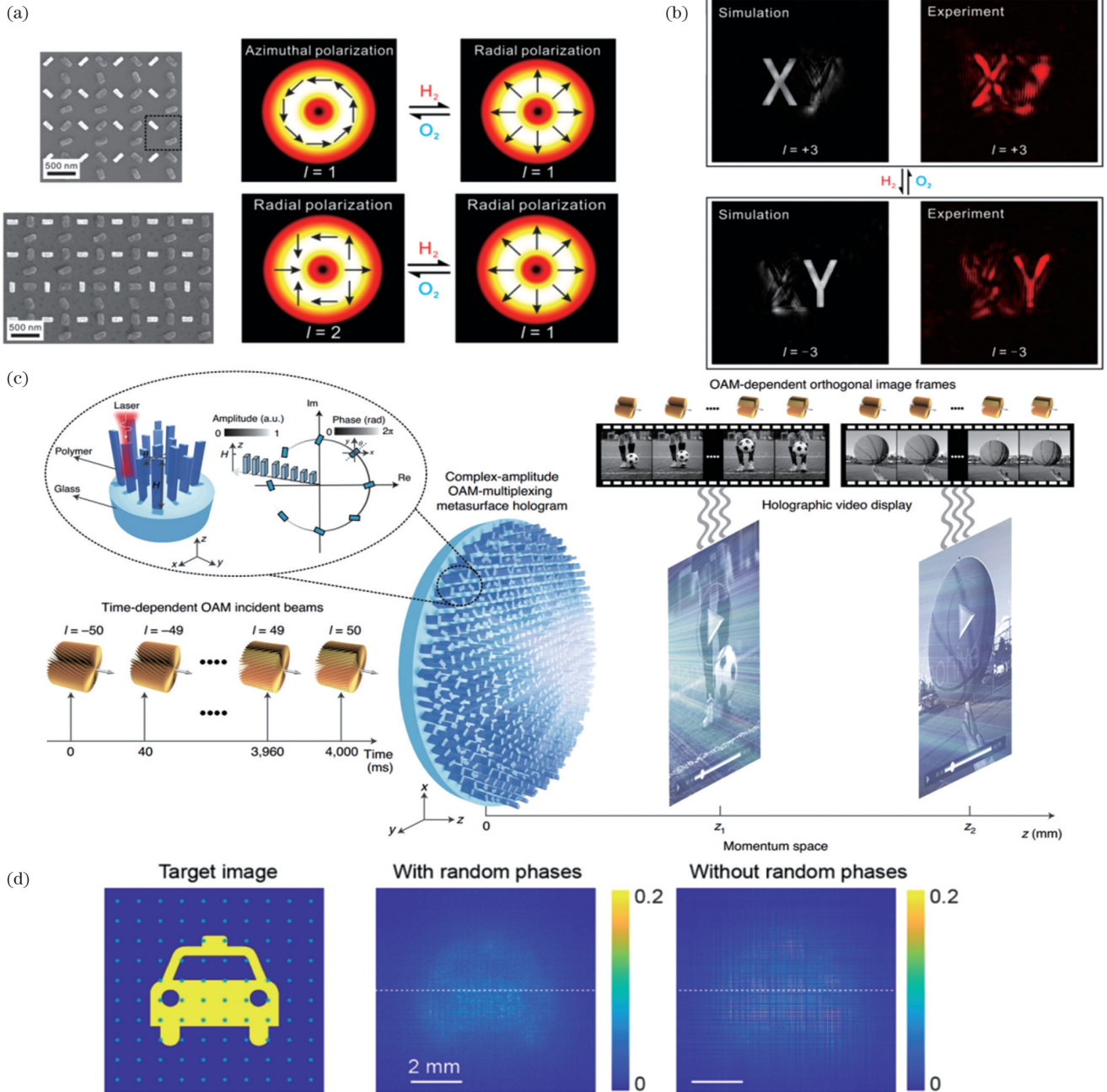


图 5 超表面动态全息。(a)超表面 SEM 图以及 H_2 和 O_2 加载时可切换的径向偏振光束示意图^[89]；(b)吸氢和脱氢变换时的模拟和实验结果^[89]；(c)基于大尺度复振幅 OAM 复用超表面全息的超高维 OAM 复用全息示意图^[90]；(d)有无利用随机相位的深度复用 OAM 全息术的比较^[91]

Fig. 5 Metasurface dynamic holography. (a) SEM image of the metasurface sample and schematic illustration of switchable radially polarized beams upon H_2 and O_2 loading^[89]; (b) simulated and experimental results upon H_2 and O_2 loading^[89]; (c) schematic of ultrahigh-dimensional OAM-multiplexed holography based on a large-scale complex-amplitude OAM-multiplexed metasurface hologram^[90]; (d) comparisons of depth multiplexing OAM holography with and without random phases^[91]

另一超表面时,即可重建不同的信息,未来有望应用于光学传感器领域。由图 5(b)可以看出,吸氢和脱氢虽然可以实现不同通道的切换,但成像质量较差,化学反应较难控制。因此,利用静态超表面实现动态全息仍然是目前的研究热点。

2020 年, Ren 等^[90]提出了 OAM 复振幅超表面全息,该技术通过切换复用通道实现动态特性,展示了在两个不同平面上显示两个独立全息视频的效果。仅相位调制的超表面无法实现复振幅调控,图像通道与 OAM 螺旋波阵面的卷积破坏了线性叠加原理,造成了较大的串扰。复振幅超表面全息通过控制微纳结构的高度、转角来控制振幅和相位,可以实现 200 个正交通道。此外,复振幅 OAM 复用全息图的编码比依赖于迭代算法且仅基于相位的复用全息图的编码少两个数量级的计算时间。设计原理如下:

首先,在全息图平面中,将不同 OAM 模式编码不同通道的复振幅进行叠加,

$$E^{\text{mul}} = \sum_{j=1}^M A_j \exp(i\phi_j) \exp(il_j\varphi), \quad (5)$$

式中: E^{mul} 代表 OAM 复用全息图的复振幅场; A_j 和 ϕ_j 代表每个通道的振幅和相位; l_j 和 φ 分别表示编码图像的拓扑荷数和方位角; M 表示复用通道的总数。重建光场可以表示为

$$\mathcal{F}(E^{\text{mul}}) = \sum_{j=1}^M \left\{ \mathcal{F}(A_j) \otimes \mathcal{F}[\exp(i\phi_j)] \otimes \mathcal{F}[\exp(il_j\varphi)] \right\}. \quad (6)$$

赋予全息图相位为随机相位,并将特定 OAM 螺旋相位和菲涅耳透镜的相位添加到复振幅全息图的相位信息中,可以实现深度复用。用 OAM 光束依次照射制备好的超表面,实现了两个不同平面上的动态全息,如图 5(c)所示。

2022 年, Wang 等^[91]通过理论推导解释了利用随机相位可以抑制串扰的原因,同时实现了多个深度的复用,如图 5(d)所示。动态全息未来可应用于动态显示方面,但目前制备难度较大,难以实现大规模应用。

3.4 手性光场复用 OAM 全息

2022 年, Li 等^[92]提出了调制光相位调制(MC-OAM)全息技术,该技术通过结合光相位调制技术与光复用技术,将手性光束的相位结构引入到多维 OAM 全息术中。手性光束的强度和相位分布可以通过改变手性系数、轴锥参数、旋转角度和拓扑荷数来调制。他们证明了锥透镜参数、手征系数和调制手征相位分布的旋转角具有正交性,可作为拓扑荷数之外的额外自由度。这三个参数结合拓扑荷数作为 4 个光密钥,为信息安全提供了一种四维空间复用方法。此外,他们还证明了分数阶 MC-OAM 的拓扑荷最小分辨率可达到 0.01,并采用该技术进行了理论模拟和实验成像。虽然该技术能够将多个维度结合进行加密,提高

了信息的安全性,而且信息传输的通道数显著增加,但这种方法的成像质量与仅 OAM 复用全息相比较差。

4 内在自由度复用 OAM 全息

4.1 相位跃变梯度因子复用 OAM 全息

除了可将 OAM 模式数、偏振、波长等作为复用维度外,涡旋光的相位梯度、椭圆度、角度、径向-角度也可以作为复用维度。

利用相位跃变梯度因子的 OAM 多通道复用全息可以使拓扑荷的分辨率达到 0.1,实现分数拓扑荷 OAM 全息。涡旋光的复振幅相位梯度可以表示为

$$E = A \exp\left[i \text{mod}\left(l\varphi, \frac{2\pi l}{n}\right)\right], \quad (7)$$

式中: l 、 n 、 A 、 φ 、 $\text{mod}(\cdot)$ 分别代表拓扑荷数、相位跃变梯度因子、振幅、方位角、取余数操作。相位跃变梯度因子决定分裂涡旋的数目,每个分裂部分与其他部分用暗隙隔开,如图 6(a)所示,被称为剩余相位光学涡旋。由图 6(c)可以看出只有当拓扑荷数、位置信息和相位跃变梯度因子与设计的参数匹配时,才能分别解密多幅图像。相位跃变梯度因子的复用增加了新的自由度,且相位跃变因子不会破坏 OAM 全息的正交性。拓扑荷数可以是整数也可以是分数,极大地增加了复用通道^[93]。

4.2 角度复用 OAM 全息

与相位跃变复用 OAM 全息类似的一种复用方式是角度复用 OAM 全息,此技术将角空间作为 OAM 全息的一种新的编码自由度。如图 6(b)、(c)所示,将完整 OAM 模式划分为多个部分的 OAM 模式来增加复用通道,同时在编码流程中分别引入相位梯度和角度,以增加复用的维度。角复用 OAM 全息原理如图 6(d)所示。自由空间中部分 OAM 光束的演化非常复杂,以往在图像编码和解码中都采用了完整的 OAM 模式,没有充分利用螺旋相位模式的角空间。然而,部分 OAM 模式的远场模式在结构上是稳定且可控的,这为操纵部分 OAM 模式提供了可行性^[94]。部分 OAM 全息图重构结果如图 6(f)所示,其编码流程与 OAM 复用全息基本一致。

4.3 椭圆度复用 OAM 全息

2019 年, Yang 等^[95]提出了产生任意可控旋转角度椭圆光学涡旋的相位调制方法,这使得椭圆度成为一种新的自由度。Cheng 等^[96]将其与 OAM 复用全息相结合,将椭圆光涡旋的椭圆度作为全息加密的自由度,实现了四维椭圆度加密全息。对于具有特定拓扑荷数的涡旋光束来说,其结合椭圆率可在成像平面上重建不同的图像。不同椭圆度的涡旋光束^[97]如图 7(a)所示,其实现方法与 OAM 全息一致,进一步丰富了 OAM 复用全息。由图 7(b)可看出,重建图像的质量较差,信噪比较低。如果通过设计超表面能够实现椭

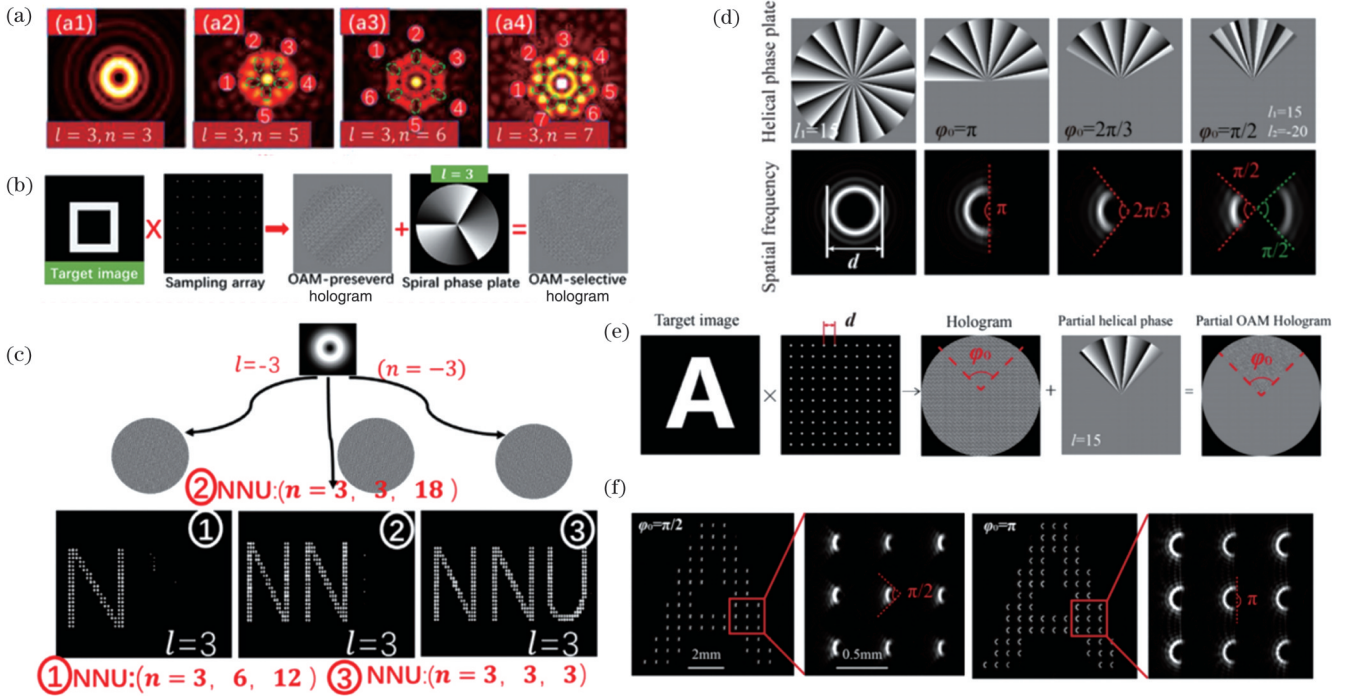


图 6 OAM 复用全息中部分螺旋相位模式的基于跳跃梯度因子和角度复用。(a) 剩余相位光学涡旋的强度^[93]；(b) 调制 OAM 选择性全息术的设计原理^[93]；(c) 三幅由入射调制光束产生的重建图像^[93]；(d) 部分 OAM 全息的原理^[94]；(e) 部分 OAM 全息图的设计过程^[94]；(f) $\varphi_0 = \pi/2$ 和 $\varphi_0 = \pi$ 时部分 OAM 全息图的重构结果^[94]

Fig. 6 Jump gradient factors-based and angular multiplexation of partial helical phase modes in OAM multiplexing holography. (a) The intensity patterns of the remainder-phase optical vortex^[93]; (b) design principle of modulated OAM-selective holography^[93]; (c) three reconstructed images resulting from an incident modulated beam^[93]; (d) principle of partial OAM holography^[94]; (e) design procedure of a partial OAM hologram^[94]; (f) reconstruction results of partial OAM holograms with $\varphi_0 = \pi/2$ and $\varphi_0 = \pi$ ^[94]

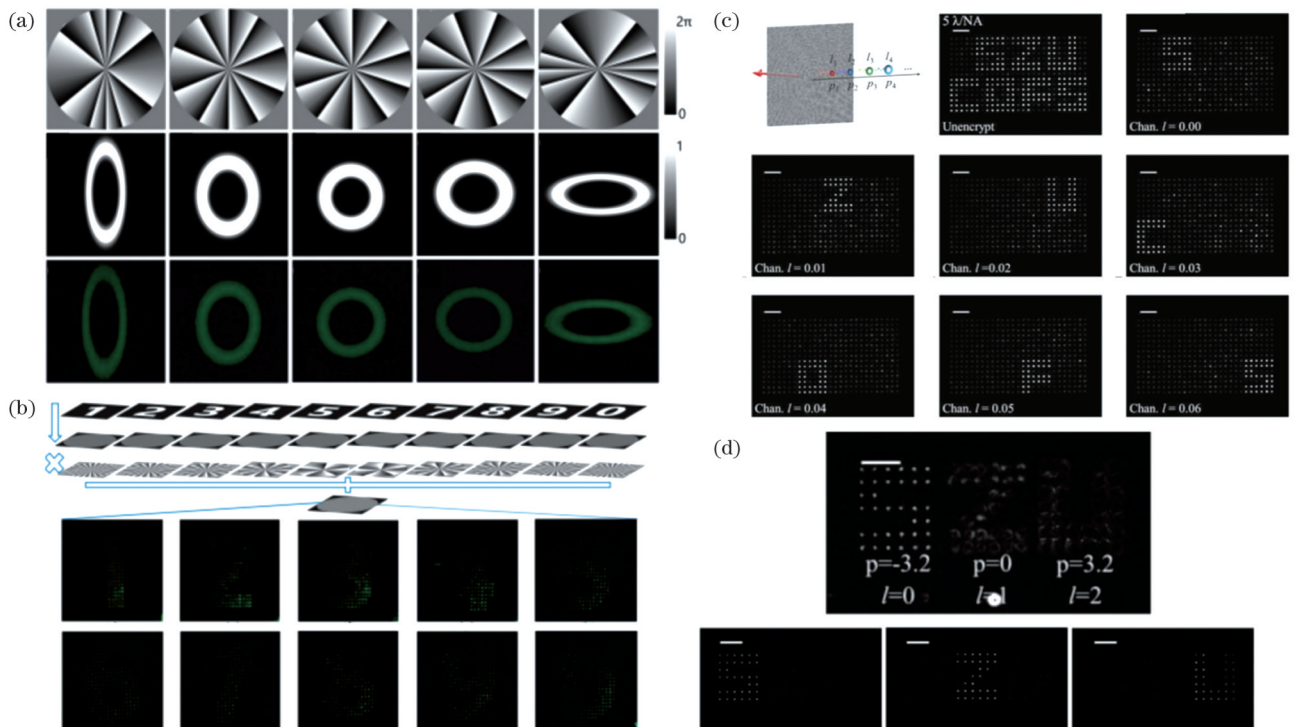


图 7 椭圆度加密 OAM 复用全息和径向-角度复用 OAM 全息^[97]。(a) 不同椭圆度的椭圆光学涡旋；(b) 椭圆度加密 OAM 多路复用全息图解；(c) 超精细 OAM 复用全息术；(d) 二维空分复用全息术

Fig. 7 Ellipticity-encrypted OAM multiplexed holography and radial-angular OAM multiplexed holography^[97]. (a) Elliptical optical vortices with different ellipticities; (b) illustration of ellipticity-encrypted OAM multiplexing holography; (c) ultra-fine OAM multiplexing holography; (d) two-dimension spatial division multiplexed holography

圆度复用 OAM 加密, 就可以增大视场, 提高衍射效率。同时, 利用超表面可以实现复振幅全息, 从而突破仅相位复用 OAM 全息的限制。

4.4 径向-角度复用 OAM 全息

超密完美 OAM 全息进一步对径向维度进行了复用, 进而拓展至二维(径向-角度)空分复用全息术。将径向调制作为新自由度的超精细 OAM 复用全息的实验结果如图 7(c) 所示。径向轴棱镜和旋涡相位调制的结合产生了完美 OAM 模式^[98], 径向调制可以独立地抑制复用信道之间的串扰。径向-角度复用 OAM 全息将全息图的 OAM 通道分辨率从整数阶提高到 0.01, 实现了一维空分复用超精细 OAM 全息, 如图 7(d) 所示。空间带宽积的效率比传统的仅相位 OAM 全息提高了约 20 倍^[97]。OAM 与其他维度复用实现全息已有多种方法, 且还在不断丰富中。OAM 除了可以利用全息实现加密之外, 还可以利用其他方式, 如光热。

5 OAM 全息复用的扩展

Xu 研究团队^[99]提出了一种利用 OAM 进行加密的全新方式, 实现了 OAM 与波长、偏振和三维空间相结合的六维光学信息复用, 进一步增加了复用维度。非手性纳米颗粒对不同阶次的 OAM 光束具有不同的吸收, 导致合成螺旋具有二向色性, 由此实现了 OAM 高维复用: 在线偏振 OAM 光束聚焦下, Gouy 相移叠加导致聚焦体积内倾斜的偏振态呈倾斜的椭圆, 方向由 Gouy 相位差决定^[100]。具有不同拓扑荷数的紧密聚焦线性偏振 OAM 光束在焦斑内的相同位置产生不同的偏振椭圆, 而随机分布的纳米棒对具有不同拓扑荷数的 OAM 光束具有不同的线性吸收, 一旦 OAM 光束的功率超过自组装纳米体的热重塑阈值, 极大放大的合成螺旋二向色性就会允许不同群体的自组装纳米体在具有不同拓扑荷数的 OAM 光束焦点内选择性激发和变形, 为纳米级 OAM 编码提供了方法。自组装纳米聚集体的无序性质自动赋予这种合成螺旋二向色性的同时使其具有高维编码的偏振和波长敏感性。该团队利用这些性质, 通过 OAM 划分两个波长和正交入射极化状态, 演示了纳米二维码的六维光学加密, 如图 8 所示。随着与 OAM 有关的光学维度不断被开发, 通道数已不再是 OAM 复用全息的关键, 如何提高成像质量, 或者如何将多种维度进行复用, 是未来的发展方向。

6 结 论

OAM 是当前信息复用领域的研究热点, 本文围绕 OAM 的几种复用方式进行了详细论述。除了与偏振、手性光场、非线性等结合外, 还可以利用其自身特性进行复用, 实现更高维复用。OAM 超表面全息可实现无限通道数而且各种模式之间相互独立, 极大地增加了信息容量。利用超表面不仅可以消除不需要的衍射,

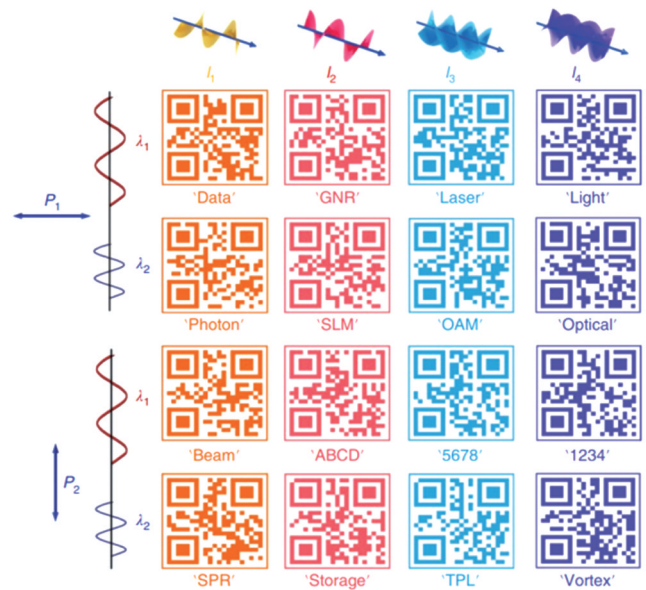


图 8 16 个 QR 码在同一空间区域的光复用和解复用^[99]

Fig. 8 Optical multiplexing and demultiplexing of 16 QR codes in the same spatial region^[99]

还可以同时调控振幅与相位, 实现更高的成像质量。将 OAM 与其他物理维度相结合, 可以丰富加密和显示技术的潜在应用。但由于离散采样间距的限制, 随着拓扑荷数增大, 采样间距增大, 图像损失信息增多, 无法实现图像的加密和传输。这是提高 OAM 复用全息通道数亟待解决的问题。此外, 目前的动态 OAM 全息主要基于可切换超表面完成, 能形成的全息图像都是预先设定好的图像, 无法实现真正意义上的实时任意调控。因此, 如何利用可调节材料设计超表面结构, 获得相位的实时连续调控, 从而实现动态 OAM 全息显示是未来的发展方向之一。目前, OAM 与外在自由度复用实现 OAM 全息复用是主流的复用手段, 但内在自由度复用 OAM 全息由于控制较为复杂, 还有更多的可挖掘空间。最近, 利用连续域束缚态的偏振拓扑奇点性质实现 OAM 也是重要的方向之一^[101-102]。若能利用好超表面, 开发更多的复用形式(且达到更优质的成像质量), OAM 多通道复用将在三维显示、信息传输、加密等方面具有巨大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(10): 1123-1130.
- [3] Matsushima K, Sonobe N. Full-color digitized holography for large-scale holographic 3D imaging of physical and nonphysical objects[J]. Applied Optics, 2018, 57(1): A150-A156.
- [4] Paturzo M, Memmolo P, Finizio A, et al. Synthesis and display of dynamic holographic 3D scenes with real-world objects[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 8806-8815.
- [5] Matsushima K, Arima Y, Nakahara S. Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects[J].

- Applied Optics, 2011, 50(34): H278-H284.
- [6] Blanche P A. Holography, and the future of 3D display[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(4): 446-459.
- [7] Huang T S. Digital holography[J]. Proceedings of the IEEE, 1971, 59(9): 1335-1346.
- [8] Brown B R, Lohmann A W. Complex spatial filtering with binary masks[J]. Applied Optics, 1966, 5(6): 967-969.
- [9] Slinger C, Cameron C, Stanley M. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. Computer, 2005, 38(8): 46-53.
- [10] Dallas W J. Computer-generated holograms[M]//Poon T C. Digital holography and three-dimensional display. New York: Springer, 2006: 1-49.
- [11] Osten W, Faridian A, Gao P, et al. Recent advances in digital holography[J]. Applied Optics, 2014, 53(27): G44-G63.
- [12] Sahin E, Stoykova E, Mäkinen J, et al. Computer-generated holograms for 3D imaging: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 53(2): 32.
- [13] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 227-232.
- [14] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(3): 227-231.
- [15] Xie R S, Zhai G H, Wang X, et al. High-efficiency ultrathin dual-wavelength pancharatanam - berry metasurfaces with complete independent phase control[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(20): 1900594.
- [16] Li L, Liu Z X, Ren X F, et al. Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source[J]. Science, 2020, 368(6498): 1487-1490.
- [17] Salary M M, Mosallaei H. Tunable all-dielectric metasurfaces for phase-only modulation of transmitted light based on quasi-bound states in the continuum[J]. ACS Photonics, 2020, 7(7): 1813-1829.
- [18] Song Q H, Odeh M, Zúñiga-Pérez J, et al. Plasmonic topological metasurface by encircling an exceptional point[J]. Science, 2021, 373(6559): 1133-1137.
- [19] 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.
- [20] Ni X J, Kildishev A V, Shalaei V M. Metasurface holograms for visible light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2807.
- [21] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [22] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [23] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, et al. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32867.
- [24] Wan W W, Gao J E, Yang X D. Metasurface holograms for holographic imaging[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(21): 1700541.
- [25] Song X, Huang L L, Sun L, et al. Near-field plasmonic beam engineering with complex amplitude modulation based on metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(7): 073104.
- [26] Song X, Huang L L, Tang C C, et al. Selective diffraction with complex amplitude modulation by dielectric metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(4): 1701181.
- [27] Huang L L, Zhang S A, Zentgraf T. Metasurface holography: from fundamentals to applications[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1169-1190.
- [28] 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.
- [29] Lee G Y, Sung J, Lee B. Recent advances in metasurface hologram technologies (invited paper)[J]. ETRI Journal, 2019, 41(1): 10-22.
- [30] Wu J W, Wang Z X, Zhang L, et al. Anisotropic metasurface holography in 3-D space with high resolution and efficiency[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(1): 302-316.
- [31] Zheng G X, Zhou N, Deng L G, et al. Full-space metasurface holograms in the visible range[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2920-2930.
- [32] Cao T, Lian M, Liu K A, et al. Wideband mid-infrared thermal emitter based on stacked nanocavity metasurfaces[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(1): 015402.
- [33] Li X, Zhang X E, Zhao R Z, et al. Independent light field manipulation in diffraction orders of metasurface holography[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(8): 2100592.
- [34] Dorrah A H, Capasso F. Tunable structured light with flat optics [J]. Science, 2022, 376(6591): eabi6860.
- [35] Li X P, Lan T H, Tien C H, et al. Three-dimensional orientation-unlimited polarization encryption by a single optically configured vectorial beam[J]. Nature Communications, 2012, 3: 998.
- [36] Yang Y M, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5753.
- [37] Yun H, Lee S Y, Hong K, et al. Plasmonic cavity-apertures as dynamic pixels for the simultaneous control of colour and intensity [J]. Nature Communications, 2015, 6: 7133.
- [38] Yan C, Yang K Y, Martin O J F. Fano-resonance-assisted metasurface for color routing[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(7): e17017.
- [39] Song Q H, Wu P C, Zhu W M, et al. Split Archimedean spiral metasurface for controllable GHz asymmetric transmission[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(15): 151105.
- [40] 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.
- [41] Yan L B, Zhu W M, Karim M F, et al. Arbitrary and independent polarization control *in situ* via a single metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(21): 1800728.
- [42] Ding F, Chang B D, Wei Q S, et al. Versatile polarization generation and manipulation using dielectric metasurfaces[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(11): 2000116.
- [43] Fan Q B, Liu M Z, Zhang C, et al. Independent amplitude control of arbitrary orthogonal states of polarization via dielectric metasurfaces[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(26): 267402.
- [44] Li L, Zhang J A, Hu Y Q, et al. Broadband polarization-switchable multi-focal noninterleaved metalenses in the visible[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(11): 2100198.
- [45] Rubin N A, Zaidi A, Dorrah A H, et al. Jones matrix holography with metasurfaces[J]. Science Advances, 2021, 7(33): eabg7488.
- [46] 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.
- [47] Tang J A, Li Z, Wan S A, et al. Angular multiplexing nanoprinting with independent amplitude encryption based on visible-frequency metasurfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(32): 38623-38628.
- [48] Jang J, Lee G Y, Sung J, et al. Independent multichannel wavefront modulation for angle multiplexed meta-holograms[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(17): 2100678.
- [49] Li G X, Chen S M, Pholchai N, et al. Continuous control of the nonlinearity phase for harmonic generations[J]. Nature Materials, 2015, 14(6): 607-612.
- [50] Liu B Y, Sain B, Reineke B, et al. Nonlinear wavefront control by geometric-phase dielectric metasurfaces: influence of mode field and rotational symmetry[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(9): 1902050.
- [51] Mao N, Zhang G, Tang Y, et al. Nonlinear vectorial holography

- with quad-atom metasurfaces[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022, 119(22): e2204418119.
- [52] 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.
- [53] Xu H X, Hu G W, 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.
- [54] Chen Q M, Li Y, Ye J F, et al. Wavelength and polarization multiplexed optical vortex demultiplexer[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(37): 375104.
- [55] Leitis A, Tittl A, Liu M K, et al. Angle-multiplexed all-dielectric metasurfaces for broadband molecular fingerprint retrieval[J]. Science Advances, 2019, 5(5): eaaw2871.
- [56] 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: Science & Applications, 2019, 8: 92.
- [57] 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.
- [58] Song Q H, Baroni A, Sawant R, et al. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase metasurfaces[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2651.
- [59] Song Q H, Khadir S, Vézian S, et al. Printing polarization and phase at the optical diffraction limit: near- and far-field optical encryption[J]. Nanophotonics, 2020, 10(1): 697-704.
- [60] Yuan Y Y, Zhang K, Ratni B, et al. Independent phase modulation for quadruplex polarization channels enabled by chirality-assisted geometric-phase metasurfaces[J]. Nature Communications, 2020, 11: 4186.
- [61] Wan S A, Wan C W, Dai C J, et al. Angular-multiplexing metasurface: building up independent-encoded amplitude/phase dictionary for angular illumination[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(22): 2101547.
- [62] Wang H, Jing Y, Li Y F, et al. Tailoring circular dichroism for simultaneous control of amplitude and phase via ohmic dissipation metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(12): 2100140.
- [63] Wu T, Zhang X Q, Xu Q A, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(1): 2101223.
- [64] Song Q H, Liu X S, Qiu C W, et al. Vectorial metasurface holography[J]. Applied Physics Reviews, 2022, 9(1): 011311.
- [65] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [66] Li Y, Li X, Chen L W, et al. Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(2): 1600502.
- [67] Zhao H A, Quan B G, Wang X K, et al. Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on a metasurface in the terahertz band[J]. ACS Photonics, 2018, 5(5): 1726-1732.
- [68] Meng Y F, Yi J J, Burokur S N, et al. Phase-modulation based transmitarray convergence lens for vortex wave carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 22019-22029.
- [69] Tan H Y, Deng J H, Zhao R Z, et al. A free-space orbital angular momentum multiplexing communication system based on a metasurface[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019: 1800278.
- [70] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 90.
- [71] Liu T H, Li W H, Meng Y Y, et al. Six-mode orbital angular momentum generator enabled by helicity-assisted full-space metasurface with flexible manipulation of phase, polarization, and spatial information[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(8): 2102638.
- [72] Liu F, Tsilipakos O, Ptilakis A, et al. Intelligent metasurfaces with continuously tunable local surface impedance for multiple reconfigurable functions[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(4): 044024.
- [73] Fang X Y, Ren H R, Gu M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. Nature Photonics, 2020, 14(2): 102-108.
- [74] Kotlyar V V, Khonina S N, Kovalev A A, et al. Diffraction of a plane, finite-radius wave by a spiral phase plate[J]. Optics Letters, 2006, 31(11): 1597-1599.
- [75] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2986.
- [76] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 95.
- [77] Zhou H Q, Sain B, Wang Y T, et al. Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography[J]. ACS Nano, 2020, 14(5): 5553-5559.
- [78] Xiao Q A, Ma Q A, Yan T, et al. Orbital-angular-momentum-encrypted holography based on coding information metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(11): 2002155.
- [79] Yang H, He P, Ou K, et al. Angular momentum holography via a minimalist metasurface for optical nested encryption[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 79.
- [80] Jin L, Huang Y W, Jin Z W, et al. Dielectric multi-momentum meta-transformer in the visible[J]. Nature Communications, 2019, 10: 4789.
- [81] Liu H G, Li J, Fang X L, et al. Dynamic computer-generated nonlinear-optical holograms[J]. Physical Review A, 2017, 96(2): 023801.
- [82] Yang B, Hong X H, Lu R E, et al. 2D wave-front shaping in optical superlattices using nonlinear volume holography[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 2927-2929.
- [83] Wei D Z, Wang C W, Xu X Y, et al. Efficient nonlinear beam shaping in three-dimensional lithium niobate nonlinear photonic crystals[J]. Nature Communications, 2019, 10: 4193.
- [84] Fang X Y, Wang H J, Yang H C, et al. Multichannel nonlinear holography in a two-dimensional nonlinear photonic crystal[J]. Physical Review A, 2020, 102(4): 043506.
- [85] Fang X Y, Yang H C, Yao W Z, et al. High-dimensional orbital angular momentum multiplexing nonlinear holography[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(1): 015001.
- [86] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11930.
- [87] Suchowski H, O'Brien K, Wong Z J, et al. Phase mismatch - free nonlinear propagation in optical zero-index materials[J]. Science, 2013, 342(6163): 1223-1226.
- [88] Duan X Y, Kamin S, Liu N. Dynamic plasmonic colour display[J]. Nature Communications, 2017, 8: 14606.
- [89] Yu P, Li J X, Li X, et al. Generation of switchable singular beams with dynamic metasurfaces[J]. ACS Nano, 2019, 13(6): 7100-7106.
- [90] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space [J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(11): 948-955.
- [91] Wang F L, Zhang X C, Xiong R, et al. Depth multiplexing in an orbital angular momentum holography based on random phase encoding[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 31863-31871.
- [92] Li F J, Nie S P, Ma J, et al. Multiple-dimensional multiplexed holography based on modulated chiro-optical fields[J]. Optics Express, 2022, 30(23): 41567-41579.
- [93] Li F J, Ding H, Nie S P, et al. Multiple-image encryption using phase jump gradient factors-based OAM multiplexing holography [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107303.

- [94] Wang F L, Zhang X C, Xiong R, et al. Angular multiplexation of partial helical phase modes in orbital angular momentum holography [J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11110-11119.
- [95] Yang D H, Li Y, Deng D, et al. Controllable rotation of multiplexing elliptic optical vortices[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(49): 495103.
- [96] Cheng P Y, Huang S J, Yan C. Ellipticity-encrypted orbital angular momentum multiplexed holography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(12): 1875-1883.
- [97] Zhu G X, Bai Z Y, Chen J Y, et al. Ultra-dense perfect optical orbital angular momentum multiplexed holography[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28452-28460.
- [98] Vaity P, Rusch L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 597-600.
- [99] Ouyang X, Xu Y, Xian M C, et al. Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 901-907.
- [100] Visser T D, Wolf E. The origin of the Gouy phase anomaly and its generalization to astigmatic wavefields[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(18): 3371-3375.
- [101] Qin H, Su Z, Liu M, et al. Arbitrarily polarized bound states in the continuum with twisted photonic crystal slabs[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 66.
- [102] Qin H, Shi Y, Su Z, et al. Exploiting extraordinary topological optical forces at bound states in the continuum[J]. *Science Advances*, 2022, 8(49): eade7556.

Recent Advances in Orbital Angular Momentum Multiplexed Metasurface Holography

Gao Xinyue, Song Qinghua*

Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract

Significance Orbital angular momentum (OAM), which is manifested by the helical wavefront of light, has emerged as a new degree of freedom of light that can significantly enhance both the optical and quantum information capacities. Holography is an intriguing technique that can be used to reconstruct the three-dimensional (3D) light fields of an object. Because the helical-mode index of OAM beams is theoretically unlimited, numerous OAM-dependent information channels can be multiplexed in a single hologram, indicating that it has tremendous potential for achieving ultrahigh capacities in holographic devices and systems. Traditional OAM holograms rely on spatial light modulators (SLM) to modulate the wavefront. However, their low resolution and bulky size limit their practical applications. Metasurfaces, which are artificially engineered materials and are composed of optical thin films and subwavelength structure arrays, can be used to flexibly and accurately modulate optical fields, making them ideal candidates for high-performance optical applications. By designing the metasurface structure, it is possible to adjust the phase as well as independently and simultaneously adjust other physical dimensions such as the amplitude, polarization, angle, and frequency. A combination of these physical dimensions and OAM can be used to create independent information channels for high-capacity holographic multichannel multiplexing. The development of new degrees of freedom and improvement in the image quality open up new opportunities for future research in OAM holography, which can lead to the creation of safer and more integrated optical components.

Progress The recent progress in OAM multiplexed holography is reviewed based on optical metasurfaces, from the basic concepts to the practical implementation. The OAM is divided into two categories according to its multiplexing form and other optical degrees of freedom (Fig. 1): extrinsic degree of freedom multiplexed OAM holography, and intrinsic degree of freedom multiplexed OAM holography. Extrinsic degrees of freedom multiplexed OAM holography mainly includes polarization multiplexed OAM holography (Fig. 3), frequency-multiplexed OAM holography (Fig. 4), space-time multiplexed OAM holography (Fig. 5), and chiro-optical field multiplexed OAM holography (Fig. 6). Intrinsic degree of freedom multiplexed OAM holography includes phase jump gradient factor-multiplexed OAM holography, angle-multiplexed OAM holography (Fig. 7), ellipticity-multiplexed OAM holography, and radial-angle-multiplexed OAM holography (Fig. 8).

Conclusions and Prospects OAM holography can achieve an infinite number of orthogonal and independent channels, which significantly increases the information capacity for various applications. This can be achieved using a compact metasurface to miniaturize the device and improve the imaging quality by eliminating unnecessary diffraction. Furthermore, metasurfaces provide an excellent platform for combining OAM holography with other optical degrees of freedom, resulting in an enriched information capacity for potential applications in optical communications and information encryption. However, some pressing issues still require immediate resolution. First, as the topological charge of the OAM increases, the image resolution and information capacity of the OAM holography deteriorates because of the increased discrete sampling interval. Second, the current dynamic OAM holography primarily employs switchable metasurfaces; however, to achieve real-time and continuously tunable OAM holographic displays, adjustable materials should be utilized to design metasurface structures. Finally, further exploration of new optical degrees of freedom is imperative for achieving greater information capacity.

Key words holography; orbital angular momentum; metasurface; multichannel; multiplexing