

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

矢量全息技术的研究进展与应用

叶依琦, 皮大普, 顾敏, 方心远

引用本文:

叶依琦, 皮大普, 顾敏, 等. 矢量全息技术的研究进展与应用[J]. *光电工程*, 2024, **51**(8): 240082.

Ye Y Q, Pi D P, Gu M, et al. Research progress and applications of vectorial holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(8): 240082.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240082>

收稿日期: 2024-04-06; 修改日期: 2024-05-22; 录用日期: 2024-05-22

相关论文

Miniature tunable Airy beam optical meta-device

Jing Cheng Zhang, Mu Ku Chen, Yubin Fan, Qinmiao Chen, Shufan Chen, Jin Yao, Xiaoyuan Liu, Shumin Xiao, Din Ping Tsai
Opto-Electronic Advances 2024, **7**(2): 230171 doi: [10.29026/oea.2024.230171](https://doi.org/10.29026/oea.2024.230171)

Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band

Huan Zhao, Xinke Wang, Shutian Liu, Yan Zhang
Opto-Electronic Advances 2023, **6**(2): 220012 doi: [10.29026/oea.2023.220012](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220012)

Generation of structured light beams with polarization variation along arbitrary spatial trajectories using tri-layer metasurfaces

Tong Nan, Huan Zhao, Jinying Guo, Xinke Wang, Hao Tian, Yan Zhang
Opto-Electronic Science 2024, **3**(5): 230052 doi: [10.29026/oes.2024.230052](https://doi.org/10.29026/oes.2024.230052)

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚, 章思梦, 李晨霞, 洪治, 井绪峰
光电工程 2023, **50**(8): 230117 doi: [10.12086/oe.2023.230117](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230117)

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 **光电工程**
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240082

矢量全息技术的研究进展与应用

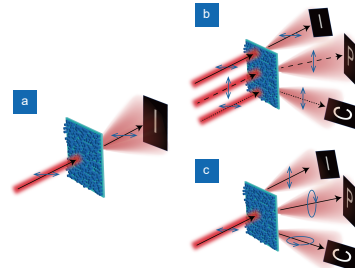
叶依琦^{1,2}, 皮大普^{1,2*}, 顾敏^{1,2}, 方心远^{1,2*}¹上海理工大学智能科技学院, 上海 200093;²上海理工大学光子芯片研究院, 上海 200093

摘要: 全息技术能够记录和重建物光波的全部信息, 自问世发展至今已经取得了显著的进步。近年来, 矢量全息的出现为这一领域带来新的发展。矢量全息技术不仅继承了传统标量全息技术记录振幅和相位的能力, 还额外引入了对偏振维度的调控, 因此能够显著提高记录信息的密度, 并在多个领域得以广泛应用。本文旨在从偏振调控的角度深入探讨矢量全息技术。首先介绍了标量全息技术和矢量全息技术的概念, 并比较了二者的优缺点, 重点阐述了矢量全息技术的优势; 然后详细地介绍了矢量全息技术的两种偏振态调控方式, 包括对入射光和出射光偏振态的调控; 同时阐述了矢量全息技术在三维显示和加密领域的应用; 最后总结了矢量全息技术目前面临的挑战, 并展望了其未来的发展趋势。

关键词: 全息; 矢量全息; 偏振调控

中图分类号: O438.1

文献标志码: A



叶依琦, 皮大普, 顾敏, 等. 矢量全息技术的研究进展与应用 [J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240082

Ye Y Q, Pi D P, Gu M, et al. Research progress and applications of vectorial holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240082

Research progress and applications of vectorial holography

Ye Yiqi^{1,2}, Pi Dapu^{1,2*}, Gu Min^{1,2}, Fang Xinyuan^{1,2*}¹School of Artificial Intelligence Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;²Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Holography, which can record and reconstruct all the information of object light waves, has made remarkable progress since its invention. In recent years, the emergence of vectorial holography has brought new developments to this field. Vectorial holography not only inherits the ability to record the amplitude and phase of traditional scalar holography but also introduces the additional control of the polarization dimension, which can significantly improve the density of the recorded information and has been widely used in many fields. This paper discusses vectorial holography in depth from the perspective of polarization modulation. Firstly, the concepts of scalar holography and vectorial holography are introduced, and their advantages and disadvantages are compared.

收稿日期: 2024-04-06; 修回日期: 2024-05-22; 录用日期: 2024-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62005164); 上海市曙光学者计划项目 (23SG41); 青年人才托举工程项目 (20220042); 上海市自然科学基金 (23ZR1443700); 上海市科学技术委员会项目 (21DZ1100500); 上海市类脑光子芯片前沿科学研究基地 (2021-2025 No. 20)

*通信作者: 皮大普, pidapu@126.com; 方心远, xinyuan.fang@usst.edu.cn

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

Then, the two polarization modulation methods of vectorial holography are introduced in detail, including the polarization modulation of incident light and output light. Meanwhile, the applications of vectorial holography in the field of 3D display and encryption are described. Finally, the challenges faced by vectorial holography are summarized, and the future development of vectorial holography is expected.

Keywords: holography; vectorial holography; polarization modulation

1 引言

全息技术是利用光的干涉和衍射原理记录并重建原始物体的一种技术^[1-5]。“全息”一词来源于希腊语“holos”和“gramma”，其含义是“完全的信息”。1948年，英国科学家 Dennis Gabor 首次提出了“全息”这个概念^[6]。Gabor 利用可见光记录了物体的振幅和相位信息，并制作了世界上第一张全息图。然而，在全息技术问世之后的很长一段时间内，其并没有受到人们的重视，主要原因有两点：第一是没有合适的相干光源；第二是重建的原始像和共轭像无法分离，导致重建质量很差。二十世纪六十年代，随着激光器的问世，全息技术中相干光源的问题得以解决，这一进步极大地促进了全息技术的发展。1962年，美国科学家 Leith 和 Upatnieks 提出了离轴全息技术^[7-9]，通过引入离轴参考光波成功地把原始像、共轭像和零级像在空间域中分离，显著提高了全息重建质量。随着计算机技术的发展，全息图的记录可以通过计算机模拟完成^[10-12]，完全摆脱光学全息技术记录过程中光学实验条件的限制。1965年，德国科学家 Lohman 将计算机技术和全息技术结合起来，并制作了世界上第一张计算全息图。计算全息技术的出现不仅解决了光学全息技术易受环境变化影响的问题^[13-25]，而且能更灵活地设计全息图以实现物光波的振幅和相位进行调控。20世纪90年代以来，随着空间光调制器 (spatial light modulator)、数字微镜阵列 (digital micromirror device)、声光调制器等动态调制器件的发展，计算全息技术可以通过切换加载在调制器件上的全息图实现动态全息三维显示^[26-28]。此外，由于计算全息技术具有设计灵活等优点，因此被广泛应用于图像加密^[29-33]和数字水印^[34-35]等许多新的领域。然而，传统计算全息技术主要针对光波的振幅和相位进行调控，而忽略了光波的偏振信息，因此其调控能力有限。

2013年，Huang 等设计了一种基于几何相位原理的超表面全息图^[36]，实现了可见光波段下高分辨率、大视场、无多级衍射和共轭像的三维图像重建，为全

息技术的发展带来了新的机遇^[37-44]。超表面是由人工亚波长的结构单元构成的阵列元器件，相比传统调制器件，具有像素尺寸小，视场角大，多维调控能力等优势^[45-54]。超表面的出现推动了对全息技术中偏振维度调控的研究，极大地促进了矢量全息技术的发展。与传统标量全息技术不同，矢量全息技术不仅可以灵活地调控光波的振幅和相位信息，还能精准地调控光波的偏振态，极大地增加全息图的信息容量。矢量全息技术的发展经历了多个阶段。从早期矢量全息尝试采用反射等离子体超表面方法^[55]、双原子等离子体单元细胞到介电介质和氮化镓的超表面方法，再到引入叠加方法控制色散和新型任意偏振转换二色性^[56]的概念，矢量全息技术突破了转换效率、偏振态数量、入射光角度、工作带宽以及色散等方面的限制。最近引入的正交偏振二色性的概念进一步扩展了矢量全息技术的设计自由度^[57]，使其能更好地对空间上各点的偏振态和偏振取向进行精准的调控。这些发展过程中的创新使得矢量全息技术在成像、通信和显示领域都产生了积极影响，能够更全面、更灵活地满足不同应用领域的需求。

2 标量全息技术与矢量全息技术的对比

2.1 标量全息技术的原理及其实现

全息技术分为波前记录和波前重建两个部分。

波前记录是基于光的干涉原理，如图 1(a) 所示，由激光器产生的相干光源，通过分束镜被分成两束：其中一束光照射在物体表面，并被物体表面反射，称为物光波 $O(x,y) = O_0(x,y)\exp[j\Phi_0(x,y)]$ ；另外一束光作为参考光波 $R(x,y) = R_0(x,y)\exp[j\Phi_1(x,y)]$ ，和物光波发生干涉，干涉条纹被记录在全息材料上，其强度分布可以表示为

$$I(x,y) = |O|^2 + |R|^2 + O \cdot R^* + O^* \cdot R. \quad (1)$$

由式 (1) 可知，干涉条纹的前两项分别表示物光

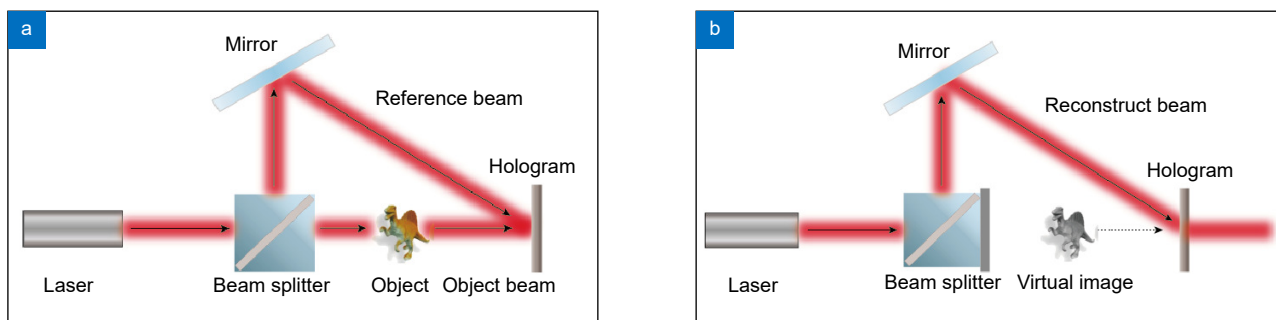


图 1 全息技术原理。(a) 波前记录; (b) 波前重建

Fig. 1 Principle of holographic technology. (a) Wavefront recording; (b) Wavefront reconstruction

波和参考光波的强度分布, 后两项表示物光波和参考光波的干涉项, 其中第三项包含了物光波 $O(x,y)$ 的振幅和相位信息。将记录着干涉条纹的全息材料进行曝光、显影等处理后就可以得到全息图, 因此全息图本质上是一幅干涉图。全息图的透过率函数通常正比于全息图的强度分布, 即 $t_H = kI(x,y)$, 其中 k 为比例常数。

波前重建是基于光的衍射原理, 用一束相干光作为重建光波照射全息图, 记录在全息材料上的物光波就会被重建出来。如图 1(b) 所示, 当采用和参考光波相同的光波作为重建光波, 即 $C(x,y) = R(x,y)$ 时, 透过全息图后的光场分布可以表示为

$$\begin{aligned} U'(x,y) &= C(x,y) \cdot t_H(x,y) \\ &= R(x,y) \cdot (|O|^2 + |R|^2 + O \cdot R^* + O^* \cdot R) \\ &= R_0 (O_0^2 + R_0^2) \exp[j\varphi_r] + R_0^2 O_0 \exp[j\varphi_0] \\ &\quad + R_0^2 O_0 \exp[-j(\varphi_0 - 2\varphi_r)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中: 忽略了比例常数 k , 其中第一项为零级像; 第二项包含物光波的振幅和相位信息, 因此会形成原始物体的虚像; 第三项包含物光波的共轭信息, 因此会形成原始物体的共轭像。

上文描述了光学全息技术的实现过程, 其依赖于实际光路来完成波前记录和波前重建。随着计算机技术的发展, 光学全息技术中的波前记录可以通过计算机模拟实现, 这种技术被称为计算全息技术。光学全息技术和计算全息技术的比较如表 1 所示: 1) 光学全息技术需要实际光路来完成波前记录, 成本较高、记录过程较为复杂且对光路稳定性要求高, 同时受环境

影响较大^[58-59]; 2) 光学全息技术只能记录真实存在的物体, 且全息图通常为静态全息图, 无法实现动态擦写, 同时也难以进行传输; 3) 光学全息技术中重建图像质量和可视化受到观察角度和距离的限制, 必须在正确的角度才能获得最佳的效果。相较于此, 计算全息技术的出现解决了光学全息技术的一些缺点: 1) 计算全息技术可以直接通过计算机模拟真实光路的记录过程, 解决了光学全息技术中记录过程复杂的问题, 可以灵活地对物光波的振幅和相位信息进行记录; 2) 计算全息技术不仅可以记录真实存在的物体, 也可以记录虚拟物体; 3) 可以借助调制器件对全息图进行动态切换, 从而实现动态三维全息显示; 4) 由于计算全息技术中的全息图是通过数字化产生的, 因此更易于存储和传输。计算全息技术相比光学全息技术具有许多优势, 但其重建图像质量也受到调制器件性能参数的限制, 仍存在较大的提升空间。

2.2 光的偏振态

偏振^[60-68]是描述电磁波性质的重要物理量, 是指横波的振动矢量(垂直于波的传播方向)偏于某些方向的现象。光波场的偏振态的主要表示方法有: 琼斯矢量(Jones vector representation)表示法、斯托克斯参量(Stokes vector)表示法和庞加莱球(Poincare sphere representation)图示法等^[69]。

1852年, 英国物理学家 George G. Stokes 提出使用四个斯托克斯参量来描述任意光波场的偏振态。

这四个参量分别为 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$, 并且这四个参量是可以由 7 个偏振投影测量强度值给出, 即

表 1 光学全息技术与计算全息技术对比

Table 1 Comparison between optical holography and computational holography

	是否可以记录虚拟物体	全息图类型	环境影响	图像质量是否受限	成本	信息传输
光学全息技术	否	静态	较大	是	高	复杂
计算全息技术	是	静态/动态	较小	是	低	灵活

$$S_{(x,y)} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_H - I_V \\ I_{+45} - I_{-45} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: S_0 参量为入射光的总光强 I_0 ; S_1 参量是 x 方向线偏振光的光强分量 I_H 和 y 方向线偏振光的光强分量 I_V 之间的差值; S_2 参量是 45° 线偏振光的光强分量 I_{+45} 和 -45° 线偏振光的光强分量 I_{-45} 之间的差值; S_3 参量是右旋圆偏振光的光强分量 I_{RCP} 与左旋圆偏振光的光强分量 I_{LCP} 之间的差值。Stokes 矢量的 4 个参数之间存在如下关系:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (4)$$

式 (4) 中, 只有当入射光为完全偏振光时, 不等式中的等号成立, 即 $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$; 当入射光为部分偏振光时, $0 < S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 < S_0^2$; 当入射光为完全非偏振光时 $0 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ 。

对 Stokes 矢量进行归一化是指将 Stokes 矢量的 4 个参量同时除以参量 S_0 的值, 其中常见的偏振光的归一化 Stokes 参量如表 2 所示。

表 2 常见的偏振光的归一化 Stokes 参量

Table 2 Normalized Stokes coefficients for common polarized light

偏振光	归一化 Stokes 参量
x 方向线偏振光	$[1, 1, 0, 0]^T$
y 方向线偏振光	$[1, -1, 0, 0]^T$
45° 线偏振光	$[1, 0, 1, 0]^T$
-45° 线偏振光	$[1, 0, -1, 0]^T$
左旋圆偏振光	$[1, 0, 0, -1]^T$
右旋圆偏振光	$[1, 0, 0, 1]^T$

1892 年, 法国物理学家 Henri Poincare 提出一种更直观的庞加莱球方法来表示光的偏振态^[70-71], 其中庞加莱球的 Stokes 矢量如下所示:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2\psi \cos 2\chi \\ P \sin 2\psi \cos 2\chi \\ P \sin 2\chi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: P 、 I_0 、 ψ 和 χ 分别表示偏振度、强度、方位角和椭圆度。庞加莱球如图 2 所示。

该方法使用一个半径为 1 的球体来表示任意的偏振态, 球面上任意一点 P 在 x 、 y 、 z 轴上的投影分别对应 Stokes 参量中的 S_1 、 S_2 和 S_3 。庞加莱球体内部的点表示部分偏振光, 球心则表示自然光。从图中可以看出庞加莱球赤道上的点表示线偏振光, 庞加莱球

的两极处分别表示左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 其他位置为椭圆偏振光。其中常见的六种偏振态已在图中标示出来。

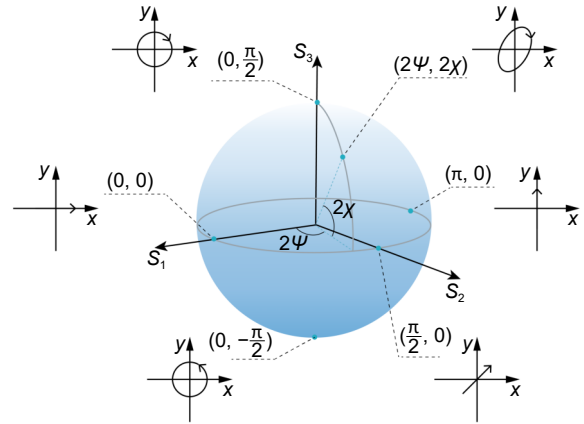


图 2 庞加莱球示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Poincare ball

1941 年, 美国物理学家 Clark Jones 提出了用琼斯矢量来表示光波在空间中的瞬时偏振态^[72]。该方法用一个列矩阵来对电场矢量在 x 、 y 方向上的两个正交分量进行表征。通常情况下琼斯矢量的表达式如下所示:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

当表示线偏振光时, 两正交分量的相位差为零, 此时琼斯矢量的表达式为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} e^{i\phi_0}. \quad (7)$$

琼斯矢量可以计算入射偏振光通过偏振元件的出射偏振态, 其中出射偏振态是将入射偏振态的琼斯矢量与光学元件的琼斯矩阵相乘得到。常见的偏振光的归一化琼斯矢量如表 3 所示。

表 3 常见偏振光的归一化琼斯矢量

Table 3 Normalised Jones vectors for commonly polarised light

偏振光	归一化琼斯矢量
x 方向线偏振光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
y 方向线偏振光	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
45° 线偏振光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
-45° 线偏振光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
左旋圆偏振光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
右旋圆偏振光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$

琼斯矢量只能表示完全偏振光, 而且琼斯矢量表示中存在复数, 部分参数无法直接测得, 因此该方法对光的偏振态表示具有一定的局限性。

2.3 矢量全息技术及其原理

标量全息技术只能记录物体的振幅和相位信息^[73-77], 而无法记录光的偏振信息, 因此其物光波和重建光波的偏振态往往是一致的, 如图 3(a) 所示。而对于矢量全息技术, 除了记录物体的振幅和相位信息外, 还能记录物体的偏振信息。偏振记录了光的矢量性质, 包括了人眼不可见信息。通过对光波的偏振态进行有效的调控, 可以扩展调控的自由度和通道数, 从而提高信息的容量。矢量全息技术对光波偏振态的调控主要可以分为两类: 第一类是对入射光的偏振态进行调控, 对入射光的偏振态的调控本质上是对重建光波的偏振态进行调控; 第二类是对出射光的偏振态进行调控, 对出射光的偏振态的调控本质上是对物光波的偏振态进行调控。前者通过组合入射偏振态与出射偏振态之间的对应关系实现偏振维度的调控, 如图 3(b) 所示, 后者通过构造出射偏振态具有空间变化分布的矢量全息图来实现偏振维度的调控, 如图 3(c) 所示。下文主要围绕这两方面进行阐述。

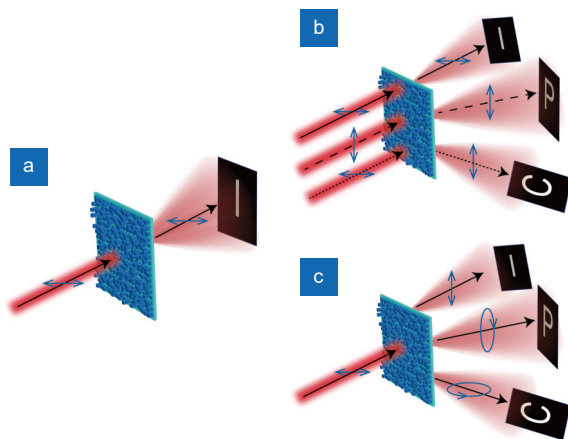


图 3 标量全息技术与矢量全息技术。(a) 标量全息技术; (b) 矢量全息技术—对入射光的偏振态进行调控; (c) 矢量全息技术—对出射光的偏振态进行调控

Fig. 3 Scalar holography and vectorial holography. (a) Scalar holography; (b) Vectorial holography - modulation of the polarization state of the incident light; (c) Vectorial holography - modulation of the polarization state of the output light

3 对入射光的偏振态进行调控

3.1 原理

对于入射光的偏振态的调控需要考虑入射偏振态

和出射偏振态的对应关系, 这种关系可以通过一个 2×2 的琼斯矩阵来描述:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{T}\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{in}}. \quad (8)$$

从式 (8) 中可以看出若入射光为 x 方向线偏振光, 出射光的琼斯矢量可以用 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yx} \end{bmatrix}$ 表示; 若入射光为 y 方向线偏振光, 出射光的琼斯矢量可以用 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} T_{xy} \\ T_{yy} \end{bmatrix}$ 来表示, 以上展示了入射光为线偏振光时, 出射光的琼斯矢量。当入射光为圆偏振光、椭圆偏振光及任意偏振光时, 出射光的琼斯矢量都可以用同样的方式表示出来。

如果可以自由设计与偏振相关的相移 (ϕ_x, ϕ_y) 和旋转角 θ , 则调制器件的琼斯矩阵可以表示为^[78]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} e^{i\phi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_y} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T = \mathbf{R}(\theta)\Delta\mathbf{R}(-\theta), \quad (9)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta)$ 为沿逆时针方向旋转 θ 角度的旋转矩阵, (ϕ_x, ϕ_y) 表示沿 x 轴和 y 轴方向的相移。在取向角 $\theta = 0$ 的时候, 该表达式可以表示为 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{bmatrix}$, 当入射光为 x 方向线偏振光时, 即 $\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 时, 出射光可以表示为 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} \\ 0 \end{bmatrix}$; 当入射光为 y 方向线偏振光时, 即 $\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 时, 出射光可以表示为 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} 0 \\ e^{i\phi_2} \end{bmatrix}$ 。

当取向角 $\theta \neq 0$ 时, 通过公式 (10-11) 表示, 利用旋转矩阵 $\mathbf{R}(\theta)$ 的设计自由度可以实现更为复杂的复用功能, 其中:

$$T_{xy} = T_{yx}, \quad (10)$$

$$T_{yy} = -\exp(2i\angle T_{yx})T_{xx}^*. \quad (11)$$

对于这种情况, 琼斯矩阵可以推导为: $\mathbf{T} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} & e^{i\phi_2} \\ e^{i\phi_2} & e^{i(2\phi_2 - \phi_1 + \pi)} \end{bmatrix}$, 可以看出: 当入射光为 x 方向线偏振光时, 即 $\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 时, 出射光可以表示为 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} \\ e^{i\phi_2} \end{bmatrix}$; 当入射光为 y 方向线偏振光时, 即 $\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 时, 出射光可以表示为 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} e^{i\phi_2} \\ e^{i(2\phi_2 - \phi_1 + \pi)} \end{bmatrix}$ 。当入射光为圆偏振光时, 出射光也可以用同样的方式表示出来。

3.2 设计

本节主要的阐述内容是: 对入射光偏振态进行调

控来实现矢量全息的设计。通常情况下, 改变入射光的偏振态只能实现两个独立通道中重建图像之间的转换, 这限制了全息图信息容量的提升。针对偏振通道数有限这一问题, 2018年, Zhao等^[79]通过双折射全介质超表面实现了多通道矢量全息技术。如图4(a)所示, 该方法利用改进 Gerchberg-Saxton 算法^[80]将多个全息图像分别记录到不同偏振通道的相位型全息图中, 并通过改变超表面纳米单元的横截面积和旋转角度实现不同偏振通道的相位调制, 通过对入射光束和出射光束偏振态的不同组合选择, 最终实现了三个独立偏振通道的七种不同偏振图像组合和复用, 极大地增强了信息容量。通过改变入射光的偏振态, 该项技术可以实现不同偏振通道中重建图像的快速切换, 未来有望应用于动态全息显示领域中。2019年, Hu等^[81]通过非交错的 TiO₂ 超表面实现了全彩矢量全息技术。如图4(b)所示, 该技术通过在 TiO₂ 超表面的三个偏振通道上分别记录红、绿、蓝颜色通道的图像实现对彩色图像的记录。由于不同颜色通道的信息被耦合到不同的偏振通道内, 因此各个颜色通道的信息几乎没有串扰。该技术通过控制超表面上纳米柱的长度、宽度和旋转角度实现了不同偏振通道的相位调制。最终, 通过对不同颜色通道入射光束和出射光束偏振态的控制, 完成近零串扰的全彩色矢量全息图像的重建, 为实现彩色全息显示提供新的思路。

2021年, Bao等^[82]通过四个纳米柱组成的单元结构对介电超表面进行设计, 如图5(a)所示。该介电超表面的单元结构是由四个纳米柱构成, 其中, 每个纳米柱具有不同的位置和方位角。因此, 琼斯矩阵中的每个元素可以由位置和方位角的函数进行独立调控。

然而, 由于超表面的镜像对称性, 琼斯矩阵的非对角线元素应保持一致, 这一特性导致琼斯矩阵的自由度上限为6个。Bao等进一步对设计的超表面进行了实验验证, 最终实现了三张近场纳米印刷图像和三个远场全息重建图像共计6个通道数的实验结果。2022年, Zhang等^[83]提出一种新的介电超表面方法实现了从一个 Stokes 空间到另外一个 Stokes 空间的偏振复用变换, 如图5(b)所示。该超表面在圆偏振通道中具有较高的偏振转换能力, 可以实现动态相位和几何相位相结合的独立相位调制。这种方法通过混合遗传算法对矢量全息图进行优化, 并利用琼斯矩阵在输入偏振态和输出偏振态之间建立桥梁, 最终实现了两个 Stokes 空间中不同输入/输出偏振通道的动态调控, 因此在动态全息显示和光学加密领域具有广阔的应用前景。同年, Bao等^[84]在之前研究的基础上使用双层超表面结构, 如图5(c)所示, 结合梯度下降算法和特殊的结构设计, 实现了琼斯矩阵中4个复数矩阵的虚部和实部组成的8个自由度的光场调控, 打破了因为镜像对称导致琼斯矩阵只能实现6个调控自由度的限制, 并且实现了传统设计方案所不能实现的光场调控功能。这种方法可以实现对任意两种偏振态的相位和振幅进行独立调控。通过对入射光和出射光之间偏振态的两两组合可以实现4个通道的复用, 接着再将这项技术与近场纳米印刷和远场全息显示技术相结合可以使得复用通道达到8个。最后, 对两个双层结构的超表面额外地引入旋转自由度, 并与入射光偏振态与出射光偏振态之间的两两组合的自由度相结合, 将信息复用的通道数扩展到了16个, 相较于之前的设计方案进一步扩展了调控自由度。上述工作通过对入射光偏振

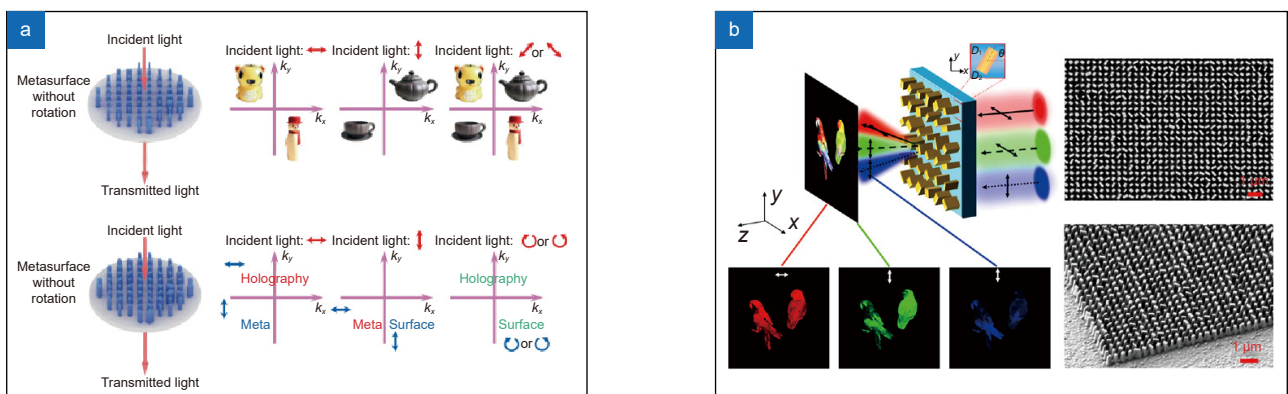


图4 对入射光偏振态调控的矢量全息技术。(a) 基于双折射全介质超表面的多通道矢量全息技术^[79];
(b) 基于非交错的 TiO₂ 超表面的全彩矢量全息技术^[81]

Fig. 4 Vectorial holography for modulation of the polarization state of incident light. (a) Multi-channel vectorial holography based on birefringent fully dielectric hypersurfaces^[79]; (b) Full-color vectorial holography based on non-interlaced TiO₂ hypersurfaces^[81]

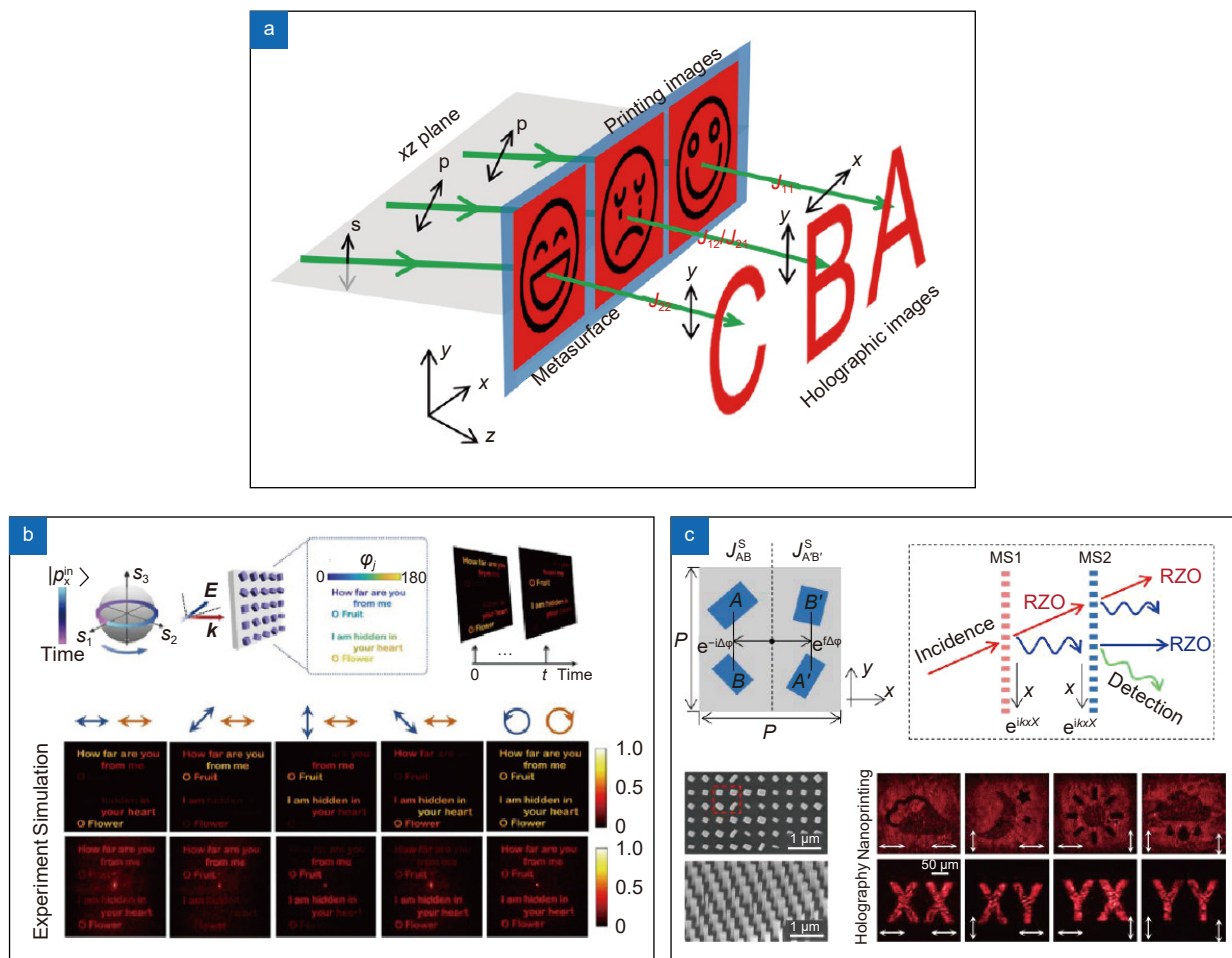


图 5 对入射光偏振态调控的矢量全息技术。(a) 基于 6 个自由度琼斯矩阵超表面矢量全息技术^[82]; (b) 基于动态相位和几何相位介电超表面的矢量全息技术^[83]; (c) 结合梯度下降算法的双层超表面结构的矢量全息技术^[84]

Fig. 5 Vectorial holography for polarization state modulation of incident light. (a) Vectorial holography based on a 6-degree-of-freedom Jones matrix hypersurface^[82]; (b) Vectorial holography based on a dynamically phased and geometrically phased dielectric hypersurface^[83]; (c) Vectorial holography of a bilayer superstructure surface structure combined with a gradient descent algorithm^[84]

态进行调控, 进一步与其他物理维度相结合实现了不同独立通道数的复用, 并在表 4 中详细进行了对比。

表 4 对入射光偏振态调控的矢量全息技术工作进行对比
Table 4 Comparison of vectorial holography work for incident light polarization state modulation

	文献[78]	文献[80]	文献[81]	文献[83]
独立通道数	3	3	6	16
与其他维度的复用	无	波长复用	空间复用	空间复用 旋转复用

4 对出射光的偏振态进行调控

4.1 原理

矢量全息技术对出射光的偏振态进行调控可以通过在空间上设计具有不同振幅比和相位延迟的正交偏

振分量来实现。由具有不同振幅比和相位延迟的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光叠加的方式来产生任意偏振态的表达式如下所示^[85]:

$$E = A_R e^{i(\varphi_H^R + \varphi_{in}^L)} |R\rangle + A_L e^{i(\varphi_H^L + \varphi_{in}^R)} |L\rangle = e^{i\varphi_R} (A_R |R\rangle + e^{i\Delta\varphi} A_L |L\rangle) \quad (12)$$

式中: A_R , A_L 分别表示右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的振幅分布, φ_H^R , φ_H^L 分别表示对右旋圆偏振光和左旋圆偏振光的调制相位, φ_{in}^R , φ_{in}^L 分别表示右旋圆偏振入射光和左旋圆偏振入射光的初始相位。其中振幅 A_R 和 A_L 与单元结构大小有关, 可以通过改变单元结构的尺寸控制左旋圆偏振光和右旋圆偏振光之间的振幅差, 进一步通过在左旋圆偏振光和右旋圆偏振光之间引入相位差 $\Delta\varphi = \varphi_L - \varphi_R$, 从而实现任意偏振态的调控。

$$\psi = \frac{\varphi_L - \varphi_R}{2}, \quad (13)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arcsin \frac{A_R^2 - A_L^2}{A_R^2 + A_L^2}. \quad (14)$$

通过式 (13-14) 可以推导出该偏振态的方位角 ψ 和椭圆度 χ 。其中, 方位角 ψ 的变化会引起偏振态沿着庞加莱球横向方向变化, 椭圆度 χ 的变化会导致偏振态沿庞加莱球纵向方向变化。因此, 通过改变正交偏振分量振幅比和相位延迟的方式产生的偏振态可以覆盖整个庞加莱球。

4.2 设计

本节主要阐述矢量全息技术对出射光偏振态的调控, 利用超表面对一组正交偏振分量进行振幅和相位

的独立调控, 是实现在空间上产生任意偏振态的矢量全息图的一种方式。2018 年, Deng 等^[86] 采用双原子多自由度超表面构建并实现了矢量全息图像的重建。如图 6(a) 所示, 该超表面每一个结构单元里面包含一对正交的原子对, 通过改变原子对之间的间距 s 和取向角 ψ , 使得其相位延迟和强度发生改变, 从而产生任意的偏振态。同时通过改变每个原子晶胞和相邻原子晶胞的位移 p , 实现对相位的调控。当采用单一偏振光对全息图进行照射时, 可以实现目标矢量全息图像的重建。2020 年, Ding 等^[87] 提出了一种介电超表面偏振发生器, 如图 6(b) 所示。这种方法可以克服双原子超表面只能调制斜入射光波的限制, 在入射光为线偏振光时, 可以实现任意偏振态的波前调控。该工

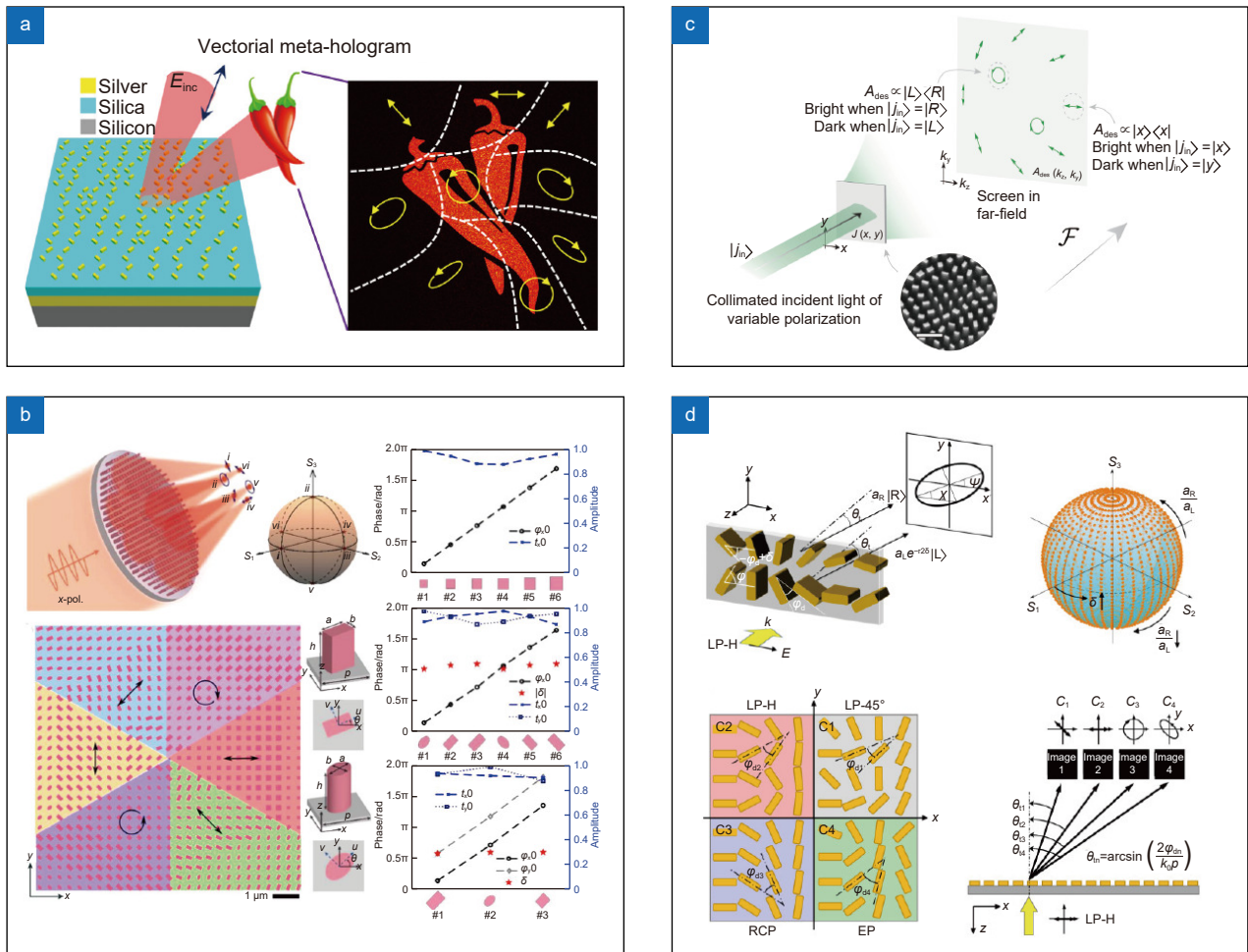


图 6 对出射光偏振态调控的矢量全息技术。(a) 基于双原子等离子体结构单元的矢量全息技术^[86]; (b) 基于介电超表面偏振发生器的矢量全息技术^[87]; (c) 基于控制偏振传递函数的矢量全息技术^[88]; (d) 基于氮化镓纳米柱像素化超表面的矢量全息技术^[89]

Fig. 6 Vectorial holography for the modulation of the polarization state of an output light. (a) Vectorial holography based on a diatomic plasma structural unit^[86]; (b) Vectorial holography based on a dielectric-super surface polarization generator^[87]; (c) Vectorial holography based on control of polarization transfer function^[88]; (d) Vectorial holography based on a pixelated hypersurface with GaN nanopillars^[89]

作主要演示了产生偏振态具有主要偏振态和任意形状波前的近红外范围内的六束光进行偏振变换的情况。对偏振器的主要设计：由六个子阵列组成，每个子阵列占据 60° 圆形扇区。每一部分的扇区都是由非晶硅为最小单位的原子组成的，通过调整该原子的形状、尺寸和方向，可以控制出射光的偏振和相位，从而产生之前预设的六种偏振光 (x 方向线偏振光、 y 方向线偏振光、 $+45^\circ$ 线偏振光、 -45° 线偏振光、左旋圆偏振光以及右旋圆偏振光)。同时该元件在设计波长处产生的多极共振频谱重叠可以保持高传输效率。2021 年, Rubin 等^[88] 提出了一种用超表面控制偏振光的新方法, 如图 6(c) 所示。这种方法与以往只处理出射光偏振态的方法不同, 而是通过控制入射光和出射光之间的偏振传递函数, 进而处理任意偏振态入射光下的矢量全息问题。与标量全息中的 Gerchberg-Saxton 算法类似, 该方法在迭代优化过程中通过将琼斯矩阵 J 进行分解, 得到一个厄米矩阵 H 和一个酉矩阵 U , 分别充当振幅和相位部分。然后将琼斯矩阵中的厄米矩阵 H 丢弃, 而将充当相位部分的酉矩阵

U 分配到预先设计的振幅与偏振分布的所需琼斯矩阵中, 以完成一次迭代优化。同年, Song 等^[89] 采用由氮化镓 (GaN) 纳米柱组成的像素化超表面上实现了对任意偏振态进行调控。如图 6(d) 所示, 一束水平方向的线偏振入射光照射在由两个相位梯度超像素组成的结构上, 会分解为一束左旋圆偏振光和一束右旋圆偏振光, 其中每个像素都可以作为一个偏转器来对分解出来的圆偏振光的振幅和相位进行调控, 最后通过叠加会产生任意相位和振幅差的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 从而实现任意偏振态的重建。该项工作要产生完全任意的偏振, 必须精确控制左旋圆偏振光和右旋圆偏振光两个分量之间的振幅差。

对振幅的通用控制方法可以通过调节超像素单元结构的尺寸来实现, 然而这种方法面临的主要问题是引入了巨大的振幅响应色散, 从而影响器件在宽光谱范围下的工作性能。在此研究背景下, Song 等^[90] 进一步对其理论进行了完善, 提出了一种使用正交圆偏振的适当叠加方法, 基本能实现在无限波长范围内维持出射光的全偏振态。如图 7(a) 所示, 该方法通过组

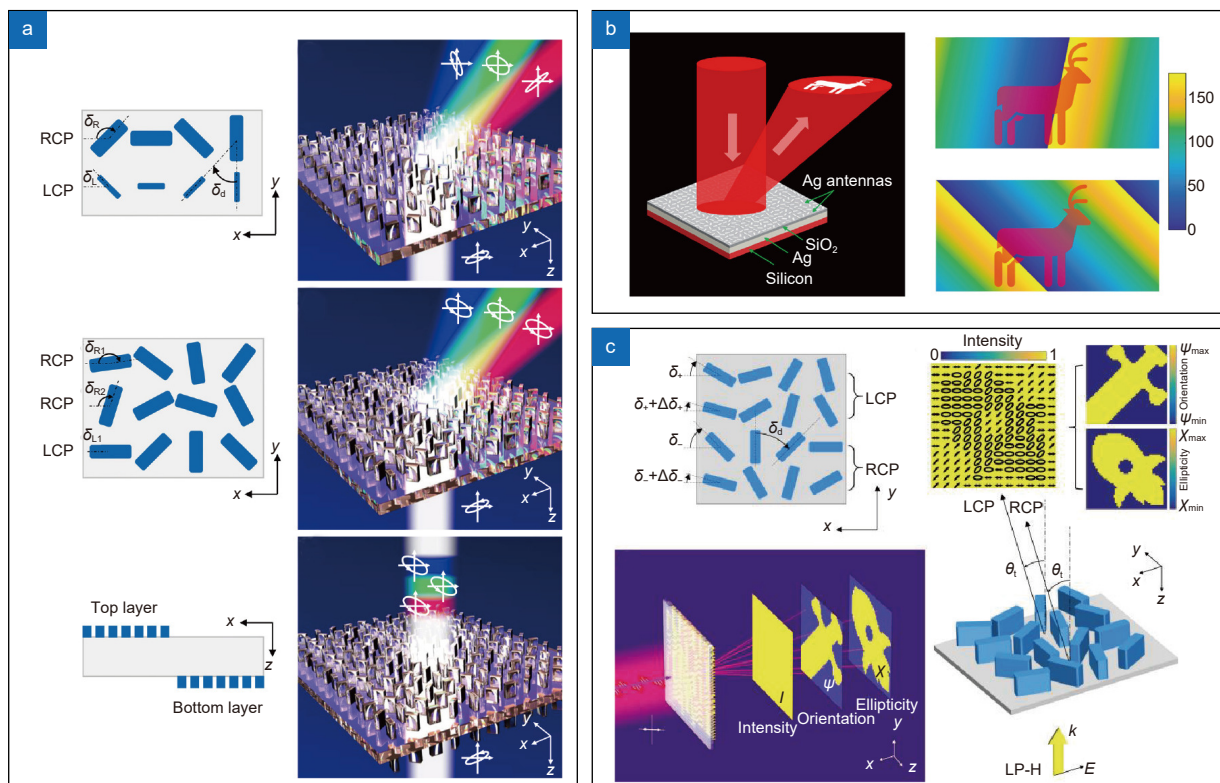


图 7 对出射光偏振态调控的矢量全息技术。(a) 基于正交圆偏振叠加的矢量全息技术^[90]; (b) 基于反射型等离子体超表面的矢量全息技术^[91]; (c) 基于矢量傅里叶超表面的矢量全息技术^[92]

Fig. 7 Vectorial holography for polarization state modulation of output light. (a) Vectorial holography based on orthogonal circular polarization superposition^[90]; (b) Vectorial holography based on a reflective plasma hypersurface^[91]; (c) Vectorial holography based on a vector Fourier hypersurface^[92]

合右旋圆偏振光、左旋圆偏振光和左旋圆偏振光(或右旋圆偏振光、右旋圆偏振光和左旋圆偏振光)形成了三行相位梯度超表面的单元结构,所有的纳米柱采用统一尺寸,使得所有传输的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光具有相同的转换效率和传播相位,以此达到均匀化色散效应的目的并且确保出射光偏振态仅与纳米柱的旋转角度有关。该方法依赖于简单的干涉条件控制出射光的振幅,并通过引入相反振幅的附加相位延迟衍射场实现出射光的全偏振调控。2021年, Wen等^[91]在此研究基础上,展示了具有空间连续偏振态分布的矢量全息图。如图7(b)所示,当采用一线偏振光垂直入射在反射型等离子体超表面上时,目标矢量全息图像在离轴方向上被重建出来。这个超表面由银纳米棒阵列构成,相邻两行的银纳米棒构成一个单元结构,该超表面会对用 Gerchberg-Saxton 算法生成的全息图进行编码,超表面结构中其中一行的银纳米棒相对于另一行的银纳米棒水平位移为 D_x , 竖直位移为 D_y , 通过改变位移 D_x , D_y 来对两偏振光之间引入相位差,最后,将两偏振分量进行叠加产生各点的最终偏振态。同年, Song等^[92]采用矢量傅里叶超表面,实现了对振幅和偏振两个通道进行调控的功能。如图7(c)所示,该工作的超表面单元结构是由四排相位梯度分布的超构原子构成的,四排超构原子的分布是上面两行的超构原子是逆时针排列,而下面两行的超构原子的顺序与上面两行的超构原子相反,是按顺时针排列的。这些超构原子的取向角分量相同且每个单元结构都可以充当半波片实现对入射光之间的相对相

位和振幅进行调控。因此,通过该结构可以叠加不同振幅和相位的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,从而实现对任意偏振态的调控。这项工作生成的矢量全息图是具有局部任意偏振态分布的,其预设偏振态分布包括方位角和椭圆度两个完整的偏振参数,因此,这项工作所编码的偏振态覆盖了整个庞加莱球,在光通信以及光学加密等领域可以得到广泛应用。

此外, Wan等^[93]提出了一种硅超表面内复用矢量全息图像的新方法。如图8(a)所示,该方法通过控制由左旋圆偏振光和右旋圆偏振光设计的全息图像的相位差来对额外的矢量全息图像进行编码。基于改进的 Gerchberg-Saxton 算法来精确地控制重建图像的相位差,两种不同全息图像通过两个交错的超表面会分别对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光进行响应,并在重建全息图像的重叠区域灵活地加密第三个额外的矢量全息图像,而无需在超表面上添加额外的一组结构。在不同相位差的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的照射下,额外的矢量全息图像的信息会随着相位差的变化而产生动态变化。该设计若是进一步结合波长、空间或角度等全息复用方法,可以为光学加密、动态显示、光学存储等许多其他领域提供新的思路。2024年, Mao等^[94]通过四原子超表面上的二次谐波产生过程,展示了非线性矢量全息。如图8(b)所示,四原子超表面由两组具有三重旋转对称超构原子组成。在线偏振飞秒激光泵浦下,两组三重旋转对称的超构原子的顶基和底基分别用来调控左/右旋圆偏振二次谐波的相位和振幅。然后,叠加两个正交偏振分量,四原子超

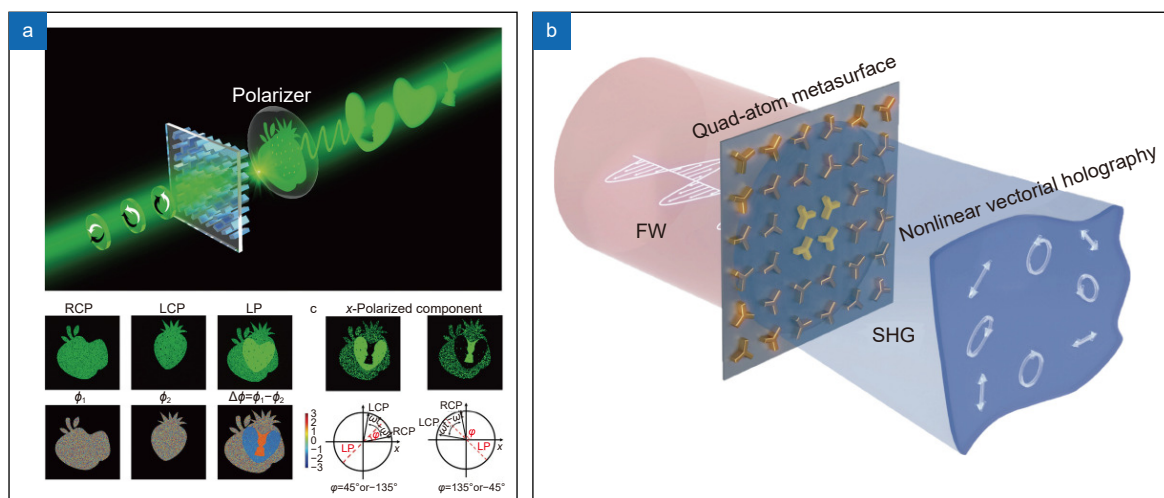


图8 对出射光偏振态调控的矢量全息技术。(a) 基于交错超表面的矢量全息技术^[93]; (b) 非线性矢量全息技术^[94]

Fig. 8 Vectorial holography for polarization state modulation of output light. (a) Vectorial holography based on interleaved hypersurfaces^[93]; (b) Nonlinear vectorial holography^[94]

表面可以产生具有任意偏振分布状态的非线性矢量全息图像。该超表面平台在光学存储和光学加密等领域具有重要的应用价值。

在上述矢量全息技术的基础上, 可以进一步对波长维度进行调控, 实现多波长或彩色矢量全息, 从而提高光波调控的维度。2018年, Jin 等^[95]展示了一种新型的自旋波长编码的多任务超表面, 该超表面能编码 6 位彩色矢量全息图。该方法使用“bit”的概念来描述重建的彩色矢量全息图的基元, 每个基元都可以代表一个具有偏振态的单色光, 并且都具有两个二进制状态, 分别对应“0”和“1”。其基本组成单元如图 9(a) 所示, 为了实现 6 位编码正入射, 要包含两个圆偏振光通道和三个波长通道(红、绿、蓝), 通过将两种不同的自旋和三个波长两两组合, 最终可以实现六个基元分别为—— \hat{R}_{RCP} 、 \hat{G}_{RCP} 、 \hat{B}_{RCP} 、 \hat{R}_{LCP} 、 \hat{G}_{LCP} 、

\hat{B}_{LCP} 。因此, 通过多波长 Gerchberg-Saxton 算法可以分别对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的相位进行控制, 然后利用几何相位将其编码到单一的超表面上。最终, 可以实现控制 6 位编码的入射光状态, 并且重建出 63 个与自旋和波长相关的矢量全息图像。2019年, Arbabi 等^[96]利用双折射介电超表面演示了几乎可以产生任意偏振模式的矢量全息图。如图 9(b) 所示, 该工作将彩色图像中的红、绿、蓝三个颜色通道的信息转化成 Stokes 参数, 相应的偏振态也可以在庞加莱球上表示出来, 每个点的位置及其颜色表示图像中某一点光的偏振态和强度。首先通过选择合适的材料、晶格常数、柱高和纳米柱尺寸大小可以完全独立的控制沿 x 方向和 y 方向的传输相位, 并且覆盖 $0-2\pi$ 的范围。然后旋转相应尺寸的电介质纳米柱来控制其位置上出射光的偏振和相位。并将该彩色图像的数据编码

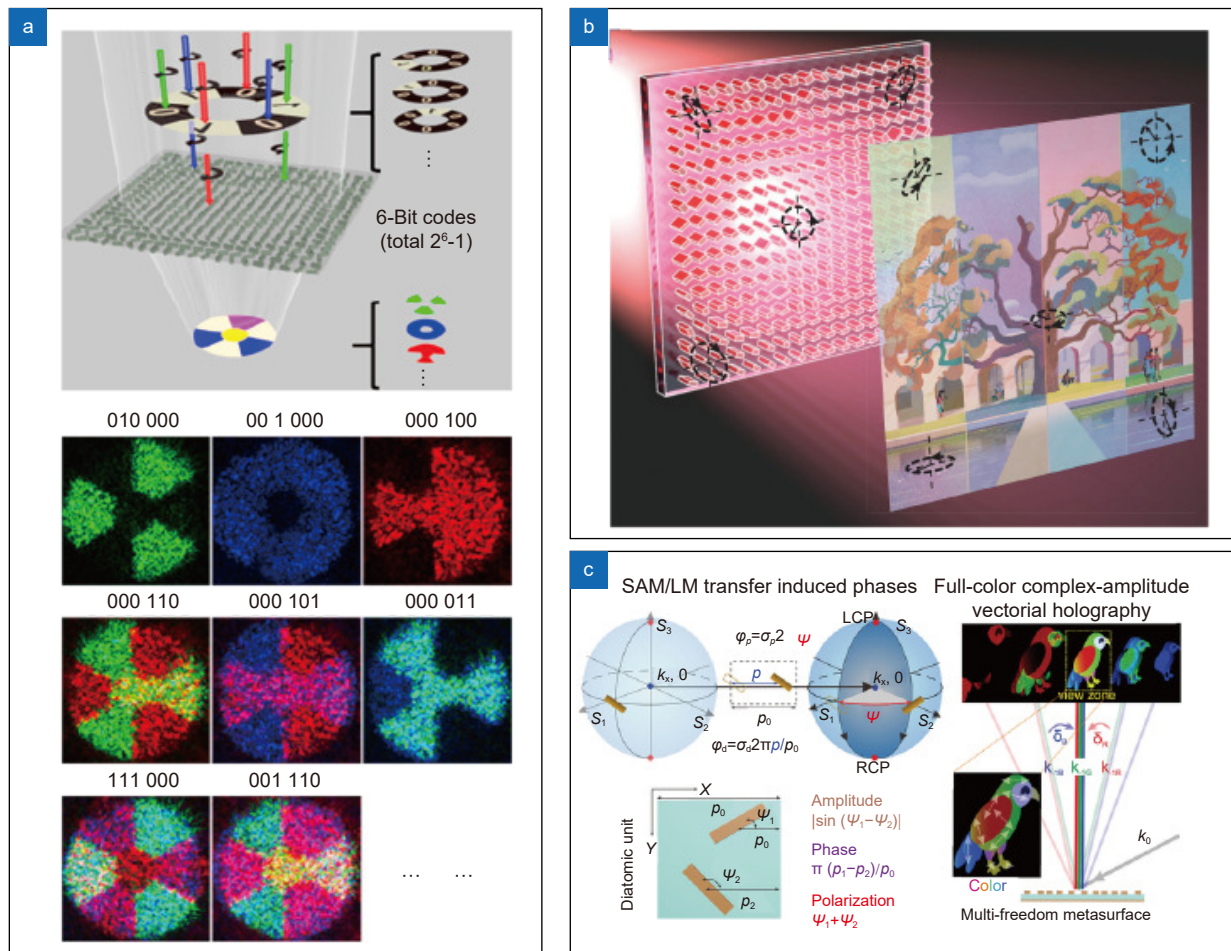


图 9 彩色矢量全息技术。(a) 基于新型的自旋波长编码的矢量全息技术^[95]; (b) 基于改进 Gerchberg-Saxton 算法的矢量全息技术^[96]; (c) 基于双原子等离子体单元结构的全彩色复振幅矢量全息技术^[44]

Fig. 9 Color vectorial holography. (a) Vectorial holography based on novel spin-wavelength encoding hypersurface^[95]; (b) Vectorial holography based on the improved Gerchberg-Saxton algorithm^[96]; (c) Full-color complex amplitude vectorial holography based on diatomic plasma cell structures^[44]

到光的偏振态中, 实现彩色偏振全息图像的生成。采用改进的 Gerchberg-Saxton 算法对介电超表面进行设计, 通过调节相位和振幅分布生成矢量全息图。这一过程使用已知波长和偏振的光束照射介电超表面时, 介电超表面对入射光的相位和偏振态进行了调控, 使得出射光的偏振态携带了彩色矢量全息图的数据。2020年, Deng 等^[44] 基于双原子结构提出了多自由超表面的全彩色复振幅矢量全息图的设计方案, 如图 9(c) 所示。该工作内容中的超表面元件是结合几何相位和迂回相位设计的, 这两者都是与频率无关的, 使得该方案能在宽频带范围内对光波的相位、振幅和偏振态进行调控。该研究工作对光波的两个维度的调制关系如下所示: 对振幅的调制通过 $|\sin(\psi_1 - \psi_2)|$, 对相位的调制通过 $\pi(p_1 + p_2)/p_0$, 对偏振的调制通过 $\psi_1 + \psi_2$, 其中 ψ_1, ψ_2 分别表示两个原子的取向角, p_0 表示双原子结构的周期, p_1, p_2 分别表示两个原子的位移。由于上述对三个维度的调制都是与频率无关的, 因此该设计方案可以适用于可见光波段的任意波长。由于该超表面的架构采用超构光栅, 因此通过应用光栅的色散效应可以将同一角度入射的不同波长的入射光衍射到不同的方向。基于此效应, 就可以将红、绿、蓝三原色的全息图适当地增加相位控制, 实现在特定空间区域下产生对应颜色的图像, 最终实现了全彩复振幅矢量全息图像的重建。

2021年, Kim 等^[97] 提出了一种结合结构彩色印刷和矢量全息的双功能超表面, 如图 10(a) 所示, 这种超表面具有八个偏振通道, 能够产生左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 并且通过随机排列每个原子, 可以消除不必要的光栅效应。该研究的关键在于双功能原子的设计, 这些原子不仅作为谐振器参与光波的传输过程, 同时还能充当局部偏振片, 对光波的偏振态进行调控。通过改变输出左旋圆偏振光和右旋圆偏振光之间的相位差和振幅, 可以实现任意偏振态的调控。在相位调制方面, 该方法采用了两种相位调控原理: 传播相位和几何相位。通过改变原子的几何形状和旋转角度, 可以精准调控共振偏振光和交叉偏振光的相位。这种设计使得超表面不仅能够实现相位和偏振的多路复用, 还能够实现颜色的多路复用。最后, 这种设计的超表面能产生具有两个自由度的偏振态, 并且能覆盖庞加莱球上的每个点。同年, Guo 等^[98] 实现了全偏振通道的全彩色全息图像投影以及偏振复用的全彩色全息术, 如图 10(b) 所示。该项工作采用了由

四个矩形纳米柱组成的四原子超表面, 每一个单元结构包含两种不同几何形状的纳米柱, 分别为元原子 A 和元原子 B, 在红色、绿色、蓝色线偏振光束的照射下, 会在空间中生成两幅自旋态相反、振幅和相位可以调控的全彩色图像, 并在第一衍射级次重叠构建了全彩色矢量全息图像。为了生成彩色全息图, 将目标图像分成了红色、绿色、蓝色三个分量, 重新缩放的图案与波长成反比。通过调节几何相位和振幅比可以对取向角和椭圆偏度进行调节, 从而能控制各点的偏振态。虽然所预设的目标图案经过不同波长的偏振光照射下会被分成红色、绿色、蓝色三个通道的分量, 但是由于几何相位调制具有与波长无关的特性, 使得每个单元结构的原子在红、绿、蓝波长会遇到恒定的相位差。因此, 通过不同颜色通道的偏振光的偏振态都会保持不变。这种特性对于实现全彩色全息图像的偏振复用非常重要, 因为这种结构对于不同颜色分量的偏振光都能以相同的方式进行处理, 从而不会改变他们的偏振信息, 保证了最终重建出来的具有任意偏振编码的彩色矢量全息图像具有一致性和稳定性, 可以应用于全息三维显示和光学加密等领域。2022年, Wan 等^[99] 采用单一的纳米结构对一组正交圆偏振光的共轭相位进行复用, 如图 10(c) 所示。该项研究工作能在超表面单元周期仍然为亚波长的情况下对红、绿、蓝三种不同波长的入射光进行独立的调控, 从而解决了之前不能利用亚波长元分子实现全彩色矢量全息图和重建图像独立空间偏振态控制的问题。通过直接控制重建图像的两圆偏振光之间的相位差, 可以在像素级的重建图像偏振态的任意调控。主要实现过程是使用三个不同尺寸的硅纳米柱, 分别独立操作红色、绿色、蓝色三个不同通道的颜色分量, 然后通过改进的 Gerchberg-Saxton 算法对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光在像素尺度上的相位差进行控制, 从而能够实现任意偏振态。此外, 该研究还通过选择入射偏振态和出射偏振态来调控重建图像的颜色和均匀对比度, 为通过改变偏振分布来决定局部颜色和强度提供了新的可能性。这种技术的应用, 不仅可以优化纳米柱的尺寸, 避免多个波长之间的串扰, 还可以通过控制不同波长之间的像素相位差, 实现同一点不同波长之间的偏振态独立调控。该项工作的意义在于, 它不仅提升了超表面在偏振调控方面的能力, 还为信息隐藏和加密提供了新的技术手段。这对于推动彩色全息显示等领域的发展具有重要的价值。2024年, Wang

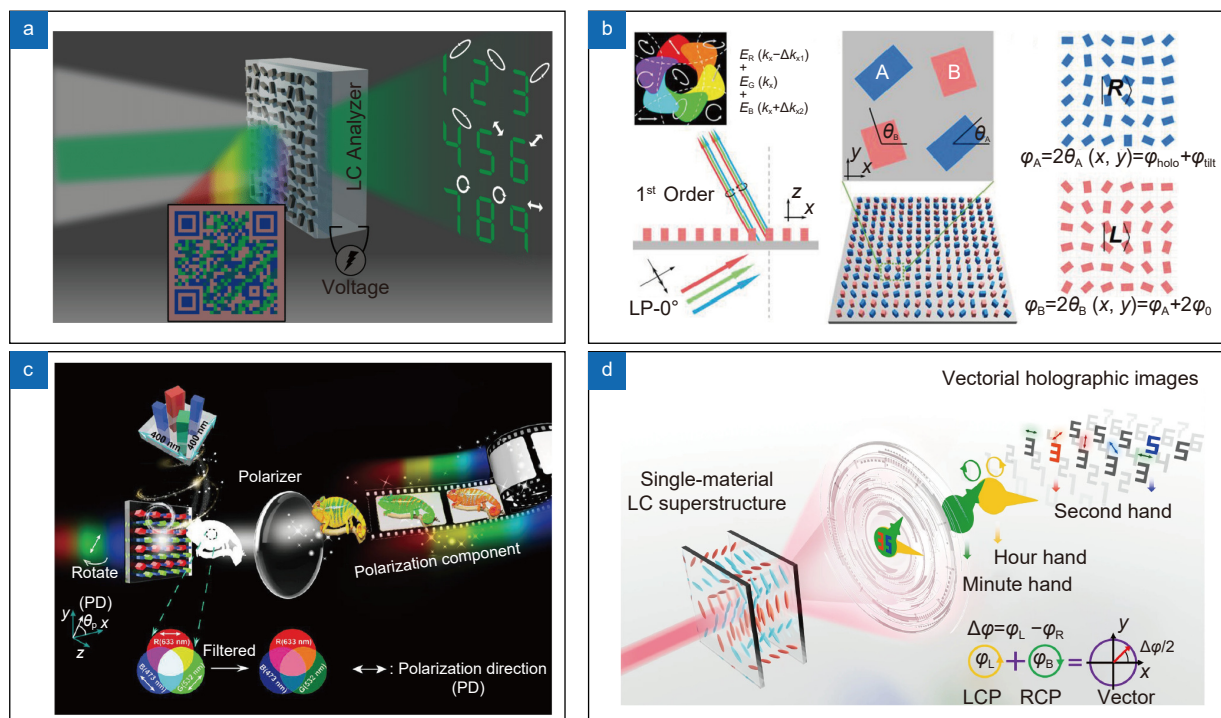


图 10 对出射光偏振态调控的矢量全息技术。(a) 基于双功能超表面的彩色矢量全息技术^[97]；(b) 全偏振通道的的全彩色矢量全息技术^[98]；(c) 基于正交圆偏振光的矢量全息技术^[99]；(d) 基于像素化液晶超结构的矢量全息技术^[100]

Fig. 10 Vectorial holography for polarization state modulation of output light. (a) Vectorial holography based on a novel spin-wavelength-encoded multi-tasking hypersurface^[97]; (b) Full-color vectorial holography with fully polarized channels^[98]; (c) Vectorial holography based on orthogonal circularly polarized light^[99]; (d) Vectorial holography based on pixelated liquid crystal superstructures^[100]

等^[100]提出了像素化液晶超结构的矢量全息术。如图 10(d) 所示, 该项工作对液晶材料体系进行了改进, 液晶上层结构是由对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光分别响应的相位全息图空间复用而成, 并呈棋盘状分布。这项研究工作提出一种改进的双循环 Gerchberg-Saxton 算法, 该算法基于左旋圆偏振光和右旋圆偏振光叠加原理, 对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光分别独立地设置两个目标图像, 并且这两个目标图像具有特定的振幅和相位分布, 其中相位差是通过两个单独的图像进行迭代循环来优化左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的液晶全息图得到的, 通过这个步骤对二者之间建立相位联系。最后能得到两个优化后的相位全息图, 并且实现了对全息图任意位置处的振幅和偏振的调控。在此基础上, 通过实验进一步展示了液晶矢量全息“钟”和液晶矢量全息“月相”的衍射图。该项研究工作仅通过单层液晶结构, 成功地实现了对空间任意光偏振和振幅的编码和控制, 为光学加密、光通信、光学存储等其他矢量光学应用提供了新的途径。

上述提到的矢量全息技术主要是针对二维情况, 在探索三维矢量全息技术方面, Ren 等^[101]提出了一

种新的三维矢量全息技术方法, 从而弥补了这一领域的空缺。如图 11 所示, 该项工作主要是基于多层感知器人工神经网络的机器学习逆向设计精确地重建了波前的任意三维矢量场分布, 通过这样的方式可以精确地控制三维矢量全息中每个像素点的任意三维偏振态。这项技术为光学全息开辟了一个全新的应用领域, 可以实现在无透镜的情况下超大视场角和高衍射效率三维矢量全息图像的重建。这项技术也首次证明了光的三维矢量状态可以作为独立的信息载体, 实现信息的编码和复用, 为深入理解光与物质的相互作用提供了一个全新平台, 具有广泛的应用前景和基础科学研究意义。

5 结论

5.1 矢量全息技术面临的挑战

上面两章介绍了矢量全息技术对于出射光以及入射光偏振态的调控, 显示了矢量全息技术强大的信息调控能力。矢量全息技术还能进一步与其他光场维度结合, 例如: 轨道、波长、空间、时间等。轨道角动量^[102-111]理论上有无数的正交通道, 与轨道角动量复

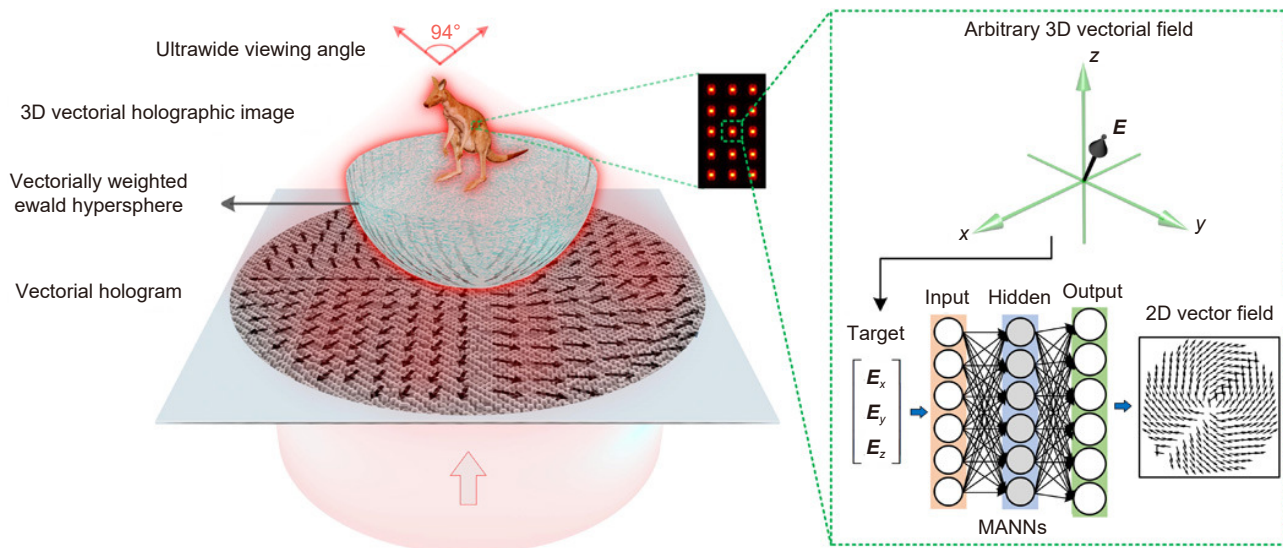


图 11 三维矢量全息技术。基于多层感知器人工神经网络的机器学习逆向设计的矢量全息技术^[101]

Fig. 11 Three-dimensional vectorial holography. Vectorial holography for machine learning inverse design based on multilayer perceptron artificial neural networks^[101]

用结合, 可以进一步增加带宽, 实现大容量加密等。波长通道具有丰富的颜色信息, 与波长^[112-117]复用结合可以实现全彩色显示等。虽然矢量全息技术有诸多优点, 但同时也面临着一些挑战: 1) 在软件方面, 矢量全息技术高速处理数据同时实现高质量图像重建, 计算复杂度高。2) 在硬件方面, 矢量全息技术存在成本高、制造过程耗时长以及缺乏适用于单元结构的有效动态控制方法的问题。为此, 可以与深度学习技术结合进一步改进矢量全息的相关算法, 提高相关数据的处理速度; 同时也需要研究新的材料作为矢量全息的调制器件, 实现更强大调控能力的同时减少制作成本。

5.2 矢量全息技术的应用领域

矢量全息技术可调控的信息不仅限于振幅和相位信息, 还包含偏振信息, 相比于标量全息技术, 矢量全息技术多了一个调控维度, 因此极大地推动了通信、显示、加密、衍射神经网络^[117]等领域的发展。在通信方面, 由于偏振维度的引入可以实现偏振多路复用, 进而实现多信道数据传输, 提高通信系统传输的容量和速度; 在显示方面, 可以通过顺序加载时变电场来对偏振通道进行变化, 由于不同的偏振通道对应不同的图像, 因此通过对偏振通道的切换, 可以实现动态显示。在信息加密方面, 可以将不同的原始图像加密到不同的偏振通道中, 通过选择不同的输入和输出偏振态, 实现不同图像的解密, 提高图像加密的安全性

和灵活性。在衍射光计算方面, 由于偏振维度的引入, 有望通过偏振态的复用实现多任务衍射神经网络的构建。总的来说, 矢量全息技术具有广泛的应用前景, 在各个领域都可能带来重要的发展和进步, 为现代科学的发展做出贡献。

5.3 总结与展望

本文简述了矢量全息技术在偏振调控方面的发展^[118]。相较于标量全息技术, 矢量全息技术多了一个调控维度, 可实现标量全息技术所不能实现的功能。对于调控的方式, 矢量全息技术通过对结构单元^[119-131]的排列方式、原子尺寸、转角进行设计, 实现对出射光和入射光偏振态的调控。不同的设计方案具有不同的调控优势和劣势, 但最终的目的都是对空间中的光场的矢量状态进行调控。尽管矢量全息技术还面临着一些问题, 例如算力、成本、制造、图像质量等, 但矢量全息技术的出现已经为通信、显示、加密、衍射神经网络等领域提供了灵活、高效、简便的新平台。

参考文献

- [1] Fang X Y, Ren H R, Gu M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. *Nat Photonics*, 2020, 14(2): 102-108.
- [2] Shi L, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks[J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 234-239.
- [3] Chang C L, Bang K, Wetzstein G, et al. Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye

- displays from a human-centric perspective[J]. *Optica*, 2020, **7**(11): 1563–1578.
- [4] Blanche P A. Holography, and the future of 3D display[J]. *Light Adv Manuf*, 2021, **2**(4): 446–459.
- [5] Pi D P, Liu J, Wang Y T. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 231.
- [6] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777–778.
- [7] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. *J Opt Soc Am*, 1962, **52**(10): 1123–1130.
- [8] Leith EN, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with continuous-tone objects[J]. *J Opt Soc Am*, 1963, **53**(12): 1377–1381.
- [9] Leith E N, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects[J]. *J Opt Soc Am*, 1964, **54**(11): 1295–1301.
- [10] Lohmann A W, Paris D P. Binary fraunhofer holograms, generated by computer[J]. *Appl Opt*, 1967, **6**(10): 1739–1748.
- [11] Lesem L B, Hirsch P M, Jordan J A. The kinoform: a new wavefront reconstruction device[J]. *IBM J Res Dev*, 1969, **13**(2): 150–155.
- [12] Lee W H. Binary computer-generated holograms[J]. *Appl Opt*, 1979, **18**(21): 3661–3669.
- [13] Pi D P, Liu J, Kang R F, et al. Reducing the memory usage of computer-generated hologram calculation using accurate high-compressed look-up-table method in color 3D holographic display[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(20): 28410–28422.
- [14] Wang Z, Lv G Q, Feng Q B, et al. Resolution priority holographic stereogram based on integral imaging with enhanced depth range[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(3): 2689–2702.
- [15] Wang Z, Zhu L M, Zhang X, et al. Computer-generated photorealistic hologram using ray-wavefront conversion based on the additive compressive light field approach[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(3): 615–618.
- [16] Chang C L, Cui W, Gao L. Holographic multipane near-eye display based on amplitude-only wavefront modulation[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(21): 30960–30970.
- [17] Sui X M, He Z H, Jin G F, et al. Band-limited double-phase method for enhancing image sharpness in complex modulated computer-generated holograms[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(2): 2597–2612.
- [18] Slinger C, Cameron C, Stanley M. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. *Computer*, 2005, **38**(8): 46–53.
- [19] Kelly D P, Monaghan D S, Pandey N, et al. Digital holographic capture and optoelectronic reconstruction for 3D displays[J]. *Int J Digit Multimed Broadcast*, 2010, **2010**: 759323.
- [20] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. *Adv Opt Photonics*, 2013, **5**(4): 456–535.
- [21] Chen L Z, Zhu R Z, Zhang H. Speckle-free compact holographic near-eye display using camera-in-the-loop optimization with phase constraint[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(26): 46649–46665.
- [22] Liu K X, Wu J C, He Z H, et al. 4K-DMDNet: diffraction model-driven network for 4K computer-generated holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(5): 220135.
- [23] Sui X M, He Z H, Cao L C, et al. Wave-front encoding method of computer-generated holography based on liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Chin J Liq Cryst Dis*, 2022, **37**(5): 613–624.
- 隋晓萌, 何泽浩, 曹良才, 等. 基于液晶空间光调制器的计算全息波前编码方法[J]. *液晶与显示*, 2022, **37**(5): 613–624.
- [24] Liu J, Pi D P, Wang Y T. Research progress of real-time holographic 3D display technology[J]. *Acta Opt Sin*, 2023, **43**(15): 1509001.
- 刘娟, 皮大善, 王涌天. 实时全息三维显示技术研究进展[J]. *光学学报*, 2023, **43**(15): 1509001.
- [25] Pi D P, Wang J, Liu J, et al. Color dynamic holographic display based on complex amplitude modulation with bandwidth constraint strategy[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(17): 4379–4382.
- [26] Sun K, Tan D Z, Fang X Y, et al. Three-dimensional direct lithography of stable perovskite nanocrystals in glass[J]. *Science*, 2022, **375**(6578): 307–310.
- [27] Pi D P, Liu J, Wang J, et al. Optimized computer-generated hologram for enhancing depth cue based on complex amplitude modulation[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(24): 6377–6380.
- [28] Pi D P, Liu J, Han Y, et al. Acceleration of computer-generated hologram using wavefront-recording plane and look-up table in three-dimensional holographic display[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(7): 9833–9841.
- [29] Peng Y, Nagase T, Kanamoto T, et al. A virtual optical holographic encryption system using expanded diffie-hellman algorithm[J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 22071–22077.
- [30] Li J Y, Chen L, Cai W Y, et al. Holographic encryption algorithm based on bit-plane decomposition and hyperchaotic Lorenz system[J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **152**: 108127.
- [31] Hamadi I A, Jamal R K, Mousa S K. Image encryption based on computer generated hologram and rossler chaotic system[J]. *Opt Quant Electron*, 2022, **54**(1): 33.
- [32] Dong Y B, Luan H T, Lin D J, et al. Laser-induced graphene hologram reconfiguration for countersurveillance multisecret sharing[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(8): 2200805.
- [33] Li K Y, Wang Y M, Pi D P, et al. Multi-dimensional multiplexing optical secret sharing framework with cascaded liquid crystal holograms[J]. *Opto-Electron Adv*, 2024, **7**(1): 230121.
- [34] Song M H, Wang H J, Wu J B, et al. A robust watermarking hybrid algorithm for color image[J]. *MATEC Web Conf*, 2021, **336**: 07012.
- [35] Cheremkhin P A, Evtikhiev N N, Krasnov V V, et al. Iterative synthesis of binary inline fresnel holograms for high-quality reconstruction in divergent beams with DMD[J]. *Opt Lasers Eng*, 2022, **150**: 106859.
- [36] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2808.
- [37] Wen D D, Cadusch J J, Meng J J, et al. Light field on a chip: metasurface-based multicolor holograms[J]. *Adv Photonics*, 2021, **3**(2): 024001.
- [38] Kim J, Seong J, Yang Y, et al. Tunable metasurfaces towards versatile metalenses and metaholograms: a review[J]. *Adv Photonics*, 2022, **4**(2): 024001.
- [39] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(4): 308–312.
- [40] Ding X M, Wang Z C, Hu G W, et al. Metasurface holographic image projection based on mathematical properties of fourier transform[J]. *Photonix*, 2020, **1**(1): 16.
- [41] 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.
- [42] Li G X, Zhang S, Zentgraf T. Nonlinear photonic

- metasurfaces[J]. *Nat Rev Mater*, 2017, 2(5): 17010.
- [43] Chen S Q, Liu W W, Li Z C, et al. Metasurface - empowered optical multiplexing and multifunction[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(3): 1805912.
- [44] Deng Z L, Jin M K, Ye X, et al. Full-color complex-amplitude vectorial holograms based on multi-freedom metasurfaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(21): 1910610.
- [45] Nemati A, Wang Q, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electron Adv*, 2018, 1(5): 180009.
- [46] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nat Mater*, 2014, 13(2): 139–150.
- [47] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2012, 12(9): 4932–4936.
- [48] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [49] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298–302.
- [50] 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 Propag Mag*, 2012, 54(2): 10–35.
- [51] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nat Commun*, 2013, 4(1): 2807.
- [52] 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.
- [53] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190–1194.
- [54] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2013, 13(2): 829–834.
- [55] Wu P C, Tsai W Y, Chen W T, et al. Versatile polarization generation with an aluminum plasmonic metasurface[J]. *Nano Lett*, 2017, 17(1): 445–452.
- [56] 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 Sci Appl*, 2021, 10(1): 24.
- [57] Fan Q B, Liu M Z, Zhang C, et al. Independent amplitude control of arbitrary orthogonal states of polarization via dielectric metasurfaces[J]. *Phys Rev Lett*, 2020, 125(26): 267402.
- [58] Cao L C, He Z H, Liu K X, et al. Progress and challenges in dynamic holographic 3D display for the metaverse (Invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2022, 51(1): 20210935.
- [59] Zheng S J, Lin X, Huang Z Y, et al. Light field regulation based on polarization holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(11): 220114.
郑淑君, 林泉, 黄志云, 等. 基于偏光全息的光场调控研究进展[J]. *光电工程*, 2022, 49(11): 220114.
- [60] Hu M X, Wang Z Q, Li X P, et al. Metasurface polarization information encoding[J]. *Chin J Lasers*, 2023, 50(18): 1813010.
胡孟霞, 王志强, 李向平, 等. 超表面偏振信息编码[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813010.
- [61] Born M, Wolf E, Hecht E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[J]. *Phys Today*, 2000, 53(10): 77–78.
- [62] Dorrah A H, Rubin N A, Zaidi A, et al. Metasurface optics for on-demand polarization transformations along the optical path[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(4): 287–296.
- [63] Zhao R Z, Xiao X F, Geng G Z, et al. Polarization and holography recording in real- and *k*-space based on dielectric metasurface[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(27): 2100406.
- [64] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304–1307.
- [65] Gao Y J, Xiong X, Wang Z H, et al. Simultaneous generation of arbitrary assembly of polarization states with geometrical-scaling-induced phase modulation[J]. *Phys Rev X*, 2020, 10(3): 031035.
- [66] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Full-stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3132–3140.
- [67] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin RC, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 118(11): 113901.
- [68] Wen D D, Yue F Y, Li G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2015, 6(1): 8241.
- [69] Goldstein D H. *Polarized Light*[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
<https://doi.org/10.1201/b10436>.
- [70] Kumar A, Ghatak A. *Polarization of Light with Applications in Optical Fibers*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2011.
- [71] Chipman R A, Lam W S T, Young G. *Polarized Light and Optical Systems*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
<https://doi.org/10.1201/9781351129121>.
- [72] Azzam R M A, Bashara N M, Ballard S S. Ellipsometry and polarized light[J]. *Phys Today*, 1978, 31(11): 72–72.
- [73] Ozaki M, Kato J I, Kawata S. Surface-plasmon holography with white-light illumination[J]. *Science*, 2011, 332(6026): 218–220.
- [74] Montelongo Y, Tenorio-Pearl J O, Williams C, et al. Plasmonic nanoparticle scattering for color holograms[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(35): 12679–12683.
- [75] Walther B, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Spatial and spectral light shaping with metamaterials[J]. *Adv Mater*, 2012, 24(47): 6300–6304.
- [76] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. *Nano Lett*, 2015, 15(5): 3122–3127.
- [77] Wan W W, Gao J, Yang X D. Full-color plasmonic metasurface holograms[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 10671–10680.
- [78] Masters B R. Fundamentals of photonics, second edition[J]. *J Biomed Opt*, 2008, 13(4): 049901.
- [79] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 95.
- [80] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237–246.
- [81] Hu Y Q, Li L, Wang Y J, et al. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. *Nano Lett*, 2020, 20(2): 994–1002.
- [82] Bao Y J, Wen L, Chen Q, et al. Toward the capacity limit of 2D planar Jones matrix with a single-layer metasurface[J]. *Sci Adv*, 2021, 7(25): eabh0365.
- [83] Zhang S F, Huang L L, Geng G Z, et al. Full-stokes

- polarization transformations and time sequence metasurface holographic display[J]. *Photonics Res*, 2022, **10**(4): 1031–1038.
- [84] Bao Y J, Nan F, Yan J H, et al. Observation of full-parameter Jones matrix in bilayer metasurface[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 7550.
- [85] Zhang F, Pu M B, Luo J, et al. Symmetry breaking of photonic spin-orbit interactions in metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 319–325.
- [86] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(5): 2885–2892.
- [87] Ding F, Chang B D, Wei Q S, et al. Versatile polarization generation and manipulation using dielectric metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2020, **14**(11): 2000116.
- [88] Rubin N A, Zaidi A, Dorrah A H, et al. Jones matrix holography with metasurfaces[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(33): eabg7488.
- [89] Song Q H, Baroni A, Sawant R, et al. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 2651.
- [90] Song Q, Khadir S, Vézian S, et al. Bandwidth-unlimited polarization-maintaining metasurfaces[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(5): eabe1112.
- [91] Wen D D, Cadusch J J, Meng J J, et al. Vectorial holograms with spatially continuous polarization distributions[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(4): 1735–1741.
- [92] Song Q H, Baroni A, Wu P C, et al. Broadband decoupling of intensity and polarization with vectorial Fourier metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 3631.
- [93] Wan W P, Yang W H, Feng H, et al. Multiplexing vectorial holographic images with arbitrary metaholograms[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(20): 2100626.
- [94] Mao N B, Zhang G Q, Tang Y T, et al. Nonlinear vectorial holography with quad-atom metasurfaces[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, **119**(22): e2204418119.
- [95] Jin L, Dong Z G, Mei S T, et al. Noninterleaved metasurface for (2^6-1) spin- and wavelength-encoded holograms[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(12): 8016–8024.
- [96] 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.
- [97] Kim I, Jang J, Kim G, et al. Pixelated bifunctional metasurface-driven dynamic vectorial holographic color prints for photonic security platform[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 3614.
- [98] Guo X Y, Zhong J Z, Li B J, et al. Full-color holographic display and encryption with full-polarization degree of freedom[J]. *Adv Mater*, 2022, **34**(3): 2103192.
- [99] Wan W P, Yang W H, Ye S, et al. Tunable full-color vectorial meta-holography[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(22): 2201478.
- [100] Wang Z Y, Zhou Z, Zhang H, et al. Vectorial liquid-crystal holography[J]. *eLight*, 2024, **4**(1): 5.
- [101] Ren H R, Shao W, Li Y, et al. Three-dimensional vectorial holography based on machine learning inverse design[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(16): eaaz4261.
- [102] Fang X Y, Hu X N, Li B L, et al. Orbital angular momentum-mediated machine learning for high-accuracy mode-feature encoding[J]. *Light Sci Appl*, 2024, **13**(1): 49.
- [103] Ni J C, Huang C, Zhou L M, et al. Multidimensional phase singularities in nanophotonics[J]. *Science*, 2021, **374**(6566): eabj0039.
- [104] Ahmed S, Jiang X T, Wang C, et al. An insightful picture of nonlinear photonics in 2D materials and their applications: recent advances and future prospects[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(11): 2001671.
- [105] Fang X Y, Ren H R, Li K Y, et al. Nanophotonic manipulation of optical angular momentum for high-dimensional information optics[J]. *Adv Opt Photonics*, 2021, **13**(4): 772–833.
- [106] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, **15**(11): 948–955.
- [107] Meng W J, Hua Y H, Cheng K, et al. 100 Hertz frame-rate switching three-dimensional orbital angular momentum multiplexing holography via cross convolution[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(9): 220004.
- [108] Guo Y H, Pu M B, Zhao Z Y, et al. Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(11): 2022–2029.
- [109] 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.
- [110] Liu Y C, Xu K, Fan X H, et al. Dynamic interactive bitwise meta-holography with ultra-high computational and display frame rates[J]. *Opto-Electron Adv*, 2024, **7**(1): 230108.
- [111] 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]. *Adv Funct Mater*, 2017, **27**(47): 1704295.
- [112] Li X P, Ren H R, Chen X, et al. Athermally photoreduced graphene oxides for three-dimensional holographic images[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 6984.
- [113] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Sci Adv*, 2016, **2**(11): e1601102.
- [114] Lim K T P, Liu H L, Liu Y J, et al. Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 25.
- [115] Feldmann J, Youngblood N, Wright C D, et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities[J]. *Nature*, 2019, **569**(7755): 208–214.
- [116] Li X, Chen Q M, Zhang X, et al. Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(8): 220060.
- [117] Zhu S K, Zheng Z H, Meng W J, et al. Harnessing disordered photonics via multi-task learning towards intelligent four-dimensional light field sensors[J]. *Photonix*, 2023, **4**(1): 26.
- [118] Wang J Y, Tan X D, Qi P L, et al. Linear polarization holography[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(2): 210009.
- [119] Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff[J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, **16**(5): 1143–1156.
- [120] 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.
- [121] Lalanne P, Chavel P. Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, **11**(3): 1600295.
- [122] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Rep Prog Phys*, 2016, **79**(7): 076401.
- [123] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 227–232.
- [124] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant

- Pancharatnam–berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(13): 1141–1143.
- [125] Yan L B, Zhu W M, Karim M F, et al. 0.2 λ_0 Thick adaptive retroreflector made of spin - locked metasurface[J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(39): 1802721.
- [126] Song Q H, Wu P C, Zhu W M, et al. Split archimedean spiral metasurface for controllable GHz asymmetric transmission[J]. *Appl Phys Lett*, 2019, **114**(15): 151105.
- [127] Lassaline N, Brechbühler R, Vonk S J W, et al. Optical fourier surfaces[J]. *Nature*, 2020, **582**(7813): 506–510.
- [128] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 2986.
- [129] Yin X B, Ye Z L, Rho J, et al. Photonic spin hall effect at metasurfaces[J]. *Science*, 2013, **339**(6126): 1405–1407.
- [130] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, **358**(6365): 896–901.
- [131] Zhao H, Wang X K, Liu S T, et al. Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(2): 220012.

作者简介



叶依琦 (2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事计算全息、矢量全息方面的研究。

E-mail: 232200411@st.usst.edu.cn



【通信作者】皮大普 (1995-), 男, 博士, 主要从事计算全息、全息显示方面的研究。曾获中国光学学会“王大珩光学奖”, 入选上海市“超级博士后”激励计划。

E-mail: pidapu@126.com



顾敏 (1960-), 男, 上海理工大学校务委员会执行主席、光子芯片研究院院长、教授。中国工程院外籍院士、澳大利亚科学院院士和澳大利亚技术科学与工程院院士。国际电气与电子工程师学会 (IEEE) 会士、国际光学工程学会 (SPIE) 会士、美国光学学会 (Optica, formerly OSA) 会士、英国物理学会 (IOP) 会士、澳大利亚物理学会 (AIP) 会士、中国光学学会 (COS) 会士等。曾获澳大利亚光学学会 Beattie Steel 奖、澳大利亚科学院 Ian Wark 奖、澳大利亚物理学会 Boas 奖、维多利亚科学创新奖、国际光学及光子学学会 Dennis Gabor 奖、美国光学学会 Emmett Norman Leith 奖章和上海市“白玉兰纪念奖”等。

E-mail: gumin@usst.edu.cn



【通信作者】方心远 (1992-), 男, 上海理工大学研究员, 博士生导师, 光子芯片研究院助理院长。主要研究方向包括多维光场调控, 光学神经网络、全息等。入选上海市曙光学者计划, 上海市东方英才 (青年项目), 中国科协青年托举人才计划, 上海市青年科技启明星。获上海科技青年 35 人引领计划奖、中国光学学会科技创新奖郭光灿光学奖一等奖、中国仪器仪表学会“金国藩青年学子奖”、Journal of Optics Emerging Leader 2023、上海市青年五四奖章。

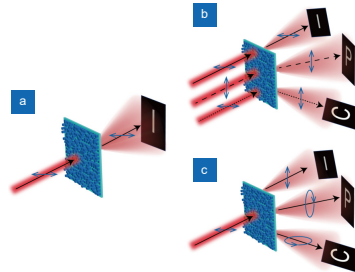
E-mail: xinyuan.fang@usst.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress and applications of vectorial holography

Ye Yiqi^{1,2}, Pi Dapu^{1,2*}, Gu Min^{1,2}, Fang Xinyuan^{1,2*}



Schematic showing the organization of topics in this review. (a) Scalar holography; (b) Vectorial holography - modulation of the polarization state of the incident light; (c) Vectorial holography - modulation of the polarization state of the output light

Overview: Holography can record and reconstruct the full information of object light waves based on the principle of interference and diffraction. Due to its outstanding ability, holography is widely used in the fields of display, imaging, communication, encryption, etc. However, scalar holography only records the amplitude and phase information and has certain limitations in polarization information. The emergence of vectorial holography provides the possibility of modulating polarization information. Different from scalar holography, vectorial holography technology can record not only amplitude and phase information but also polarization information, which improves the freedom of modulation and the density of the recorded. Hence, vectorial holography holds promising applications in high-definition display, high-quality imaging, high-security encryption and high-speed communication. According to the development history of holography technology, this paper introduces the principles of scalar holography, and vectorial holography and highlights the advantages of vectorial holography in the aspect of polarization modulation. At the same time, the principles and designs of two different polarization control methods of vectorial holography are described, including the polarization control of incident light and output light, which provide important guidance and theoretical support for researchers. For the polarization control of reconstructed light waves, a 2×2 Jones matrix is widely used to express the relationship between the polarization state of the incident light wave and the outgoing light wave. In practice, the parameters of the hologram are deliberately designed to match the unique relationships between the polarization state of the incident light wave and the outgoing light wave for different reconstructed images. In this way, different reconstructed images can be switched by selecting the desired polarization with negligible polarization crosstalk. For the polarization control of output light, the incident light wave is decomposed into a couple of orthogonal polarized light, such as left circular polarization and right circular polarization, x-polarized light and y-polarized light, etc. By intentionally controlling the phase and amplitude of the two orthogonal polarized lights, an arbitrary state of polarization that covers the entire Poincare sphere can be generated. In addition, the advantages of vectorial holography in the field of display and encryption are demonstrated. Compared with scalar holography, vectorial holography has the advantages of being able to improve the quality of holographic images, better flexibility, and applicability, and solves some of the problems that scalar holography is currently facing. Finally, the problems and possible solutions in the development of vectorial holography technology and the future development trend are also discussed.

Ye Y Q, Pi D P, Gu M, et al. Research progress and applications of vectorial holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240082; DOI: [10.12086/oe.2024.240082](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240082)

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (62005164), the Shuguang Program of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (23SG41), the Young Elite Scientist Sponsorship Program by Cast (20220042), the Shanghai Natural Science Foundation (23ZR1443700), the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (21DZ1100500), and the Shanghai Municipal Science and Technology Major Project, the Shanghai Frontiers Science Center Program (2021–2025 No. 20).

¹School of Artificial Intelligence Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ²Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

* E-mail: pidapu@126.com; xinyuan.fang@usst.edu.cn