应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

大视场级联超表面透镜成像系统

陈芳 向昱 高泽昊 王国聪 林杰 金鹏

Wide field-of-view cascaded metasurface imaging system

CHEN Fang, XIANG Yu, GAO Zehao, WANG Guocong, LIN Jie, JIN Peng

引用本文:
陈芳, 向昱, 高泽昊, 等. 大视场级联超表面透镜成像系统[J]. 应用光学, 2026, 47(5): 1096–1105. DOI: 10.5768/JAO202647.0513010
CHEN Fang, XIANG Yu, GAO Zehao, et al. Wide field–of–view cascaded metasurface imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(5): 1096–1105. DOI: 10.5768/JAO202647.0513010

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202647.0513010

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种光可调的多功能太赫兹几何相位超表面

Optically switchable multifunctional terahertz geometric phase metasurface

应用光学. 2022, 43(5): 986–993 https://doi.org/10.5768/JAO202243.0505003

基于介质超表面的圆偏振复用全息

Circular polarization multiplexing holography based on dielectric metasurface

应用光学. 2024, 45(3): 630–636 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0302002

基于超宽带反射超表面产生太赫兹轨道角动量

Terahertz orbital angular momentum generation based on ultra–wideband reflective metasurface

应用光学. 2024, 45(2): 282–291 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201002

超高圆二色性近红外全介质二维手性超表面

Ultra–high circular all–dielectric near–infrared two–dimensional chiral metasurface

应用光学. 2024, 45(4): 716–722 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401007

基于超表面的多通道窄带滤光片研究

Research on multi–channel narrow–band filter based on metasurface

应用光学. 2024, 45(1): 184–191 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0105002

超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra–large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：1002-2082 (2026) 05-1096-10
引用格式：陈芳, 向昱, 高泽昊, 等. 大视场级联超表面透镜成像系统 [J]. 应用光学, 2026, 47(5): 1096-1105.
CHEN Fang, XIANG Yu, GAO Zehao, et al. Wide field-of-view cascaded metasurface imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(5): 1096-1105.

在线阅读

大视场级联超表面透镜成像系统

陈 芳[1,2], 向 昱[1,2], 高泽昊[1,2], 王国聪[3], 林 杰[1,2], 金 鹏[1,4]

（1. 哈尔滨工业大学 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 4. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001）

摘 要：在现代先进光学系统中，对同时具备大视场角与高分辨率成像能力的成像单元的需求日益迫切。传统光学设计在实现系统紧凑化时常面临视场与像质的固有矛盾。超表面作为一种二维人工结构，为光学系统的小型化、集成化与功能定制化提供了革命性途径。然而，单层超透镜普遍受限于有限的视场。为此，设计了一种基于双曲相位与二次相位拼接的双层级联超透镜结构。该相位拼接方法能够改善超透镜在正入射和斜入射时的聚焦性能，有效地扩展了成像视场并提升像质。在此基础上，进一步引入第 2 层超表面构成级联系统，该级联结构不仅能继承并增强拼接相位对大视场的校正能力，还可通过两层相位分布的协同优化，抑制单层设计中难以避免的高阶衍射与残余像差，从而在实现高达 100°大视场成像的同时，显著提升聚焦光斑的质量与能量集中度。这种设计方法可为解决紧凑型光学系统的大视场成像难题提供一种有效方案，在车载感知、广角监控等需要宽视野精准成像的应用场景中具有发展潜力。

关键词：大视场成像；超表面；拼接相位；双层级联超透镜
中图分类号：TN202; O438　　**文献标志码**：A　　**DOI**: 10.5768/JAO202647.0513010

Wide field-of-view cascaded metasurface imaging system

CHEN Fang[1,2], XIANG Yu[1,2], GAO Zehao[1,2], WANG Guocong[3], LIN Jie[1,2], JIN Peng[1,4]

（1. Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-Structures Manufacturing, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 4. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China）

Abstract: In modern advanced optical systems, there are growing requirements for imaging units that simultaneously offer a wide field of view and high-resolution imaging. Traditional optical design often encounters an inherent trade-off between field of view and image quality for achieving miniaturized optical system. Metasurfaces, as two-dimensional artificial structures, can achieve miniaturization, integration, and functional customization of optical systems. However, single-layer metalenses are generally limited by small field of view. Therefore, a bilayer cascaded metalens structure based on stitching of hyperbolic and quadratic phase profiles was designed. The phase stitching method improved the focusing performance of metalens under both normal and oblique incidence, effectively expanding imaging field of view and enhancing image quality.

收稿日期：2026-06-15； **修回日期**：2026-08-08
基金项目：国家自然科学基金（U2341245）
第一作者：陈芳, E-mail: 2499560251@qq.com
通信作者：林杰, E-mail: linjie@hit.edu.cn
金鹏, E-mail: P.Jin@hit.edu.cn

On this basis, a second metasurface layer was further introduced to form a cascaded system. This cascaded structure inherited and enhanced wide-field correction capability of stitched phase. Moreover, through co-optimization of two-layer phase distributions, it further suppressed higher-order diffraction and residual aberrations inherent in single-layer designs. As a result, while achieving wide-field imaging with a field of view of up to 100°, it significantly improved the quality and energy concentration of focused spot. This design approach provides an effective solution to achieve wide-field imaging in compact optical systems. It holds potential for applications such as vehicular perception and wide-angle surveillance, which require broad-field and high-precision imaging.

Key words: wide field-of-view imaging; metasurface; stitched phase; bilayer cascaded metalens

引言

近年来, 光学成像技术正朝着微型化、轻量化与高度集成化的方向飞速演进。传统透镜(折射或衍射型)依赖介质厚度或面形曲率调控波前, 导致系统体积大、重量高、像差校正困难, 成为紧凑光学系统发展的瓶颈[1]。超表面作为二维平面人工材料, 通过亚波长结构单元设计, 可在纳米尺度内灵活调控光波的振幅、相位与偏振态[2-6]。基于此设计的超透镜, 具备平面化、超轻薄、易集成等传统透镜无法比拟的优势, 在宽带消色差成像[7-9]、全息[10-12]、光通信[13]、光学精密传感[14]和偏振复用[15-17]等领域展现出巨大的应用潜力。

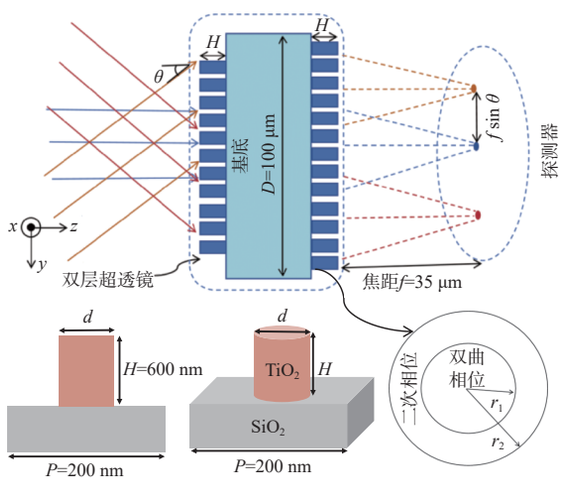
尽管超透镜在正入射条件下已能实现接近衍射极限的高质量聚焦, 但其走向实际应用, 尤其是在需要广阔环境感知能力的领域, 如自动驾驶、安防监控、虚拟现实等, 仍面临大视场成像能力不足的挑战。传统单层超透镜通常采用双曲相位分布, 在正入射时可实现高质量聚焦。然而, 在斜入射条件下, 会引入严重的轴外像差(如彗差、像散等), 导致聚焦光斑迅速劣化、能量弥散, 成像质量急剧下降, 从而极大地限制成像视场。因此, 扩展超透镜的视场, 实现高质量的大视场成像, 是该领域的研究热点与难点[18-20]。针对该问题, 国内外研究者们围绕超透镜像差校正与大视场成像技术开展了大量系统性研究, 国内学者在像差机理分析、微型化成像应用等方向也形成了丰富的研究成果与综述总结[21-22]。现有技术路线主要包括几类。例如, 在超表面前方引入孔径光阑, 限制不同角度入射光的有效孔径, 从而简化像差校正, 但会牺牲通光量和能量效率[23-24]。此外, 二次平方相位轮廓可等效为无穷大半径的球面透镜, 理论上对斜入射光不敏感, 能实现超宽视场, 但通常伴随着严重的球差和较低的聚焦效率[25-27]。一种实现大视场超透镜的设计思路是采用混合相位分布, 即在中心区域使用高聚焦效率的双曲相位, 在边缘区域采用对大角度入射更宽容的二次平方相位, 以兼顾轴上性能与视场扩展。已有针对单一超透镜的专项研究表明, 该方法对两相位的拼接边界极为敏感, 边界选取不当易引起像质退化, 仅依靠单层结构难以在全视场实现稳定高质量聚焦[28]。因此, 确定最优拼接边界并进一步抑制高阶衍射与残余像差, 仍是该方法走向生物成像、微型光场探测等实用场景的核心瓶颈[29]。

基于上述研究背景, 本文在双曲相位和二次平方相位混合拼接相位分布的基础上, 引入双层级联超透镜结构, 该方案借鉴传统复合透镜组的像差校正思想[30-32], 通过两层超表面的协同工作, 分别承担光束的预调制、像差补偿与最终聚焦等功能, 最终实现了 100°宽视场的高质量聚焦。本研究中, 第 1 层为前置相位调制层, 采用优化设计的二元衍射面, 主要承担对大角度入射光所引入的严重离轴像差(如彗差、像散)进行预校正与波前整形。第 2 层为主聚焦层, 采用经全局优化的双曲-二次混合拼接相位分布, 在接收预处理光场后, 实现接近衍射极限的高质量聚焦, 并发挥混合相位对扩展视场的固有优势。该级联结构通过两层相位分布的联合优化, 不仅实现了高达 100°的宽视场角覆盖, 而且有效抑制了单层设计中难以避免的高阶衍射与残余像差, 从而在维持系统超薄紧凑特性的同时, 显著提升了全视场范围内的聚焦光斑质量、能量集中度与成像分辨率。

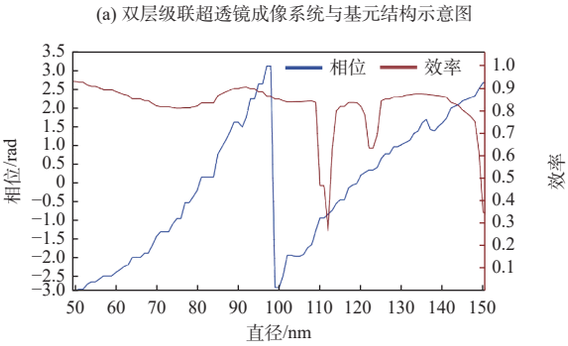
1　双层级联超透镜成像系统设计原理

本文提出的基于混合相位设计的双层级联超透镜系统结构如图 1(a) 所示, 入射条件为波长为 405 nm 的 x 方向线偏振平面波, 入射角范围覆盖 0~50°, 焦距为 35 μm。系统的第 1 层由 ZEMAX

软件中的二元面 2 经优化设计所得，其有效通光直径为 80 μm，主要功能是对大角度入射光线引入的离轴像差（如彗差、像散）进行预校正与初步波前整形。第 2 层为双曲相位与二次平方相位混合拼接而成的相位面，直径 D=100 μm，是实现大视场聚焦的核心元件。该层在接收经第 1 层预调制后的光场基础上，可对 100°视场范围内的入射光实现高质量聚焦。整体上，该混合拼接相位分布通过全局优化，旨在系统性地平衡轴上高分辨率与大视场像差校正能力，从而在扩展视场的同时保持优异的聚焦性能。



(a) 双层级联超透镜成像系统与基元结构示意图



(b) 相位与透过率随基元直径扫描变化结果

图 1 双层级联超透镜设计方案与单元结构表征

Fig. 1 Design scheme and unit-cell structural characterization of bilayer cascaded metalens

双曲相位是实现超透镜聚焦功能的核心相位分布之一。其数学描述通常基于波前重构理论，其相位分布函数为

$$\varphi_{\mathrm{H}}(r)=-\frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{r^2+f^2}-f\right) \tag{1}$$

式中：r 为透镜面上某点距中心的径向距离；f 为设计焦距；λ 为工作波长。该相位分布可将垂直入射的平面波前调制为理想的球面波前，使其在焦点处同相位叠加，实现正入射光线接近衍射极限的聚焦。然而，双曲相位对斜入射光的宽容性较差，在大角度入射时会产生显著的离轴像差，导致聚焦光斑劣化，严重限制有效视场。相较于双曲相位分布，二次平方相位超透镜实现大视场成像的核心原理在于，其独特的相位分布能够将斜入射光引入的线性相位差转化为焦点的空间平移，而非传统双曲相位分布所导致的严重像差。具体而言，其相位分布为

$$\varphi_{\mathrm{Q}}(r)=-\frac{\pi}{\lambda}\cdot\frac{r^2}{f} \tag{2}$$

当入射光与透镜法线存在夹角 θ 时，出射光的相位可表述为

$$\varphi_{\mathrm{Q}}(r)=-\frac{\pi}{\lambda}\cdot\frac{r^2}{f}-\frac{2\pi}{\lambda}x\sin\theta=-\frac{\pi}{\lambda^2}\left[(x+f\sin\theta)^2+y^2\right]+\frac{\pi f\sin^2\theta}{\lambda} \tag{3}$$

忽略该式中第 1 个常数相位项后，可等效为一个沿 x 轴平移了 $-f\sin\theta$ 距离的抛物线相位函数。这意味着斜入射的主要效应是焦点在焦平面上的横向移动，其移动量与入射角的正弦值成正比，而并非引入破坏性的彗差或像散。这种特性有效消除了场曲现象，提升了成像质量。因此，为兼顾双曲相位在近轴区域的优异聚焦性能与二次相位对斜入射光的高度宽容性，以实现全视场范围内的优化聚焦效果，本设计采用分区混合相位策略，如图 1(a) 所示，参数 r_2=50 μm，为超透镜半径，参数 r_1 表示两种相位分布的拼接边界位置，其取值范围为 0~50 μm，在透镜中心区域（半径小于 r_1）采用双曲相位分布，外围区域（半径大于 r_1）则采用二次平方相位分布。优化选取合适的 r_1 对实现全视场高质量的成像效果至关重要。图 1(a) 中 D=100 μm 为超透镜直径尺寸。当入射光以夹角 θ 倾斜入射时，焦点位置沿 x 轴平移 $f\sin\theta$ 距离。

基于上述系统结构与设计理念，本文需选取一种合适的超表面相位设计实现方法。超表面通过在二维平面上人为设计亚波长结构阵列，引入不连续的、空间变化的相位突变，从而实现对光波前的灵活操控。超表面实现相位调控的理论根基是广义斯涅耳定律[4]。该定律从费马原理出发，描述了当光线穿过具有不连续相位分布的界面时，其传播方向所遵循的规律。与经典斯涅耳定律不同，广义斯涅耳定律在公式中引入了一个额外的相位梯度项，其折射形式可表示为

$$\sin(\theta_{\mathrm{t}})n_{\mathrm{t}}-\sin(\theta_{\mathrm{i}})n_{\mathrm{i}}=\frac{\lambda_0}{2\pi}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}x} \tag{4}$$

式中: θ_i 和 θ_t 分别为入射角和折射角; n_i 和 n_t 为介质折射率; λ_0 为真空波长; $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}x$ 为界面上的相位梯度。该公式清晰地表明, 通过在亚波长尺度上精确设计和控制界面上的相位梯度分布, 可以自由地调控光波的传播方向, 实现诸如异常折射、反射等效应, 这为在平面上构造任意波前提供了核心的理论框架。

在广义斯涅耳定律的指导下, 实现具体的相位调制主要依赖 3 种物理机制。共振相位调控利用纳米结构的谐振效应(如等离子体或米氏共振)产生局域场增强, 从而调制入射光相位, 但存在工作带宽窄、效率较低的局限[33]。几何相位(Pancharatnam-Berry 相位, 又称 PB 相位)调控通过旋转各向异性纳米结构(如矩形或 L 形纳米天线)引入相位, 其相位值与旋转角度成正比($\Phi=\pm 2\alpha$), 具备宽带工作潜力, 但仅对特定圆偏振光有效[34]。传输相位调控通过改变纳米结构的几何尺寸调节其等效折射率 n_{eff}, 光波在穿过固定高度 h 的单元时, 累积的相位延迟为 $\varphi=\dfrac{2\pi}{\lambda}n_{\mathrm{eff}}h$, 通过系统性地改变单元尺寸, 使其等效折射率连续变化, 可在 0~2π 范围内实现连续相位覆盖, 且对偏振不敏感, 适用于偏振无关器件。这 3 种机制为超表面提供了灵活多样的相位调控途径。

本文选用传输相位实现超透镜所设计的理想相位分布, 构建了基于 TiO_2 的基元库。基元结构选用圆柱形纳米结构, 保证了偏振不敏感性。基底材料为 SiO_2, 基元周期 P 固定为 200 nm, 柱体高度 H 为 600 nm, 直径 d 扫描范围为 50 nm~150 nm。图 1(a) 中展示了本文所构建基元的结构示意图。为获取该结构在不同尺寸下的相位调制特性与传输效率, 采用 VirtualLab Fusion 软件对纳米柱直径进行了系统仿真。扫描直径间隔设置为 1 nm, 所得相位与透过率随直径变化曲线如图 1(b) 所示。由仿真结果可以看出, 在所选取的基元结构尺寸参数区间内, 大部分结构透过率都超过了 80%, 且完整覆盖了 0~2π 相位调控范围。

2　混合拼接相位的设计与优化

在图 1(a) 所示混合拼接相位分布中, 拼接位置 r_1 的取值是影响全视场聚焦性能的关键参数。在 VirtualLab Fusion 软件中, 为实现混合相位拼接位置 r_1 的全局优化, 构建了包含入射角度与结构参数的双重优化仿真流程。波长为 405 nm 的 x 方向线偏振平面波, 其入射角度以 10°为间隔, 在 0~50°范围内变化, 共覆盖 6 个典型视场点。与此同时, 拼接位置参数 r_1 在 0~50 μm 区间变化。在每个给定的 r_1 取值下, 均完整执行一次上述多角度光源扫描, 并记录各入射角对应焦平面上聚焦光斑的半高全宽(full width at half maximum, FWHM) W_{FWHM}。为综合评价全视场范围内的聚焦性能, 将 6 个角度下所得光斑的 FWHM 进行累加, 以此总和作为评价函数值, 其表达式为

$$F_{\mathrm{FOM}}(r_1)=\sum_{\theta=0^\circ}^{50^\circ}W_{\mathrm{FWHM}}(\theta,r_1) \tag{5}$$

该函数值越小, 表明对应 r_1 下全视场聚焦光斑的整体尺寸越小, 成像质量越优。优化完成后, 得到评价函数值随拼接位置 r_1 的变化曲线, 如图 2(a) 所示。由图可知, 当 r_1=26.4 μm 时, 评价函数取得收敛的最小值, 表明此时全视场光斑尺寸总和最小, 成像性能达到最优。

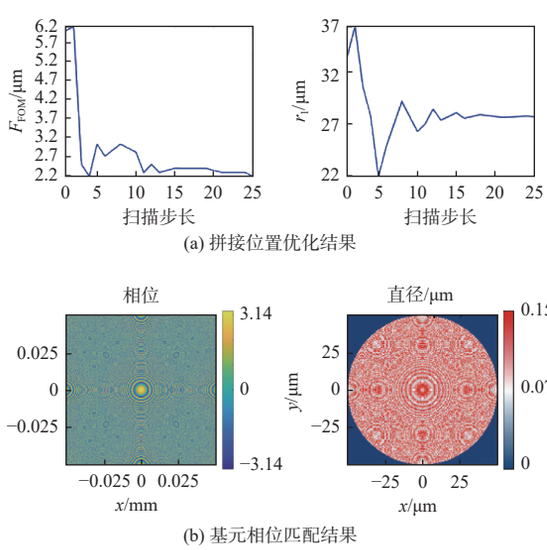
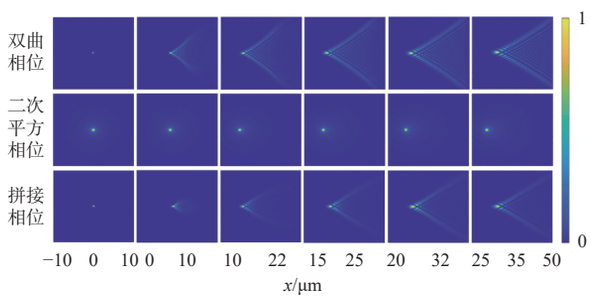


图 2　拼接位置 r_1 优化以及基元相位匹配结果

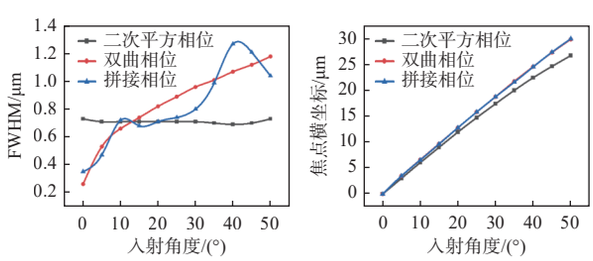
Fig. 2　Splicing position r_1 optimization and primitive phase matching result

基于优化获得的拼接位置 r_1=26.4 μm, 在同一 VirtualLab Fusion 软件平台上, 计算得到超透镜的理想相位分布。利用所建立的基元结构-相位数据库, 通过编程算法, 在满足预设透过率阈值 80% 的基础上, 为每个位置点匹配出与其目标相位值最接近的基元结构尺寸。匹配完成后, 所得匹配结果如图 2(b) 所示, 图中分别展示了经计算得到的理想拼接相位分布, 以及通过基元匹配后超表面各空间位置所对应的纳米柱半径分布。随后, 对基于该理想拼接相位分布进行了电磁仿真。波长

为 405 nm, 沿 x 方向线偏振的平面波作为光源, 入射角以 10°为间隔从 0°(正入射)逐步增加至 50°, 覆盖所关注的整个视场范围。通过监测焦平面上的光场分布, 系统评估了该拼接相位超透镜在不同斜入射条件下的聚焦特性, 仿真结果如图 3 所示。此外, 为进行对比分析, 对单一的双曲相位与二次平方相位超透镜也完成了相同的仿真流程, 其结果如图 3 所示。



(a) 聚焦光斑随0~50°入射角度演变对比



(b) 三种相位透镜聚焦的FWHM与焦斑位置随入射光角度变化

图 3 3 种大视场相位超透镜聚焦性能对比

Fig. 3 Comparison of focusing performance for three-phase metalenses under a wide field of view

通过对仿真结果分析, 该拼接相位设计能够在大视场范围内实现高质量的聚焦。对比单一双曲相位和二次平方相位设计, 混合相位设计通过多相位模型的优势互补, 实现了球差、彗差、像散的大视场综合校正。如图 3(a) 所示, 双曲相位分布在正入射条件下能够实现接近衍射极限的高质量聚焦, 具有优异的轴上分辨率与能量集中度。然而, 由仿真结果可以明显看出, 双曲相位分布对斜入射光极度敏感, 当入射角增大时, 会引入严重的离轴像差, 入射角度越大, 聚焦光斑周围的散斑越多, 光斑质量迅速劣化。与之相对, 二次平方相位分布仿真结果显示, 其在大角度入射时能够维持有效的聚焦, 且焦斑随入射角增大发生可预测的横向平移, 这体现了其对角度变化的宽容特性。在相同大角度入射时, 其聚焦光斑的完整性明显优于因严重彗差而迅速劣化的双曲相位透镜, 从而在成像视场范围上具有显著优势。然而, 仿真结果也揭示了该设计目前存在的局限, 在正入射这一核心性能指标上, 由于球差影响, 二次平方相位超透镜的聚焦效率与衍射极限逼近程度远不如双曲相位透镜。经过优化后的混合拼接相位分布能够很好地结合二者的优点。在小角度入射时更接近双曲相位透镜的高质量聚焦效果, 光斑的近轴像差, 例如球差被抑制。在大角度入射时更接近二次相位的聚焦效果, 彗差、像散等轴外像差通过相位拼接的局部修正得到有效补偿, 散斑分布范围和数量大大减小, 光斑始终维持高能量集中度。

为定量评估透镜的聚焦性能, 本文对 0~50°范围内、以 5°为间隔的斜入射光线进行了聚焦效果仿真, 并计算了焦点在 x 方向的 FWHM, 结果如图 3(b) 所示。从图中可以看出, 拼接相位透镜有效融合了双曲相位与二次相位的特点——在小角度入射时, 其 FWHM 较小, 聚焦光斑更锐利, 聚焦效果优于二次相位, 性能更接近双曲相位; 而在大角度入射时, 又能在一定角度范围内明显抑制双曲相位因像差增大而导致的性能劣化。此外, 本文还提取了 3 种透镜的焦点位置(x 坐标)随入射角度的变化关系。图 3(b) 中曲线表明, 双曲相位与拼接相位的焦点位置随角度增加的偏移速度在大角度入射情况下快于二次相位。尽管混合相位设计在校正像差方面成效显著, 但在大角度入射条件下焦平面聚焦光斑周围依然存在可辨识的散斑。这些衍射级次会分散主瓣能量, 降低目标焦点的能量集中度, 从而在一定程度上限制了其在实际大视场应用中的表现。

3 双层超透镜相位设计与仿真

为有效抑制衍射级次, 缩小弥散斑范围, 进一步提升聚焦效率, 本文进一步提出一种基于拼接相位的双层级联超透镜结构。双层级联超透镜结构将前文所设计的混合相位超透镜作为第 2 层超表面进行拓展优化。其中, 第 1 层超表面采用 ZEMAX 软件中的二元面 2 构建。该面型是一种基于衍射光学原理的相位调制元件, 其工作机制与衍射光栅或菲涅耳透镜类似, 即通过周期性或连续分布的相位阶跃结构, 对透射波前引入可控的相位延迟, 从而实现光波传播方向的精确调控。在 ZEMAX 中, 二元面 2 的相位调制能力由一组多项式系数所定义的数学模型来描述, 表达式为

$$\phi_{\text{phase}} = M\sum_{i=1}^{N} A_i\rho^{2i} = M\sum_{i=1}^{N} A_i\left(\frac{r_i}{R}\right)^{2i} \tag{6}$$

式中：M为衍射级次；N为多项式系数的序号；A_i为ρ的$2i$次幂系数；ρ为归一化的径向相对孔径坐标，是相面实际环带半径r_i与归一化半径值R的相对比值，通常R值设置为光学系统的入瞳半径值。通过优化这些系数，可在全局或局部区域内生成所需的非球面相位分布，进而实现对不同视场入射光束的波前整形。

优化过程中，软件结合光线追迹与严格的衍射计算模型，可精确模拟并分析光线经该面型调制后的传播路径与衍射特性，为系统级相位匹配与像差校正提供可靠依据。在软件中完成模型的基本参数设置，将中心波长设置为 405 nm，视场范围覆盖 0~50°，以 10°为间隔均匀设置 6 个视场点，用于评估全视场成像性能。依次编辑“表面类型”为物面、光阑、二元面 2、网格相位以及像面。其中，物面与光阑面、光阑面与二元面 2 之间的介质均设为空气，二元面 2 与网格相位面之间的材料采用 SiO_2，其厚度设为优化自变量。网格相位面处导入先前经相位拼接算法生成的理想相位分布数据，以此作为级联混合相位超透镜的基底相位。二元面 2 的净口径设置为 40 μm，归一化半径值R为 50 μm，机械半直径为 50 μm，衍射级次M设置为 1，相位函数项N设置为 4，将对应的 4 个常数项设为优化自变量，用于在优化过程中调整该面的相位分布，以对理想拼接相位进行波前补充。网格相位面与像面之间的空气间隔固定为设计焦距 35 μm。优化过程中，通过反复调整 ZEMAX 内置优化操作数，逐步优化评价函数值，使像面处的聚焦光斑形态与能量分布逐步逼近理论设计的理想效果，最终实现全视场范围内接近衍射极限的高质量聚焦。表 1 中列出了优化完成后各自变量的数值。

表 1　优化完成后二元面 2 自变量数值

Table 1　Optimized parameter values for binary optic 2

表面类型	厚度	A_1	A_2	A_3	A_4
二元面2	14 μm	64.133	−1 176.811	7 080.440	-2.252×10^4

优化完成后，图 4 展示了该双层级联大视场聚焦超透镜的光线追迹效果，并与单层拼接相位分布超透镜的聚焦表现进行了对比。图 4 中分别标注了拼接相位面与前置相位调制层二元面 2 的位置，在级联超透镜中二元面 2 与拼接相位层之间厚度经优化为 14 μm，单层超透镜与双层级联超透镜的孔径光阑大小一致且焦距相同(f=35 μm)。从光线追迹结果可见，大视场角入射时，双层超透镜通过第 1 层二元面 2 的衍射预校正与第 2 层拼接相位面的精细调控协同作用，显著校正了轴外像差，传播轨迹更趋近理想聚焦路径，实现了更优的全视场聚焦性能。图 4 右半部分进一步展示了双层超透镜与单层超透镜在像面处的点列图对比图。

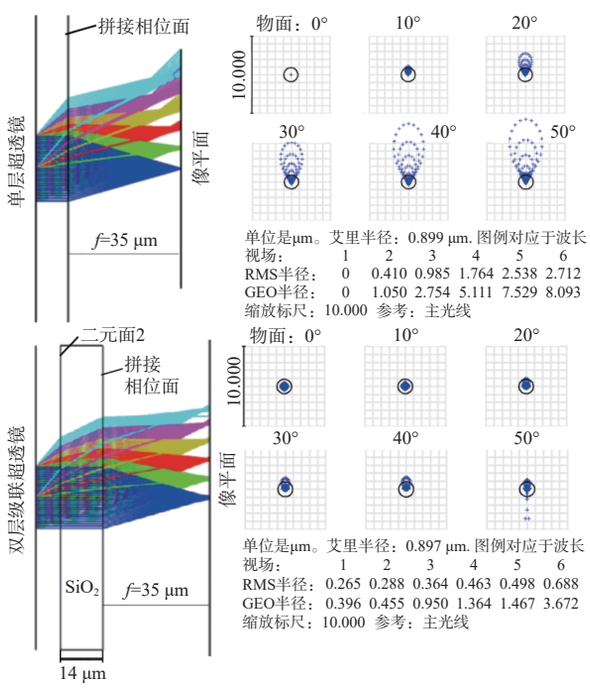
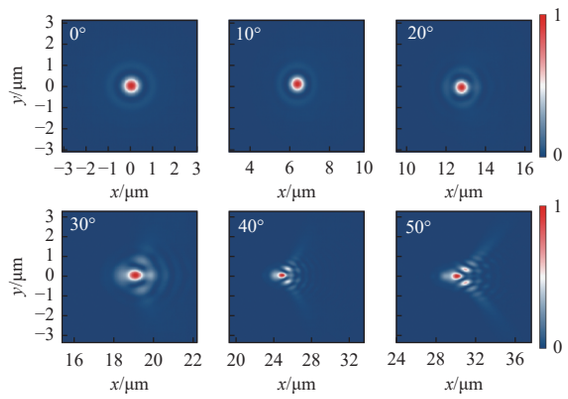


图 4　双层级联超透镜与单层超透镜光路与点列图对比

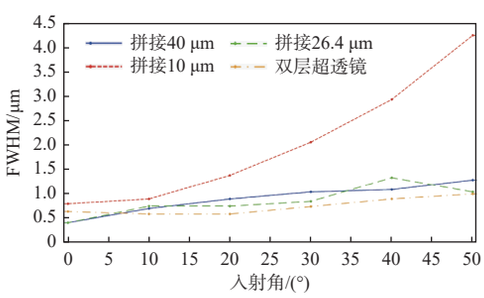
Fig. 4　Comparison of optical paths and spot diagrams between bilayer cascaded metalens and single-layer metalens

结合点列图的定量对比分析，在相同的放大倍数下，双层超透镜在像面上的聚焦光斑几乎全部被艾里斑包络，聚焦能量集中，光斑形状规则，使全视场的聚焦性能逼近理论衍射极限。相比之下，单层超透镜的大视场光斑几何像差展宽更为突出，弥散斑更大。在软件中完成系统优化后，将所获常数项参数代入式 (6)，计算得到其最终的相位分布数值。随后，将该数值传输至 VirtualLab Fusion 仿真平台，重复基元匹配与结构生成流程，从而完成对双层级联超透镜的完整物理模型构建。基于此模型，执行严格的全波电磁仿真以分析其在 0~50°入射条件下的聚焦性能。图 5(a) 展示了双层超透镜在不同入射角度下的聚焦光斑。

经对比分析，双层超透镜在大视场下的聚焦性能显著优于单层设计。其在更大的角度范围内仍能保持接近正入射时的高质量聚焦。随着入射角度增大到 50°，虽然仍会观察到散斑，但其数量与强度已得到显著抑制，能量集中度明显提升，表明离轴像差得到了有效校正。



(a) 双层级联超透镜在0~50°斜入射条件下焦平面上的聚焦光斑分布



(b) 不同拼接相位单层超透镜与双层超透镜聚焦光斑FWHM之和随入射角度变化曲线

图 5 双层级联超透镜与单层超透镜在斜入射条件下的聚焦性能对比

Fig. 5 Comparison of focusing performance between bilayer cascaded metalens and single-layer metalens under oblique incidence

最后，分别在 0~50°视场范围内，计算了单层超透镜在 3 种不同拼接位置（r_1 分别为 40 μm、26.4 μm 和 10 μm）以及双层级联超透镜的聚焦光斑 FWHM 之和。计算结果汇总如图 5(b) 所示。由图中可以明显看出，采用拼接相位的双层级联超透镜，其 FWHM 之和显著低于其余 3 种单层超透镜的情况，始终保持在较低水平，聚焦性能得到显著优化。在−40℃~60℃ 范围内，经过定量计算与仿真分析，本文所设计双层级联大视场超透镜系统温度变化带来的热光与热膨胀效应仅造成小幅相位漂移，温度对全视场聚焦光斑、能量集中度的扰动微弱，系统具备优异温度稳定性。

在加工制备方面，本文采用的 SiO_2 基底与 TiO_2 介质纳米柱是平面超表面器件的典型结构，与现有半导体微纳加工工艺体系完全兼容。本文所设计基元周期为 200 nm，高度为 600 nm，基元直径变化范围为 50 nm~150 nm，结构密度较高，为了避免常规刻蚀和生长过程中极易出现的结构坍塌，采用镶嵌光刻工艺技术对超表面器件进行加工。经过涂胶、光刻、原子层沉积生长工艺、刻蚀以及去残胶等步骤，可加工出本文所设计超透镜阵列。对于双层级联结构，可通过高精度紫外对准键合工艺完成两层超表面的集成，该工艺层间间距控制精度可达亚微米级，能够满足级联系统的装配精度要求。面向量产应用场景，该结构也可通过纳米压印工艺进行批量制备，进一步降低制造成本，工艺拓展路径清晰成熟。

在检测表征方面，本器件的形貌精度与光学性能均可通过成熟的商用设备完成全面检测。形貌精度层面，采用扫描电子显微镜可直观表征纳米柱的直径、周期与阵列整体形貌，采用原子力显微镜可精准测量纳米柱的高度与表面粗糙度，完成加工形貌的全参数核验。光学性能层面，可搭建 405 nm 波段的线偏振单色显微测试系统，通过高分辨率 CCD 采集焦平面的光强分布，提取聚焦光斑的半高全宽、能量集中度、视场偏移量等核心性能指标。整套检测方案均基于微纳光学领域的常规表征手段，无需定制特殊设备，具有充分的检测可行性。

4 结论

为应对现代光学系统对宽视场、高集成、紧凑化的迫切需求，本文以超表面相位调控理论为基础，聚焦单一超透镜大视场成像的核心难题，提出并验证了一种基于混合拼接相位的双层级联超透镜调控方案。工作首先聚焦于单层相位设计，对比分析了传统双曲相位在大视场下因严重离轴像差而导致的聚焦劣化，以及二次平方相位在正入射时所表现的聚焦光斑较分散的局限性。为解决单一相位分布的不足，采用混合拼接相位设计，将双曲相位在中心区域的高聚焦性能与二次平方相位在边缘区域的大视场宽容性相结合，并通过优化算法确定了最佳拼接位置 r_1=26.4 μm，最终实现了视场的初步有效扩展。然而，单层混合相位设计仍面临大角度入射时衍射级次干扰，具有较大范围弥散斑的问题。为此，本文在混合拼接相位的基础上提出了一种双层级联超透镜架构，在光

学设计软件中, 将优化后的混合相位分布与一个可设计的二元面相结合, 通过协同优化两层相位, 实现了对全视场波前的精确调控。仿真结果表明, 该级联系统在 0~50°的宽视场范围内, 显著抑制了轴外像差, 降低了杂散衍射, 使聚焦光斑尺寸更接近衍射极限, 能量集中度大幅提升, 最终验证了所提出方案在实现高性能、紧凑化大视场成像方面的有效性与优越性。本文设计的大视场级联超透镜工作波长为 405 nm, 结合其超薄平面化、100°宽视场、高聚焦质量的特性, 可广泛应用在半导体晶圆微缺陷检测, 微型荧光生物成像与筛查系统以及精密工业内窥检测镜头等领域。

除在超透镜设计阶段通过主动相位消除抑制像差外, 借助后续图像处理、机器学习与计算成像等软件方法对像差进行弥补, 是突破超透镜实用化瓶颈的重要路径, 近年来已形成微型化硬件编码配合强计算后端解码的计算成像新范式[22]。一方面, 神经网络可深度嵌入超透镜的设计环节, 通过正向预测、逆向设计与端到端联合优化等手段, 使超表面的相位分布与后端图像复原算法协同演进, 从而在设计层面提升系统对轴外像差与色差的容忍度[35]; 另一方面, 基于深度学习的可微分端到端框架, 能够将超透镜的物理相位分布与神经网络解码器紧耦合, 在±35°甚至更大视角范围内实现全彩色宽视场高质量成像, 表明软件端的联合优化可有效补偿硬件端难以完全消除的残余像差[36]。此外, 利用无序超构表面等弱硬件编码方案结合卷积神经网络进行解码, 或采用端到端联合优化方案, 亦可在单次快照内实现高精度多维信息复原, 进一步印证了算法重建对硬件像差的弥补能力。综上, 主动相位消除与软件端计算成像并非互斥, 而是相辅相成的两条路径——前者致力于在物理层抑制像差源头, 后者则通过硬件编码配合算法解码的协同范式提升系统整体容错性与稳定性。本文提出的级联超表面架构在硬件层面对大视场轴外像差进行了主动抑制, 未来工作中可进一步引入端到端联合优化与后端神经网络图像复原, 构建级联超透镜结合深度学习解码的协同成像系统, 从而在大视场、宽波段等极端工况下实现更优的成像质量, 推动超透镜向实用化与集成化迈进。

参考文献:

[1] 唐剑雄, 龚岩栋, 庞恺. 二维超构表面: 超透镜应用及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2100004.
TANG Jianxiong, GONG Yandong, PANG Kai. Two-dimensional metasurface: application and research progress of metalenses[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2100004.

[2] SARKAR S. A metasurface with three different configurations for absorption, transmission or reflection of incident electromagnetic waves[J]. Frequenz, 2025, 79: 183-191.

[3] 肖国梁, 孙立坤, 肖竹, 等. 基于广义斯涅尔定律对超构表面原理的研究[J]. 物理与工程, 2024, 34(6): 131-135.
XIAO Guoliang, SUN Likun, XIAO Zhu, et al. Study of principle of metasurface based on the generalized Snell's law[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(6): 131-135.

[4] 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.

[5] LUO X G, TSAI D, GU M, et al. Extraordinary optical fields in nanostructures: from sub-diffraction-limited optics to sensing and energy conversion[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(8): 2458-2494.

[6] REN M X, CAI W, XU J J. Tailorable dynamics in nonlinear optical metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2020, 32(3): 1806317.

[7] WANG Y J, CHEN Q M, YANG W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. Nature Communications, 2021, 12: 5560.

[8] PAN C F, WANG H, WANG H T, et al. 3D-printed multilayer structures for high-numerical aperture achromatic metalenses[J]. Science Advances, 2023, 9(51): eadj9262.

[9] XIAO X J, ZHAO Y W, YE X, et al. Large-scale achromatic flat lens by light frequency-domain coherence optimization[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 323.

[10] DENG J, YANG Y, TAO J, et al. Spatial frequency multiplexed meta-holography and meta-nanoprinting[J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 9237-9246.

[11] 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 Xizhi, SUN Xueping, WANG Wang, et al. Circular polarization multiplexing holography based on dielectric metasurface[J]. Journal of Applied Optics, 2024,

45(3): 630-636.

[12] YANG W X, CHEN K, DONG S F, et al. Direction-duplex Janus metasurface for full-space electromagnetic wave manipulation and holography[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(22): 27380-27390.

[13] YANG D H, LIN J, CHEN C, et al. Multiwavelength high-order optical vortex detection and demultiplexing coding using a metasurface[J]. Advanced Photonics Nexus, 2022, 1(1): 016005.

[14] CAO D L, LI D, HU J Y, et al. Off-axis bifocal metalens for displacement measurement[J]. Nanotechnology, 2024, 35(21): 215203.

[15] LIU M Z, ZHU W Q, HUO P C, et al. Multifunctional metasurfaces enabled by simultaneous and independent control of phase and amplitude for orthogonal polarization states[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 107.

[16] LI C, LIN J, CHEN C, et al. Single-shot wide-field full-stokes polarization imaging[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 173: 107860.

[17] CHEN C, WANG Y Q, JIANG M W, et al. Parallel polarization illumination with a multifocal axicon metalens for improved polarization imaging[J]. Nano Letters, 2020, 20(7): 5428-5434.

[18] PANIAGUA-DOMÍNGUEZ R, YU Y F, KHAIDAROV E, et al. A metalens with a near-unity numerical aperture[J]. Nano Letters, 2018, 18(3): 2124-2132.

[19] LIANG H W, MARTINS A, BORGES B V, et al. High performance metalenses: numerical aperture, aberrations, chromaticity, and trade-offs[J]. Optica, 2019, 6(12): 1461.

[20] LUO X G, ZHANG F, PU M B, et al. Recent advances of wide-angle metalenses: principle, design, and applications[J]. Nanophotonics, 2022, 11(1): 1-20.

[21] 刘逸天, 陈琦凯, 唐志远, 等. 超表面透镜的像差分析和成像技术研究[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 831-850.
LIU Yitian, CHEN Qikai, TANG Zhiyuan, et al. Research progress of aberration analysis and imaging technology based on metalens[J]. Chinese Journal of Optics, 2021, 14(4): 831-850.

[22] 杨俊雅, 黄天, 李子乐, 等. 微型化多维光场探测与成像研究进展[J]. 光电工程, 2025, 52(12): 250261.
YANG Junya, HUANG Tian, LI Zile, et al. Research progress in miniaturized multidimensional light field detection and imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 2025, 52(12): 250261.

[23] KALVACH A, SZABÓ Z. Aberration-free flat lens design for a wide range of incident angles[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(2): A66.

[24] SHALAGINOV M Y, AN S S, YANG F, et al. Single-element diffraction-limited fisheye metalens[J]. Nano Letters, 2020, 20(10): 7429-7437.

[25] PU M B, LI X, GUO Y H, et al. Nanoapertures with ordered rotations: symmetry transformation and wide-angle flat lensing[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31471.

[26] MARTINS A, LI K Z, LI J T, et al. On metalenses with arbitrarily wide field of view[J]. Acs Photonics, 2020, 7(8): 2073-2079.

[27] ZHANG F, PU M B, LI X, et al. Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces[J]. Advanced Materials, 2021, 33(11): 2008157.

[28] 孙全帮. 单一超透镜大视场成像机制及其优化设计研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
SUN Quanbang. Study on imaging mechanism and optimal design of single superlens with large field of view[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025.

[29] JO Y, PARK H, YOON H, et al. Advanced biological imaging techniques based on metasurfaces[J]. Opto-Electronic Advances, 2024, 7(12): 240122.

[30] GROEVER B, CHEN W T, CAPASSO F. Meta-lens doublet in the visible region[J]. Nano Letters, 2017, 17(8): 4902-4907.

[31] 何德伟. 大视场级联超表面透镜的聚焦与成像设计方法研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2019.
HE Dewei. Research on focusing and imaging design method of cascade hypersurface lens with large field of view[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2019.

[32] 黄振宇. 大视场宽波段成像超透镜的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
HUANG Zhenyu. Research on imaging metalens with wide bandwidth and large viewing field[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

[33] 李慰. 新型等离激元超表面设计及其二维材料激子调控研究[D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院物理研究所), 2024.
LI Wei. Supersurface design of a new plasmon and its

two-dimensional material exciton regulation[D]. Beijing : University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences), 2024.

[34] 胡中, 徐涛, 汤蓉, 等. 几何相位电磁超表面: 从原理到应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(20): 202408.
HU Zhong, XU Tao, TANG Rong, et al. Geometric-phase metasurfaces: from physics to applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(20): 202408.

[35] ZHAO Y, WANG H J, LI Z L, et al. A neuro metasurface mode-router for fiber mode demultiplexing and communications[J]. Engineering, 2025, 45: 88-96.

[36] 周嘉涛, 邓娟, 鄢波, 等. 融合神经网络的超表面设计和光场调控研究进展[J]. 光电工程, 2025, 52(11): 250188.
ZHOU Jiatao, DENG Juan, YAN Bo, et al. Advances in metasurface design and light field modulation by fusing neural networks[J]. Opto-Electronic Engineering, 2025, 52(11): 250188.