

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

超表面偏振器件研究进展与展望

王皓萱, 何彦霖, 祝航威, 董杭, 王书凝

引用本文:

王皓萱, 何彦霖, 祝航威, 等. 超表面偏振器件研究进展与展望[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 240095.

Wang H X, He Y L, Zhu H W, et al. Research progress and prospects of metasurface polarization devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240095.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240095>

收稿日期: 2024-04-26; 修改日期: 2024-07-05; 录用日期: 2024-07-08

相关论文

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)

拓扑优化超表面的偏振复用光学微分运算

冯睿, 田耀恺, 刘亚龙, 孙芳魁, 曹永印, 丁卫强

光电工程 2023, 50(9): 230172 doi: [10.12086/oe.2023.230172](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230172)

动态可调谐超表面的研究进展与应用

王家伟, 李珂, 成茗, 陈磊, 孔德来, 刘言军

光电工程 2023, 50(8): 230141 doi: [10.12086/oe.2023.230141](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230141)

Linear polarization holography

Jinyu Wang, Xiaodi Tan, Peiliang Qi, Chenhao Wu, Lu Huang, Xianmiao Xu, Zhiyun Huang, Lili Zhu, Yuanying Zhang, Xiao Lin, Jinliang Zang, Kazuo Kuroda

Opto-Electronic Science 2022, 1(2): 210009 doi: [10.29026/oes.2022.210009](https://doi.org/10.29026/oes.2022.210009)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



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



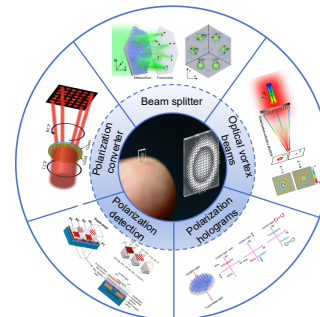
OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240095

超表面偏振器件研究进展与展望

王皓萱^{1,2}, 何彦霖^{1,2*}, 祝航威^{1,2,3}, 董杭^{1,2}, 王书凝^{1,2}¹北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;²广州南沙光子感知技术研究院, 广东 广州 511462;³大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116028

摘要: 偏振作为光的基本特性之一, 其产生、调控和探测被广泛应用于通信、成像、光学加密等领域。然而传统的偏振器件存在体积大、集成度低等问题。亚波长尺度的超表面由于其独特的光场调控机制, 为偏振器件的小型化和低成本提供了创新性的解决方案。本文对近年来基于超表面的偏振器件研究进展及超表面制备工艺进行综述。从超表面相位调控机理入手, 简单介绍了传输相位、几何相位、广义几何相位和共振相位的调控方法, 重点总结了偏振转换、偏振分束、矢量涡旋光发生器、高阶庞加莱球光学加密、偏振多通道全息、偏振探测等不同超表面偏振器件及其制备工艺, 最后展望了该领域可能的发展趋势和应用前景。

关键词: 偏振器件; 超表面; 偏振探测; 多功能复用; 相位调控

中图分类号: O441.4; O436.3

文献标志码: A

王皓萱, 何彦霖, 祝航威, 等. 超表面偏振器件研究进展与展望[J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240095

Wang H X, He Y L, Zhu H W, et al. Research progress and prospects of metasurface polarization devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240095

Research progress and prospects of metasurface polarization devices

Wang Haoxuan^{1,2}, He Yanlin^{1,2*}, Zhu Hangwei^{1,2,3}, Dong Hang^{1,2}, Wang Shuning^{1,2}¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;²Guangzhou Nansha Intelligent Photonics Sensing Research Institute, Guangzhou, Guangdong 511462, China;³School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China

Abstract: Polarization, as one of the basic characteristics of light, is widely utilized in communication, imaging, optical encryption, and other fields. However, traditional polarization devices face numerous problems such as large size and low integration. Due to their unique light field manipulation mechanisms, subwavelength-scale metasurfaces offer innovative solutions for miniaturization and cost reduction of polarization devices. This paper reviews recent advances in metasurface-based polarization devices and fabrication techniques. Starting from the phase manipulation mechanisms of metasurfaces, the article briefly introduces methods for controlling the transmission phase, geometric phase, generalized geometric phase, and resonance phase. The focus is summarizing various

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-07-05; 录用日期: 2024-07-08

基金项目: 国家重点研发计划(2020VFA0711200)

*通信作者: 何彦霖, heyalin@bistu.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

metasurface polarization devices and their fabrication, including polarization conversion, polarization beam splitting, vector vortex beam generators, high-order Poincaré sphere optical encryption, polarization multi-channel holography, and polarization detection. Finally, we discuss potential development trends and application prospects in this field.

Keywords: polarization device; metasurface; polarization detection; multifunction; phase regulation

1 引言

光波是一种电磁波, 其相位、振幅、频率和偏振等参数都能反映光的本质特征。其中, 偏振信息可以反映电场矢量在空间中传播时候的振动方向。在光波与目标物体发生相互作用后, 反射光的偏振特性会发生改变, 通过对物体反射光的偏振信息的探测, 可以获得物体的材料、形状、表面粗糙程度等多维信息。与传统光学成像技术依赖光的强度信息实现目标探测和识别相比, 偏振探测技术能够突破传统探测器的限制。它更容易抑制背景干扰, 凸显目标特征, 具有较强的穿透能力, 从而显著提高探测的准确性。基于偏振探测的种种优势, 其已被证明在地物探测^[1-2]、水下探测^[3-4]、医疗诊断^[5-6]、环境监测^[7-8]和通信^[9]等方面有广泛的应用。

偏振器是光学信息处理、光学测量、光通信等系统中重要的光学器件, 由于人类的视觉系统并不能识别偏振信息, 只有利用偏振器件才能对其进行了解。这些器件基于光的偏振特性, 对其信息进行展现^[10]。传统的偏振器件主要利用天然晶体的双折射效应^[11-12], 或者可在布儒斯特角附近分离偏振光的多层介质薄膜^[13]。天然双折射晶体固有的小分开角度决定了晶体偏振器需要很大厚度才足以分开两个偏振态, 由此造成晶体偏振器体积较大, 无法实现小型化和集成化; 多层膜结构作为其替代品利用自身较天然晶体几倍大的双折射特性, 虽然在很大程度上减小了厚度, 但是制作这种多层结构需要堆积的薄膜层数很多, 制作过程相对复杂, 而且这种多层膜结构的偏振选择性只在一个较小的波长范围内和角度范围内才具有大的消光比^[14-15], 因此这两种偏振器的应用都受到了很大的限制^[16]。

考虑器件搭载等方面对器件质量、体积的要求, 在满足光场质量的前提下, 减小偏振器件体积是目前研究的主要方向。超表面材料由于其独特的光场调制机制, 具有轻、薄、简、可应用波长范围广等优势, 成为偏振器微型化、轻量化的解决方案之一。超表面是指厚度小于波长的人工超材料, 由亚波长平面周期

结构组成的阵列^[17-19], 可以实现对光的调控, 一般由简单的微小元胞阵列构成, 采用各向异性的单元结构(如矩形、椭圆形等), 超表面器件会因此呈现偏振相关的特性^[20-22], 如偏振转换、偏振复用甚至复杂的矢量光束生成, 实现偏振器的功能。在此基础上, 结合光相位和振幅的调节, 可以实现更复杂的功能^[23]。

偏振器件承载了偏振探测系统获取目标区域偏振特性的主要功能, 其消光比、工作带宽和透过率等性能指标决定了偏振探测系统的工作范围及探测精度等光学性能^[24]。缩小偏振器件的尺寸, 与成像传感器集成, 实现偏振探测系统小型化、集成化, 提高偏振探测性能, 需要权衡各类光学性能指标参数以满足市场应用需求。因此, 在基于超表面的微纳偏振器件发展的道路上依然面临着诸多挑战, 这已成为当前国内外研究者迫切需要解决的问题。

近年来, 超表面领域的综述丰富且多样, 主要集中在以下几个方面: 针对不同材料的超表面, 对金属材料 and 介质材料的分类讨论^[23,25-26]; 针对超原子不同的调控机理, 涵盖波前调控和相位调控的内容进行综述^[27-28]; 针对所实现的不同功能, 侧重对偏振全息、偏振成像、光谱成像等单一功能综述^[29-32]。本文在此基础上, 从超表面的相位调控机理入手, 针对偏振器件实现的不同功能, 包括偏振转换、偏振全息、偏振探测、光学加密等, 对超表面偏振器件的研究进展进行综述, 并对其发展脉络及应用现状进行归纳。另外, 我们增加了对目前超表面制备工艺的介绍, 这有助于全面了解目前超表面领域面临的技术挑战。最后, 总结了微纳偏振器件及偏振成像系统目前存在的关键技术问题和未来发展趋势。

2 超表面相位调控机理

2.1 偏振信息表示方法

光场矢量的振动方向垂直于光波的传播方向。而光场的振动方向往往相对于光波的传播方向是不对称的, 这称为光波的偏振性^[33]。根据光矢量在与传播方

向垂直的平面上的投影, 光在空间的均匀偏振态可以划分为线偏振 (linear polarization, LP)、圆偏振 (circular polarization, CP) 和椭圆偏振 (elliptical polarization), 这些均匀类型偏振态不依赖于横截面处光的位置, 广泛应用于各种光学实验和技术, 如激光、偏振转换装置和成像系统。而根据在空间偏振态分布不均匀的矢量光场, 可以划分为径向矢量光 (radial vector beam) 和角向矢量光 (azimuthal vector beam), 这种非均匀类型矢量偏振光在光学通信、显微成像等领域具有独特的优势和应用价值。通常根据不同的应用需求, 偏振可以使用琼斯矢量、庞加莱球和斯托克斯 (Stokes) 矢量来进行描述。

2.1.1 琼斯矢量法

1941 年, 琼斯提出一种利用光波电矢量在两个任意正交偏振基投影之间的关系来描述偏振态的方法, 称为琼斯矩阵法。通常电磁波的偏振主要考虑电场的振动情况。一般情况下可以表示为

$$\mathbf{E} = A_x e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)} \mathbf{i} + A_y e^{i(kz - \omega t + \varphi_y)} \mathbf{j}, \quad (1)$$

式中: 矢量 \mathbf{i} 和 \mathbf{j} 分别代表坐标轴 x 方向和 y 方向的单位矢量, A_x 和 A_y 分别代表 x 和 y 分量上的振幅, φ_x 和 φ_y 分别代表各分量上的初始相位。因此, \mathbf{E} 可以由两个正交的分量所决定, 从而确定其偏振状态, 故可以用一个矩阵表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)} \\ A_y e^{i(kz - \omega t + \varphi_y)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

略去其共有的相位因子, 并且用 δ 表示 x 方向电场和 y 方向电场之间的相位差, 可以化简矩阵 (2) 为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y e^{i\delta} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

尽管琼斯矢量形式简单, 但是它仅可以表示完全偏振光, 其具体参数难以通过光电系统测量, 因此在很多应用场景下不宜采用该方法。

2.1.2 Stokes 矢量法

Stokes 矢量 $\mathbf{S}(x, y)$ 是由四个参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 构成的列向量, 光波的任一偏振态都可以用 Stokes 矢量的四个参量表示^[34]。其物理意义与计算方法为

$$\mathbf{S}(x, y) = \begin{bmatrix} S_0(x, y) \\ S_1(x, y) \\ S_2(x, y) \\ S_3(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ}(x, y) + I_{90^\circ}(x, y) \\ I_{0^\circ}(x, y) - I_{90^\circ}(x, y) \\ I_{45^\circ}(x, y) - I_{135^\circ}(x, y) \\ I_{\text{RCP}}(x, y) - I_{\text{LCP}}(x, y) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

与琼斯矢量法相比, Stokes 矢量的四个参量可以直接通过光电探测器所探测到的光强数值计算出来。另外, Stokes 矢量也可以描述偏振度、线偏振度和圆

偏振度, 比琼斯矢量法具有更广泛的适用性。

2.1.3 庞加莱球法

1892 年, 著名的法国数学家庞加莱在斯托克斯理论的基础之上, 提出用单位球形象地描述光波的偏振态, 也就是对 Stokes 矢量的四个分量进行归一化处理, 使入射光的总强度 $I = 1$ 。通过将偏振态的信息映射到极坐标系进行表示就可以得到庞加莱球^[35-36], 如图 1(a) 所示。图 1(b) 为部分线偏光 (0° 、 90° 、 45° 、 135°) 和圆偏光 (LCP、RCP) 在庞加莱球上的表示。

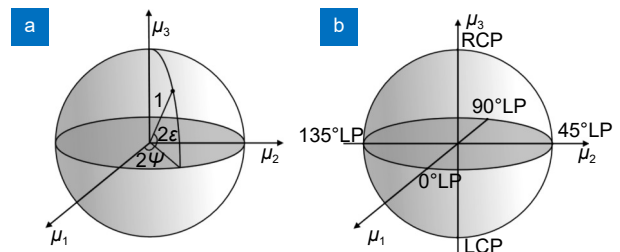


图 1 (a) 庞加莱球示意图; (b) 线偏振与圆偏振在庞加莱球上的表示

Fig. 1 (a) Schematic image of the Poincaré sphere; (b) Representation of LP and CP on a Poincaré sphere

2.2 超表面相位调控机理

2011 年, 哈佛大学 Capasso 研究组首次提出了超构表面的概念^[37], 基于梯度超表面发现了广义 Snell 折射定律, 为光学超构材料的研究开辟了新的方向, 在塑造波前和光学设计中获得新的自由度^[38-40], 展示了光学系统小型化、集成化的巨大潜力。近年来, 这一领域取得了飞速的发展, 超表面呈现出对光波前振幅^[41-42]、相位^[43-45]、偏振^[46-47]等多种参量的多样灵活调控能力, 为微型化和高性能的微纳光学器件设计提供了全新的平台。其中, 相位是电磁波的一个核心属性, 等相位面决定了电磁波的传播方向, 超表面通过对电磁波相位的调控, 可以实现光束偏转、超透镜、超全息、涡旋光产生等功能。在超表面的发展历程中, 逐渐形成了几种不同的相位调控机理: 传输相位、几何相位、广义几何相位和共振相位^[48]。

2.2.1 传输相位

传输相位型超表面通过电磁波在传输过程中产生的光程差来实现相位调控。当波长为 λ 的光波垂直入射到材料折射率为 n 、厚度为 d 的介质表面时, 其累积的相位延迟可表示为^[48]

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nd. \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 传输相位通常与入射光波长和材料折射率及厚度有关, 而与偏振无关, 无手性响应。

传输相位型超表面可以通过利用高折射率介质或改变亚波长结构的单元尺寸, 从而调节材料的等效折射率, 进而保证足够小的器件厚度^[49-50]。

2.2.2 几何相位 (Pancharatnam-Berry phase, PB phase)

几何相位是由英国物理学家 Berry 于 1984 年首次提出的^[51], 是量子系统在参数空间中循环演化时, 系统的量子态相位发生的累积变化, 它是光子自旋角动量和轨道角动量相互作用下的产物。Berry 考虑了一个量子系统, 其哈密顿量依赖于某些参数, 当这些参数缓慢并连续地改变并最终返回到它们的初始值时, 系统的波函数会获得一个额外的相位。几何相位是一种拓扑相位, 其取值只与系统在参数空间中变化的几何路径有关。

假设超表面单元结构对应 $u-v$ 坐标系, 与 $x-y$ 坐标系之间的夹角为 θ , 如图 2 所示。此时, 超表面的琼斯矩阵可以表示为^[48]

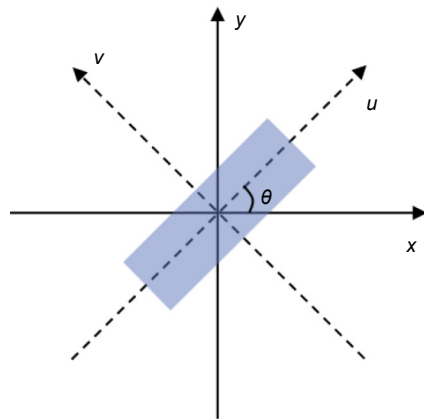
$$M = R(-\theta) \begin{bmatrix} t_u & 0 \\ 0 & t_v \end{bmatrix} R(\theta), \quad (6)$$


图 2 几何相位示意图
Fig. 2 Schematic image of the PB phase

式中: t_u 和 t_v 为两个主轴方向的透射复振幅, $R(\theta)$ 为旋转矩阵, 可以表示为

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 中, 化简可得:

$$M = \begin{bmatrix} t_u \cos^2\theta + t_v \sin^2\theta & (t_u - t_v) \sin\theta \cos\theta \\ (t_u - t_v) \sin\theta \cos\theta & t_u \sin^2\theta + t_v \cos^2\theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

当入射光场为圆偏振光时, 出射光场可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \\ &= \frac{t_u + t_v}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} + \frac{t_u - t_v}{2} e^{-2i\sigma\theta} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix}, \quad (9) \end{aligned}$$

式中: σ 为 1 或 -1, 分别表示右旋圆偏振 (right-handed circular polarization, RCP) 光波和左旋圆偏振 (light-handed circular polarization, LCP) 光波。出射光场中既包含相同的偏振分量, 又包含了携带附加几何相位为 $-2\sigma\theta$ 的正交偏振分量, 其几何相位值为主轴夹角 θ 的 2 倍。由此, 几何相位只与入射光偏振和结构旋向有关, 而与入射光的波长和材料无关, 通过改变单元结构的旋转角, 可以实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位调控。

2.2.3 广义几何相位

经典的几何相移与超表面元单元结构的旋转角 θ 存在唯一确定的对应关系, PB 相位对于正交圆极化都是对称的, 即 LCP 和 RCP 的几何相位具有相同的绝对值, 但符号相反。在过去的几年中, PB 相进一步扩展到非线性 PB 相和高阶线性 PB 相^[52]。2015 年, 研究者首次提出了非线性 PB 相位^[53-55], 入射不同的偏振光束, 通过倍频与三倍频辐射过程在单次外差测量中实现了纳米材料的多维非线性偏振响应, 验证了非线性 PB 相位的存在。非线性 PB 相位主要应用于研究非线性光学超表面, 其对光频转换的高可控制度引起了大量关注。通过利用非线性光学体系中 PB 相位的概念, 提出了许多功能器件^[52,56-58], 如非线性透镜、非线性加密和非线性成像。2021 年, 研究人员构造了不同旋转对称的金属纳米孔, 并将其分别置于正方形和正六边形晶格中, 发现当超表面的单元结构对称性与晶格对称性不一致时, 由于晶格之间的耦合效应, 结构将在平面内会呈现出各向异性, 此时, 根据等效介质理论的物理限制, 超表面将有且只有两个主轴。在这种情况下, 可以通过分析等效主轴的旋转来解释高阶几何相位。对于正方形晶格中的超构原子, 当其具有一重或二重旋转对称性时, 结构旋转角与主轴旋转角度近乎相等, 而当超构原子的旋转对称性大于等于 3 时, 其主轴旋转角与结构的旋转角度之间存在着倍数关系, 利用多重关系, 可以实现超原子旋转角度数倍的高阶线性几何相位, 使其不局限于与旋转角 θ 之间的二倍关系^[59]。另外, 可以将上述几何相位推广到更一般的情况, 通过研究不同旋转角度下沿主轴的几何相位或透射系数来确定相应的表达式。这种打破传统几何相位线性限制的广义几何相位在量子计算、量子通信、高精度传感测量等多个领域具有巨大潜力和广泛应用前景, 是未来量子技术发展的重要组成部分。

2.2.4 共振相位

传统的折/反射定律描述了光入射到不同介质的

界面上时, 光波反射和折射的物理关系^[60], 如图 3(a) 所示。然而在亚波长尺度下, 当光波入射到图 3(b, c) 所示的两个折射率不同的界面上时, 在光路中引入波长尺度的相位突变, 使得微小位移处的光程相等, 此时折/反射关系可写为^[37]

$$\begin{aligned} k_0 n_1 \sin \theta_i dx + (\varphi + d\varphi) &= k_0 n_2 \sin \theta_t dx + \varphi, \\ k_0 n_1 \sin \theta_i dx + (\varphi + d\varphi) &= k_0 n_1 \sin \theta_r dx + \varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 广义折射定律和反射定律为

$$\begin{aligned} n_2 \sin \theta_t - n_1 \sin \theta_i &= \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}, \\ \sin \theta_r - \sin \theta_i &= \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \frac{d\varphi}{dx}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中: λ_0 为真空波长; k_0 为波数; n_1 和 n_2 为两种界面材料的折射率; θ_i 、 θ_t 和 θ_r 分别为入射角、折射角和反射角; φ 和 $\varphi + d\varphi$ 为两条路径在界面处的相位突变。

式 (11) 表明, 对于一定的入射角, 若沿入射界面引入的恰当且恒定的不连续相位梯度 $\frac{d\varphi}{dx}$, 那么折射和反射光束可以具有任意方向。若使用具有亚波长间隔的不同相移的光学共振结构阵列可以实现沿入射界面的不连续相位改变, 以此来控制异常的折/反射光束。共振型相位调控大多利用局域表面等离子体共振响应控制辐射场的相位, 从而在亚波长尺度实现对光场的调控。2011 年, Capasso 团队^[37] 基于该定律设计了一种具有双共振特性的 V 形金纳米天线, 实现了对光波前的完全控制。这些亚波长的金属天线结构可被视为光学共振结构, 当入射光的波长与结构的共振波长一致时, 共振结构中会产生位移电流, 从而产生强散射的电磁场, 当改变 V 形天线的夹角使之与共振峰失谐时, 相移也会随之改变。因此, 可以通过调整纳米结构阵列中元原子共振结构的几何形状及尺寸使其共振波长发生改变, 从而实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位调控。

3 基于超表面结构的偏振器件

超表面因其平面化和易于集成化的巨大优势, 能

够解决传统偏振探测系统中常用偏振器件尺寸限制的问题, 在集成式偏振探测系统中极具吸引力。然而, 要想更好地挖掘出基于超表面结构偏振器件的更大潜力, 需要结合多种不同偏振功能的超表面, 发挥出超表面平面化和易于集成化的优势, 在缩小系统体积的前提下, 还能实现高质量的探测性能和成像效果。下面将以不同功能的偏振器件为主线, 对基于超表面的微纳偏振器件研究进行综述。

3.1 偏振转换

超表面最基本的偏振调控功能就是偏振态产生和转换, 类似于传统波片^[23,61-62]。超表面亚波长各向异性的单元结构可以沿两个正交轴产生不同的相移, 由于介质材料与空气折射率相差较大, 相同厚度下也会产生较大的相移, 通过调整单元结构的几何参数, 可以控制两电场分量之间的相位差, 实现具有任意相位延迟的超薄偏振转换器^[63-65]。

目前, 已有研究人员通过设计不同的超表面结构, 实现了多种偏振转换功能。2020 年, 空军工程大学李思佳团队^[66] 提出一种用于偏振转换的双波段双圆透射超表面, 通过仿真模拟和实验测试表明, 当 y 线偏振光垂直入射时, 该偏振转换器可以实现两种模式圆偏光的转换, 在低频波段出射左旋圆偏光而在高频波段出射右旋圆偏光。2021 年, 南丹麦大学 Deng 等人^[67] 提出一种基于“十”字型的间隙表面等离子体超表面 $1/4$ 波片元单元结构, 如图 4 所示。所设计的单元结构采用 Au-SiO₂-Au 的材质, 底层 Au 相当于反射层, 中间 SiO₂ 间隔层在确保高反射效率的同时能够有足够的谐振相位覆盖, 通过改变最上层 Au 天线的长度 (L_x 和 L_y) 使纳米天线的共振相位达到 300° 的宽范围, 选择具有 90° 相位步长的四个纳米元单元结构组成元原子库。结合几何相位调控原理, 共极化 CP 光束的相位只与共振相位有关, 而交叉极化 CP 光束的相位则由几何相位和共振相位同时决定, 改变元原子尺寸和取向可以独立或依赖性地操纵共极化和交叉极化 CP 光束, 因此该结构能够实现高效的圆到线偏

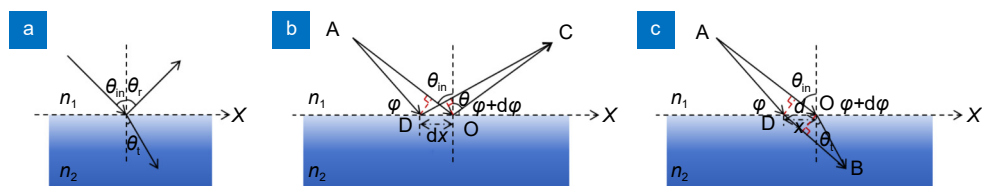


图 3 (a) 传统折/反射示意图; (b) 广义反射定律示意图; (c) 广义折射定律示意图

Fig. 3 (a) Schematic image of the traditional Snell's law; (b) Schematic image of generalized refraction law; (c) Schematic image of generalized reflection law

振转换, 并实现对反射场的完全相位控制, 图 4(a) 为这种反射式偏振转换器件的示意图。基于纳米 1/4 波片单元结构的设计, 实现了在近红外范围内的共极化和交叉极化圆偏振通道的任意光束转向, 实现了在圆偏光垂直入射下的共极化和交叉极化圆偏振波的独立和同步相位调制, 图 4(b, c) 为单元结构的示意图及其相位调控结果, 图 4(d) 展示了这种反射式偏振转换器件的 SEM 图。2022 年, He 等人^[68] 利用全介电非晶硅超表面, 提出了一套具有独立相位和偏振控制集成功能的高传输 1/4 波片, 可以实现高效的圆偏振光到线偏振光转换。2023 年, Ahmad 等人^[69] 提出了一种单层反射式的各向异性超表面, 在不同的微波频率范围内实现半波片和 1/4 波片的功能, 在 8.2 GHz、12.7 GHz 和 20.8 GHz 三个等离子共振频率点上, 交叉极化的转换效率几乎接近 100%。

3.2 偏振分束

偏振分束器是一种常用的光学器件, 可以将入射光按照不同的偏振方向进行分离, 常常用于光纤通信和偏振成像等领域。然而传统的偏振分束器体积较大, 限制了它在集成光学中的应用。超表面通过对入射光相位和偏振的调控, 通过合理地设计纳米结构及其角度, 对不同的偏振光提供不同相移, 能够很容易实现偏振分束的效果。为偏振分束器小型化、集成化提供了支持, 拓宽了偏振分束器在集成光学系统中的应用前景。

2020 年, Ding 等人^[70] 使用介质超表面生成多偏振状态, 并对其进行操控。其设计的超表面结构单元为矩形及椭圆形截面的非晶硅元原子, 位于熔融二氧化硅衬底上。通过调整其形状、尺寸和方向, 在 x 偏振光入射下, 由 6 个子阵列组成的超表面偏振器可以

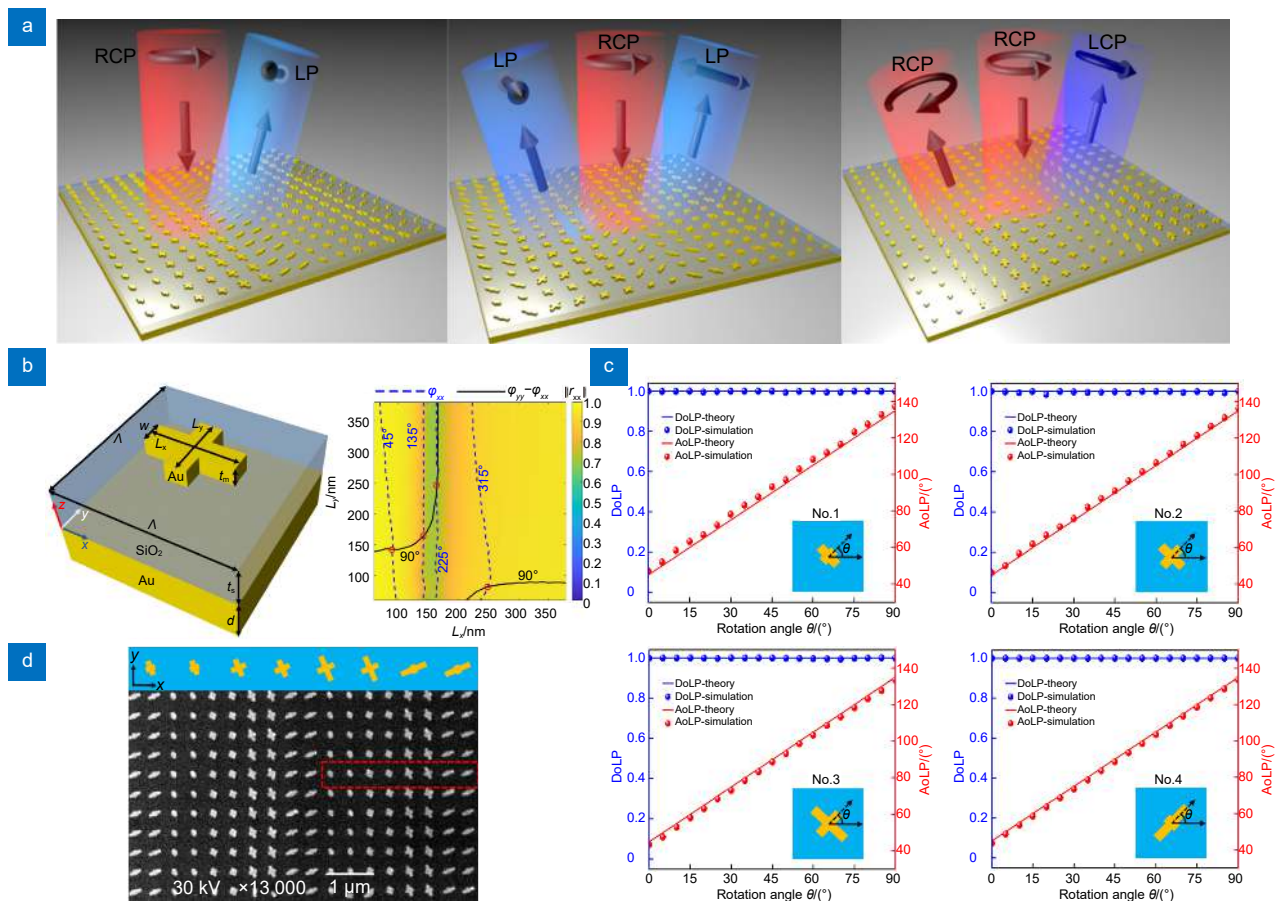


图 4 (a) 等离子体超表面偏振转换示意图^[67]; (b) 等离子体超表面偏振转换器单元结构及其计算的反射系数和相位曲线^[67]; (c) 四种纳米结构随角度 θ 变化的计算线偏振度及线偏振角曲线^[67]; (d) 所制备的超表面偏振转换器 SEM 图^[67]

Fig. 4 (a) Schematic image of plasma metasurface polarization conversion^[67]; (b) Plasma metasurface polarization converter cell structure and calculated reflection coefficient and phase curve^[67]; (c) Calculated degree of linear polarization (DoLPs) and angle of linear polarization (AoLPs) of the four designed nano structures as a function of the rotation angle of θ ^[67]; (d) SEM image of the fabricated metasurface polarization conversion^[67]

产生和操纵 6 种不同的偏振状态, 完全独立地控制输出的偏振和相位。2021 年, Gao 等人^[71]展示了一种高效的全介电双原子超表面, 作为纳米级非偏振分束器和线性偏振器的集成, 在工作波长为 690 nm 时, 最大传输效率为 96.2%, 消光比为 32.8 dB。2022 年, 中国南京大学 Ren 等人^[72]设计了基于椭圆形 TiO₂ 超表面结构的全 Stokes 偏振镜, 如图 5(a) 所示, 亚波长间隔的椭圆形 TiO₂ 纳米柱能够起到纳米级双折射波板的作用, 对于沿着纳米柱长轴和短轴入射的线偏光, 因其不同的等效折射率而产生相位差。再利用传输相位和几何相位对入射光进行调控, 如图 5(b, c) 所示, 可提供两个正交偏振态的不相关相位信息, 从而实现入射光各偏振态的高效空间分离, 其实验系统和结果分别如图 5(d) 和图 5(e) 所示。但这些设计需要大量的模拟实验, 光栅和相机的集成工艺和后期的数据处理也都很有挑战。

3.3 矢量涡旋光发生器

操纵光的局部偏振态的能力在研究和应用中至关重要。矢量光束在横向平面上具有空间变化偏振, 近年来因其有趣而广泛的应用而受到广泛关注; 径向矢量光、角向矢量光都是特殊的矢量光束, 它们的电场

矢量在光束横截面上的分布各具特点。径向矢量光在聚焦时可以产生强烈的轴向电场分量, 适用于超分辨率显微镜^[73]、光捕获^[74]和粒子操控^[75]等领域; 而角向矢量光在聚焦时可以产生强烈的径向电场分量, 适用于某些类型的光学操控^[76]和显微成像^[77]。矢量涡旋光束具有特殊的波前性质和轨道角动量模式的多样性, 与普通的高斯光束和单一偏振光束的波前相比具有很大的差别, 这使得光学涡旋具有独特的量子特性^[78]。轨道角动量结合传统调制维度, 为量子通讯和光通讯领域提供了一种新的复用通道, 实现大容量通信^[79]。对于涡旋光束的模式调控, 通常通过级联多个光学器件构建庞大的光学系统来实现, 这与光子学中集成和小型化的主要趋势不相容, 而光学超表面因其光操纵、多功能性、易于片上制造和集成方面的卓越能力为矢量光束的产生以及偏振态矢量光束的操纵提供了新的方法。

2015 年, Jin 等人^[80]提出了一种纳米天线超表面, 通过改变纳米天线的方向和几何形状, 同时调控入射光的相位和振幅, 抑制了高阶衍射的能量, 产生能量相等的多通道涡旋光和球面波。使光束之间发生干涉, 不同拓扑荷数的涡旋光束与球面波产生不同的衍射效

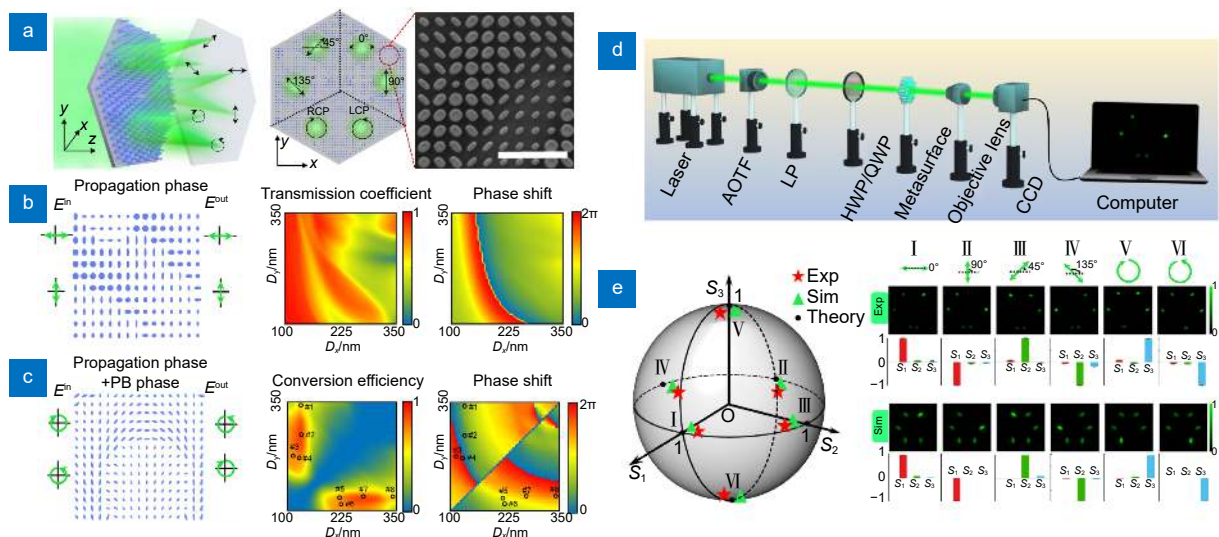


图 5 (a) 熔融石英衬底上的 TiO₂ 纳米柱超表面示意图 (左) 和 SEM (右) 图像^[72]; (b) LP 偏振入射下仅用传输相位调控示意图 (左), 透射系数图和相移图 (右)^[72]; (c) CP 偏振入射下用传输相位和 PB 相位同时调控示意图 (左), 透射系数图和相移图 (右)^[72]; (d) 全 Stokes 探测实验装置示意图^[72]; (e) 庞加莱球面上所选的六组基偏振态入射下超表面的实验和模拟强度分布以及相应 Stokes 参数重建^[72]

Fig. 5 (a) Schematic (left) and SEM (right) image of the designed metasurface consisting of TiO₂ nanopillars on a fused-silica substrate^[72]; (b) Schematic of the LP polarization manipulation (left), which employs only the propagation phase. The transmission coefficient and phase shift (right)^[72]; (c) Schematic of the CP polarization manipulation (left) achieved by combining propagation and PB phases. The conversion efficiency and phase shift (right)^[72]; (d) Experimental setup for full-Stokes polarimetry^[72]; (e) The experimental and simulated intensity distributions of the metasurface and corresponding reconstructed Stokes parameters for the selected six basis polarization states on a Poincaré sphere^[72]

果, 再根据衍射效果对拓扑荷数进行判定。2017年, Guo 等人^[81]设计了一种金属-电介质-金属三层等离子体几何超表面, 来演示矢量场的偏振调制, 通过改变两个反射超表面超单元之间的横向相移, 线性偏振光的旋转角度可以高效地从 0 到 π 连续调谐, 且具有稳定性和每个衍射阶达 27% 的高转换效率, 具有强大且可控光学活性, 为矢量光束的偏振态的调控提供了一种高效的方法。2020年, Ou 等人^[82]利用超表面双折射元原子在中波红外实现了偏振控制的多功能元器件, 如图 6(a, b) 所示, 该器件能够在不同偏振光入射下产生同轴消色差的聚焦涡旋光束。通过入射不同方向的线性偏振光, 实现了具有不同拓扑电荷数的涡旋光束发生器, 如图 6(c, d) 所示。2021年, Kong 等人^[83]提出了一种用于生成双矢量光束的超表面, 该超表面由排列在多组半圆形环上的正交狭缝对组成, 在线偏振光的照射下, 两组位移位的半圆环在观测平面上位移的中心位置产生两个矢量光束。每组的狭缝单元都设计有独立的旋转顺序和初始取向角度。通过调整照明的线性偏振, 可以同时独立控制两个具有阶数和偏振状态的矢量光束。2022年, Fu 等人^[84]提出了一种单层矢量超表面, 并在标准的垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 平台上集成系统, 将其命名为“Meta-VCSELs”, 如图 7(a) 所示; 使用该集成系统可以按

需特性控制 VCSEL 的相位和偏振, 可以生成任意偏振态光束, 如图 7(b) 所示; 同时该系统支持径向矢量光的生成, 而通过将变表面涡旋波片的初始相位从 $\phi = 0$ 更改为 $\pi/2$, 可以改变 VCSEL 产生角向矢量光, 实现了片上集成以及矢量光束的生成, 如图 7(c) 所示。2022年, He 等人^[68]在 1/4 波片元原子的基础上, 通过旋转纳米柱角度, 设计了束流器和聚焦金属, 分别在不同的圆偏振光入射下产生均匀和非均匀线极化分布的不同波前, 生成一个平面波前均匀线偏振分布和聚焦矢量涡旋光束, 通过仿真模拟了级联多级光学组件的功能, 使偏振光学中的易于集成和更多应用成为可能。2023年, Shafqat 等人^[85]提出一种能够产生同心完美涡旋光束的单芯驱动宽带超表面, 每个涡旋光束都是通过复用多个光学器件的相位轮廓和三角相位特征来实现, 从而达到无限的拓扑电荷, 所设计的超表面工作波段为 1460 ~ 1565 nm, 突破了以前仅在单一波长下设计的局限性, 为宽带涡旋光发生器的设计提供了理论支持。

3.4 高阶庞加莱球光学加密

随着信息技术的迅速发展, 信息安全问题和由此衍生的信息加密技术得到了愈发广泛的关注。光学加密技术融合光子的多个自由度, 具有高速并行处理的

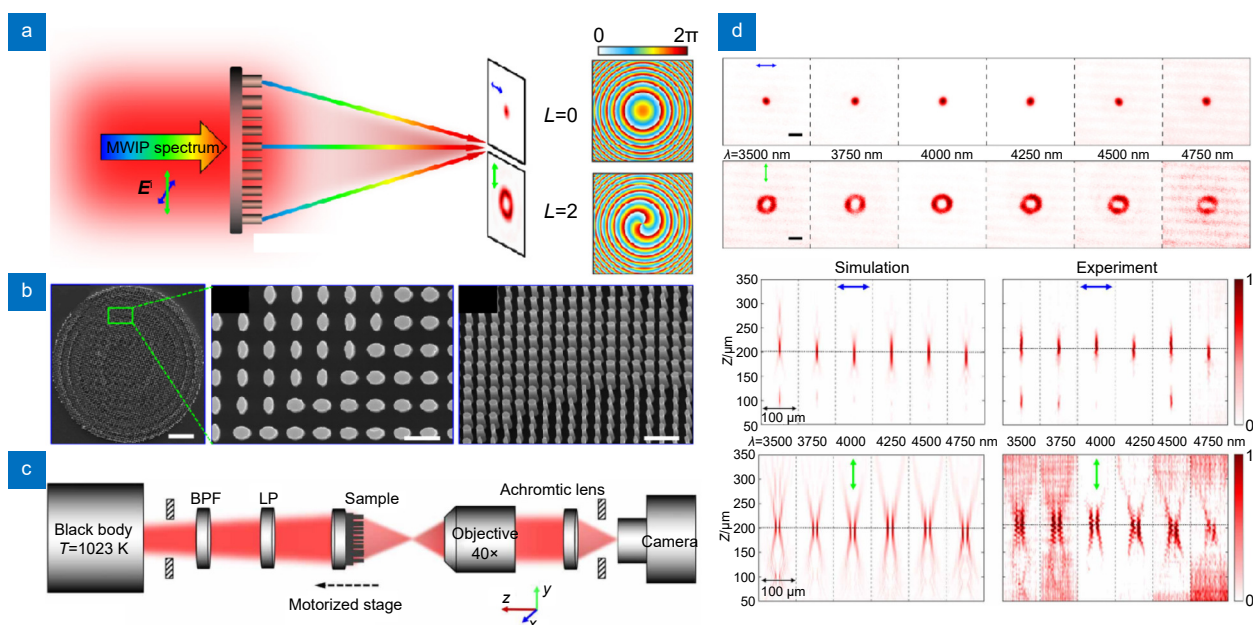


图 6 (a) 具有偏振相关的同轴宽带消色差聚焦涡旋光发生器生成示意图^[82]; (b) 偏振控制的涡旋光发生器 SEM 图^[82]; (c) 测量所制备超器件的实验系统示意图^[82]; (d) 涡旋光发生器性能表征^[82]

Fig. 6 (a) Schematic illustration of the the on-axis broadband achromatic focusing optical vortex generator (BAFOV) generation with polarization-dependent functions^[82]; (b) SEM images of the fabricated polarization-controlled BAFOV^[82]; (c) Schematic illustration of the characterizing system for the measurement of fabricated metadevices^[82]; (d) Performance of the BAFOV generator^[82]

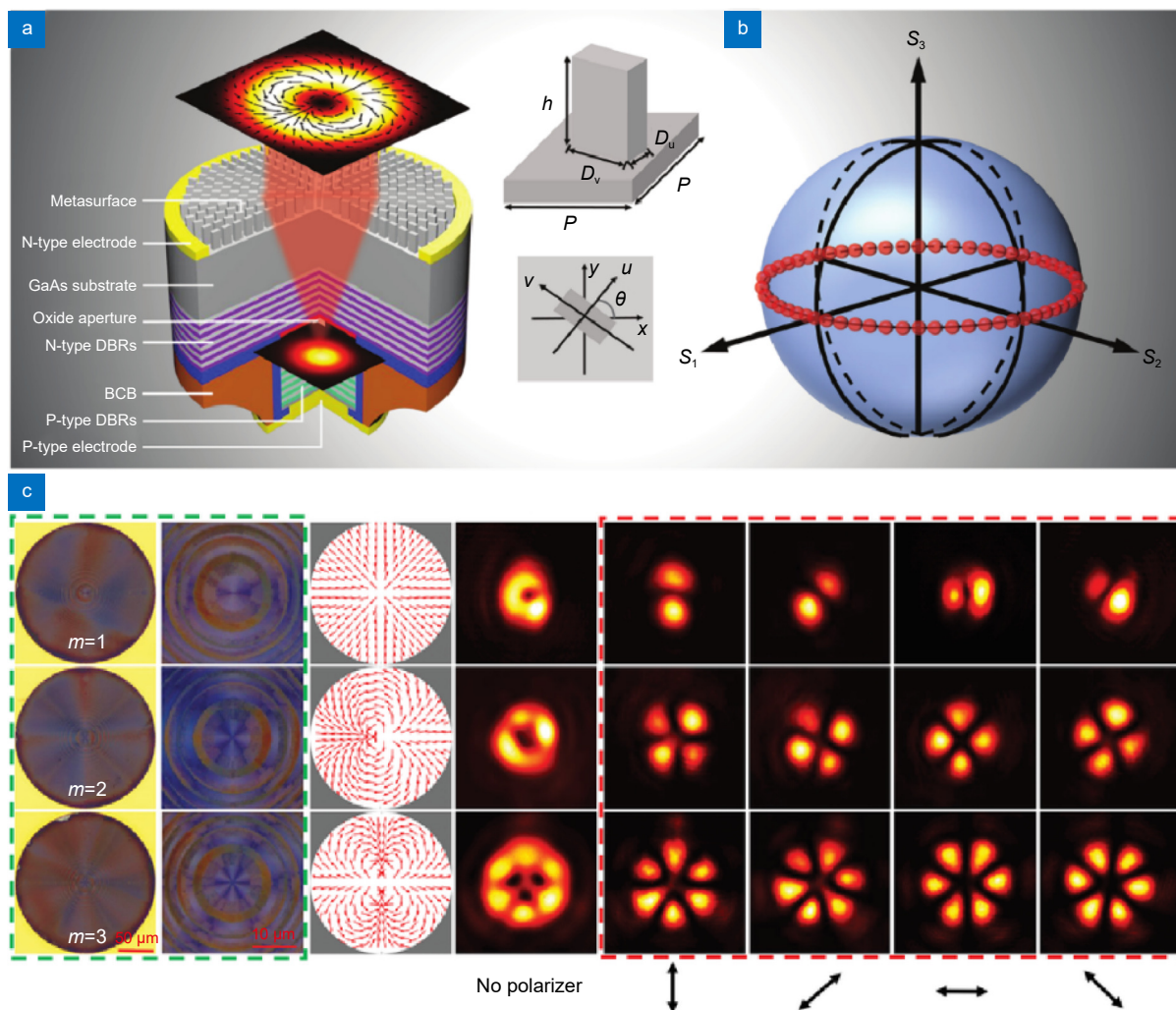


图 7 (a) Meta-VCSELs 示意图^[84]; (b) 通过将各向异性超原子操作为纳米半波片, 在庞加莱球上可实现的偏振态^[84]; (c) 矢量涡旋光束的产生^[84]

Fig. 7 (a) Schematic of Meta-VCSELs^[84]; (b) The achievable polarization states on the Poincaré sphere in this example by operating the anisotropic meta-atoms as nano half-waveplates^[84]; (c) Generations of vector vortex beams^[84]

优势, 为高性能、低功耗的信息加密提供了可靠的解决方案。超表面的出现为小型化、高效化的光学加密系统提供了极具潜力的平台。级联式和阵列化的超构表面有望为高安全性、大容量的光学信息加密和防伪开辟新的途径^[86-91]。

2022 年, Guo 等人^[92] 借助光学超表面强大的光场多维调控能力, 提出了一种基于斯托克斯矢量编码的超表面全息光学加密新方法, 并发展了基于斯托克斯矢量的级联偏振掩蔽、非对称加密等不同安全性的加密方案。2024 年, 南京大学研究团队^[93] 提出了一种基于级联超构表面阵列的高维庞加莱光束加密方案。通过级联不同的超构表面子单元, 按需生成完美高维庞加莱光束, 展示了光学信息加密功能, 有望推动光学信息安全的快速发展。研究人员针对超构表面加密

中密钥空间、编码空间受限的问题, 首先探究了单个手性超构表面生成多通道完美混合阶庞加莱光束的可行性, 首先利用手性超构表面设计了左右旋解耦的三个独立相位通道, 通过正交圆偏光通道的相干叠加, 在不同入射圆偏振条件下生成两种独立的完美混合阶庞加莱光束, 如图 8(a) 所示。进一步通过级联两片超构表面验证了高维庞加莱光束的产生机制, 通过改变级联超构表面参数, 精确调控了高维庞加莱光束的偏振级数、椭圆度以及方位角等属性, 图 8(b) 所示。因此, 可以将信息加载到高维庞加莱光束对应的可控参数上, 从而完成光学编码功能。最后, 作为光学加密功能的概念验证, 研究人员构建了两组包含 16×10 个子单元的超表面阵列, 如图 8(c) 所示。发送方首先将信息隐藏在超表面阵列中, 同时将阵列间的对齐坐

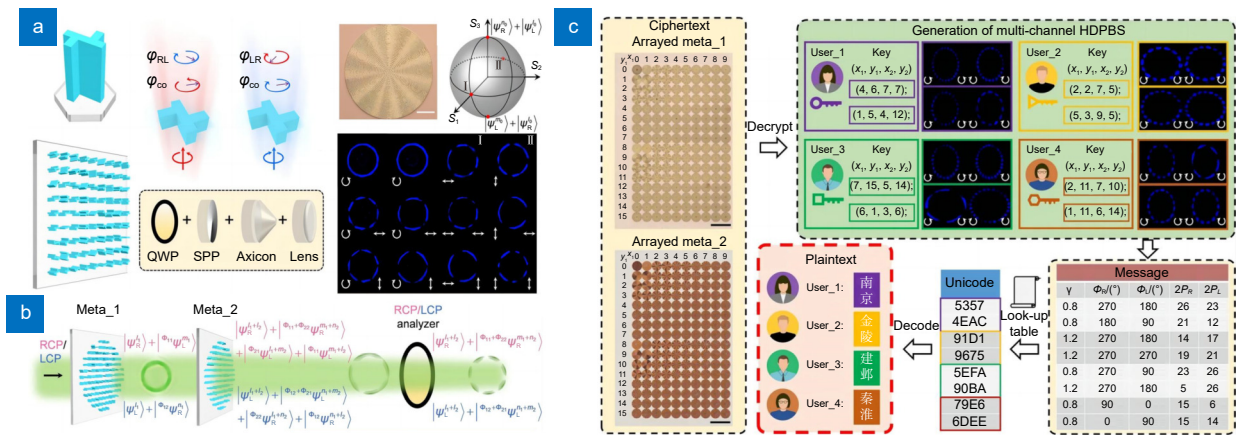


图 8 (a) 手性超构表面自旋解耦相位调控示意图^[93]; (b) 级联超构表面生成、调控高维庞加莱光束的概念图^[93]; (c) 级联超构表面阵列光学加密方案示意图^[93]

Fig. 8 (a) Schematic of phase control of spin decoupling on chiral metasurfaces^[93]; (b) Conceptual illustration of generating multi-channel perfect HDPBs via cascaded chiral metasurfaces^[93]; (c) Optical encryption demonstration based on cascaded metasurfaces^[93]

标作为密钥。接收方根据所定制的坐标密钥，对齐并级联相应的超构表面子单元，随后对生成高维庞加莱光束的空间光场分布进行分析，解码出加载的信息，实现高维庞加莱光束加密的功能。该方法丰富了复杂矢量涡旋光场的产生手段，为光学加密系统高性能、小型化、集成化的发展提供了一种极具前景的策略。

3.5 偏振多通道全息

偏光全息作为一个极具前景的学科，在一些领域已有所应用，它不仅像传统全息一样能够记录光场的振幅和相位信息，而且可以准确记录并再现光场的偏振信息^[94]。现有研究表明，超表面通过对偏振和相位的联合调控，能够实现多通道的全息显示^[95-96]。

2017年，Mueller等人提出了一种TiO₂超表面，它可以在任意一对正交状态的偏振上实现独立的任意相位面^[21]。通过同时改变椭圆单元的取向角和尺寸，在任意两个正交偏振状态(包括圆形和椭圆形)上分别实现“卡通狗”和“卡通猫”的完全独立全息图。2018年，Zhao等人^[97]通过探索双折射Si纳米柱对偏振和相位的联合控制，设计了偏振依赖型三通道全息超表面，比较研究了从正交两通道到十二通道的两种方案。通过将两种相位面编码到截面不同但不旋转的非对称纳米柱中，可以实现两种正交线性偏振态下的可切换全息图像。2021年，法国蔚蓝海岸大学Song等人^[98]通过设计GaN超表面光栅，如图9(a)所示，成功实现了复杂的宽带波前整形和光束偏转，获得了白光全息图，见图9(b, c)。2024年，Zhu等人^[99]利用4种不同的纳米结构(外层双C形分裂环谐振器、改进双C

形槽谐振器、内层双C形分裂环谐振器和包含“I”型结构的金属环)嵌套在一起形成元原子，提出了一种能够显示四通道图像的多功能超表面。该元原子是由F4B基底和金属纳米结构组成，金属结构主要激发了电场的共振效应，与电场之间形成强耦合；而不同结构之间的沟槽则激发了磁共振，根据电场和磁场的不同耦合机制，交替排列使得相邻的电共振和磁共振结构相对独立，减少了它们之间的相互影响。根据几何相位理论，超表面的交叉极化分量能够产生 2θ 的相位移动，因此通过调整四个谐振器的方向角，元原子可对RCP入射波进行调制，从而在7.2 GHz、9.1 GHz、10.9 GHz和15.2 GHz四个不同频率上产生独立的全 2π 相位调制，实现两种非正交偏振态下的四通道复用图像显示。

3.6 偏振探测

传统的偏振探测器主要分为分时型偏振探测器、分振幅型偏振探测器和分孔径型偏振探测器^[100]，它们主要利用传统光学器件搭建光路，再采用传统的探测器实现偏振探测，虽然搭建过程较为简单，无需进行复杂的加工工艺，但存在对准难、体积大、光路复杂等特点。随着近年来电子束光刻、纳米压印等技术的发展，现在可以将基于超表面的偏振探测器件直接集成在焦平面阵列上^[101-102]，从而实现分焦平面偏振成像系统。通过对物体反射光偏振态的测量，尤其是圆偏光的探测，就能够获得更加丰富的偏振信息，提高目标与背景的对比度以及目标探测的识别能力^[103]。因此，基于传输相位和几何相位共同调控的圆偏光探测

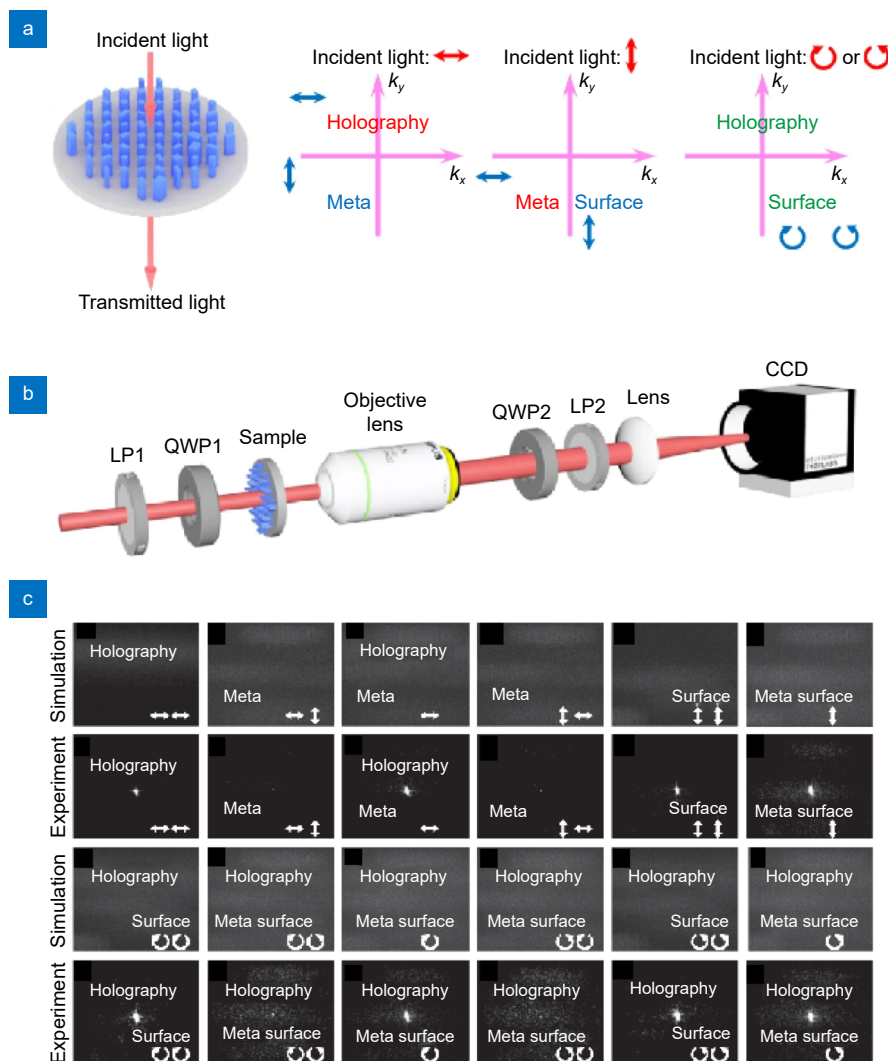


图 9 (a) 基于介电超表面的偏振多路复用全息图示意图^[98]; (b) 观察全息图像实验装置图^[98]; (c) 多通道矢量全息仿真及实验结果^[98]

Fig. 9 (a) Schematic illustrations of polarization multiplexed holograms based on dielectric metasurfaces^[98]; (b) The experimental setup for the observation of the holographic images^[98]; (c) Simulated and experimental results for the multichannel vectorial holography^[98]

超表面近年来逐渐成为全 Stokes 探测的主流研究方向。

2019 年, 美国哈佛大学 Rubin 等人在 *Science* 杂志上提出了基于 TiO₂ 超表面光栅的紧凑型全 Stokes 偏振相机^[104], 图 10(a) 表示了这种可用于任意平行偏振态分析的矩阵光栅示意图和最终制备光栅结构的 SEM 图像。这种全 Stokes 偏振相机依赖于矩阵傅里叶光学, 将平面波分解转换为 2×2 的矩阵形式, 矩阵中每个平面波项由琼斯矩阵的系数加权获得。矩阵光栅将入射光按照马吕斯定律分配到 4 个衍射级上, 并从每个衍射级分析远场中不同的偏振信息, 从而得到光的全偏振信息, 如图 10(b) 所示。将该超表面与传统的 CMOS 成像传感器集成, 即可在没有传统的偏振光学和运动部件支持下, 仅通过设计和优化绝缘体

超表面的纳米结构, 集成到相机上获得可见光谱范围的全 Stokes 偏振态的测量, 图 10(c) 表示了所选阶次偏振测量对比度。同年, Yan 等人^[105] 提出了一种用于中红外主动式照明偏振成像的全硅超表面。在实验中, 该超表面可实时在两个正交偏振基集上同时成像, 实现了线偏振成像和圆偏振成像。

2021 年, Zhang 等人^[106] 提出了基于绝缘体上硅的近红外波段高性能超紧凑全介电像素化全 Stokes 超表面。该超表面通过使用简单的二维“Z”型结构来实现具有高圆二色性的圆偏振滤光片, 该结构采用 Si-SiO₂-Si 的全介质材料, 这种材料具有功耗低、耐高温、易集成等优点, “Z”字型结构不具备镜面对称, 因此可以对 CP 光束进行滤波。将“Z”型圆滤波器件

与 0° 、 45° 、 90° 线性偏振滤光片集成在单个芯片上, 如图 11 所示, 图 11(a-c) 分别展示了该器件的示意图和 SEM 图像。该课题组通过实验证明了圆偏振滤光片在 $1.6 \mu\text{m}$ 波长下的最大圆二色性高达 70%, 在 $1.48\sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段下的平均透射效率高于 80%, 见图 11(d, e)。2023 年, Cheng 等^[107] 提出一种基于六方晶格手性超表面的全 Stokes 偏振光电探测器。该超表面由两个镜面等腰梯形块在相反方向上位移形成, 通过集成到 InGaAs/InP 光电探测器中来实现圆偏振光的探测。基于该像元的全 Stokes 探测器可以精确测量 1550 nm 工作波长下的任意偏振光, 其线性偏振度和圆偏振度的误差分别小于 0.01 和 0.15。

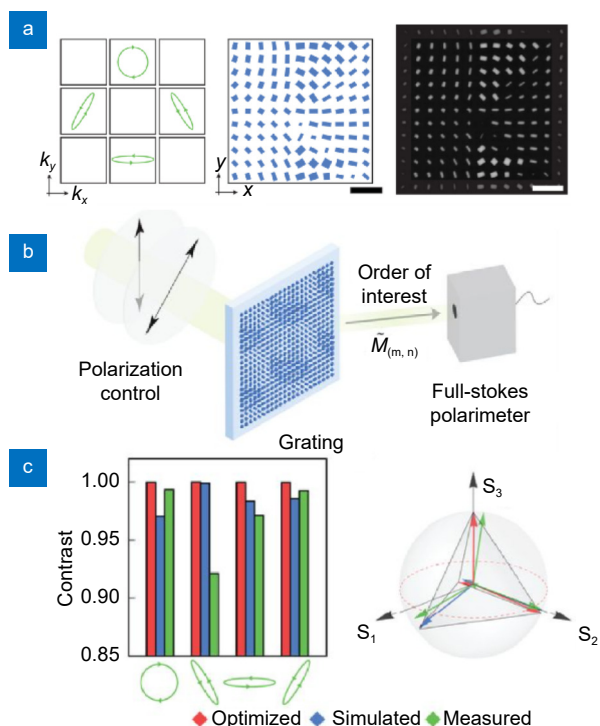


图 10 (a) 用于任意平行偏振态分析的矩阵光栅示意图和 SEM 图像^[104]; (b) 任意 Stokes 偏振态测量装置示意图表示^[104]; (c) 所选阶次偏振测量对比度^[104]

Fig. 10 (a) Schematic image and SEM of matrix gratings for arbitrary parallel polarization analysis^[104]; (b) Schematic image of the measurement of the arbitrary state Stokes polarization state^[104]; (c) The polarization contrast of each order is shown^[104]

除了利用单层手性超表面实现电磁波的偏振调控和全 Stokes 探测之外, 提高偏振调控能力的方法也是一个值得关注的领域。其中, 通过利用层间耦和效应来提升超表面的偏振调控能力被证明是一项有效的技术手段。Park 等人提出通过增加更多层数, 可以进一步增加偏振态的旋转角度和传输带宽, 并可以通过

改变超材料间距来进行调谐^[108]。2019 年, 受到螳螂复眼结构的启发^[109], Basiri 等人^[110] 设计了具有强手性光学效应和低插入损耗的手性超表面, 使用 Si 矩形纳米柱和氧化硅基底作为 $1/4$ 波片, 并与金线栅滤波器集成, 实现全偏光的测量。矩形 Si 纳米柱可以看做一个双折射元件, 会产生 Δn 的折射率差, 其中 $\Delta n = n_v - n_u$, n_v 和 n_u 分别定义为沿纳米柱宽方向及其垂直方向的有效折射率。通过改变纳米柱的几何尺寸, 可以精确调整两束垂直光入射时的相位延迟, 使其在工作波长处达到 $\pi/2$ 。并且通过实验证明了在 $1.3\sim 1.6 \mu\text{m}$ 的波段范围内, 亚微米厚的圆偏振光滤光片峰值消光比可以达到 35:1, 最大透射效率接近 80%。该课题组将所设计的圆偏振滤光片与线性滤光器相结合, 实现了对任意偏振状态光波进行全 Stokes 探测, S_1 、 S_2 、 S_3 的平均测量误差分别为 1.9%、2.7% 和 7.2%。2023 年, 该课题组^[111] 设计了芯片集成式超表面全 Stokes 偏振成像传感器, 其工作带宽为 80 nm, 见图 12。通过将 Si 纳米线栅 $1/4$ 波片集成到双层垂直耦合的 Al 金属光栅线偏振器上, 设计了基于金属-介质混合手性亚表面的 CP 滤光片。对于波长较短的可见光区域, 利用具有更多可行尺寸的 Si 纳米线栅设计人工光学双折射, 达到 $\pi/2$ 的相位差。最后, 将超薄 ($\sim 600 \text{ nm}$) 的超表面偏振滤波器阵列集成到 CMOS 可见光成像传感器上, 如图 12(e) 所示, 实现了紧凑的单镜头全偏光探测。该超表面偏振滤波器阵列具有宽带介电-金属杂化手性超表面和双层纳米光栅偏振器的特点, 其示意图如图 12(a), 在红光波段可达到 40° 的视场角范围, 在红光和绿光照射下, 其 S_1 、 S_2 、 S_3 的平均测量误差均小于 2%, 如图 12(b-d)。

4 超表面制备工艺

超表面通过亚波长纳米结构中光与物质的相互作用, 能够有效调控光的振幅、相位、偏振和频率。由于其轻薄且易于集成的独特优势, 被认为是突破传统光学系统体积限制的最有前景的解决方案之一。然而, 实现超表面器件应用的一个关键挑战是如何制造具有高分辨率、高精度且大规模、均匀的纳米结构。超表面器件的制备发展通常是一个与 COMS 兼容的发展进程, 许多用于半导体工业的纳米制造技术都可以应用于超表面的制备。这些技术主要被分为三类: 无掩模光刻、掩模光刻以及飞秒激光直写技术等新型制备工艺。

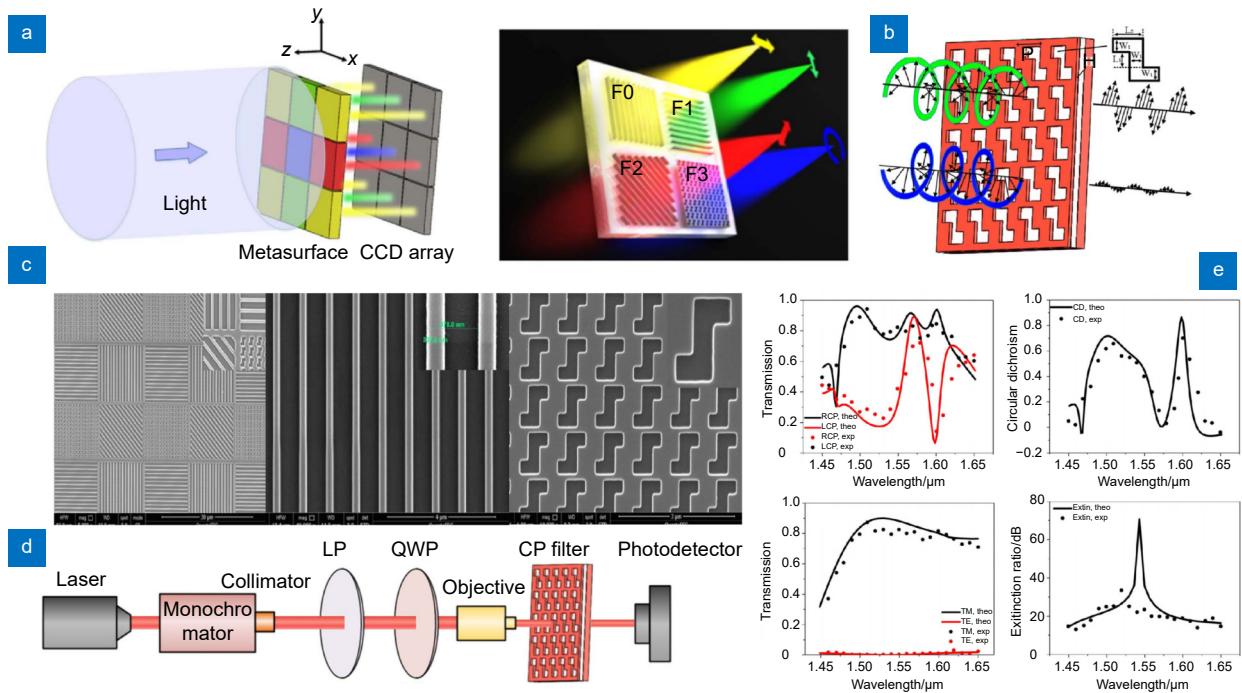


图 11 (a) 近红外全 Stokes 探测装置示意图^[106]; (b) Z 字型圆偏振滤波器示意图, 可透过 RCP(绿色) 并阻挡 LCP(蓝色)^[106]; (c)SEM 图^[106]; (d) CP 滤波器表征的测量装置示意图^[106]; (e) CP 光的透射光谱和相应的圆二色性曲线(上), TM 和 TE 偏振光的透射光谱和消光比曲线(下)^[106]

Fig. 11 (a) Schematic of setup for near-infrared full-Stokes detection^[106]; (b) CP filter with the Z-shaped pattern, which transmits RCP light (green) and blocks LCP light (blue)^[106]; (c) Scanning electron microscope (SEM) image^[106]; (d) Schematic of the measurement setup for CP filter characterization^[106]; (e) Transmission spectra and corresponding circular dichroism (CD) of CP light (top) and transmission spectra and extinction ratio of TM and TE polarized light (down)^[106]

4.1 无掩模高自由度直写技术

4.1.1 电子束曝光 (E-beam lithography, EBL)

EBL 是制备超表面材料中最常用的技术之一, 采用聚焦电子束对样品表面的抗蚀剂进行曝光, 定义光束敏感抗蚀剂上的纳米结构。EBL 在无掩模曝光过程中提供了所需的超高分辨率的模式, 成为目前实验室制备超表面结构的主流方法。根据超表面的结构设计, 通常需要进行进一步的制造步骤, 例如旋涂光刻胶、剥离 (lift-off)、蚀刻 (etching) 和原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 等, 将 EBL 定义的图案转移到目标工作层。图 13(a) 展示了基于 EBL 的超表面制备流程。EBL 是一种逐像素式的技术, 存在成本高、加工时间长、邻近效应明显、产率低等问题, 这都限制了 EBL 仅适用于实验室制备^[112-115]。

4.1.2 聚焦离子束 (Focused ion beam, FIB)

不同于 EBL 制备原理, FIB 光刻技术不再使用电子束写入图案, 光束不用于曝光抗蚀剂, 而是采用重离子束轰击样品表面, 直接去除表面中性和电离原子, 通过精确控制离子束作用的位置实现图案化单元

结构的制备。将 FIB 与扫描电镜的结合形成双光束系统, 可以实现对目标样品的直接成像和分析。FIB 是一种比 EBL 更灵活的模式化方法, 然而, 它也存在成本高、分辨率较低、吞吐量低的问题, 不能应用于大规模制造。在磨削过程中, 离子掺杂、样品损伤和样品位移也会降低所制备样品的性能^[116-120]。图 13(b) 展示了基于 FIB 的超表面制备流程。

4.1.3 激光刻写技术 (Laser lithography writing, LDW)

LDW 是一种低成本、高效、高精度的加工技术, 是半导体行业刻写中的一种常用技术, 能够高度定制实现二维或三维图案的刻写制备^[121]。LDW 应用激光直接作用于光刻胶, 曝光位置通过移动工作台进行控制, 图 13(c, d) 分别展示了 LDW 和加工系统的示意图。LDW 技术的费用相对较低, 通过与其他光学元件的集成, 能够实现高通量、大面积制造, 但是每个样品都必须独立制备, 这使得其很难进行大规模批量生产。激光干涉光刻技术 (Laser interference lithography, LIL) 应用两束或多束相干激光束产生明、暗区域的干

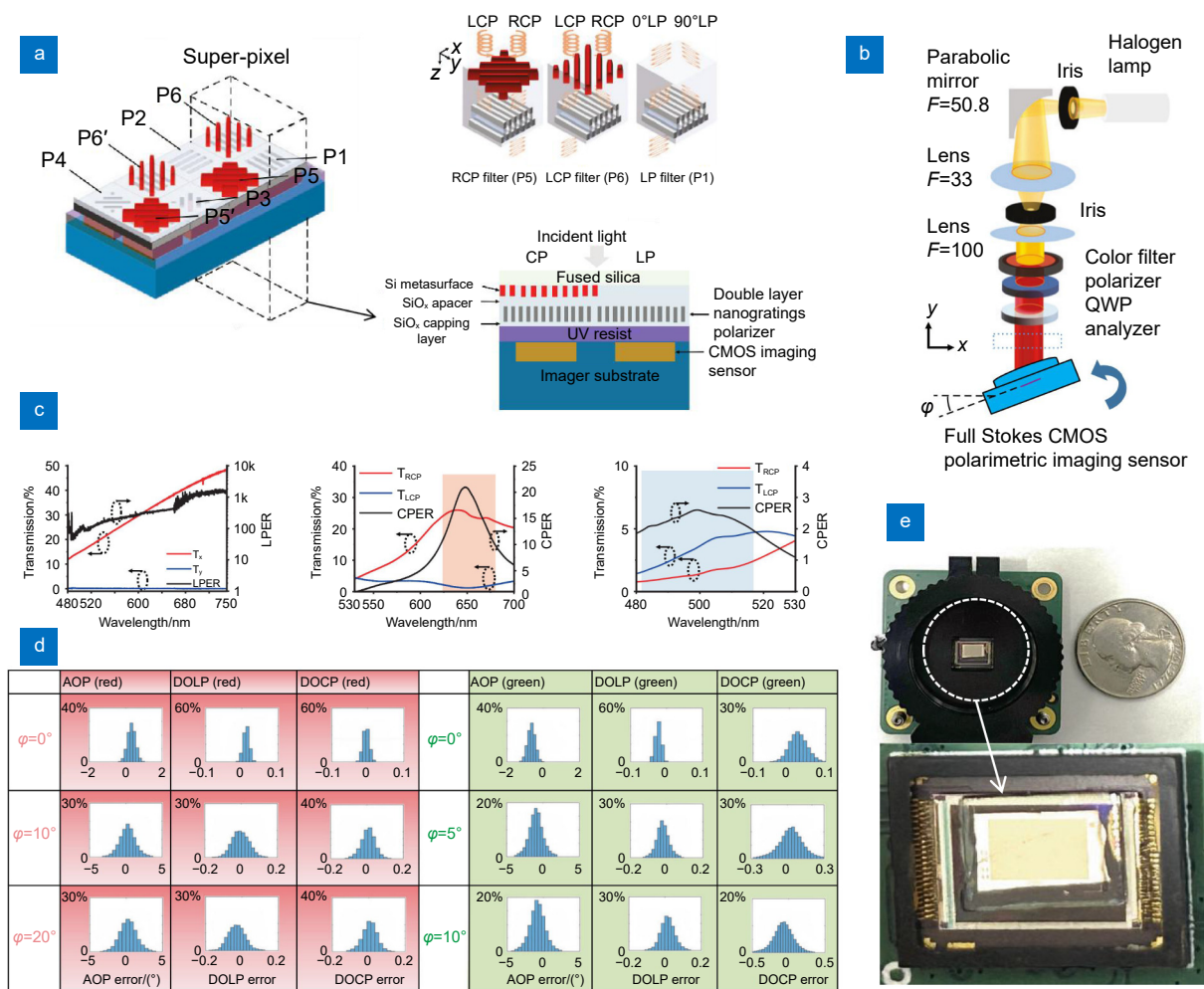


图 12 (a) 具有双工作波长的 CMOS 集成全 Stokes 偏振成像仪示意图^[111]; (b) 用于生成任意偏振态以进行完整斯托克斯偏振检测的定制实验装置示意图^[111]; (c) 垂直耦合双层光栅的透射率及线性消光比曲线(左), 手性超表面在 530~700 nm 和 480~530 nm 处的透射率和消光比曲线(右)^[111]; (d) 所有超表面偏振滤光片阵列像素分别在特定偏振状态下红光和绿光垂直入射和斜入射时的偏振角、线偏振度和圆偏振度检测误差分布^[111]; (e) 全斯托克斯偏振 CMOS 成像传感器^[111]

Fig. 12 (a) Schematic of CMOS integrated full Stokes polarimetric imager with dual operation wavelength^[111]; (b) A schematic of the customized experimental setup for generating arbitrary polarization states for full Stokes polarization detection^[111]; (c) Measured transmission and LPER of fabricated vertically coupled double-layered gratings (VCDG) (left) and measured transmission and CPER of the chiral metasurface at 530~700 nm and 480~530 nm, respectively (right)^[111]; (d) The angle of polarization (AOP), the degree of linear polarization (DOLP), and the degree of circular polarization (DOCP) detection error distributions of all metasurface polarization filter array pixels for the specific polarization state at normal incidence and oblique incidence of red color (left) and green color (right)^[111]; (e) Image of full Stokes polarimetric CMOS imaging sensor^[111]

涉图案, 使光刻胶被选择曝光而形成图案, 能够实现大面积周期性的纳米结构制造, 且不需要掩模。尽管可以通过使用更多的干涉光束或控制光束强度分布来制造更复杂的结构图案, LIL 仍然不能绘制非周期的图案^[122-123]。随着激光领域的飞速发展, 利用光子高能量、高频率的特性, 使得飞秒激光能够对固体材料进行瞬间加工, 当激光束瞬间照射到固体表面时, 激光能量会迅速转化为离子和自由电子, 形成等离子体区域或局部化学反应, 这种非热效应的加工过程可以实现仅影响材料的局部, 使其发生微观结构变化。

4.2 基于大面积掩模转移光刻技术

4.2.1 投影式光刻技术 (Project photolithography, PPL)

PPL 是借助光刻胶将掩模板上的几何图案转移到基片上的技术。其中紫外光以步进或扫描的方式通过掩模板照射在表面有光刻胶的基片上, 光刻胶被曝光的区域发生化学反应, 通过显影技术去除曝光区域(正胶)或未曝光区域(负胶)的光刻胶, 再利用刻蚀技术在基片上加工出图形, 有效地缩短了曝光时间^[124-125]。

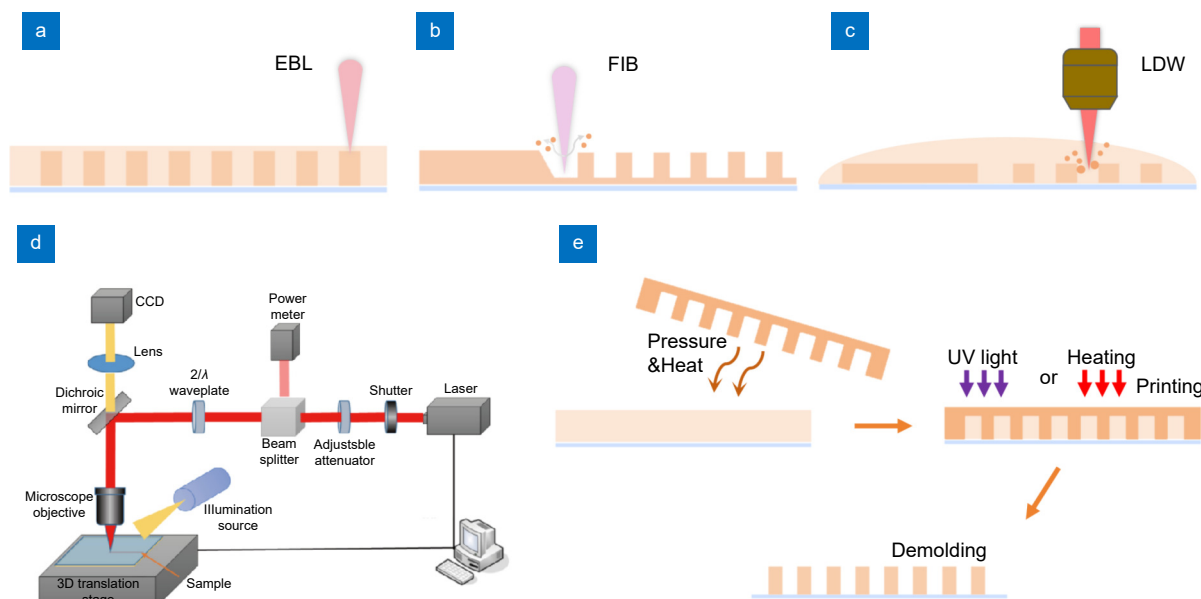


图 13 超表面制备工艺。(a) 电子束曝光示意图^[120]; (b) 聚焦离子束刻蚀示意图^[120]; (c) 激光直写示意图;
(d) 激光直写微纳加工系统示意图^[121]; (e) 纳米压印示意图

Fig. 13 Fabrication technologies for metasurfaces. (a) Schematic of EBL^[120]; (b) Schematic of FIB^[120]; (c) Schematic of LDW;
(d) Schematic of LDW processing system^[121]; (e) Schematic of NIL

因此, 掩模光刻技术是最适合批量生产大面积光学超表面的技术之一, 有希望将超表面器件从实验室走向量产应用。但是, 由于光学波段的结构尺寸较小, 普通的紫外光刻无法满足, 需要借助半导体制程中更短波长和更先进的浸没式曝光系统, 但是其自由度较低, 成本较高, 且需要 EBL 等手段进行掩模的制备。目前已经开发了 2、4、6、8、12 英寸 (1 inch = 2.54 cm) 硅晶圆的超构透镜器件以及二氧化硅晶圆器件^[126]。

4.2.2 纳米压印技术 (Nano-imprint lithography, NIL)

NIL 是一种制作纳米级图案的微纳加工工艺。是将具有纳米级尺寸图案的模板通过某种方式将图案作用到高分子材料的衬底上进行等比例压印复制图案的微纳加工工艺, 图 13(e) 展示了 NIL 加工的示意图。纳米压印是加工聚合物结构最常用的方法, 拥有成本低、工期短、产量高、分辨率高等优点^[127-129]。成熟且常用的纳米压印技术工艺主要有: 热纳米压印 (T-NIL) 技术^[130]、紫外固化纳米压印 (UV-NIL) 技术^[131-132]和微接触印刷 (μ CP) 技术^[133-134]。NIL 作为一种自下而上的制备方案, 其中最关键的是模具制备。主模板的制作往往利用精度更高的电子束曝光法以保证模具的质量, 但用 PDMS 转移图案的过程由于需要经过多次材料填充和脱模, 无法保证 PDMS 模具转移产品的精度, 利用该模具制造的大部分产品需要进一步退火去除所携带的分散剂后才能正常工作, 这可能会导

致产品精度的降低。

4.3 新型制备工艺

4.3.1 双光子聚合 (Two-photon polymerization, TPP) 光刻技术

TPP 技术利用飞秒激光使光刻胶在激光焦点处发生双光子聚合, TPP 属于 3D 打印的范畴, 无需掩模版, 具备 3D 微观结构加工的能力, 进而能够灵活地满足不同器件的加工需求。基于飞秒脉冲光源的 TPP 光刻方法, 自面世以来便受到了广泛的关注, 但 TPP 的加工精度以及加工效率, 相对于传统曝光光刻技术而言, 仍然存在一定的差距^[135-136]。

4.3.2 自组装技术 (Directed self-assembly, DSA)

DSA 光刻技术是一种极具发展潜力的新型图形化工艺, 已被国际器件与系统路线图 (international roadmap for devices and systems, IRDS) 列为下一代光刻技术的主要候选方案。控制微颗粒或纳米颗粒的组装以形成器件。DSA 光刻技术是基于嵌段共聚物 (block copolymer, BCP) 自组装构建高分辨图案, 能够突破传统光学光刻的衍射极限, 具有高通量、低成本和延续性好等显著优势, 已成为半导体工艺技术中的研究热点^[137-138]。将 DSA 与其它光刻技术如极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 光刻、深紫外 (deep ultraviolet, DUV) 光刻、紫外光刻和纳米压印光刻

(nanoimprint lithography, NIL) 等相结合, 能极大地提高加工结构的分辨率以及器件的密度。目前, DSA 光刻技术已被应用于鳍式场效应晶体管 (fin field-effect transistor, FinFET)、存储器和光电子器件等领域, 以期实现高密度集成和高效率低成本制造, 但是只能加工周期排列的简单图形。

4.3.3 探针扫描光刻 (Scanning probe lithography, SPL)

SPL 是利用纳米针尖诱导材料表面局部特性发生改变, 包括力学、电学、热学、扩散等, 移除抗蚀剂上的粒子或者排列图案中的粒子从而实现图案化, 其精度由原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 控制。根据 SPL 制造过程中的不同驱动方式: SPL 可以分为蘸笔式纳米光刻 (dip-pen lithography, DPL)、近原子尺度 SPL (close-to-atomic scale SPL)、氧化扫描探针光刻 (oxidation SPL, O-SPL)、热扫描探针光刻 (thermal scanning probe lithography, T-SPL) 等^[139-141]。DPL 是基于扫描探针显微镜的纳米加工技术, 将软物质直写与 AFM 的高分辨率结合起来, 可用于以低于 50 nm 的分辨率在表面沉积分子和材料。O-SPL 采用了探针与基底表面之间的阳极氧化反应, 能够生成纳米级别的氧化结构。在氧化过程中, AFM 探针和样品表面分别作为电化学阳极反应的阴极 (负极) 和阳极 (正极)。T-SPL 的加工过程主要利用高温加热针尖的热能, 同时使用热解凝胶作为辅助材料。热解凝胶可在高温下挥发, 从而实现复杂纳米结构的图案加工, 并且同时探测刻写所得结构的形貌。更重要的是, 由于在整个加工过程中使用的是热针尖和热解凝胶, 而不是电子束或光刻胶, 因此可以有效减少加工过程中电荷注入样品造成的损伤, 从而提高微纳结构的可靠性, 并有效改善设备的电特性^[138,142-143]。

4.3.4 激光消融 (Laser ablation)

激光消融技术是一种以低成本、高通量制备大面积超表面的替代技术。利用高强度激光束对表面材料进行消融去除或修饰, 将高能量的激光脉冲聚焦到材料表面, 使材料在瞬间吸收大量能量并迅速升温、熔化甚至蒸发, 然后刻蚀形成周期性排列的纳米阵列。根据不同的激光能量密度和材料特性, 激光消融可以分为热消融和冷消融两种类型。前者在材料吸收激光能量后, 温度上升, 最终材料熔化或汽化; 后者则利用超短激光脉冲, 使材料发生非热蒸发或直接断裂, 不会产生明显的热效应。激光消融具有高精度、高效

且非接触式的优点, 然而高精度激光加工系统设备成本高, 可能限制其在某些领域的应用^[144-145]。

5 问题与挑战

1) 超表面加工器件存在误差, 缺少高性能超表面偏振器件实物。尽管现有研究表明, 超表面偏振器件在理论上拥有良好的性能, 但由于加工工艺的限制, 存在实际加工几何形状与仿真不符、纳米柱倒塌、尺寸不符等误差, 尤其是对高深宽比、几何形状复杂的超原子结构, 这可能导致器件性能的大幅度降低。另外, 如何将多种功能的超原子集成在一种器件上, 也是目前研究人员所面临的问题之一。

2) 传统设计过程复杂耗时, 神经网络优化设计泛性能力有限。传统设计超表面结构的方法在设计过程中需要进行大量的仿真模拟, 包括扫描和优化过程, 尤其对较复杂的超表面结构进行设计时, 过程更加繁琐冗余。如何快速设计超表面结构参数, 找出最符合性能指标要求的解是研究超表面结构的重点问题之一。近年来, 神经网络逐渐进入了光学研究和设计领域^[146], 通常采用将机器学习、拓扑优化方法和人工智能结合起来加速超表面结构的设计^[147-155]。尽管取得了进展, 但在准确建模超表面的结构以及将这些模型与人工智能框架整合方面仍存在挑战。拓扑优化方法通常涉及复杂的数值计算和迭代过程, 计算资源需求较高, 优化过程可能耗时较长; 神经网络的训练又需要大量高质量的训练数据集, 对训练数据集的特性过于依赖, 泛化能力有限, 这导致每设计一种超表面, 都需要重新建立数据库、设计网络结构。

3) 偏振器件与探测器焦平面集成困难。如何将超表面集成到微纳米尺度系统中, 以适应小型化设备和传感器的需求也是目前集成式偏振探测系统所面临的问题。制备所设计的偏振器件后, 需要通过钢柱等将偏振片与探测器集成。然而偏振结构与焦平面芯片互连时, 对不同偏振角度与像元之间的对准精度要求极高, 尤其对偏振器件与光敏元件之间的距离控制和面形控制更为严格, 互连结构在封装过程中有可能影响整个组件的探测精度和可靠性。

4) 难以进行实时成像与动态光学调控。尽管目前有研究者提出基于相变材料的可重构动态超表面, 但其仍然难以实现实时偏振成像和动态光学调控。这导致目前基于超表面结构的偏振阵列无法在生物体内或变化迅速的光学系统等动态环境下应用, 如何推动其

商业化和实际应用仍然有待解决。

6 结论与展望

本文结合偏振器件的不同功能, 对基于超表面结构的偏振转换器件、偏振分束器件、涡旋光发生器、偏振多通道全息器件和偏振探测器件的研究进展进行了综述。与传统的偏振器件相比, 平面化且易于集成的超表面偏振器件为偏振探测系统的小型便携化提供了可能, 将基于超表面的偏振器件与探测焦平面的直接耦合, 或者直接改变探测器表面结构, 从而在实现体积小、光路简单、光损耗较小的偏振探测系统的同时, 达到快速且多像素的偏振成像。

目前, 随着微纳加工技术的发展, 超表面设计以及制备工艺已经日益成熟, 然而, 在提高超表面性能、设计多功能复用型超表面、发展超表面偏振器件制备工艺、与探测器集成方面仍需要进一步优化。未来的发展方向包括:

1) 探索开发新型光学材料, 提高超表面的性能和适用性。目前超表面的研究大多基于金属或全介电材料, 例如采用金、银等金属材料制备等离子超表面, 采用非晶硅、TiO₂、砷化镓等制备全介电材料, 然而金属材质的超表面存在高损耗、热效应等缺点; 介质材料超表面存在光散射、机械强度不足等问题。现有超表面特别是在柔性和可穿戴设备应用中仍然需要进一步优化。针对这一问题, 可能会有以下解决方法: 结合二维材料设计超表面结构, 如石墨烯、过渡金属硫化物等, 这些材料具有优异的电学、光学和机械性能, 特别是石墨烯具有超高的载流子迁移率和良好的光学透明性, 适用于宽带和高效的偏振器件, 然而二维材料的光学特性对制备误差和环境极其敏感, 需要进一步优化和保护, 另外, 这种大面积高质量的薄膜制备工艺仍然面临很大的挑战。

2) 结合神经网络和传统物理模型, 发展更高效、更通用的优化算法, 应对复杂结构超表面设计问题。针对这一问题, 近几年产生了物理信息神经网络 (physics informed neural networks, PINNs)。PINNs 是一种结合了深度学习和物理知识的机器学习模型, 在训练过程中遵循偏微分方程和设定的边界条件, 这相对减少了网络对训练集的依赖性, 从而提高模型泛化能力。PINNs 在求解电磁场方程时, 因存在局部高梯度等问题, 会影响其计算效率和精度。在后续的研究中, 除了采用单一的逆向网络设计方法, 可以尝试

将 PINNs 与传统有限元方法、时域有限差分法、遗传算法等多种方法结合, 这将有利于提高数据的利用率, 提升网络泛化性能。

3) 优化设计参数和加工工艺, 提高加工精度, 实现大批量生产。基于目前超表面加工工艺的限制, 很多高深宽比、纳米级别的超原子无法精确加工, 其表面粗糙度、侧壁垂直度、高度与设计值不符、纳米柱几何形状改变等误差都会影响最终超表面偏振器件的性能。要提高超表面加工精度可以从以下方面入手: 一是系统研究加工误差与实际模拟和器件性能之间的关系, 尽可能人为减小加工误差, 然而这种方法耗时耗力, 需要大量实验验证; 二是使用深度学习方法控制加工过程, 例如对加工步骤中 PECVD 沉积的薄膜厚度、MBE 分子束外延时对温度进行精确控制等方式提高加工精度。另外, 也需要研究新型超表面加工和集成工艺, 以实现与超表面的共同发展, 为超表面偏振器件商业化和产品化打下基础。

4) 后期图像处理减小探测误差, 以实现更精准的探测等。将超表面偏振器件集成在成像系统时, 由于相邻像元之间的串扰, 会导致成像分辨率损失、伪偏振增强等问题, 因此后期对探测图像处理也是提高探测精度的方法之一^[156-159]。针对图像的特点及应用背景不同, 可以采用直方图均衡化、图像平滑滤波、超分辨率重建等图像处理方法, 对所探测目标图像的伪偏振进行消除, 从而增大对比度, 使图像清晰, 达到增强的目的。另外, 可以结合深度学习和传统图像处理方法, 分别从图像特征级和像素级入手, 得到更好的图像融合效果。

提升超表面性能、优化加工工艺、完善后期处理, 这将为光学系统的小型化、集成化打下基础, 推动超表面偏振器件以及偏振探测在各个领域的进一步创新和发展。

参考文献

- [1] Wang X. Research on ground target recognition based on multi-angle and multispectral polarimetric remote sensing[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021.
王鑫. 基于多角度多光谱偏振遥感的地物目标识别研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [2] Liang T Q, Zhao Q, Sun X B, et al. Research on image restoration by polarized remotesensing through haze[J]. *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2014, 39(2): 244-247.

- 梁天全, 赵强, 孙晓兵, 等. 雾霾天气条件下偏振遥感图像复原研究[J]. *武汉大学学报-信息科学版*, 2014, **39**(2): 244–247.
- [3] Han P L, Liu F, Wei Y, et al. Optical correlation assists to enhance underwater polarization imaging performance[J]. *Opt Lasers Eng*, 2020, **134**: 106256.
- [4] Bai X Y, Liang Z D, Zhu Z M, et al. Polarization-based underwater geolocalization with deep learning[J]. *eLight*, 2023, **3**(1): 15.
- [5] Smith M H. Interpreting Mueller matrix images of tissues[J]. *Proc SPIE*, 2001, **4257**: 82–89.
- [6] Yaroslavsky A N, Feng X, Yu S H, et al. Dual-wavelength optical polarization imaging for detecting skin cancer margins[J]. *J Invest Dermatol*, 2020, **140**(10): 1994–2000. e1. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2020.03.947>.
- [7] Chenault D B, Vaden J P, Mitchell D A, et al. Infrared polarimetric sensing of oil on water[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9999**: 99990D.
- [8] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument[J]. *Proc SPIE*, 1995, **2572**: 79–90.
- [9] Gaiarin S, Perego A M, da Silva E P, et al. Dual-polarization nonlinear Fourier transform-based optical communication system[J]. *Optica*, 2018, **5**(3): 263–270.
- [10] Gao S K, Mondal S B, Zhu N, et al. Image overlay solution based on threshold detection for a compact near infrared fluorescence goggle system[J]. *J Biomed Opt*, 2015, **20**(1): 016018.
- [11] Lane C, Rode D, Rösger T. Two-dimensional birefringence measurement technique using a polarization camera[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(27): 8435–8444.
- [12] Bouhy J, Dekoninck A, Voué M, et al. Analysis of accuracy and ambiguities in spatial measurements of birefringence in uniaxial anisotropic media[J]. *Appl Opt*, 2022, **61**(27): 8081–8090.
- [13] Zheng W H, Xing M X, Ren G, et al. Integration of a photonic crystal polarization beam splitter and waveguide bend[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(10): 8657–8668.
- [14] Lu M F, Liao S M, Huang Y T. Ultracompact photonic crystal polarization beam splitter based on multimode interference[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(4): 724–731.
- [15] Chen S H, Wang C H, Yeh Y W, et al. Polarization filters with an autocloned symmetric structure[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(9): C368–C372.
- [16] Zhu J K, Wu F Q, Ren S F, et al. Research and development prospects of the subwavelength grating polarizer[J]. *Laser J*, 2012, **33**(6): 1–3.
朱久凯, 吴福全, 任树锋, 等. 亚波长光栅偏振器的研究现状与发展前景[J]. *激光杂志*, 2012, **33**(6): 1–3.
- [17] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, **1**(4): 1600064.
- [18] Kim J, Rana A S, Kim Y, et al. Chiroptical metasurfaces: principles, classification, and applications[J]. *Sensors*, 2021, **21**(13): 4381.
- [19] Tsilipakos O, Tasolamprou A C, Ptilakis A, et al. Toward intelligent metasurfaces: the progress from globally tunable metasurfaces to software - defined metasurfaces with an embedded network of controllers[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(17): 2000783.
- [20] 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.
- [21] 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]. *Phys Rev Lett*, 2017, **118**(11): 113901.
- [22] Park H, Crozier K B. Elliptical silicon nanowire photodetectors for polarization-resolved imaging[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(6): 7209–7216.
- [23] Hu Y Q, Wang X D, Luo X H, et al. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(12): 3755–3780.
- [24] Li Z Y, Jin W Q. Research progress of short-wavelength infrared polarization imaging technologies[J]. *J Appl Opt*, 2023, **44**(3): 643–654.
李子园, 金伟其. 短波红外偏振成像技术的研究进展[J]. *应用光学*, 2023, **44**(3): 643–654.
- [25] Lin J, Wang D P, Si G Y. Recent progress on plasmonic metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 289–296.
林佼, 王大鹏, 司光远. 表面等离子激元超构表面的研究进展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 289–296.
- [26] Liu B, Xie X, Gan X T, et al. Applications and progress of all-metal metasurfaces in phase manipulation of electromagnetic waves[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230119.
刘博, 谢鑫, 甘雪涛, 等. 全金属超表面在电磁波相位调控中的应用及进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230119.
- [27] Hu J, Bandyopadhyay S, Liu Y H, et al. A review on metasurface: from principle to smart metadevices[J]. *Front Phys*, 2021, **8**: 586087.
- [28] Zhou J Z, Hao J, Yu X C, et al. Recent advances in metasurfaces for polarization imaging[J]. *Chin Opt*, 2023, **16**(5): 973–995.
周俊焯, 郝佳, 余晓畅, 等. 面向偏振成像的超构表面研究进展[J]. *中国光学*, 2023, **16**(5): 973–995.
- [29] Ke L, Zhang S M, Li C X, et al. Research progress on hybrid vector beam implementation by metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230117.
柯岚, 章思梦, 李晨霞, 等. 超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230117.
- [30] He J W, Dong T, Zhang Y. Development of metasurfaces for wavefront modulation in terahertz waveband[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(9): 20201033.
贺敬文, 董涛, 张岩. 太赫兹波前调制超表面器件研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(9): 20201033.
- [31] Wan Y Q, Liu W J, Lin R Y, et al. Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230139.
万源庆, 刘威骏, 林若雨, 等. 基于超构表面的光谱成像及应用研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230139.
- [32] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(11):

- 210030.
- [33] Guo Z Y, Wang X Y, Li D K, et al. Advances on theory and application of polarization information propagation (*Invited*)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(6): 20201013.
郭忠义, 汪信洋, 李德奎, 等. 偏振信息传输理论及应用进展 (特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(6): 20201013.
- [34] Li Z Y, Zhai A P, Ji Y Z, et al. Research, application and progress of optical polarization imaging technology[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(9): 20220808.
李智渊, 翟爱平, 冀莹泽, 等. 光学偏振成像技术的研究、应用与进展[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(9): 20220808.
- [35] Liu X T, Zhai Y W, Fu S Y, et al. Selection of full Poincaré beams with higher robustness in turbulent atmosphere (*Invited*)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2021, **50**(9): 20210242. <https://doi.org/10.3788/IRLA20210242>.
刘雪婷, 翟焱望, 付时尧, 等. 湍流大气中高稳定性全庞加莱球光束模式选择 (特邀)(英文)[J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(9): 20210242. <https://doi.org/10.3788/IRLA20210242>.
- [36] Zhang L, Liang X Z, Lin Q, et al. Research progress of hybrid vector beams (*Invited*)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2021, **50**(9): 20210447.
张莉, 梁信洲, 林倩, 等. 杂化矢量光场的研究进展 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(9): 20210447.
- [37] 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.
- [38] Pors A, Albrektsen O, Radko I P, et al. Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light[J]. *Sci Rep*, 2013, **3**(1): 2155.
- [39] 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.
- [40] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(9): 5319–5325.
- [41] Kim T T, Kim H, Kenney M, et al. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated - graphene metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(1): 1700507.
- [42] Li J, Li J T, Zhang Y T, et al. All-optical switchable terahertz spin-photon devices based on vanadium dioxide integrated metasurfaces[J]. *Opt Commun*, 2020, **460**: 124986.
- [43] Luo X Q, Huang W L, Wang B X, et al. Terahertz graphene metasurfaces antennas for dynamic phase modulation and beam steering[J]. *J Integr Technol*, 2023, **12**(4): 77–90.
罗小青, 黄文礼, 王彬旭, 等. 基于石墨烯超表面天线的太赫兹动态相位调控及波束扫描[J]. *集成技术*, 2023, **12**(4): 77–90.
- [44] Huang J J, Yin X N, Xu M, et al. Switchable coding metasurface for flexible manipulation of terahertz wave based on Dirac semimetal[J]. *Results Phys*, 2022, **33**: 105204.
- [45] Zheng L, Song Z T, Song W X, et al. Fabrication of stable multi-level resistance states in a Nb-doped Ge₂Sb₂Te₅ device[J]. *J Mater Chem C*, 2023, **11**(11): 3770–3777.
- [46] Yu F L, Chen J, Zhao Z Y, et al. A forward calculation method to quickly realize the achromatic metasurface for arbitrary polarization control[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2022, **41**(4): 792–798.
郁菲茱, 陈金, 赵增月, 等. 一种实现任意偏振调控中波红外消色差超表面的正向计算方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(4): 792–798.
- [47] Gao Y H, Tian Y, Du Q G, et al. High efficiency and high transmission asymmetric polarization converter with chiral metasurface in visible and near-infrared[J]. *Chin Phys B*, 2023, **32**(7): 074201.
- [48] Zhang F, Cai J X, Pu M B, et al. Composite-phase manipulation in optical metasurfaces[J]. *Physics*, 2021, **50**(5): 300–307.
张飞, 蔡吉祥, 蒲明博, 等. 光学超构表面中的复合相位调控[J]. *物理*, 2021, **50**(5): 300–307.
- [49] Zhang R Z, Zhang R, Wang Z B, et al. Liquid refractive index sensor based on terahertz metamaterials[J]. *Plasmonics*, 2022, **17**(2): 457–465.
- [50] Li X T, Li Y, Li C, et al. High color saturation and angle-insensitive ultrathin color filter based on effective medium theory[J]. *Chin Opt Lett*, 2023, **21**(3): 033602.
- [51] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proc Roy Soc A: Math, Phys Eng Sci*, 1984, **392**(1802): 45–57.
- [52] Tal M, Haim D B, Ellenbogen T. Geometric phase opens new frontiers in nonlinear frequency conversion of light[J]. *Front Phys*, 2022, **17**(1): 12302.
- [53] Li G X, Chen S M, Pholchai N, et al. Continuous control of the nonlinearity phase for harmonic generations[J]. *Nat Mater*, 2015, **14**(6): 607–612.
- [54] Wen D D, Yue F Y, Li G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 8241.
- [55] Chen S M, Zeuner F, Weismann M, et al. Giant nonlinear optical activity of achiral origin in planar metasurfaces with quadratic and cubic nonlinearities[J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(15): 2992–2999.
- [56] Li G X, Zhang S, Zentgraf T. Nonlinear photonic metasurfaces[J]. *Nat Rev Mater*, 2017, **2**(5): 17010.
- [57] Sun Z Y, Yi Y F, Song T C, et al. Giant nonreciprocal second-harmonic generation from antiferromagnetic bilayer CrI₃[J]. *Nature*, 2019, **572**(7770): 497–501.
- [58] 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.
- [59] Xie X, Pu M B, Jin J J, et al. Generalized Pancharatnam-Berry phase in rotationally symmetric meta-atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, **126**(18): 183902.
- [60] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Sci China Phys, Mech Astron*, 2015, **58**(9): 594201.
- [61] Wang M J, Huang Z J, Salut R, et al. Plasmonic helical nanoantenna as a converter between longitudinal fields and circularly polarized waves[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(8): 3410–3417.
- [62] Shu J, Qiu C Y, Astley V, et al. High-contrast terahertz modulator based on extraordinary transmission through a ring aperture[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(27): 26666–26671.

- [63] Tan Y J, Zhang L, Sun T X, et al. Polarization compensation method based on the wave plate group in phase mismatch for free-space quantum key distribution[J]. *EPJ Quantum Technol*, 2023, **10**(1): 6.
- [64] Lin S T, Le Q H, Chen S H, et al. Heterodyne polariscope for measuring the principal angle and phase retardation of stressed plastic substrates[J]. *Measurement*, 2021, **175**: 109096.
- [65] Chen Q H, Zhou S, Ding J H, et al. Three-dimensional temperature field measurement based on multi-step phase shift method and polarization interference optical tomography optical path[J]. *Acta Opt Sin*, 2022, **42**(7): 0712004.
陈强华, 周胜, 丁锦红, 等. 基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量[J]. *光学学报*, 2022, **42**(7): 0712004.
- [66] Han B W, Li S J, Cao X Y, et al. Dual-band transmissive metasurface with linear to dual-circular polarization conversion simultaneously[J]. *AIP Adv*, 2020, **10**(12): 125025.
- [67] Deng Y D, Wu C, Meng C, et al. Functional metasurface quarter-wave plates for simultaneous polarization conversion and beam steering[J]. *ACS Nano*, 2021, **15**(11): 18532–18540.
- [68] He H J, Tang S W, Zheng Z W, et al. Multifunctional all-dielectric metasurface quarter-wave plates for polarization conversion and wavefront shaping[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(10): 2478–2481.
- [69] Ahmad M, Liu J, Qureshi U U R. Wideband reflective half-and quarter-wave plate metasurface based on multi-plasmon resonances[J]. *Opt Continuum*, 2023, **2**(5): 1242–1255.
- [70] 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.
- [71] Gao S, Zhou C Y, Yue W J, et al. Efficient all-dielectric diatomic metasurface for linear polarization generation and 1-bit phase control[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(12): 14497–14506.
- [72] Ren Y Z, Guo S H, Zhu W Q, et al. Full - stokes polarimetry for visible light enabled by an all - dielectric metasurface[J]. *Adv Photonics Res*, 2022, **3**(7): 2100373.
- [73] Rong Z H, Kuang C F, Fang Y, et al. Super-resolution microscopy based on fluorescence emission difference of cylindrical vector beams[J]. *Opt Commun*, 2015, **354**: 71–78.
- [74] Wang X L, Chen J, Li Y N, et al. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **105**(25): 253602.
- [75] Gu B, Hu Y Q, Zhang X B, et al. Angular momentum separation in focused fractional vector beams for optical manipulation[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(10): 14705–14719.
- [76] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2009, **1**(1): 1–57.
- [77] Segawa S, Kozawa Y, Sato S. Demonstration of subtraction imaging in confocal microscopy with vector beams[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(15): 4529–4532.
- [78] Zhu L, Wang J. A review of multiple optical vortices generation: methods and applications[J]. *Front Optoelectron*, 2019, **12**: 52–68.
- [79] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, **341**(6145): 537–540.
- [80] Jin J J, Pu M B, Wang Y Q, et al. Multi - channel vortex beam generation by simultaneous amplitude and phase modulation with two - dimensional metamaterial[J]. *Adv Mater Technol*, 2017, **2**(2): 1600201.
- [81] Guo Q H, Schlickriede C, Wang D Y, et al. Manipulation of vector beam polarization with geometric metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(13): 14300–14307.
- [82] Ou K, Yu F L, Li G H, et al. Mid-infrared polarization-controlled broadband achromatic metadvice[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(37): eabc0711.
- [83] Kong Q, Gu M N, Zeng X Y, et al. Metasurface of combined semicircular rings with orthogonal slit pairs for generation of dual vector beams[J]. *Nanomaterials*, 2021, **11**(7): 1718.
- [84] Fu P, Ni P N, Wu B, et al. Metasurface enabled on-chip generation and manipulation of vector beams from vertical cavity surface-emitting lasers[J]. *Adv Mater*, 2023, **35**(12): 2204286.
- [85] Shafqat M D, Mahmood N, Akbar J, et al. Broadband multifunctional metasurfaces for concentric perfect vortex beam generation via trigonometric functions[J]. *Opt Mater Express*, 2024, **14**(1): 125–138.
- [86] Wei R, Bao Y J. Metasurface-based multidimensional optical information encryption[J]. *Chin J Lasers*, 2023, **50**(18): 1813004.
魏睿, 包燕军. 基于超构表面的多维光信息加密[J]. *中国激光*, 2023, **50**(18): 1813004.
- [87] 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.
- [88] Deng J, Li Z L, Li J X, et al. Metasurface-assisted optical encryption carrying camouflaged information[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(16): 2200949.
- [89] Liu S L, Wang X H, Ni J C, et al. Optical encryption in the photonic orbital angular momentum dimension via direct-laser-writing 3D chiral metahelices[J]. *Nano Lett*, 2023, **23**(6): 2304–2311.
- [90] Yang H, He P, Ou K, et al. Angular momentum holography via a minimalist metasurface for optical nested encryption[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12**(1): 79.
- [91] 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.
- [92] Guo X Y, Li P, Zhong J Z, et al. Stokes meta-hologram toward optical cryptography[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 6687.
- [93] Ji J T, Chen C, Sun J C, et al. High-dimensional Poincaré beams generated through cascaded metasurfaces for high-security optical encryption[J]. *PhotonIX*, 2024, **5**(1): 13.
- [94] Kakichashvili S D. Method for phase polarization recording of holograms[J]. *Sov J Quantum Electron*, 1974, **4**(6): 795–798.
- [95] Mu Y H, Zheng M Y, Qi J R, et al. A large field-of-view metasurface for complex-amplitude hologram breaking numerical aperture limitation[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(16): 4749–4759.

- [96] Zhao R Z, Huang L L, Wang Y T. Recent advances in multi-dimensional metasurfaces holographic technologies[J]. *Photonix*, 2020, **1**(1): 20.
- [97] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**(1): 95.
- [98] Song Q, Khadir S, Vézian S, et al. Bandwidth-unlimited polarization-maintaining metasurfaces[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(5): eabe1112.
- [99] Zhu L, Wei J X, Dong L, et al. Four-channel meta-hologram enabled by a frequency-multiplexed mono-layered geometric phase metasurface[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(3): 4553–4563.
- [100] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(22): 5453–5469.
- [101] Andreou A G, Kalayjian Z K. Polarization imaging: principles and integrated polarimeters[J]. *IEEE Sens J*, 2002, **2**(6): 566–576.
- [102] Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, et al. Diffractive optical element for Stokes vector measurement with a focal plane array[J]. *Proc SPIE*, 1999, **3754**: 169–177.
- [103] Yang W, Wang X M, Shi L, et al. A dual-camera polarization imaging system based on Stokes vector[J]. *Electron Opt Control*, 2021, **28**(6): 72–75,89.
杨威, 王晓曼, 石林, 等. 基于 Stokes 矢量的双相机偏振成像系统[J]. *电光与控制*, 2021, **28**(6): 72–75,89.
- [104] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. *Science*, 2019, **365**(6448): eaax1839.
- [105] Yan C, Li X, Pu M B, et al. Midinfrared real-time polarization imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 2019, **114**(16): 161904.
- [106] Zhang C, Hu J P, Dong Y G, et al. High efficiency all-dielectric pixelated metasurface for near-infrared full-Stokes polarization detection[J]. *Photonics Res*, 2021, **9**(4): 583–589.
- [107] Cheng B, Song G F. Full-Stokes polarization photodetector based on the hexagonal lattice chiral metasurface[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(19): 30993–31004.
- [108] Park H S, Park J, Son J, et al. A general recipe for nondispersive optical activity in bilayer chiral metamaterials[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(19): 1801729.
- [109] Roberts N W, Chiou T H, Marshall N J, et al. A biological quarter-wave retarder with excellent achromaticity in the visible wavelength region[J]. *Nat Photonics*, 2009, **3**(11): 641–644.
- [110] Basiri A, Chen X H, Bai J, et al. Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements[J]. *Light Sci Appl*, 2019, **8**(1): 78.
- [111] Zuo, J, Bai, J, Choi S et al. Chip-integrated metasurface full-Stokes polarimetric imaging sensor[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **218**(12).
- [112] Vieu C, Carcenac F, Pépin A, et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications[J]. *Appl Surf Sci*, 2000, **164**(1-4): 111–117.
- [113] Qin N, Qian Z G, Zhou C Z, et al. 3D electron-beam writing at sub-15 nm resolution using spider silk as a resist[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 5133.
- [114] Zhu C X, Ekinci H, Pan A X, et al. Electron beam lithography on nonplanar and irregular surfaces[J]. *Microsyst Nanoeng*, 2024, **10**(1): 52.
- [115] Cakirlar C, Galderisi G, Beyer C, et al. Challenges in electron beam lithography of silicon nanostructures[C]//*Proceedings of the IEEE 22nd International Conference on Nanotechnology (NANO)*, 2022: 207–210.
<https://doi.org/10.1109/NANO54668.2022.9928629>.
- [116] Szafraniak B, Fuśnik Ł, Xu J, et al. Semiconducting metal oxides: SrTiO₃, BaTiO₃ and BaSrTiO₃ in gas-sensing applications: a review[J]. *Coatings*, 2021, **11**(2): 185.
- [117] Keskinbora K, Robisch A L, Mayer M, et al. Recent advances in use of atomic layer deposition and focused ion beams for fabrication of Fresnel zone plates for hard x-rays[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8851**: 885119.
- [118] Mayer M, Keskinbora K, Grévent C, et al. Efficient focusing of 8 keV X-rays with multilayer Fresnel zone plates fabricated by atomic layer deposition and focused ion beam milling[J]. *J Synchrotron Radiat*, 2013, **20**(3): 433–440.
- [119] Tseng M L, Lin Z H, Kuo H Y, et al. Stress-induced 3D chiral fractal metasurface for enhanced and stabilized broadband near-field optical chirality[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(15): 1900617.
- [120] Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220183.
许可, 王星儿, 范旭浩, 等. 超表面全息术: 从概念到实现[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220183.
- [121] Zhou W P, Bai S, Xie Z W, et al. Research progress of laser direct writing fabrication of metal and carbon micro/nano structures and devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(1): 210330.
周伟平, 白石, 谢祖武, 等. 激光直写制备金属与碳材料微纳结构与器件研究进展[J]. *光电工程*, 2022, **49**(1): 210330.
- [122] Berzinš J, Indrišiūnas S, Van Erve K, et al. Direct and high-throughput fabrication of mie-resonant metasurfaces via single-pulse laser interference[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(5): 6138–6149.
- [123] Min S Y, Li S J, Zhu Z Y, et al. Ultrasensitive molecular detection by imaging of centimeter-scale metasurfaces with a deterministic gradient geometry[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(29): 2100270.
- [124] Park J S, Zhang S Y, She A L, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(12): 8673–8682.
- [125] Zhang L D, Chang S Y, Chen X, et al. High-efficiency, 80 mm aperture metalens telescope[J]. *Nano Lett*, 2023, **23**(1): 51–57.
- [126] Hu T, Zhong Q Z, Li N X, et al. CMOS-compatible a-Si metalenses on a 12-inch glass wafer for fingerprint imaging[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(4): 823–830.
- [127] Yoon G, Kim K, Kim S U, et al. Printable nanocomposite metalens for high-contrast near-infrared imaging[J]. *ACS Nano*, 2021, **15**(1): 698–706.

- [128] Yoon G, Kim K, Huh D, et al. Single-step manufacturing of hierarchical dielectric metalens in the visible[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 2268.
- [129] Chen M K, Zhang J C, Leung C W, et al. Chiral-magic angle of nanoimprint meta-device[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(13): 2479–2490.
- [130] Hao Z B, He X C, Li H D, et al. Vertically aligned and ordered arrays of 2D MCo_2S_4 @metal with ultrafast ion/electron transport for thickness-independent pseudocapacitive energy storage[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(10): 12719–12731.
- [131] Xia D F, Ye L, Guo X, et al. A dual-curable transfer layer for adhesion enhancement of a multilayer UV-curable nanoimprint resist system[J]. *Appl Phys A*, 2012, **108**(1): 1–6.
- [132] Hu X, Yang T, Gu R H, et al. A degradable polycyclic cross-linker for UV-curing nanoimprint lithography[J]. *J Mater Chem C*, 2014, **2**(10): 1836–1843.
- [133] Qiu S, Ji J W, Sun W, et al. Recent advances in surface manipulation using micro-contact printing for biomedical applications[J]. *Smart Mater Med*, 2021, **2**: 65–73.
- [134] Wu C T, Utsunomiya T, Ichii T, et al. Microstructured SiO_2 /COP stamps for patterning TiO_2 on polymer substrates via microcontact printing[J]. *Langmuir*, 2020, **36**(37): 10933–10940.
- [135] Zhang Y Y, Jiao Y L, Li C Z, et al. Bioinspired micro/nanostructured surfaces prepared by femtosecond laser direct writing for multi-functional applications[J]. *Int J Extrem Manuf*, 2020, **2**(3): 032002.
- [136] Yang S H, Ding C L, Zhu D Z, et al. High-speed two-photon lithography based on femtosecond laser[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(3): 220133.
杨顺华, 丁晨良, 朱大钊, 等. 基于飞秒激光的高速双光子刻写技术[J]. *光电工程*, 2023, **50**(3): 220133.
- [137] Hulst J C, Van Duyn R P. Nanosphere lithography: a materials general fabrication process for periodic particle array surfaces[J]. *J Vac Sci Technol A*, 1995, **13**(3): 1553–1558.
- [138] Gottlieb S, Lorenzoni M, Evangelio L, et al. Thermal scanning probe lithography for the directed self-assembly of block copolymers[J]. *Nanotechnology*, 2017, **28**(17): 175301.
- [139] Jakšić Z, Vasiljević-Radović D, Maksimović M, et al. Nanofabrication of negative refractive index metasurfaces[J]. *Microelectron Eng*, 2006, **83**(4–9): 1786–1791.
- [140] Xu K, Chen J B. High-resolution scanning probe lithography technology: a review[J]. *Appl Nanosci*, 2020, **10**(4): 1013–1022.
- [141] Fan P F, Gao J, Mao H, et al. Scanning probe lithography: state-of-the-art and future perspectives[J]. *Micromachines*, 2022, **13**(2): 228.
- [142] Garcia R, Knoll A W, Riedo E. Advanced scanning probe lithography[J]. *Nat Nanotechnol*, 2014, **9**(8): 577–587.
- [143] Zheng X R, Calò A, Albisetti E, et al. Patterning metal contacts on monolayer MoS_2 with vanishing Schottky barriers using thermal nanolithography[J]. *Nat Electron*, 2019, **2**(1): 17–25.
- [144] Yuan D D, Li J, Huang J X, et al. Large-scale laser nanopatterning of multiband tunable mid-infrared metasurface absorber[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(22): 2200939.
- [145] Huang L Y, Xu K, Yuan D D, et al. Sub-wavelength patterned pulse laser lithography for efficient fabrication of large-area metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 5823.
- [146] Ji W Y, Chang J, Xu H X, et al. Recent advances in metasurface design and quantum optics applications with machine learning, physics-informed neural networks, and topology optimization methods[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12**(1): 169.
- [147] Radford A, Metz L, Chintala S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Learning Representations*, 2016.
- [148] An S S, Fowler C, Zheng B W, et al. A deep learning approach for objective-driven all-dielectric metasurface design[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(12): 3196–3207.
- [149] Liu D J, Tan Y X, Khoram E, et al. Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonic structures[J]. *Acs Photonics*, 2018, **5**(4): 1365–1369.
- [150] An S S, Zheng B W, Shalaginov M Y, et al. A freeform dielectric metasurface modeling approach based on deep neural networks[Z]. arXiv: 2001.00121, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.00121>.
- [151] Mall A, Patil A, Tamboli D, et al. Fast design of plasmonic metasurfaces enabled by deep learning[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2020, **53**(49): 49LT01.
- [152] Zhu D Y, Liu Z C, Raju L, et al. Building multifunctional metasystems via algorithmic construction[J]. *ACS Nano*, 2021, **15**(2): 2318–2326.
- [153] Zhu T F, Guo C, Huang J Y, et al. Topological optical differentiator[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 680.
- [154] Long O Y, Guo C, Wang H W, et al. Isotropic topological second-order spatial differentiator operating in transmission mode[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(13): 3247–3250.
- [155] Feng R, Tian Y K, Liu Y L, et al. Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230172.
冯睿, 田耀恺, 刘亚龙, 等. 拓扑优化超表面的偏振复用光学微分运算[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230172.
- [156] Duan J, Zhang H, Song J Y, et al. Review of polarization image fusion based on deep learning[J]. *Infrared Technol*, 2024, **46**(2): 119–128.
段锦, 张昊, 宋靖远, 等. 深度学习偏振图像融合研究现状[J]. *红外技术*, 2024, **46**(2): 119–128.
- [157] Zhao F, Cheng X M, Feng B, et al. Comparison research of interpolation algorithms for division of focal plane polarization image[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2020, **57**(16): 161014.
赵峰, 程喜萌, 冯斌, 等. 分焦平面偏振图像插值算法的比较研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(16): 161014.
- [158] Li Y C, Yang S, Fu Q, et al. Research on local feature extraction algorithm for polarized images based on deep learning (Invited)[J]. *Electro-Opt Technol Appl*, 2022, **37**(5): 62–69.
李英超, 杨帅, 付强, 等. 基于深度学习的偏振图像局部特征提取算法研究 (特邀)[J]. *光电技术应用*, 2022, **37**(5): 62–69.

[159] Dong Y, Zhang F D, Yao Y, et al. Mueller microscopy for digital pathology[J]. *Sci Sin Vitae*, 2023, 53(4): 480–504.

董洋, 张冯颀, 姚悦, 等. 基于全偏振成像的数字病理方法[J]. *中国科学: 生命科学*, 2023, 53(4): 480–504.

作者简介



王皓萱 (1999-), 女, 陕西宝鸡人, 2021 年于西北工业大学获得工学学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为超表面偏振探测技术。

E-mail: 2022020151@bistu.edu.cn



【通信作者】何彦霖 (1988-), 女, 甘肃天水人, 2011 年于兰州交通大学获得工学学士学位和文学学士 (双学位), 2018 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授、博士生导师, 主要从事红外探测与超表面增强技术、软体手术机器人及光纤传感与机器人智能导航技术等。

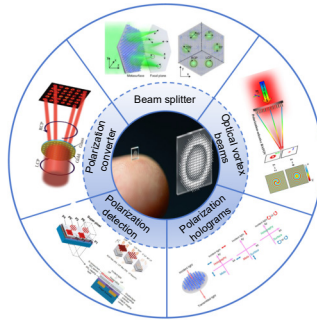
E-mail: heylinlin@bistu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress and prospects of metasurface polarization devices

Wang Haoxuan^{1,2}, He Yanlin^{1,2*}, Zhu Hangwei^{1,2,3}, Dong Hang^{1,2}, Wang Shuning^{1,2}



Schematic of a metasurface polarization application

Overview: Polarization devices are significant optical components in polarized optical systems such as optical information processing, optical measurement, polarization detection, and communication. Traditional polarizers rely on the birefringence effect of natural crystals or the polarization selectivity of multilayer film structures, which requires accumulated optical path differences to achieve phase control. The inherent characteristics of the former necessitate significant thickness to separate the two polarization states, while the latter, as an alternative, significantly reduces thickness but involves a complex manufacturing process and offers high extinction ratios only within narrow bands and at small incident angles. These defects greatly restrict the development and application of these polarizers. Metasurface, as a novel type of optical field modulator, is generally composed of sub-wavelength meta-atom arrays. It can introduce phase discontinuities and enable precise control of the polarization state of incident light. Metasurface polarization devices meet the quality of the optical field and have the advantages of small size, lightweight, high design freedom, and tunable bandwidth, unveiling fascinating approaches to develop the next-generation on-chip polarization devices. In this paper, the basic process of designing metasurface polarization devices is discussed. Furthermore, four different meta-atom polarization modulation methods are introduced. As the basic units of metasurfaces, the polarization characteristics of meta-atoms are crucial for designing metasurfaces with specific polarization responses. Besides, common homogeneous polarization states and more complex types such as radial vector beams and azimuthal vector beams are introduced, which have unique advantages and application value in fields such as optical communication and microscopy imaging. Then, the research progress of different polarization devices is discussed in detail. Finally, the metasurface fabrication technologies are discussed. Overall, this review presents the principle, development, and fabrication in an all-around way, focusing on the various applications of metasurface polarizers in planar optical devices, and puts forward the existing problems and possible solutions in the design and processing of metasurface polarization devices.

Wang H X, He Y L, Zhu H W, et al. Research progress and prospects of metasurface polarization devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240095; DOI: [10.12086/oe.2024.240095](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240095)

Foundation item: Project supported by National Key R&D Program of China (2020VFA0711200)

¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; ²Guangzhou Nansha Intelligent Photonics Sensing Research Institute, Guangzhou, Guangdong 511462, China; ³School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China

* E-mail: heylin@bistu.edu.cn