

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260169.

专题:2025全国硕博士光通信菁英论坛

孙硕,陈亮,李进.超表面光场调控技术及应用[J].光通信研究,2026(5):1-11.

Sun S, Chen L, Li J. Metasurface-based Optical Field Manipulation Technologies and Applications[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):1-11.

超表面光场调控技术及应用(特邀)

孙 硕¹, 陈 亮¹, 李 进²

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:超表面由亚波长人工微纳结构在二维平面上排布而成,能够通过局域散射、共振耦合、几何相位、传播相位和非局域响应等机制,对光场的相位、振幅、偏振、频率、轨道角动量及传播模式进行精确调控。与传统光学元件依赖体相器件的传播相位积累不同,超表面可在纳米级厚度的界面上实现复杂波前重构,具有超薄、轻量、易集成和多功能复用等优势。近年来,随着高效率介质超表面、宽带消色差超透镜、复振幅全息、超表面光场成像、动态可重构器件和智能逆向设计方法的发展,超表面光场调控技术已从基础波前操控逐渐拓展至成像、显示、传感、通信、隐身和光计算等多个领域。文章围绕超表面光场调控的物理机制、设计方法、关键技术及典型应用展开综述,以光场多维自由度调控为主线,重点评述代表性研究工作在相位突变、高效率介质平台、色散工程、多维复用、光场成像、增强现实显示、动态全息和精密传感等方面的进展,并梳理了不同物理机制、设计策略与功能应用之间的内在联系,分析了该领域在效率、带宽、视场、制造、动态调控和系统集成方面面临的挑战。最后,对超表面光场调控技术在智能设计、可编程平面光学、计算成像和光电融合系统中的发展趋势进行了展望。

关键词:超表面;光场调控;成像;全息显示;可重构光学

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Metasurface-based Optical Field Manipulation Technologies and Applications

SUN Shuo¹, CHEN Liang¹, LI Jin²

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Metasurfaces are composed of subwavelength artificial micro- and nanostructures arranged on a two-dimensional plane. Through mechanisms such as local scattering, resonant coupling, geometric phase, propagation phase, and nonlocal responses, metasurfaces enable precise control over the phase, amplitude, polarization, frequency, orbital angular momentum, and propagation modes of optical fields. Unlike conventional optical elements, which rely on propagation-phase accumulation in bulk media, metasurfaces can realize complex wavefront reconstruction at interfaces with nanoscale thickness, offering advantages including ultrathin form factors, lightweight architectures, ease of integration, and multifunctional multiplexing. In recent years, driven by advances in high-efficiency dielectric metasurfaces, broadband achromatic metalenses, complex-amplitude holography, metasurface-based light-field imaging, dynamically reconfigurable devices, and intelligent inverse-design methodologies, metasurface-enabled optical field manipulation has evolved from fundamental wavefront control toward a broad range of applications, including imaging, display, sensing, communication, cloaking, and optical computing. This review focuses on the physical mechanisms, design methodologies, enabling technologies, and representative applications of metasurface-based optical field manipulation. Centered on the multidimensional control of optical-field degrees of freedom, it critically examines representative advances in abrupt phase modulation, high-efficiency dielectric platforms, dispersion engineering, multidimensional multiplexing, optical-field imaging, augmented-reality displays, dynamic holography, and precision sensing. It further elucidates the intrinsic relationships among different physical mechanisms, design strategies, and functional applications. Moreover, it analyzes the key challenges in terms of efficiency, bandwidth, field of view, fabrication, dynamic tunability, and system-level integration. Finally, future trends in metasurface-enabled optical field manipulation are discussed, with particular emphasis on intelligent design, programmable planar optics, computational imaging, and optoelectronic integrated systems.

Key words: metasurface; optical field manipulation; imaging; holographic display; reconfigurable optics

0 引言

光场调控是现代光学与光子学研究中的核心问题之一,其本质是在空间、时间、频率、偏振和相干性

等多个维度上控制光的传播、聚焦、干涉、成像与信息承载方式^[1-3]。传统光学系统通常依赖透镜、棱镜、波片、偏振片、光栅和空间光调制器等体相器件实现波前变换,往往需要一定厚度或传播距离来积

收稿日期:2026-06-29; 修回日期:2026-07-28; 纸质出版日期:2026-10-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFE0207700);国家自然科学基金资助项目(62575265, 62075205);国家创新中心开放基金资助项目(GFMTIC2025C05);浙江省重点研发计划资助项目(2026C02A1230, 2024C01078, 2024C01126, 2025C02040)

作者简介:孙硕(1996—),男,河北唐山人。特聘副研究员,博士,主要研究方向为超表面光场调控技术及应用。

通信作者:孙硕,特聘副研究员。E-mail:shuosun96@cjlu.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

累相位差。因此,在高性能成像、三维显示、光学传感、自由空间通信和光计算等应用中,传统光学方案常面临系统体积大、重量大、装调复杂、功能分散和集成度不足等问题。

超表面作为二维形式的人工电磁材料,为光场调控提供了新的物理平台。其基本思想是在亚波长尺度上设计纳米天线、介质柱、孔阵列或复合谐振结构,使入射光在界面处获得预设的相位、振幅、偏振和频谱响应。相位突变与广义斯涅尔定律的提出,使异常折射、异常反射和任意波前重构能够通过亚波长界面实现^[4]。随后,超表面全息、高效率介质超表面、可见光超透镜和宽带消色差超透镜等成果相继出现,推动超表面从基础物理概念发展为平面光学器件平台^[5-11]。

从光场调控的角度看,超表面的价值不仅在于减小光学元件的厚度和重量,更在于其能够在单个平面内集成多个光学自由度^[12-13]。通过调节纳米结构的几何形貌、取向角度、材料组成、排列周期和空间编码方式,超表面可以协同调控相位、振幅、偏振、频率、轨道角动量和空间模式,从而实现传统分立光学系统难以完成的多通道复用与多功能集成^[14-15]。近年来,相关研究已从单一波前调控元件逐渐拓展到光学编码、信息采样、动态显示、精密测量和自由空间计算等系统级平台。

尽管超表面光场调控技术已取得显著进展,其实际应用仍面临一系列挑战。高效率、宽带宽、大视场、高数值孔径和偏振鲁棒性之间存在复杂权衡;大面积、高一致性和低成本制造仍是产业化的重要瓶颈;动态可重构超表面在调制速度、调制深度、像素寻址和长期稳定性方面仍需突破;面向真实光学系统的封装、可靠性、标准化测试和算法协同设计也尚未完全成熟。因此,有必要系统梳理超表面光场调控技术的发展脉络,分析其关键物理机制、代表性工作、应用前景和未来挑战,为下一代平面光学系统的发展提供参考。

1 超表面光场调控的物理基础

1.1 相位突变与广义折射反射

相位是光场调控中最基本的自由度之一。传统折射和反射过程通常服从经典斯涅尔定律,而当界面处存在空间变化的附加相位时,入射光与出射光之间的横向动量守恒关系将被重新定义。Yu 等人通过在硅基底上排布 V 形金属天线,在界面上引入空间非均匀相位突变,实验实现了异常折射和异常

反射,并提出了广义斯涅尔定律^[4]:

$$n_i \sin \theta_i - n_t \sin \theta_t = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx}, \quad (1)$$

式中: n_i 和 n_t 分别为入射、透射介质的折射率; θ_i 为入射角,指入射光传播方向与界面法线之间的夹角; θ_t 为透射角/折射角,指透射(折射)光传播方向与界面法线之间的夹角; λ_0 为工作波长; $\Phi(x)$ 为在界面位置 x 处产生的相位突变。该工作证明,亚波长界面不仅可以改变光束传播方向,还可以作为二维波前变换器重构出射光场,为后续超透镜、光束偏转器、涡旋光发生器和超表面全息奠定了理论基础。

基于相位梯度的调控方式具有设计直观、器件超薄和功能灵活等优点,但早期金属等离激元超表面普遍存在欧姆损耗较高、透射效率有限和工作带宽受限等问题。因此,如何在实现完整 $0 \sim 2\pi$ 相位覆盖的同时提高效率,成为超表面从物理演示走向实际应用的关键问题。

1.2 几何相位与偏振相关调控

几何相位又称 Pancharatnam-Berry 相位,通常通过旋转各向异性纳米结构实现,纳米结构旋转角度 θ ,将产生 $\Phi=2\theta$ 的相位差。Huang 等人利用空间旋转的金属纳米棒阵列实现三维光学全息,证明 θ 可直接映射为圆偏振光条件下的几何相位,从而在二维平面上编码复杂三维波前,如图 1 所示^[5]。该工作使超表面全息从简单波束偏折拓展到复杂图像重构,并展示了几何相位在全息显示和光学信息编码中的潜力。

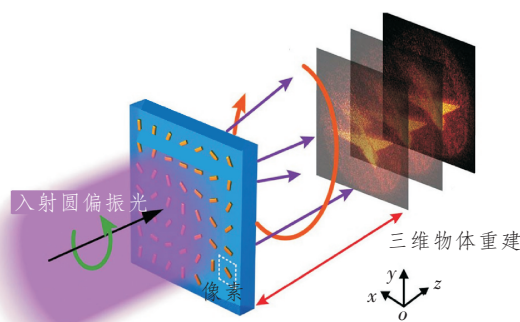


图 1 基于几何相位超表面的三维全息^[5]

Figure 1 Three-dimensional holography based on Pancharatnam-Berry phase metasurfaces^[5]

Zheng 等人进一步采用介质超表面实现高效率全息,报道了效率可达 80% 的超表面全息器件^[6]。与等离激元结构相比,介质结构显著降低了材料吸收损耗,使几何相位超表面在可见光全息、光学防伪和多通道信息复用中更具实用价值。几何相位方法

的优势在于相位覆盖范围完整且设计方式简单,但其通常依赖特定圆偏振输入,且共偏振和交叉偏振通道之间的能量分配会影响系统效率。

1.3 介质超表面与高效率波前调控

为克服金属结构损耗问题,全介质超表面逐渐成为高效率光场调控的重要平台。Arbabi 等人利用高对比度介质椭圆纳米柱构建透射型超表面,实现了亚波长空间分辨率下的相位和偏振完整调控^[8]。该工作通过改变纳米柱几何尺寸和取向角度,使单个结构单元能够等效实现局域琼斯矩阵调控,为高效率偏振器件、波前调制器和矢量光场发生器提供了通用设计方法。

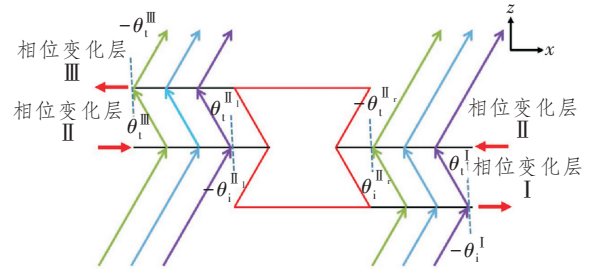
Khorasaninejad 等人采用二氧化钛(TiO_2)纳米鳍阵列实现可见光波段超透镜,在 405、532 和 660 nm 等波长下实现了衍射极限聚焦和亚波长分辨成像^[9]。该工作的重要意义在于,其证明了超表面不仅能够产生预设波前,而且能够承担实际成像系统中的核心聚焦功能。与传统透镜相比,超透镜厚度可降至亚微米量级,因而在微型显微镜、内窥镜、片上成像和轻量化光学系统中具有重要应用前景。

1.4 色散工程与宽带消色差

色散是限制超表面成像性能的重要因素。由于超透镜本质上具有衍射光学特征,其焦距通常随波长变化而改变,导致白光成像中出现明显色差。Chen 等人通过同时设计纳米结构的相位、群延迟和群延迟色散,在 470~670 nm 可见光范围内实现了宽带消色差聚焦和成像^[11]。该工作表明,宽带消色差超表面不仅需要满足单波长下的相位匹配,还需要在不同波长下精确控制群延迟,使多色光能够在同一焦面重合。

除成像系统外,色散工程也被拓展到隐身和散射调控场景。Sun 等人基于全介质结构提出斜入射消色差隐身超表面,通过同时调控单元结构的相位梯度和线性色散,使不同频率的入射波在斜入射条件下绕过目标区域并以相同偏折角传播,从而降低色差对隐身器件的影响,如图 2 所示^[16]。该研究表明,消色差设计并不局限于超透镜,也可服务于宽带隐身和散射调控等应用。

综上,超表面对光场的调控本质上源于亚波长结构对入射电磁波局域响应、相位积累、共振耦合及非局域相互作用的综合调制。不同物理机制为相位、振幅、偏振、频率及传播模式等光场自由度的调控提供了基础支撑。基于上述物理基础,如何进一步将这些调控机制转化为可实现、可优化和可集成



注:下标 i 代表入射端;下标 t 代表出射端;I、II、III 代表不同相位变化层;下标 l 和 r 分别代表左侧和右侧。

图 2 基于宽带消色差超表面的斜入射隐身器^[16]

Figure 2 Oblique-incidence stealth device based on broadband achromatic metasurface^[16]

的器件结构,成为超表面光场调控研究中的关键问题。因此,下一章将围绕超表面的设计方法展开讨论,重点介绍从经验设计、单元库构建到逆向优化和智能设计的发展过程。

2 超表面设计方法

2.1 单元库设计方法

单元库设计是超表面研究中最常用的正向设计方法。该方法通常先利用有限差分频域法、有限元法或严格耦合波分析,对不同几何参数的纳米结构进行全波仿真,获得其透射或反射相位、振幅和偏振响应;随后根据目标光场分布,在空间不同位置选取最接近目标响应的单元结构。Khorasaninejad 等人的可见光超透镜和 Chen 等人的消色差超透镜均采用了以物理模型和参数扫描为基础的设计思路^[9,11]。

单元库方法具有物理图像清晰、实现门槛较低和设计流程成熟等优点,适用于透镜、光束偏转器、偏振转换器和简单全息器件。但该方法通常依赖局域周期近似,即假设每个结构单元处于周期性阵列环境中,忽略相邻不同单元之间的近场耦合。当器件具有高数值孔径、大相位梯度、多波长复用或复杂振幅调控需求时,局域周期近似可能导致实际响应偏离设计目标。

2.2 逆向设计与智能优化

随着超表面功能复杂度的增长,传统单元库方法难以有效处理多目标、多约束和高维参数空间问题。在逆向设计中,研究者不再从给定结构出发预测光学响应,而是直接给定目标光场、光谱或系统任务,通过优化算法反推出满足要求的纳米结构。该思路尤其适合处理多波长、多偏振、多角度和多通道复用等复杂约束条件。

机器学习方法主要包括两类。一类是正向预测模型,即利用神经网络学习结构参数与光学响应之间的映射,以替代耗时的全波仿真;另一类是逆向生成模型,即由目标响应直接生成候选结构。拓扑优化和伴随优化则能够在连续材料分布空间中搜索最优结构,适用于非规则几何、非局域耦合和多波长多角度设计。未来,超表面设计将越来越多地依赖物理约束与数据驱动方法的结合,以实现可制造、高效率和高鲁棒性的器件设计。

2.3 端到端系统协同设计

传统超表面设计通常以单个器件性能为优化目标,例如聚焦效率、相位误差或全息重构质量。然而,在实际应用中,最终性能往往由光学器件、传感器、显示芯片、重建算法、照明系统和封装结构共同决定。因此,端到端协同设计逐渐成为超表面系统研究的重要趋势。

Gopakumar 等人将逆向设计的全彩超表面波导光栅、紧凑色散补偿波导结构和人工智能(Artificial Intelligence, AI)驱动的全息算法结合,实现了全彩三维增强现实显示系统,如图3所示^[17]。该工作说明,超表面不应仅被视为孤立光学元件,而应作为计算显示系统中的可设计物理层,与算法和系统结构共同优化。类似思想也适用于超表面光场成像、计算显微和光学神经网络等方向,即通过联合优化

光学编码层和数字重建层,实现单个器件优化无法达到的系统性能。

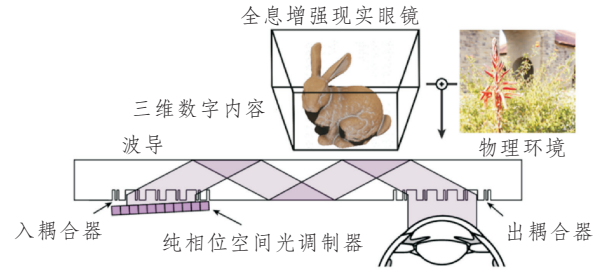


图3 基于逆向设计超表面的全彩三维增强现实显示系统^[17]

Figure 3 Full-color three-dimensional augmented reality display system based on inverse-designed metasurfaces^[17]

本章围绕超表面光场调控的设计方法进行了梳理,介绍了基于物理模型、参数扫描、相位匹配、优化算法及智能逆向设计等不同设计思路,如表1所示。这些方法在一定程度上实现了从物理机制到功能器件的转化,使超表面能够根据特定需求实现波前整形、聚焦、成像、全息和复用等功能。然而,随着应用需求的不断拓展,超表面调控目标已不再局限于单一光场参数,而是逐渐向多个自由度的协同调控发展。因此,下一章将进一步讨论超表面在相位、振幅、偏振、频率、轨道角动量及空间模式等多维光场自由度调控方面的研究进展。

表1 超表面主要设计方法的对比

Table 1 Comparison of major design methodologies for metasurfaces

设计方法	设计思想	适用场景	计算成本	主要优势	主要局限
单元库设计	预先扫描单元几何参数,建立相位/振幅/偏振响应库,再按目标光场逐点匹配	透镜、偏折器、简单全息和偏振转换器等局域响应占主导的器件	中等;前期参数扫描耗时,器件级设计较快	物理模型清晰、实现门槛低和工艺兼容性较好	依赖局域周期近似,难处理强耦合、高NA和多目标约束
拓扑/伴随优化	以目标函数为导向,在连续材料分布或大量自由参数空间中自动搜索最优结构	非规则结构、多波长多角度器件、强耦合或非局域响应器件	较高;通常需要多轮场求解和梯度计算	可突破人工经验限制,适合高维多目标优化	大面积计算规模仍是难点
机器学习预测/生成	利用神经网络学习结构-响应映射,或由目标响应生成候选结构	快速单元筛选、光谱响应设计和多目标候选结构生成	训练阶段较高,推理阶段较低	可显著加速设计搜索,并处理逆问题非唯一性	依赖高质量训练数据,外推能力和物理一致性需验证
端到端协同设计	将超表面、光源、传感器、波导、显示芯片和算法作为整体共同优化	计算成像、近眼显示、光场相机、光计算和复杂传感系统	高;涉及光学仿真、算法训练和系统级评价	直接面向最终任务指标,能突破单器件优化上限	系统模型复杂,实验标定、制造误差和算法泛化能力要求高

注:NA为数值孔径。

3 多维光场调控技术

3.1 振幅—相位协同调控

相位调控可以实现聚焦、偏折和波前整形,但对于高保真全息、复杂模式变换和模拟光计算,仅有相位调控往往不足以完整定义目标光场。Overvig 等人提出了基于介质超表面的振幅与相位独立调控方法,通过改变单元结构的形状双折射和旋转角度,实现了光场复振幅的完整编码^[18]。该工作展示了二维和三维全息图像生成,并指出复振幅调控可避免传统相位型全息中常见的迭代优化、散斑噪声和伪影问题。

除超表面结构本身的复振幅编码外,入射光场均匀性也会显著影响全息重构质量。Sun 等人提出利用主动波前整形产生超均匀平顶光束,并将其用于照明超表面全息器件,从而降低图像边缘噪声并提升全息图像亮度均匀性^[19]。该研究提示,高保真超表面全息不仅需要优化纳米结构相位分布,也需要关注光源形态、照明均匀性和系统误差补偿。

3.2 偏振与矢量光场调控

偏振是光场的重要矢量自由度。各向异性超表面可以通过控制正交偏振分量之间的相位差和振幅比,实现偏振旋转、圆偏振转换、椭圆偏振产生和空间变偏振光场构造。Arbabi 等人提出的介质超表面能够对相位和偏振进行联合调控,为局域琼斯矩阵设计提供了重要实验基础^[8]。

基于偏振调控的超表面可以产生径向偏振、方位角偏振、Poincaré 光束和矢量涡旋光束。这类矢量光场在高分辨显微、激光加工、光镊操控、手性传感和量子信息中具有重要价值。与传统由多片波片和偏振器组合而成的系统相比,超表面可将偏振变换、相位调制和空间模式转换集成到单片平面器件中,显著提升系统紧凑性和稳定性。

3.3 频谱与色散调控

超表面可通过谐振响应、结构色、群延迟调控和多波长编码实现频谱维度上的光场调控。Chen 等

人提出的宽带消色差超透镜证明,纳米结构不仅可以提供目标相位,还可以设计所需群延迟,从而补偿不同波长之间的焦距差异^[11]。这一思路使超表面具备从单色光学元件向宽带成像器件发展的可能。

在多波长复用方面,不同波长可被设计为不同功能通道。例如,同一超表面在红、绿、蓝 3 个颜色通道下可生成不同全息图像,或在不同波长下实现聚焦、偏折和模式转换等不同功能。频谱自由度的引入显著提高了超表面的信息容量,但也增加了设计难度,因为不同波长下的相位、振幅和效率需要同时满足目标要求。

3.4 轨道角动量与结构光场调控

结构光场是指振幅、相位或偏振在横向空间呈现非均匀分布的光场。携带轨道角动量的涡旋光束具有螺旋相位波前和中心相位奇点,是结构光研究中的重要类型。超表面可以在亚波长尺度上直接编码螺旋相位,因此适用于产生、复用和检测轨道角动量光束。

与传统螺旋相位板和空间光调制器相比,超表面结构光器件具有厚度小、稳定性高、易阵列化和可多通道复用等优势。通过结合几何相位和传播相位,超表面可实现自旋—轨道角动量耦合、偏振复用涡旋光束产生和多模态光通信。结构光调控还可用于光镊操控、超分辨显微、材料加工和高维量子态编码等场景。

综上,超表面光场调控已由早期以相位调控为主的单一功能实现,逐渐发展为面向多自由度、多通道和多功能复用的综合调控体系。通过对振幅、相位、偏振、频率、轨道角动量和传播模式等维度的协同设计,超表面为复杂光场构建和高集成光学功能实现提供了重要平台,如表 2 所示。这些多维调控能力不仅拓展了超表面的物理内涵,也为其在实际系统中的应用奠定了基础。基于此,下一章将从典型应用角度出发,进一步讨论超表面光场调控技术在成像、显示、传感、通信及光计算等领域中的功能实现与应用价值。

表 2 超表面光场调控自由度及其耦合机制对比

Table 2 Comparison of optical-field degrees of freedom and coupling mechanisms in metasurfaces

调控自由度	主要控制变量	典型耦合机制	可实现功能	关键限制
相位	单元尺寸 取向角 空间位置	相位梯度引入横向动量； 传播相位与有效折射率 耦合	聚焦 偏折 波前整形 全息	高 NA 和大相位梯度 下易受近场耦合影响
振幅—相位	结构双折射 偏振投影 透射率	通过偏振分解或复振幅编 码同时设定场强和相位	低散斑全息 模式变换 模拟光计算	结构参数空间大,制备 误差会引入伪影
偏振	各向异性轴向 手性结构 琼斯矩阵	自旋选择性、交叉偏振转 换和局域琼斯矩阵调控	矢量光束 偏振成像 手性传感	偏振依赖和通道串扰 需控制
频谱/色散	谐振频率 群延迟 材料色散	相位对频率的导数决定群 延迟和消色差性能	白光聚焦 光谱探测 多波长复用	宽带效率、大面积加工 和多波长串扰存在权衡
轨道角动量/空间模式	螺旋相位 模式基 空间编码	自旋—轨道耦合和模式正 交复用	轨道角动量通信 光镊 量子态编码	模式纯度、对准误差和 通道串扰限制容量
动态响应	液晶取向 相变状态 电控像素 照明模式	材料折射率或系统输入场 随外场变化	动态全息 自适应成像 波束扫描	调制速度、深度、功耗 和稳定性难以同时最优

4 超表面光场调控的典型应用

4.1 超透镜与平面成像

超透镜是超表面光场调控最具代表性的应用之一。Khorasaninejad 等人报道的可见光超透镜实现了衍射极限聚焦和亚波长分辨成像,证明平面超表面能够承担传统透镜的聚焦功能^[9];Chen 等人进一步通过色散工程实现宽带消色差超透镜,使超表面成像从单色场景拓展到白光成像场景^[11]。

超透镜在微型显微镜、内窥镜、片上成像、红外探测和轻量化光学系统中具有广阔应用前景。其优势在于厚度薄、重量轻、可与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal - Oxide - Semiconductor, CMOS)图像传感器直接集成,并可同时引入偏振、光谱或深度信息编码。然而,超透镜仍面临大口径加工、高数值孔径像差控制、宽视场成像和杂散光抑制等问题。实际应用中,超透镜更可能作为像差校正层、功能编码层或紧凑聚焦层,与传统透镜和计算成像算法协同工作。

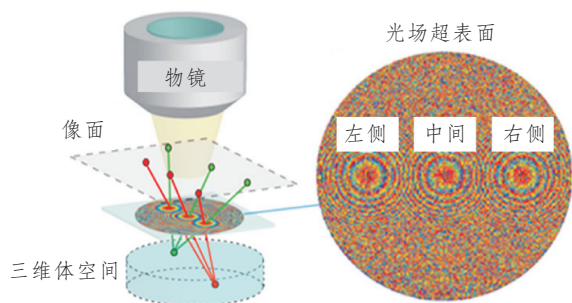
4.2 超表面光场成像与三维感知

光场成像通过同时记录光线的空间位置和传播方向,来实现数字重聚焦、深度估计和三维重建。传

统光场相机通常依赖微透镜阵列,但存在空间分辨率和角度分辨率之间的权衡。Lin 等人利用氮化镓(Gallium Nitride, GaN)纳米天线构建消色差超透镜阵列,实现全彩光场成像和后期重聚焦^[20]。该工作说明,超透镜阵列能够替代传统微透镜阵列,并在消色差和微型化方面具有优势。

Holsteen 等人提出超表面用于高分辨单粒子三维跟踪,在常规荧光显微系统中加入多功能超表面,实现了荧光颗粒三维位置的高精度估计,如图 4 所示^[21];Fan 等人受三叶虫复眼结构启发,构建自旋复用双焦超透镜阵列,并结合神经网络重建,实现了极大景深的纳米光子光场相机^[22]。这些工作表明,超表面光场成像不仅能够压缩光学系统体积,还可以通过多焦点、偏振复用和算法重建提升三维感知能力。

未来超表面光场成像的核心不只是设计更小的透镜阵列,而是要在光学编码、传感器采样和计算重建之间建立协同优化机制。随着传感器像元尺寸的减小和重建算法的发展,超表面光场相机有望在微型内窥、显微成像、机器人视觉和三维感知中发挥更大作用。

图4 超表面三维显微成像^[21]Figure 4 Metasurface-based three-dimensional microscopic imaging^[21]

4.3 超表面全息与近眼显示

超表面全息利用亚波长像素编码目标波前,具有空间带宽积高、器件厚度小和多通道复用能力强等特点。Huang 等人利用几何相位超表面实现三维光学全息,证明超表面可在平面内重构复杂三维光场^[5];Zheng 等人随后实现高效率超表面全息,将超表面全息效率提升至实用化更有希望的水平^[6];Overvig 等人通过振幅-相位独立调控进一步提高全息图像质量,为低伪影和高保真全息提供了新的设计路径^[18]。

面向真实三维显示,传统超表面全息往往在算法复杂度、图像质量、结构复杂度和串扰抑制之间存在权衡。Sun 等人提出多层全息透镜集成超表面,将全息透镜计算与非晶硅(a-Si)纳米柱超表面结构结合,实现了高效率、宽带和低串扰的三维全息重构^[23]。该工作将超表面全息从单层二维图像编码推进到多深度三维信息加载,为高空间带宽积全息显示提供了新的器件架构。

在近眼显示和增强现实方向,Gopakumar 等人将逆向设计超表面波导与 AI 全息算法结合,实现了紧凑型全彩三维增强现实显示系统^[17]。该工作表明,超表面在显示系统中的作用已经从单一全息片扩展到波导耦合、色散补偿、三维图像重构和系统小型化等多个层面。未来,超表面显示技术的发展将依赖全彩效率、视场角、眼盒尺寸、动态刷新能力和制造一致性的综合提升。

4.4 光学传感与光谱偏振探测

超表面对偏振态、入射角、频率和环境折射率变化高度敏感,因此适用于偏振成像、光谱检测、生物传感和手性分子识别。Arbabi 等人的介质超表面展示了相位和偏振的联合调控能力,为超紧凑偏振分析器和偏振复用器件提供了基础^[8]。在偏振成像中,超表面可将不同偏振分量分束到不同探测区域,

从而在单次曝光中获得偏振信息。

在原子磁力计等精密测量系统中,超表面也可作为紧凑型偏振和相位调控模块。Zhang 等人提出基于相位梯度超表面的椭圆偏振光泵原子磁力计,利用手性分束超表面实现原子自旋手性探测,将泵浦与探测功能集成于单光束架构中,从而实现了更紧凑的偏振调控和高灵敏磁场探测^[24];Sun 等人提出基于自旋解耦超表面的双向泵浦原子磁力计,通过预设相位分布产生不同手性的圆偏振光和线偏振光,实现对光泵浦过程的空间调控,从而提升光泵原子磁力计的偏振控制能力^[25]。这些工作说明,超表面不仅可用于常规成像和显示,也能够嵌入量子精密测量系统,用于压缩光路体积和提高光场调控精度。

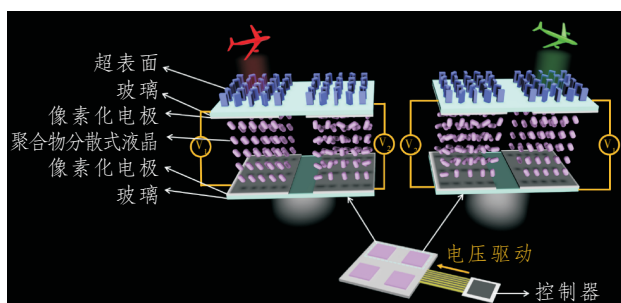
在光谱探测中,超表面滤波阵列可与计算重建算法结合,实现快照式多光谱或高光谱成像。与传统光谱仪相比,超表面光谱器件具有体积小、无需扫描和易集成等优势。未来,超表面传感器若与 CMOS 图像传感器、片上光源、微流控芯片和机器学习识别算法结合,有望形成便携式、多模态和智能化的检测平台。

4.5 可重构光场调控与动态器件

静态超表面一旦加工完成,其光学功能通常固定,难以满足动态显示、自适应成像、波束扫描和可编程计算等需求。液晶、相变材料、透明导电氧化物、二维材料、铁磁流体和微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)均可用于实现可调超表面,但不同方案在调制速度、调制深度、损耗、功耗和寿命方面各有局限。

液晶集成是实现可调超表面的重要路线之一。Hu 等人将液晶与偏振依赖超表面集成,在可见光范围内实现电控多功能偏振调控,为低电压和可重构超表面器件提供了实验基础^[26];进一步地,Sun 等人将聚合物分散式液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC)与宽带超表面级联,利用 PDLC 液滴在电控条件下的散射态变化,实现快速响应、高对比度和连续调节的动态三维全息显示,如图 5 所示^[27]。该方法将传统静态超表面与可电控光学材料结合,为动态超表面全息提供了不同于单纯改变纳米结构本身的调控路径。

除液晶辅助调控外,相变材料和流体材料也为动态超表面显示提供了新的自由度。Cotrufo 等人利用相变材料实现可重构图像处理超表面,展示了通过温度调控改变空间频率响应,从而实现了图像边缘检测等功能切换^[28];Sun 等人提出铁磁流体辅



注: V_1 和 V_2 分别为电压 1 和电压 2。

图 5 液晶集成超表面的动态三维全息显示^[27]

Figure 5 Dynamic three-dimensional holographic display based on liquid-crystal-integrated metasurface^[27]

助动态超表面三维全息方法,实现了快速、线性且高对比度的颜色调制^[29]。这些工作体现了外场响应材料与超表面全息结合的潜力,说明动态调控可以通过改变照明、传播介质或外场环境实现,而不必完全依赖复杂的纳米像素独立寻址。

在像素级可寻址动态调控方面,Li 等人提出电控数字超表面器件,使每个超表面像素具备可编程和可寻址能力,并实现了动态全息图案切换^[30];与材料调制路线不同,Sun 等人从系统照明端切入,利用数字微镜器件将入射高斯光转换为平顶光束,并结合全空间复用超表面实现基于任意空间选择的动态三维全息显示^[31]。这些工作共同表明,动态超表面显示既可以依赖主动材料,也可以通过“静态超表面+可控照明+主动空间选择”的系统架构实现功能拓展。

4.6 自由空间光计算

自由空间光计算利用光传播的天然并行性,在光学域中完成数学运算、图像处理和机器学习任务。超表面在该方向中的优势在于能够以亚波长分辨率设计空间频率传递函数,从而实现微分、边缘增强、卷积和模式分类等功能。

与传统电子计算相比,光计算具有高并行度、低延迟和潜在低功耗优势,但也面临计算精度、噪声鲁棒性、动态可编程能力和系统标定等挑战。Cotrufo 等人的可重构图像处理超表面表明,相变材料、主动调控和空间频率工程相结合,有望推动超表面光计算从静态单任务处理走向动态多任务处理^[28]。未来,超表面光计算将更强调器件响应、输入光场、探测器采样和电子后处理之间的协同优化。

本章从多个典型应用场景出发,梳理了超表面光场调控技术在成像、显示、全息、传感、通信、隐身及光计算等方向的研究进展。可见超表面凭借超薄结构、多自由度调控和易于集成等优势,已在多种光

学系统中展现出重要应用潜力。同时,实际应用也对器件效率、工作带宽、视场范围、动态调控能力、加工一致性和系统集成水平提出了更高要求。因此,在展示应用前景的基础上,有必要进一步分析当前超表面光场调控技术仍面临的关键问题与发展瓶颈,下一章将围绕这些挑战展开讨论。

5 关键挑战

5.1 性能指标之间的权衡

超表面器件通常需要在效率、带宽、视场、数值孔径、偏振鲁棒性和制造容差之间进行权衡。高数值孔径超透镜需要实现剧烈的空间相位变化,容易引入相邻单元间的耦合误差;宽带消色差设计需要同时控制相位和群延迟,增加了结构复杂度;宽视场成像则要求器件在大角度入射下仍保持稳定响应。如何在多指标之间实现系统级优化,是超表面走向实际应用的核心问题。在具体应用中,这种权衡具有不同表现形式:近眼显示和增强现实系统需要同时兼顾效率、视场、眼盒范围以及色彩一致性。光场成像与计算成像系统更关注空间带宽积、视角采样密度、信噪比和重建复杂度。全息显示则需要在低散斑、高亮度、大视角和动态刷新之间取得平衡。因此,超表面优化不能仅面向单一器件参数,而应结合具体应用场景建立系统级性能评价目标。

5.2 大面积制造与工艺一致性

实验室中的超表面样品通常依赖电子束光刻制备,具有高精度但成本高、效率低的特点。面向产业化应用,超表面需要实现厘米级甚至晶圆级的大面积加工。深紫外光刻、纳米压印和晶圆级刻蚀是潜在量产路径,但仍需解决母版制备、结构倒塌、刻蚀均匀性、缺陷控制 and 多层对准等问题。对于三维全息、近眼显示和大视场成像等应用,大面积制造能力将直接决定器件能否从实验室样品走向工程系统。例如,近眼显示要求大口径范围内保持相位响应一致,否则会造成视场边缘像质下降;大面积全息显示对像素级结构均匀性和缺陷密度高度敏感,局部误差可能引入散斑、串扰或重建伪影;片上集成传感系统则要求超表面与探测器阵列、波导和 CMOS 工艺实现高精度兼容。因此,大面积制造不仅是加工尺寸的放大,更涉及一致性、良率和封装集成能力。

5.3 动态调控与系统集成

动态超表面需要在纳米尺度光学响应和宏观电路控制之间建立有效接口。液晶、相变材料、透明导电氧化物、二维材料、铁磁流体和 MEMS 均可用于

实现可调超表面,但不同方案在调制速度、调制深度、损耗、功耗和寿命方面各有局限。PDLC 级联超表面、铁磁流体辅助动态全息和数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)波前整形等近期工作表明,动态超表面系统并不局限于单一主动材料,而是可以通过“静态超表面+可控照明/可调介质/主动驱动”的系统架构实现功能扩展^[27,29,31]。未来可编程超表面不仅需要材料和结构层面的突破,也需要驱动电路、封装工艺、热管理和控制算法的协同发展。

在更广义的电磁调控场景中,可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)也体现了动态超表面系统化发展的趋势。例如,RIS 辅助异构反向散射通信系统通过联合设计反射系数、能量采集和通信资源配置,提高了复杂低功耗通信场景下的资源利用效率^[32]。这说明可重构超表面的应用正在从单一波前调控拓展到器件响应-外部环境-系统任务的联合优化。对光学超表面而言,未来动态调控同样需要与反馈感知、误差补偿和实时控制算法结合,以满足动态全息、自适应成像和波束扫描等应用需求。

5.4 评价标准与可靠性

目前,不同超表面研究工作在效率定义、测试光源、入射偏振、视场范围和系统级性能指标方面并不完全统一,导致不同器件之间的横向比较存在困难。面向实际应用,应建立更规范的评价体系,包括绝对效率、系统效率、波前误差、杂散光、偏振串扰、色差、视场均匀性、加工容差和环境稳定性等指标。此外,湿度、温度循环、光照老化、机械冲击和表面污染等因素对纳米结构性能的影响也需要系统评估。对于成像和显示应用,还应关注调制传递函数、图像重建质量、色彩还原、眼安全和长时间工作稳定性。对于传感和通信应用,则需要进一步考虑噪声干扰、硬件非理想性、信道变化和算法收敛稳定性等系统因素。已有多 RIS 辅助多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)安全通信研究表明,在存在硬件损伤和信道不确定性的条件下,鲁棒波束赋形设计对于维持系统性能具有重要作用^[33]。这也提示超表面器件的评价标准应从单一实验室指标逐步扩展到真实应用环境下的系统级鲁棒性。

6 发展趋势

未来超表面光场调控技术将呈现多维协同、智能设计、动态可编程和系统融合的发展趋势。首先,

调控对象将从单一相位扩展到振幅、相位、偏振、频谱、角动量和时间响应等多自由度联合编码。其次,设计方法将从经验驱动和单元库匹配转向逆向设计、机器学习和端到端系统优化,使超表面能够面向具体任务进行定制化设计。再次,可重构超表面将成为动态显示、自适应成像、波束扫描和光计算的重要基础。最后,超表面将与传感器、波导、光源、显示芯片、AI 算法、主动材料和 CMOS 工艺深度融合,形成集光学编码、信息采样、物理计算和智能处理于一体的新型光电系统。

结合具体应用场景来看,超表面的发展趋势可进一步体现在 4 个方面。其一,在成像和计算视觉领域,超表面将从单一成像元件发展为“光学编码前端+计算重建算法”的联合优化平台,用于轻量化相机、偏振成像、光谱成像和三维感知;其二,在全息显示和增强现实领域,超表面有望与微显示芯片、波导耦合器和动态调制器件结合,推动近眼显示系统向轻薄化和集成化发展;其三,在精密传感和片上光学领域,超表面可与探测器阵列、微流控芯片和集成光源结合,实现小型化、多参数和高灵敏度检测;其四,在无线通信、太赫兹通信和智能环境构建中,RIS 代表了超表面从被动电磁调控器件向可编程信息界面的拓展方向。总体来看,未来超表面研究的重要方向不仅在于提升单个器件的效率、带宽和调控精度,更在于构建面向真实任务的“器件-系统-算法-应用场景”一体化设计框架。

7 结束语

超表面光场调控技术通过亚波长人工结构在二维界面上实现对光场多自由度的精确编码,突破了传统光学元件依赖体相器件传播相位积累的限制,为光学系统的小型化、轻量化、集成化和智能化提供了重要路径。经过十余年的快速发展,超表面已从异常折反射和基础波前调控拓展到高效率超透镜、宽带消色差成像、超表面全息、光场成像、动态显示、可重构光学、精密传感、增强现实显示和自由空间光计算等多个方向。当前,该技术仍面临效率-带宽-视场协同、大面积制造、动态调控、可靠封装和标准化评价等挑战。随着纳米制造、低损耗材料、主动调控机制、智能优化算法和系统级协同设计的发展,超表面有望从单一平面光学器件进一步演进为集光场编码、信息获取、物理计算和智能感知于一体的核心平台,在下一代成像、显示、传感、通信和光计算系统中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 张莉, 孙俊. 基于几何相位的超表面产生宽带太赫兹涡旋波束的设计[J]. 激光杂志, 2024, 45(6): 44–48.
Zhang L, Sun J. Design of Wideband Terahertz Vortex Beam Generation Using Geometric Phase Metasurfaces[J]. Laser Journal, 2024, 45(6): 44–48.
- [2] 李征, 穆毅, 梁静远, 等. 液晶空间光调制器及其在自适应光学中的应用[J]. 光通信研究, 2024(2): 220073.
Li Z, Mu Y, Liang J Y, et al. Application of LC-SLM in adaptive optics[J]. Study on Optical Communications, 2024(2): 220073.
- [3] 贾兴宁, 王猛, 赵悦晗, 等. 基于连续域束缚态的全介质太赫兹超表面及其等效参数研究[J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240274.
Jia X N, Wang M, Zhao Y H, et al. All-Dielectric Terahertz Metasurface based on Bound States in the Continuum and the Research of Its Equivalent Parameter[J]. Opto-Electronic Engineering, 2025, 52(2): 240274.
- [4] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333–337.
- [5] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Three-Dimensional Optical Holography Using a Plasmonic Metasurface[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2808.
- [6] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface Holograms Reaching 80% Efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308–312.
- [7] 易政宇, 李阳, 梁厚昆, 等. 基于离轴级联超表面的轨道角动量解复用系统设计[J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240161.
Yi Z Y, Li Y, Liang H K, et al. Design of an Orbital Angular Momentum Demultiplexing System based on Off-Axis Cascaded Metasurfaces[J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(8): 240161.
- [8] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric Metasurfaces for Complete Control of Phase and Polarization with Subwavelength Spatial Resolution and High Transmission[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937–943.
- [9] 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.
- [10] 杜庆国, 蔡栋, 李泉波, 等. 近红外超宽带多功能偏振转换超表面[J]. 光电工程, 2026, 53(1): 250191.
Du Q G, Cai D, Li Q B, et al. Near-Infrared Ultra-Broadband Multifunctional Polarization Conversion Metasurface[J]. Opto-Electronic Engineering, 2026, 53(1): 250191.
- [11] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A Broadband Achromatic Metalens for Focusing and Imaging in the Visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 220–226.
- [12] 任康, 武炫光, 魏冰妍, 等. 单层超表面单次曝光实现光学多维感知[J]. 光电工程, 2026, 53(1): 250209.
Ren K, Wu X G, Wei B Y, et al. Multidimensional Optical Sensing via Single-Shot of a Single-Layer Metasurface[J]. Opto-Electronic Engineering, 2026, 53(1): 250209.
- [13] 万希智, 孙雪平, 王望, 等. 基于介质超表面的圆偏振复用全息[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 630–636.
Wan X Z, Sun X P, Wang W, et al. Circular Polarization Multiplexing Holography based on Dielectric Metasurface[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 630–636.
- [14] 王望, 孙雪平, 万希智, 等. 超高圆二色性近红外全介质二维手性超表面[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 716–722.
Wang W, Sun X P, Wan X Z, et al. Ultra-High Circular All-Dielectric Near-Infrared Two-Dimensional Chiral Metasurface[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 716–722.
- [15] 单梦珠, 杜宜格, 陈若卉, 等. 液晶集成超表面光束偏转器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 2313001.
Shan M Z, Du Y G, Chen R H, et al. Research on Liquid Crystal-Integrated Metasurface Beam Deflector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(23): 2313001.
- [16] Sun S, Chen L, Jing X, et al. Oblique Incidence Achromatic Stealth Metasurface based on All-Dielectric[J]. The European Physical Journal D, 2023, 77(6): 111.
- [17] Gopakumar M, Lee G Y, Choi S, et al. Full-Colour 3D Holographic Augmented-Reality Displays with Metasurface Waveguides[J]. Nature, 2024, 629(8013): 791–797.
- [18] Overvig A C, Shrestha S, Malek S C, et al. Dielectric Metasurfaces for Complete and Independent Control of the Optical Amplitude and Phase[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 92.
- [19] Sun S, Li X, Zhang J, et al. High-Fidelity Metasurface Holography Illuminated by an Ultra-Uniform Flat-

- Top Beam Generated through Active Wavefront Shaping[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(2): 467–470.
- [20] Lin R J, Su V C, Wang S, et al. Achromatic Metalens Array for Full-Colour Light-Field Imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227–231.
- [21] Holsteen A L, Lin D, Kauvar I, et al. A Light-Field Metasurface for High-Resolution Single-Particle Tracking[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(4): 2267–2271.
- [22] Fan Q, Xu W, Hu X, et al. Trilobite-Inspired Neural Nanophotonic Light-Field Camera with Extreme Depth-of-Field [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2130.
- [23] Sun S, Li J, Li X, et al. High-Efficiency, Broadband, and Low-Crosstalk 3D Holography by Multi-Layer Holographic-Lens Integrated Metasurface[J]. *APL Photonics*, 2024, 9(8): 086102.
- [24] Zhang J, Sun S, Zhou H, et al. Phase-Gradient Metasurface Enables Atomic Spin Chirality Detection for Elliptically Polarized Laser-Pumped Atomic Magnetometer[J]. *Photonix*, 2025, 6: 29.
- [25] Sun S, Zhang J, Zhu R, et al. Polarization-Improved Bidirectional-Pump Atomic Magnetometer based on Spin-Decoupled Metasurface [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(37): e09028.
- [26] Hu Y, Ou X, Zeng T, et al. Electrically Tunable Multifunctional Polarization-Dependent Metasurfaces Integrated with Liquid Crystals in the Visible Region [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(11): 4554–4562.
- [27] Sun S, Li J, Li X, et al. Dynamic 3D Metasurface Holography via Cascaded Polymer Dispersed Liquid Crystal [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10: 203.
- [28] Cotrufo M, Sulejman S B, Wesemann L, et al. Reconfigurable Image Processing Metasurfaces with Phase-Change Materials [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4483.
- [29] Sun S, Li J, Li X, et al. Ferrofluid-Assisted Dynamic Metasurface 3D Holography Endowed with Rapid, Linear, and High-Contrast Color Modulation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(8): 2401417.
- [30] Li J, Yu P, Zhang S, et al. Electrically-Controlled Digital Metasurface Device for Light Projection Displays[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3574.
- [31] Sun S, Li J, Chen L. Realistic Dynamic Metasurface 3D Holographic Display by Arbitrary Space-Selection *via* Wavefront Shaping [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(33): e02038.
- [32] Xu Y, Xu J, Li X, et al. RIS-Assisted Heterogeneous Backscatter Communications: a Robust Design [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(12): 13214–13225.
- [33] Xu Y, Tian Q, Chen Q, et al. Robust Secure Beamforming Design for Multi-RIS-Aided MISO Systems with Hardware Impairments and Channel Uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(3): 1517–1530.