中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

可见连续波段大视场消色差单片超构表面透镜

黄昊华 李玮 刘睿 张伟 张婧英 李文昊

Achromatic monolayer metalens with elongated field of view in a continuous waveband

HUANG Hao-hua, LI Wei, LIU Rui, ZHANG Wei, ZHANG Jing-ying, LI Wen-hao

引用本文:
黄昊华, 李玮, 刘睿, 张伟, 张婧英, 李文昊. 可见连续波段大视场消色差单片超构表面透镜[J]. 中国光学, 2025, 18(6): 1267-1276. doi: 10.37188/CO.2025-0061
HUANG Hao-hua, LI Wei, LIU Rui, ZHANG Wei, ZHANG Jing-ying, LI Wen-hao. Achromatic monolayer metalens with elongated field of view in a continuous waveband[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1267-1276. doi: 10.37188/CO.2025-0061

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2025-0061

文章编号 2097-1842(2025)06-1267-10

可见连续波段大视场消色差单片超构表面透镜

黄昊华[1,2], 李 玮[1,2], 刘 睿[1,2], 张 伟[1*], 张婧英[1,2], 李文昊[1]
（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049）

摘要: 超构表面透镜存在离轴像差和材料色散, 在成像探测领域无法同时兼顾视场和工作带宽。本文基于单片超构表面构建可见光大视场消色差超透镜。采用二次型相位实现大视场探测, 进一步通过粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 优化超构表面单元结构传输相位, 实现连续波段色散调控, 在满足大视场的前提下拓展了工作带宽。对于数值孔径为 0.351 的单片超构表面透镜, 在 0.55 μm~0.65 μm 波段内实现了±20°视场角的消色差光场聚焦。在工作波段和视场范围内焦距纵向误差≤3.2 μm(~0.08f_0), 入射角探测偏差≤1.34°。本文提出的可见连续波段大视场消色差单片超构表面透镜有望在轻小型、集成化光学系统成像探测等领域发挥作用。

关 键 词: 超构表面透镜; 宽带消色差; 大视场
中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2025-0061 **CSTR:** 32171.14.CO.2025-0061

Achromatic monolayer metalens with elongated field of view in a continuous waveband

HUANG Hao-hua[1,2], LI Wei[1,2], LIU Rui[1,2], ZHANG Wei[1*], ZHANG Jing-ying[1,2], LI Wen-hao[1]
（1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*）
* *Corresponding author, E-mail: zhangwei*1990@*ciomp.ac.cn*

Abstract: Metalenses are subject to off-axis aberrations and material dispersion, which fundamentally limit their ability to achieve both wide field-of-view (FOV) and broad operational bandwidth in imaging detection systems. In this paper, an achromatic monolayer metalens with an elongated FOV in a continuous waveband is constructed using an elaborately designed metasurface. By leveraging a quadratic phase profile for large-field-of-view (FOV) detection, the metasurface unit structure transmission phase is subsequently optimized via particle swarm optimization (PSO) to achieve continuous band dispersion tuning. This approach consequently enables expanded operational bandwidth under wide-FOV conditions. For a monolayer metalens

收稿日期: 2025-04-08; **修订日期:** 2025-04-30
基金项目: 国家重点研发计划项目（No. 2022YFF1202002）; 国家自然科学基金（No. 62005270）; 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队项目（No. YSBR-103）
Supported by National Key R & D Program of China (No. 2022YFF1202002); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 62005270); CAS Project for Young Scientists in Basic Research (No. YSBR-103)

with a numerical aperture of 0.351, an achromatic focusing field covering a ±20° FOV is obtained within the continuous waveband from 0.55 μm to 0.65 μm. The maximum focal length deviation along the optical axis is 3.2 μm (~0.08 f_0), and the incident angle detection deviation ⩽ 1.34°. The proposed method can realize an achromatic monolayer metalens with an elongated FOV within a continuous waveband, which will have potential applications in lightweight and integrated optical imaging systems.

Key words: metalens; achromatic; large field of view

1 引 言

视场[1-2]和工作带宽[3-4]是成像系统的两个关键指标。为了实现宽带大视场成像，传统光学系统通常将多组透镜进行组合[5]，从而导致系统加工装配难度高、体积重量大、价格昂贵等，难以满足光学系统轻量化、小型化的发展需求。上述问题的根本原因在于系统中光学元件的设计源于经典的折射或反射定理，通过控制光学元件的不同面形实现波前调控，甚至引入非球面和自由曲面[6]，由于自然界中光学材料的折射率普遍较小，透镜的厚度远大于波长，使得传统成像系统体积庞大且笨重[7]。超构表面通过改变单元结构的尺寸，材料，转角等参数，在不同位置处产生相位突变调控光场[8-14]，优化光学系统性能，具有微型化、易集成等优势[15]。

近年来，研究人员针对超构表面透镜的工作带宽和视场开展了广泛研究[16-22]。2017 年，哈佛大学 Capasoo[23] 等研究人员利用二氧化钛 (TiO_2) 纳米柱结构的超构表面，在聚焦相位中引入与波长相关的因子，在 0.49 μm~0.55 μm 波段正入射下实现了具有消色差功能的超构表面透镜。2018 年，南京大学 Wang[24] 等研究人员利用 GaN 纳米柱和纳米孔两类互补结构组成超构表面，实现了对光场相位、群时延和群时延色散[25]的同时控制，在 0.40 μm~0.66 μm 波段正入射下，实现了宽带消色差成像。2020 年，中国科学院光电研究所 Zhang[26] 等人在太赫兹单波长下，实现了视场±40°探测。2023 年，浙江大学 Liu[27] 等人针对水下成像系统，在 0.53 μm 波长下利用焦距为 6 μm 的超透镜阵列实现了±20°视场角。目前，单层超构表面透镜的研究还未同时兼顾宽带消色差和大视场探测能力。

2017 年，Capasso 等人分析了波长为 0.532 μm，视场为 50°的双层超构表面的工作带宽对成像性能的影响[28]，发现当带宽从 0.05 μm 增加至 0.1 μm 时，系统的分辨率和成像对比度下降明显，具有较好性能的工作带宽只有 0.05 μm。2021 年，电子科技大学的 Huang[29] 等研究人员采用双层超构表面，在 0.47~0.65 μm 波段实现了±30°的大视场消色差聚焦。然而，基于双层超构表面的宽带大视场超透镜大多停留在仿真层面，其实际加工难度大，双层之间的对准精度要求高。

本文基于单片超构表面构建可见连续波段大视场消色差超透镜，采用二次型相位实现大视场探测，进一步通过粒子群算法优化超构表面单元结构传输相位，从而实现连续波段色散调控。以氧化铝 (Al_2O_3) 为衬底材料、氮化镓 (GaN) 为单元结构材料的单层超构表面实现了兼顾连续波段消色差与大视场的超透镜。此研究有望用于轻小型集成化的光学成像系统。

2 原理及设计

2.1 大视场消色差原理

本文提出的可见连续波段大视场消色差超透镜如图 1(a) 所示。

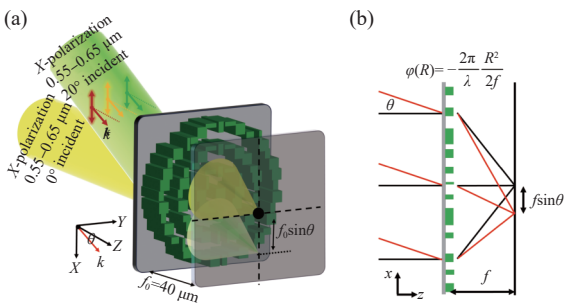


图 1 (a) 大视场消色差超透镜示意图及 (b) 二次相位原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) the large FOV achromatic metalens and (b) the quadratic phase principle

使用 0.55 μm~0.65 μm 波段的平面波入射半径 R_0=15 μm 的超透镜。当正入射时, 即入射光与光轴重合时, 不同波长的入射光经过超透镜, 出射光被聚焦在焦距 f_0=40 μm 的焦平面处, 实现连续波段内消色差。当斜入射时, 即入射光与光轴夹角为 θ 时, 不同波长的出射光仍被聚焦在 f_0=40 μm 的焦平面处, 且在焦平面内焦点发生 $f_0\times\sin\theta$ 的横向位置偏移, 实现连续波段范围内大视场探测。

可见连续波段大视场消色差超透镜原理如图 1(b) 所示。采用二次型相位将物空间倾斜入射光的旋转对称转换为像空间聚焦光束的平移对称[30], 二次型相位为:

$$\varphi(R,\lambda)=-\frac{2\pi}{\lambda}\frac{R^2}{2f}\quad,\qquad(1)$$

其中, λ 为入射光波长, f 为焦距, $R=\sqrt{x^2+y^2}$ 为透镜上任意位置 (x, y) 到中心原点之间的距离。当平面波以入射角 θ 照射二次型相位时, 出射光的相位为:

$$\varphi(R,\lambda)=-\frac{2\pi}{\lambda}\frac{R^2}{2f}+\frac{2\pi}{\lambda}x\sin\theta=-\frac{\pi}{\lambda f}[(x-f\sin\theta)^2+y^2]+\frac{\pi f\sin^2\theta}{\lambda}\quad,\qquad(2)$$

式中 $\frac{2\pi}{\lambda}x\sin\theta$ 为斜入射引入的梯度相位。通过分析发现, $\frac{\pi f\sin^2\theta}{\lambda}$ 项与位置坐标 x 无关, 且对于单波长和入射角 θ, 该项是固定值, 在实现聚焦相位分布的情况下, $\frac{\pi f\sin^2\theta}{\lambda}$ 项对焦距和焦点都无影响。因此当平面波斜入射时, 经过二次相位的出射光在传播方向 f 处聚焦, 且焦点在焦平面内存在 $f\times\sin\theta$ 横向位置偏移。

由式 (2) 可得, 二次型相位 $\varphi(R,\lambda)$ 与入射光波长 λ 相关, 即在连续波段光入射下会产生色散。为实现大视场下的连续波段内的消色差, 需在工作波段内每个入射波长下, 使其均满足该波长对应的二次型相位 $\varphi(R,\lambda)$ 分布。从公式 (2) 可以看到, 在每个波长对应的理想二次相位 $\varphi(R,\lambda)$ 分布下, $\frac{\pi f\sin^2\theta}{\lambda}$ 项依然为固定值, 二次相位形式不变, 所以只考虑二次型相位正入射下连续波段消色差, 即可满足斜入射下的连续波段消色差。

2.2　超透镜设计方案

用粒子群优化算法对单片超构表面透镜的连续波段消色差相位分布以及单元结构排布进行优化, 流程如图 2(a) 所示。首先, 建立单元结构相位随入射波长、结构参数变化的数据库, 之后随机产生单元结构参数, 排列形成超透镜, 从数据库中生成每个波长下超透镜的相位 $\varphi_{\text{real}}(R,\lambda)$。为实现连续波段内消色差, 每个波长理想相位分布应为 $\varphi_{\text{ideal}}(R,\lambda)=-\frac{2\pi}{\lambda}\frac{R^2}{2f_0}$。将随机生成相位 $\varphi_{\text{real}}(R,\lambda)$ 和每个波长理想二次型相位 $\varphi_{\text{ideal}}(R,\lambda)$ 的差的绝对值 $\Delta\varphi(R,\lambda)=|\varphi_{\text{real}}(R,\lambda)-\varphi_{\text{ideal}}(R,\lambda)|$ 作为适应度函数。通过粒子群优化算法不断迭代每个波长的相位 $\varphi_{\text{real}}(R,\lambda)$, 使适应度函数 $\Delta\varphi(R,\lambda)$ 最小且小于 $\pi/2$ (瑞利判据)[31], 进而得到最优的连续波段消色差相位分布以及超构表面的单元结构排布。

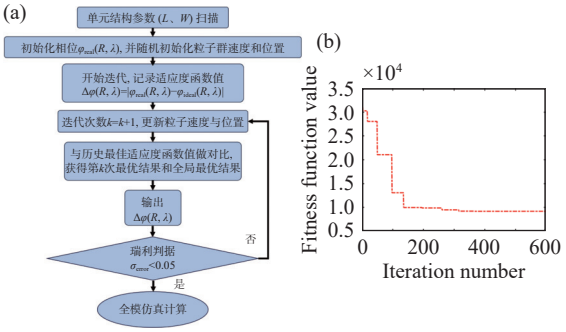


图 2　(a) 粒子群算法流程图。(b) PSO 收敛曲线

Fig. 2　(a) Flow chart for the particle swarm algorithm. (b) The convergence curve of PSO

在粒子群优化过程中, 初始种群数量设定为 200, 惯性权重表示粒子继承先前速度的能力, 用 w 表示, 较大的惯性权重有利于全局搜索, 较小的惯性权重有利于局部搜索。一般来说, 选取动态的惯性权重能更灵活, 容易满足迭代过程中变化的惯性权重需求。

本优化采用动态的惯性权重设置, 如公式(3)所示,

$$w=w_{\max}-(w_{\max}-w_{\min})\times\frac{i}{T}\quad,\qquad(3)$$

其中 i 为当前迭代次数, T 为总迭代次数。$w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 为初始设置的惯性权重边界。学习因子设置为等权重(根据经验值取 2)。整个过程进行 T=600 次迭代, 并随着迭代次数的增加使得适应度函数值不断减小, 如图 2(b) 所示。按照上述流

程得到的粒子群优化算法是针对工作波段内离散波长进行相位优化的。所优化的离散波长间隔越小，最终结果越接近连续波段内消色差所需相位，但是需要更高的计算能力，从而使计算时间增加[32-33]。由公式 (1) 可知，在超透镜的固定位置 (R 为固定值) 处，理想二次型相位分布是 $1/\lambda$ 的线性函数。因此，为构建连续波段内的消色差超透镜，先采用粒子群优化算法对工作波段的边界和中心三个离散波长进行超构表面单元结构排布优化，同时计算空间不同位置 R_i 处放置的单元结构随波长变化所响应的传输相位，判断其是否为 $1/\lambda$ 的线性函数[34]，以实现连续波段消色差相位优化。这种优化方法，将对超透镜在准连续波长下的全模计算转换为不同空间位置 R_i 处单元结构相位响应随波长的变化情况，从而降低计算量，提高计算效率。本文在粒子群优化算法的约束条件中加入超透镜空间不同位置处放置的单元结构随波长变化响应的传输相位与 $1/\lambda$ 的线性度判断条件，通过最小二乘法将 R_i 处的单元结构响应相位函数 $\varphi_{\mathrm{real}}(R_i,\lambda)$ 随 $1/\lambda$ 的变化进行线性拟合，定义拟合后相位分布为 $\varphi_{\mathrm{fit}}(R_i,\lambda)$，拟合偏差为 $\sigma_{\mathrm{error}}|_{R_i}=\sqrt{\dfrac{\sum_{\lambda}|\varphi_{\mathrm{fit}}(R_i,\lambda)-\varphi_{\mathrm{real}}(R_i,\lambda)|^2}{N-1}}$，$N$ 为工作带宽内所选取的频数。因此优化模型为：

$$\begin{aligned}&\text{Fitness function}: \min\{\Delta\varphi(R,\lambda)\}\\&\text{Constraint conditions}:\\&\begin{cases}\Delta\varphi(R,\lambda)<\dfrac{\pi}{2}\\ \sigma_{\mathrm{error}}|_{R_i}<0.05 \quad \forall R_i\in(0,R)\end{cases}.\end{aligned}$$

超透镜全模结构尺寸大小约为 R_0=15 μm，该超透镜平面被划分为 75×75 个单元设计区域，其垂直径向边缘位置到中心的 38 组结构参数如表 1 所示。

表 1　超透镜径向单元结构对应的结构参数

Tab. 1　The corresponding structure parameters of the radial unit cells for metalens

位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L/mm	116.3	175.1	197.9	253.4	119.5	113	139.1	201.2	243.6
W/mm	100	253.4	243.6	253.4	126.1	224	191.4	103.2	100
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
168.5	152.2	181.6	214.2	237.1	207.7	256.7	260	152.2	250.2
260	122.8	113	103.2	103.2	142.4	122.8	132.6	168.5	184.8
位置	20	21	22	23	24	25	26	27	28
L/mm	260	155.5	162	168.5	152.2	126.1	201.2	211	224
W/mm	188.1	260	253.4	250.2	129.3	256.7	233.8	227.3	220.8
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
230.6	224	253.4	237.1	243.6	253.4	243.6	246.9	246.9	246.9
217.5	246.9	201.2	243.6	243.6	224	256.7	253.4	253.4	253.4

3　仿真结果

3.1　单元结构排布

如图 3(a)(彩图见期刊电子版) 所示，以氧化铝 (Al_2O_3) 为衬底，选用氮化镓 (GaN) 矩形纳米柱组成单元结构，通过改变纳米柱结构的长宽尺寸控制单元结构传输相位，从而调控光场相位。单元结构周期 P 为 0.4 μm，高度 H 为 0.8 μm，衬底厚度为 0.3 μm。采用时域有限差分法，光源从衬底入射，在 x 和 y 方向上设置周期性边界条件，z 方向上应用完美匹配层 (PML)，监视器和纳米柱上表面的距离要大于 $\lambda/2$，避免倏逝波的影响。通过对不同波长下单元结构的长 L 与宽 W 在 0.1 μm~0.26 μm 范围内扫描计算，获得工作波段内不同单元结构的传输相位及振幅，如图 3(b)(彩图见期刊

电子版) 所示。整个参数扫描仿真过程时长约为 4.5 h。

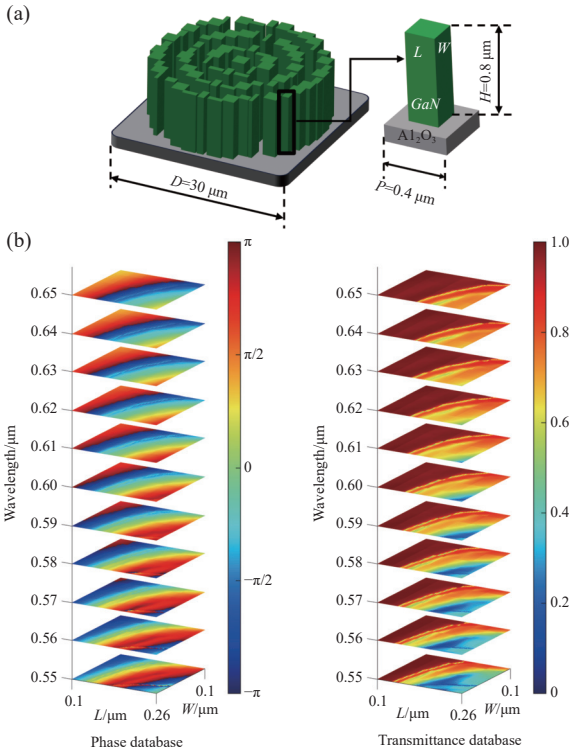


图 3　超透镜阵列单元结构。(a) 单元结构示意简图。(b) 不同波长下, 不同 L 与 W 对应的相位与振幅数据库

Fig. 3　Structure of metasurface array units. (a) Schematic diagram of the unit structure. (b) Phase and transmittance efficiencies as functions of the length L and the width W of the unit structure at different wavelengths

依据上述优化模型, 为了获得波段 0.55~0.65 μm 范围内连续的消色差相位, 以 0.55 μm、0.60 μm、0.65 μm 三个波长作为工作波段内的离散波长, 采用粒子群优化算法进行消色差相位优化, 同时限制单元结构的传输相位在工作波段内是 1/λ 的线性函数。图 4(a)~4(c)(彩图见期刊电子版) 展示了工作波段内 0.55 μm、0.60 μm、0.65 μm 三个离散波长的相位分布, 红色实线是理想的消色差二次型相位分布, 蓝色散点是优化之后的超构表面单元结构排列构建出的超透镜相位分布。针对优化之后的超构表面, 计算了空间坐标不同位置 R_i 处单元结构的相位随波长倒数 1/λ 的变化情况, 采用最小二乘法进行拟合并计算拟合偏差 $\sigma_{\text{error}}|_{R_i}$, 如图 4(d)(彩图见期刊电子版) 所示。在工作波段内, 不同位置处的拟合偏差都小于 0.05, 表明优化获得的单元结构产生的传输相位近似为 1/λ 的线性函数。

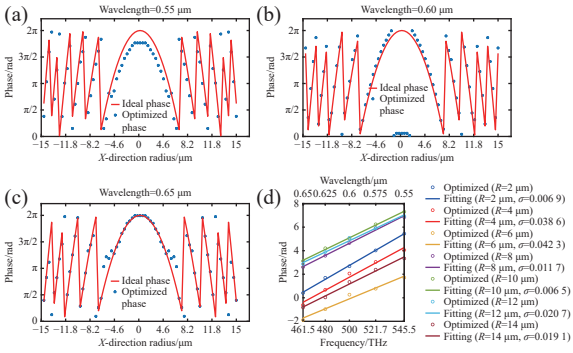
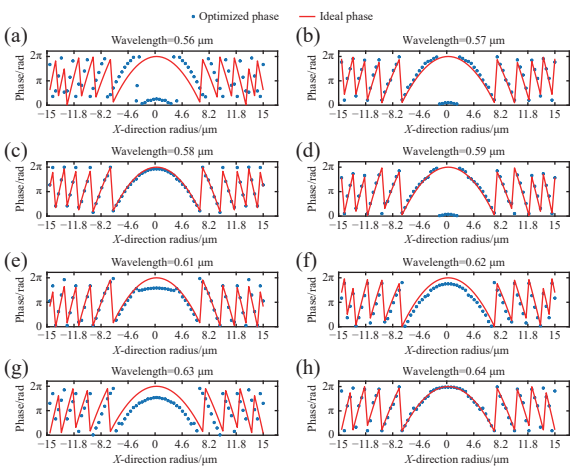


图 4　(a~c) 各优化波长下, 消色差超透镜理想相位分布与实际相位分布图。红色实线为理想相位, 蓝色散点为实际相位。(d) 超透镜不同位置处的单元结构响应相位随波长变化示意图。其中离散圆点为实际相位, 实线为其线性拟合结果

Fig. 4　(a–c) Ideal and optimized phases of the achromatic metalens at each optimized wavelength. The red solid line represents the ideal phase and the blue dots represent the optimized phase. (d) Phases of the unit structure at different positions on the metalens as a function of the wavelength. The discrete dots represent the optimized phases, and the solid lines represent the linear fitting results

基于优化得到超构表面单元结构分布, 进一步模拟了工作波段内其它波长的相位分布, 结果如图 5(a)~5(h)(彩图见期刊电子版) 所示, 并且计算了不同波长下实际相位分布与理想相位分布的偏差, 如图 5(i)(彩图见期刊电子版) 所示。可以看到波段内所有波长下的偏差都小于 π/2, 满足瑞利判据。由此可知, 所设计超构表面透镜在连续工作波段 0.55 μm~0.65 μm 内实现了消色差。



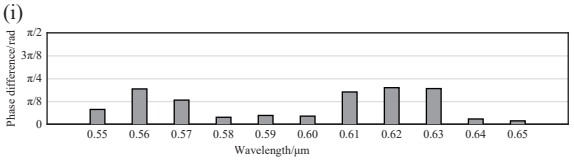


图 5 (a~h) 工作波段内其它波长的理想相位分布与实际相位分布。红色实线为理想相位分布，蓝色散点为实际相位分布。(i) 工作波段内各波长的理想相位与优化之后相位的差值

Fig. 5 (a~h) Ideal and optimized phase distributions at non-optimized wavelengths. The red solid lines represent the ideal phase distributions and the blue dots represent the optimized phase distributions. (i) Differences between the ideal phase and the optimized phase at each wavelength in the working band

3.2 全模仿真

采用时域有限差分算法对超构表面透镜进行全模仿真。在所有方向上均采用完美匹配层 (PML) 边界条件，仿真网格精度为 2。图 6(a)(彩图见期刊电子版) 展示了 0.55 μm、0.60 μm、0.65 μm 3 个波长的 X 偏振平面波正入射下，在设定焦距 f_0=40 μm 处 xy 平面内聚焦光场强度分布。图 6(b)(彩图见期刊电子版) 中展示了消色差超透镜在工作波段 0.55~0.65 μm 内焦距 f_0=40 μm 处的聚焦光斑的 FWHM(黑色五角星) 以及聚焦效率 (蓝色虚线)，红色实线为设计的超构表面透镜的衍射极限。其中，聚焦效率η定义为一个艾里斑内聚焦光束的光强度与透射光束的光强度之比。由于超透镜对 X 偏振光聚焦，则聚焦效率等于出射 X 偏振光的波印廷矢量面积分与入射光功率之比乘透过率：

$$\eta = \frac{\iint_{\text{out}} \langle \boldsymbol{S}_{\text{x}} \rangle \mathrm{d}A}{\iint_{\text{in}} \langle \boldsymbol{S} \rangle \mathrm{d}A} \times \tau$$

$$\langle S \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T \boldsymbol{S}(t)\mathrm{d}t = Re\left(\frac{1}{2}\boldsymbol{E}_{\text{m}} \times \boldsymbol{H}_{\text{m}}^{*}\right) \quad , \qquad (4)$$

其中，$\boldsymbol{S}_{\text{x}}$ 为出射偏振光的波印廷矢量，$\boldsymbol{S}$ 为入射光的波印廷矢量，$\boldsymbol{E}_{\text{m}}$ 为电场的复振幅矢量，$\boldsymbol{H}^{*}_{\text{m}}$ 为磁场复振幅矢量的共轭，τ 为透过率。图 6(b) 中三个优化波长下的超构表面透镜理论衍射极限值分别为 0.956 μm、1.043 μm 和 1.130 μm，仿真得到的焦斑 FWHM 为 0.975 μm、1.137 μm 和 1.209 μm，表明聚焦光斑接近衍射极限。同时工作波段内超构表面透镜聚焦的最高效率为 46.07%，平均效率约为 40.23%。上述计算结果表明在设定焦距 f_0=40 μm 处，0.55 μm~0.65 μm 波段范围内优化获得的超构表面透镜实现了消色差，且焦斑尺寸接近衍射极限。

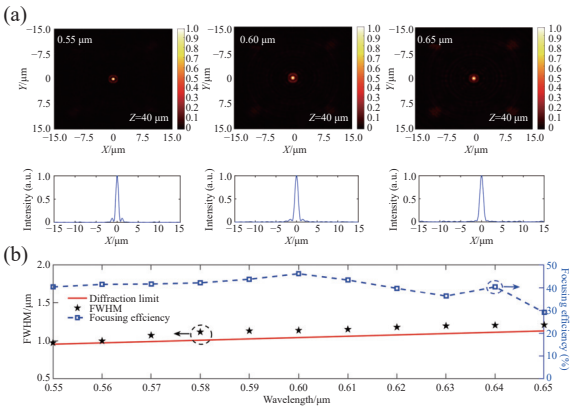


图 6 (a) 各优化波长正入射下，在焦距 f_0=40 μm 处 xy 平面内聚焦光场强度分布示意图。上半部分表示焦平面在不同波长下的聚焦效果，下半部分表示焦平面处焦斑沿 x 方向的归一化强度分布。(b) 工作波段内焦斑尺寸及聚焦效率随波长变化示意图。其中黑色五角星代表工作带宽内各波长在 z=40 μm 处聚焦光斑的 FWHM，红色实线为衍射极限，蓝色虚线代表聚焦效率

Fig. 6 (a) Electrical intensity distributions of the focused light field in the xy-plane at the focal length f_0 = 40 μm for each of the optimized wavelengths under normal light incidence. The upper parts show the electrical intensity distributions on the focal plane at the different wavelengths, and the lower parts show the corresponding normalized intensity distributions of the focal spot along the x-direction on the focal plane. (b) Focal spot size and focusing efficiency as a function of wavelength within the working waveband. The black stars represent the FWHM values of the focal spot at the focal length f_0 = 40 μm for each wavelength within the working waveband; the red solid line represents the diffraction limit, and the blue dashed line represents the focusing efficiency

进一步，计算了光场在 xz 平面的电场强度分布图，如图 7(a)(彩图见期刊电子版) 所示。蓝色虚线是不同波长下沿传播方向 z 轴的最大光场强度位置，即每个波长下的实际焦距。可以看到实际焦距与理想焦距 f_0=40 μm 是有偏差的，主要原因是优化之后获得的相位与理想消色差二次型相位分布存在偏差。图 7(b)(彩图见期刊电子版) 展

示了工作波段 0.55 μm~0.65 μm 内, 每个波长实际焦距的分布, 用蓝色圆点表示。从图中可以看出, 实际焦距和理想焦距的最大偏差为 3.2 μm (~0.08f_0)。同时以 z 轴上归一化电场强度的一半对应的纵向传输距离作为聚焦光场焦深, 图 7(b)中的黑色方点表示每个波长下的聚焦光场焦深。可以看到, 实际焦距和理想焦距的偏差都在焦深范围内, 因此尽管优化获得相位与理想消色差相位间存在偏差, 导致焦距偏移, 但是由于焦深比较长, 可以抵消上述偏差的影响。

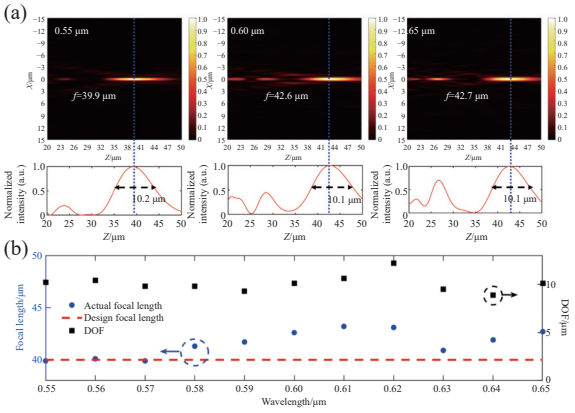


图 7　(a) 各优化波长正入射下, xz 平面光场强度分布示意图。上半部分是 xz 平面的光场分布。下半部分是沿 z 轴的能量归一化强度分布图, 图中的黑色双箭头为不同波长下的焦深。(b) 工作波段内, 超构表面透镜的实际焦距和焦深随波长变化情况。蓝色圆点表示实际焦距, 红色虚线表示预设焦距, 黑色方点表示工作波段内各波长的焦深

Fig. 7　(a) Electrical intensity distributions in the xz plane under normal incidence conditions for each optimized wavelength. The upper parts show the electrical intensity distributions in the xz plane. The lower parts show the normalized electrical intensity distributions along the z-axis, and the black double arrows in the figures indicate the focal depths at the different wavelengths. (b) Actual focal length and depth of focus (DOF) as functions of the wavelength. The blue dots indicate the actual focal length values, the red dashed line indicates the focal length f_0=40 μm, and the black square dots indicate the DOF values

为了表明优化后的消色差超构表面透镜具有大视场角度探测能力, 仿真计算了以 5°、10°、15°、20°斜入射下的光场聚焦结果。图 8(彩图见期刊电子版) 展示了 0.55 μm、0.60 μm、0.65 μm 波长斜入射下, xz 平面内的光场强度分布图。

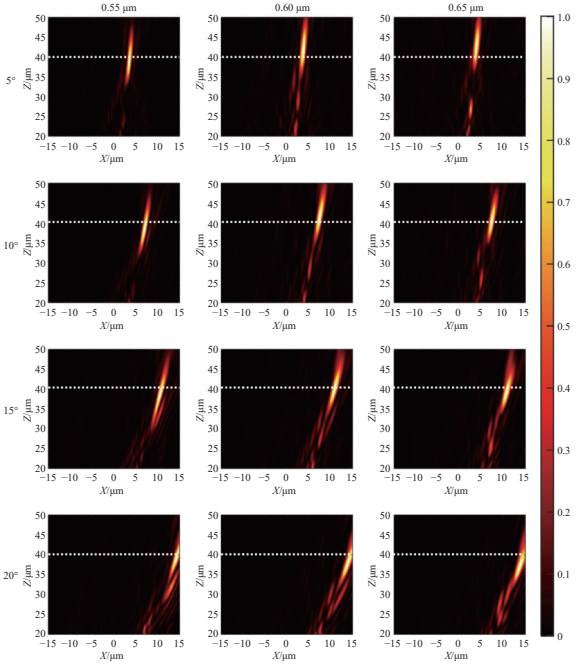
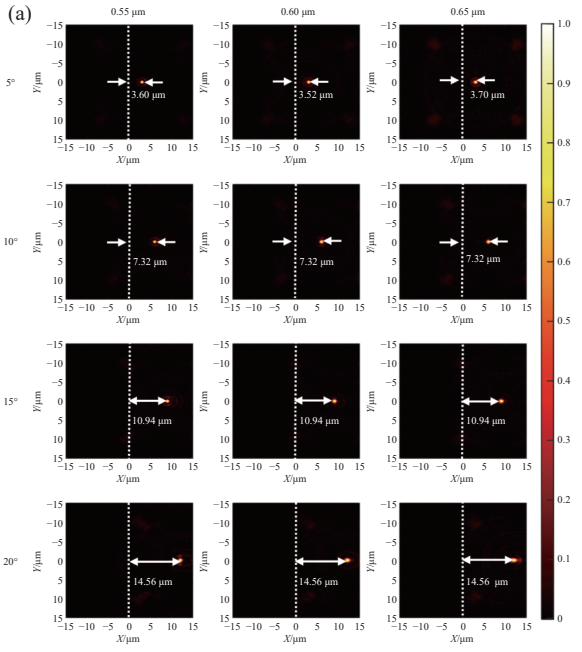


图 8　不同波长下, 入射角分别为 5°、10°、15°、20°时, xz 平面内电场归一化强度分布。其中白色虚线为理想焦距 f_0=40 μm 处

Fig. 8　Normalized electrical intensity distributions on the xz plane at angles of incidence of 5°, 10°, 15° and 20°. The white dashed lines indicate the ideal focal length f_0 = 40 μm

图中白色虚线为预设焦距 f_0=40 μm 的位置, 可以看到在斜入射 20°范围内, 实现了消色差聚焦。同时计算了在理想焦距 f_0=40 μm 处, xy 平面内的聚焦光斑分布情况, 如图 9(a)(彩图见期刊电子版) 所示。



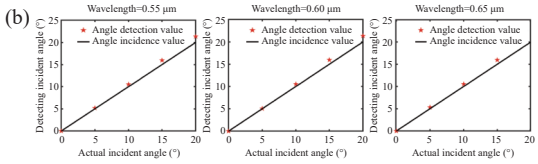


图 9 (a)0.55、0.60、0.65 μm 3 个波长下，入射角分别为 5°、10°、15°、20°时，在理想焦距 f_0=40 μm 处，*xy* 平面聚焦光场的归一化电场强度分布图。其中白色虚线为焦平面正中位置。(b) 不同波长下，根据焦斑偏移量计算的入射角误差

Fig. 9 (a) Normalized electric intensity distributions on the *xy*-plane at angles of incidence of 5°, 10°, 15°, and 20° at the ideal focal length f_0 = 40 μm. (b) Detected angle of incidence characteristics calculated based on the offset of the focal spot at the different wavelengths

对于不同入射角，聚焦光斑在焦平面内发生偏移。利用函数关系$\Delta x = f\sin\theta$计算焦点实际偏移量对应的入射角，并与实际的入射角进行比较，如图 9(b)(彩图见期刊电子版) 所示。黑色实线为实际的入射角，红色五角星为计算得到的入射角。对于实际入射角分别为 5°、10°、15°、20°时，波长 0.55 μm 的角度探测误差分别为 0.16°、0.54°、0.96°、1.34°；波长 0.60 μm 的角度探测误差分别为 0.04°、0.54°、0.96°、1.34°；波长 0.65 μm 的角度探测误差分别为 0.30°、0.54°、0.96°、1.34°。计算得到的探测入射角与实际入射角之间的误差随波长的增大而增大。这是因为当入射角增大时，单元结构的等效高度发生改变，影响单元结构相位响应，从而产生误差。由图 9(b) 可以看到，在 0.55 μm~0.65 μm 波段、±20°以内斜入射时，探测角度的最大误差为 1.34°。表 2 将本文与部分国内外已有研究进行了性能对比。现有研究多聚焦于带宽、视场单一性能的提升，或通过双层设计同时实现大视场与宽带宽。本文基于单层超表面设计，在 0.55~0.65 μm 工作波段实现了±20°的探测视场，探测误差小于 3.3%。在集成化、多功能复用方面具有一定的优势。

表 2 与已有研究参数的横向对比

Tab. 2 Side-by-side comparison of the parameters with the existing studies

团队	单元结构	工作波段	视场角	层数	数值孔径
哈佛大学Capasoo[23]	TiO_2方柱	0.49~0.55 μm	0°	1	0.201
南京大学Wang. S. M[24]	GaN互补六棱柱	0.40~0.66 μm	0°	1	0.106
中国科学院光电所Zhang[26]	Si椭圆纳米柱	10.6 μm	±40°	1	0.850
浙江大学Liu. S. J[27]	GaN矩形纳米柱	0.53 μm	±20°	1	0.398
哈佛大学Capasoo[28]	TiO_2方柱	0.532 μm	±25°	2	0.44
电子科技大学Huang[29]	TiO_2圆柱	0.47~0.65 μm	±30°	2	0.086
安徽大学Zhang[33]	氮化铝“H”型“T”型纳米柱	0.26~0.35 μm	0°	1	0.371
新加坡材料研究与工程研究所Lassalle. E[32]	Si圆纳米柱	0.74 μm	±50°	1	0.894
本课题组	GaN矩形纳米柱	0.55~0.65 pm	±20°	1	0.351

4 结 论

本文利用超构表面传输相位对入射光进行色散调控，并以二次型相位为目标，以不同的消色差波长作为多维解空间，借助粒子群优化算法对超构表面透镜相位及单元结构排布进行优化，在单层超构表面透镜上集成了连续波段消色差聚焦以及大视场角探测两种功能。在 0.55~0.65 μm 波段内实现了±20°视场角的消色差光场聚焦。在设计波段和视场范围内焦距的最大纵向误差为 3.2 μm(~0.08f_0)，平均聚焦效率约为 40.23%，入射角的最大探测偏差为 1.34°。本文提出的单层超构表面透镜为应用于宽波段大视场场景下的成像和探测领域提供了思路，具有一定的应用前景。

参考文献：

[1] WIRTH-SINGH A, FRÖCH J E, YANG F, *et al*.. Wide field of view large aperture meta-doublet eyepiece[J]. *Light*:

Science & Applications, 2025, 14(1): 17.

[2] DENG J, WU K L, FU R, *et al*.. Full-space and wide field-of-view metalens based on 1D photonic crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182: 112187.

[3] CHEN CH CH, GU H G, LIU SH Y. Ultra-broadband diffractive imaging with unknown probe spectrum[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2024, 13(1): 213.

[4] PENG Y Y, ZHANG J W, ZHOU X T, *et al*.. Metalens in improving imaging quality: advancements, challenges, and prospects for future display[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(4): 2300731.

[5] VALLE P J, CAGIGAL M P. Analytic design of multiple-axis, multifocal diffractive lenses[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1121-1123.

[6] HAO Q, TAO X, HU Y, *et al*.. Interferometric measurement of high-order aspheric surface parameter errors based on a virtual-real combination iterative algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27014-27030.

[7] PAN M Y, FU Y F, ZHENG M J, *et al*.. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2022, 11(1): 195.

[8] 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.

[9] ZUO J W, BAI J, CHOI S, *et al*.. Chip-integrated metasurface full-Stokes polarimetric imaging sensor[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2023, 12(1): 218.

[10] ARBABI E, KAMALI S M, ARBABI A, *et al*.. Full-Stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3132-3140.

[11] REN Y Z, GUO S H, ZHU W Q, *et al*.. Full - stokes polarimetry for visible light enabled by an all - dielectric metasurface[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(7): 2100373.

[12] LIU J Y, CHU J K, ZHANG R, *et al*.. Wide field of view and full Stokes polarization imaging using metasurfaces inspired by the stomatopod eye[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(6): 1137-1146.

[13] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, ZHU A Y, *et al*.. Multispectral chiral imaging with a metalens[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4595-4600.

[14] ENGAY E, HUO D W, MALUREANU R, *et al*.. Polarization-dependent all-dielectric metasurface for single-shot quantitative phase imaging[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3820-3826.

[15] YANG Y, SEONG J, CHOI M, *et al*.. Integrated metasurfaces for re-envisioning a near-future disruptive optical platform[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2023, 12(1): 152.

[16] LIU R, LI W H, ZHANG W, *et al*.. Manipulating continuous optical spectra in the wave vector domain by metalens[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(2): 598-601.

[17] SHRESTHA S, OVERVIG A C, LU M, *et al*.. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2018, 7(1): 85.

[18] SUN T, HU J P, ZHU X J, *et al*.. Broadband single - chip full stokes polarization - spectral imaging based on all - dielectric spatial multiplexing metalens[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100650.

[19] CHEN W T, ZHU A Y, SISLER J, *et al*.. Broadband achromatic metasurface-refractive optics[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7801-7808.

[20] 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.

[21] WANG J L, DENG Y T, WANG CH M, *et al*.. Portable astronomical observation system based on large-aperture concentric-ring metalens[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2025, 14(1): 2.

[22] BARANIKOV A V, KHAIDAROV E, LASSALLE E, *et al*.. Large field - of - view and multi - color imaging with GaP quadratic metalenses[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(1): 2300553.

[23] KHORASANINEJAD M, SHI Z, ZHU A Y, *et al*.. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1819-1824.

[24] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al*.. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*,

2018, 13(3): 227-232.

[25] 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.

[26] ZHANG Y X, JIN J J, PU M B, *et al*.. Full stokes polarimetry for wide-angle incident light[J]. *Physica Status Solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 2020, 14(5): 2000044.

[27] LIU S J, ZHANG Z J, CHENG J X, *et al*.. Design of full stokes vector polarimetry based on metasurfaces for wide-angle incident light[J]. *Photonics*, 2023, 10(4): 382.

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

[29] HUANG ZH Y, QIN M S, GUO X W, *et al*.. Achromatic and wide-field metalens in the visible region[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13542-13551.

[30] 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): 31471-31477.

[31] VAN DEN BOS A. Rayleigh wave-front criterion: comment[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(9): 2307-2309.

[32] ZHAO Y N, CHEN CH, ZHONG X, *et al*.. Enhancing OFDM with index modulation using heuristic geometric constellation shaping and generalized interleaving for underwater VLC[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 13720-13732.

[33] ZHANG CH, CHEN M SH, ZHANG L R, *et al*.. Broadband achromatic metalens design based on predictive neural network and particle swarm optimization-genetic algorithm[J]. *New Journal of Physics*, 2023, 25(10): 103040.

[34] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al*.. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.

作者简介：

张　伟(1990—)，男，山西大同人，博士，副研究员，2011 年于电子科技大学获得学士学位，2016 年于中国科学院大学获得博士学位，主要从事光栅理论设计及制作工艺、微纳光学等方面的研究。E-mail: zhangwei1990@ciomp.ac.cn