光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024032703

近红外单层大视场角超透镜研究

陈若卉[1]，鲁依林[1]，赵兴岩[1]，邱　阳[1]，郑少南[1]，钟其泽[1]，董　渊[1,2*]，胡　挺[1]

（上海大学 1. 微电子学院；2. 上海市智能感知芯片技术协同创新中心，上海 201800）

摘　要： 大视场角透镜是成像系统的重要组成部分。为实现大视场成像效果，传统光学中需要由多个镜片组成的透镜组来纠正不同入射光角度带来的像差，从而在整个视场范围内获得无畸变的清晰图像。文章设计并制造了一种近红外超透镜，由分布在衬底两侧的单层超表面和金属光阑组成。该器件能够有效抑制像差，在 940 nm 波长下实现 120°的广角成像。实验结果证明所制造的器件在设计的视场角范围内具有良好的聚焦性能，平均实验聚焦效率为 45%。

关键词： 超表面；超透镜；大视场角；近红外；光学设计

中图分类号： TP391.41；TN219　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0531－06

Research on the Near-Infrared Single-Layer Metalens with Large Field-of-View

CHEN Ruohui[1], LU Yilin[1], ZHAO Xingyan[1], QIU Yang[1],
ZHENG Shaonan[1], ZHONG Qize[1], DONG Yuan[1,2], HU Ting[1]

(1. School of Microelectronics, Shanghai University; 2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Intelligent Sensing Chip Technology, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN)

Abstract: Large field-of-view (FOV) lens is an essential component in imaging systems. To realize the large FOV, conventional optics requires the combination of multiple lenses into a lens group to correct the aberration caused by different angles of incident light. In this paper, a near-infrared metalens is designed and fabricated, which consists of a single-layer metasurface and a metal aperture distributed on both sides of the substrate. The device can suppress aberration effectively and realize a 120° large FOV imaging at the wavelength of 940 nm. Experiments have demonstrated that the fabricated device exhibits good focusing performance within the designed FOV range, with an average experimental focusing efficiency of 45%.

Key words: metasurface; metalens; large field-of-view; near-infrared; optical design

0　引言

视场角(FOV)是衡量光学系统性能的重要指标之一。具有大视场的成像设备可以一次性捕获周围场景的光信号，从而获得更全面的信息，无需借助图像拼接或机械扫描。然而，传统的广角光学系统基于折射透镜，随着入射光角度的增加，与角度相关的三阶(Seidel)像差，例如慧差、像散、场曲，会随之增加，导致所捕获的图像不清晰。为了抑制这些像差，传统解决方案通常是使用多个堆叠的折射透镜形成复合透镜组。但这种多透镜的结构增加了光学系统的尺寸、重量、成本和复杂性，不利于器件的轻量化、小型化应用。

近年来，由亚波长纳米单元阵列组成的超表面表现出巨大的应用潜力[1-3]。根据广义斯涅尔定律，它能够对入射光波的振幅、偏振和相位等基本特性进行灵活调控[4]。得益于超表面的二维平面结构和亚波长的单元尺寸，与传统折射光学相比，超表面具

收稿日期：2024－03－27.
基金项目：上海市智能感知芯片技术协同创新中心、上海市汽车智能网联交互芯片与系统重点实验室揭榜挂帅项目；红外探测国家重点实验室开放课题项目(IRDT-23-08)；国家自然科学基金项目(62204149，62205193，U23A20356).
* **通信作者：**董　渊

有轻量化和小巧化的特点，有望大大降低传统光学系统的尺寸和复杂性[5-8]。此外，超表面的制备过程与互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺兼容，可以实现低成本的批量制造[9-11]。基于上述优势，超表面已经在光束整形、全息投影、偏振检测、增强现实等众多领域实现了广泛应用[12-17]。

基于超表面的平面光学透镜为紧凑的广角成像系统提供了可能。一般超透镜的电磁响应高度依赖于入射光角度，也就是具有角度色散的特性，这导致了一个有限的视场角[18-20]。理想的广角超透镜能够将不同角度的入射光束聚焦在同一焦平面上而不产生像差，焦点的位置与入射角相关。曲面基底上的大视场成像超表面结构在早期被提出[21]，但曲面基底使器件的制造和光学系统的集成都具有挑战性。之后，Arbabi 等用双层级联的超表面在近红外波长下实现了 60°的 FOV[22]，其中第一个超透镜被用于矫正离轴像差，第二个超透镜提供相位补偿实现聚焦，最终实现大视场成像效果。相较于多层超透镜结构，单层的大视场超透镜具有更简单且易于制造的结构[23-26]，如 Engelberg 等在近红外波长使用 FOV 为 30°的单层超透镜进行了户外成像[25]；Xie 等将超透镜与后置波矢滤波器集成[26]，在 830 nm 的工作波长下将 FOV 拓展至 120°以上，但其使用的后置波矢滤波器增加了制造成本。目前，在近红外波长下超透镜仍存在视场角较小、制造成本较高、结构不够简单的问题。

本文在 940 nm 的近红外波长下设计并制造了具有 120°大视场角的单层超透镜，它由一个金属光阑和单层超表面的简单结构组成，金属光阑被直接集成在衬底背面来减少像差。使用光线追踪算法对超透镜的相位面进行优化设计，并对所设计的超透镜进行了制造和实验表征，分析了不同入射角下的焦斑质量，对其聚焦性能进行了研究。

1　基本原理

在超表面的设计中，可以通过调整亚波长纳米单元的尺寸来改变其有效折射率，从而对其透射相位进行调控。普通的聚焦超透镜采用双曲相位分布，存在较为严重的离轴像差。采用二次相位分布的超透镜可以实现大视场功能，这一原理由 Pu 等首次提出[27]，其相位表达式为：

$$\Phi(x,y)=\boldsymbol{k}_0\frac{x^2+y^2}{2f} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{k}_0$ 为自由空间波矢，f 为焦距，x 和 y 为超透镜上的半径位置。公式(1)为正入射下的情况，若入射光与透镜法线存在一个角度 θ，则出射光携带的相位为：

$$\Phi(x,y)=\boldsymbol{k}_0\frac{x^2+y^2}{2f}+\boldsymbol{k}_0x\sin\theta=\frac{\boldsymbol{k}_0}{2f}[(x+f\sin\theta)^2+y^2]-\frac{f\boldsymbol{k}_0\sin^2\theta}{2} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{k}_0x\sin\theta$ 是由斜入射引起的梯度相位。将等式中最后一项常数项忽略不计可以看出，相对于正常入射，斜入射带来的影响是焦点的空间平移，如图 1 所示。因此，二次相位可以将斜入射光施加的线性相位转化为空间位移，从而实现大视场角。

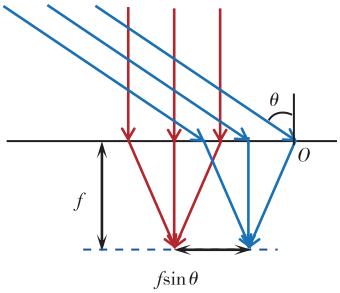


图 1　二次相位原理示意图

2　仿真设计

2.1　相位设计

当入射光直接照射在具有二次相位的超透镜上时具有较大的球差，从而造成较强的背景噪声和较低成像对比度。为了解决这一问题，可以借鉴传统光学中弥补像差的常见方法，在超透镜的前面增加一个孔径光阑，不同角度的入射光经过光阑被分离开来，照射到超透镜的不同部分，不引入额外的波前畸变，抑制了像差[28]。所设计的超透镜结构示意图如图 2 所示，一个直径为 200 μm 的圆形金属光阑被直接集成在厚度为 500 μm SiO_2 衬底背面，衬底正

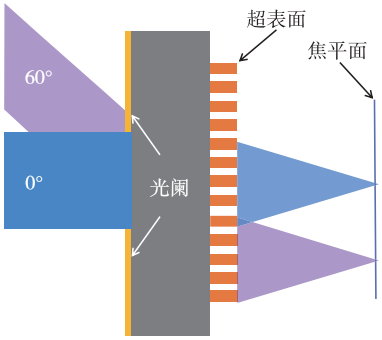


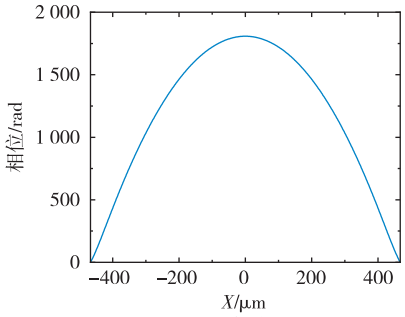
图 2　超透镜结构示意图

面为直径为 940 μm 的单层非晶硅(a-Si)超透镜,超透镜的焦距为 365 μm,具有 0.26 的数值孔径(NA)。

本文利用光线追踪算法对超透镜的整体相位进行设计,使用商业光学计算软件 OpticStudio(Zemax, LLC)中的二元相位面来模拟超透镜的相位分布。二元相位面没有厚度,可用以下多项式表示:

$$\Phi(\rho)=\sum_{n=1}^{7}a_n\left(\frac{\rho}{R}\right)^{2n} \tag{3}$$

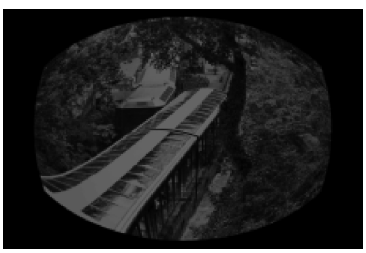
式中,R 为二元相位面的归一化半径,ρ 为超透镜上的径向位置,a_n 为相关系数。相位面为旋转对称分布,因此只需要对 0°～60°的半视场进行设计。使用阻尼最小二乘法在 940 nm 波长下对系数 a_n 进行反复优化,使入射角为 0°～60°的情况下焦斑大小尽量小。最终优化出的超透镜理想相位轮廓如图 3(a)所示。进一步地,利用 Zemax 中的图像模拟功能,用所优化出的超透镜系统对图 3(b)中所示的原始图像进行了模拟成像。模拟成像效果展示在图 3(c)中,可以看出在整个视场范围内图像都较为清晰,表现出较高的成像质量。其中,产生的桶形畸变是广角成像系统难以避免的,这种畸变不影响图像的分辨率,可以使用图像处理软件进行校正。这验证了所优化的超透镜理想相位面能够在±60°的视场角内实现晰成像。



(a) 理想相位分布



(b) 原图像



(c) 模拟成像效果

图 3 超透镜的理想相位及成像模拟结果

2.2 器件设计

所设计的超表面结构由 SiO_2 衬底上的 a-Si 纳米柱构成,根据椭偏仪的测量结果,使用到的 a-Si 和 SiO_2 的材料在波长为 940 nm 下的折射率分别为 3.2 和 1.47。本实验使用时域有限差分(FDTD)仿真软件 Ansys Lumerical 对超透镜进行电磁仿真模拟。选取高度 H 为 690 nm,直径 D 从 100 nm 变化到 300 nm 的 a-Si 纳米柱,按 480 nm 的周期 P 排列在正方形晶格当中,纳米柱的模拟相位和透过率随直径的变化如图 4 所示,从图中可以看出整体纳米柱的相位覆盖了 0～2π 的范围,且除了当仿真尺寸为直径 300 nm 时谐振导致了透过率的突变外,在其他仿真尺寸下的纳米柱均保持极高的透过率,所有纳米柱的模拟平均透过率为 87%。图 4 中的插图为超表面单元的结构示意图。

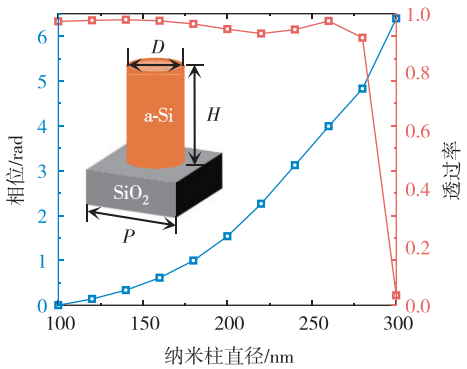
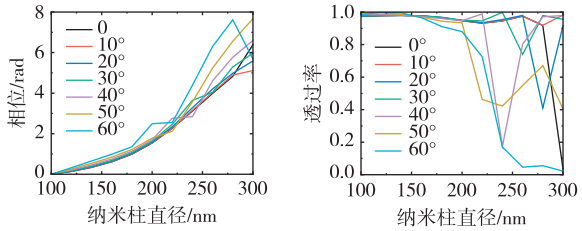


图 4 纳米柱单元的透过率和相位变化

然而,纳米柱的电磁响应与入射光角度相关,随着入射角度的变化,相位和透过率曲线会发生变化。相位的变化带来不同角度下超透镜的实际相位与理想相位的偏差,有可能影响焦点的质量,而透过率则影响不同角度下的成像亮度。因此,在设计大视场超透镜时应尽量选择电磁响应对角度敏感性较低的单元结构。图 5(a)和(b)分别为从 0°～60°平面波入射下的纳米柱相位和透过率随直径变化的模拟结果,入射光源均设置位于 SiO_2 衬底内。由图可见,当入射角在 0°～30°范围内变化时,纳米柱的相位受入射光角度影响较小,且平均透过率均保持在 85%以上,而在 40°～60°范围内变化时相位曲线略有偏移,透过率有所下降。当入射角为 60°时平均透过率达到最低,但仍有 60%以上。总体来说,所设计

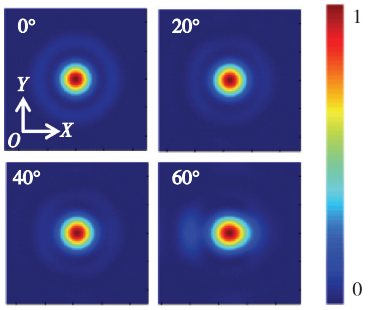
的超表面单元结构受入射光角度影响较小。



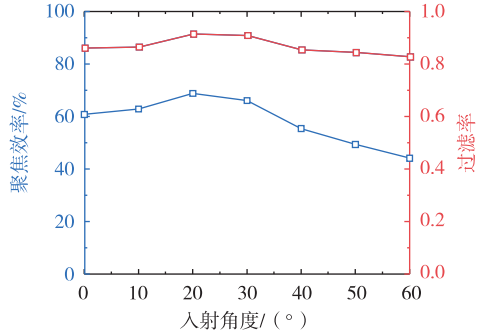
(a) 相位变化　(b) 透过率变化

图 5　不同入射角下纳米柱的相位和透过率变化

根据图 3(a)所示的理想相位轮廓排列纳米柱得到超表面结构，仿真模拟整个超透镜结构，图 6(a)展示入射角为 0°～60°范围内超透镜的归一化焦平面电场强度分布。从图中可看出，0°～60°入射光经过超透镜均能正常聚焦且焦点形状良好。不同角度的入射光的模拟聚焦效率和整体器件透过率如图 6(b)所示，聚焦效率被定义为焦点强度与照射到超透镜上的光强之比，各入射角下的平均模拟聚焦效率为 58%，在 60°入射角下模拟聚焦效率最低为 44%。聚焦效率曲线与透过率曲线具有相同的变化趋势，因此可以推测出不同视场角下超透镜聚焦效率的变化与损失的传输功率有关。



(a) 不同入射角下归一化焦平面电场强度分布



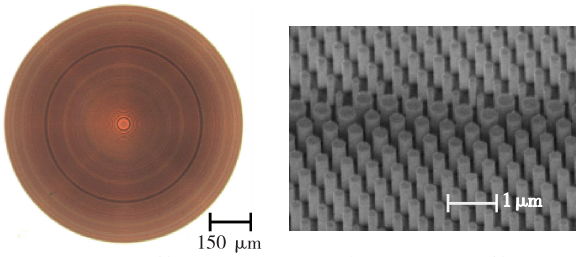
(b) 不同入射角下聚焦效率和透过率变化曲线

图 6　超透镜仿真结果

3　实验表征

3.1　制备测试

采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术，在 500 μm 厚的 4 寸熔融石英衬底上生长了 690 nm 厚的 a-Si 薄膜。经过电子束光刻(EBL)之后，沉积一层铬(Cr)作为后续刻蚀 a-Si 过程中的硬掩膜，采用剥离(Lift-off)工艺将剩余的光刻胶和其上方的 Cr 一起去除，将图案转移至 Cr 上。接着以 Cr 作为硬掩膜，对 a-Si 薄膜进行干法刻蚀得到纳米柱结构。另外在衬底背面沉积 130 nm 的 Cr，经过双面对准光刻与湿法刻蚀方法制备出直径为 200 μm 的圆形 Cr 金属光阑，完成整个超透镜的制备。制备得到的直径为 940 μm 的超透镜的光学显微镜图像如图 7(a)所示。图 7(b)展示了倾斜视角的扫描电子显微镜图像，可看出所制备的超透镜保持较好的纳米柱结构。



(a) 光学显微镜图片　(b) 扫描电子显微镜图片

图 7　超透镜制造结果

搭建的超透镜测试系统示意图如图 8 所示。将一个波长为 940 nm 的窄线宽激光器连接到光纤准直器上作为超透镜测试系统的入射光源，并将其置于±90°的半圆形滑轨上，通过移动光源在半圆形轨道上的位置来实现入射光角度从 0°～60°的变化。不同角度的入射光照射到超透镜样品衬底背面的金属光阑上，然后经过正面的超表面结构在焦平面的不同位置上形成焦点。成像系统由物镜、镜筒透镜和滨松 CMOS 相机(C13440-20CU)连接组成，通过在三维方向移动成像系统来找到焦点，捕获各视场下超透镜的焦平面图像。

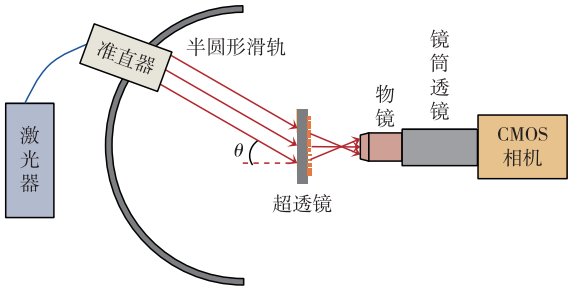
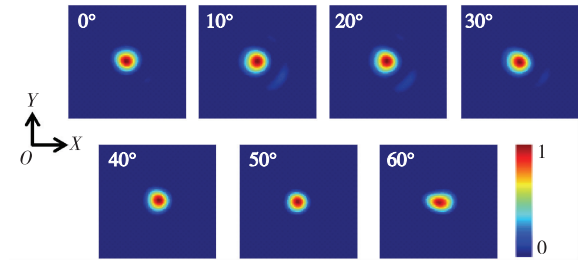


图 8　超透镜测试系统示意图

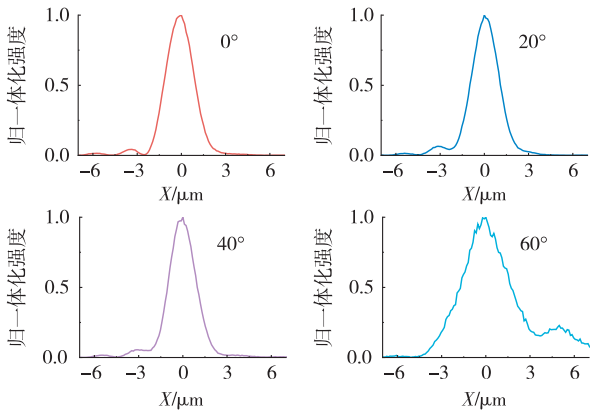
3.2　结果分析

首先对不同角度入射光下的焦斑质量进行表

征，图 9(a)为在 0°～60°入射角度下的归一化焦平面强度分布，可以看到在各入射角度下均能较好实现聚焦，只在 60°入射角下出现了轻微的变形。与模拟结果相比，焦斑形状轻微的不对称可能是由于实验误差或制造中光阑与超表面的对准误差造成的。图 9(b)展示了 0°，20°，40°和 60°入射角下对应的焦点横截面归一化强度分布。



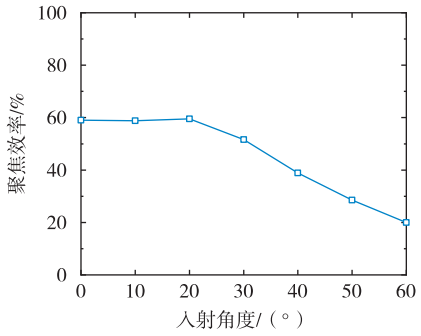
(a) 焦平面归一化强度分布



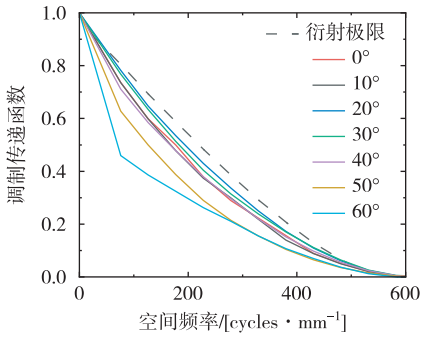
(b) 焦点横截面归一化强度分布

图 9 不同入射角下焦斑表征结果

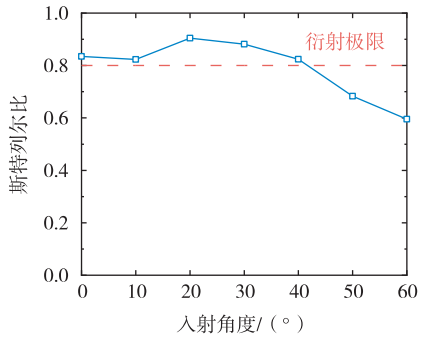
器件在各角度下的测量聚焦效率被绘制在图 10(a)中。当入射光的入射角取 0°～20°时，聚焦效率保持在 60%左右；当增加入射光角度至 30°以上，聚焦效率出现了下降；当 60°入射时为 20%，整个视场范围内平均聚焦效率为 45%。与模拟结果相比，聚焦效率有所降低，这可能是由于当斜入射时纳米柱的侧壁粗糙度带来的散射变大。对焦斑强度进行



(a) 聚焦效率



(b) 调制传递函数曲线



(c) 斯特列尔比

图 10 不同入射角下聚焦性能分析结果

傅里叶变化并取模值可以得到调制传递函数(MTF)，它描述了透镜的分辨率，各角度入射光下超透镜的 MTF 测量值如图 10(b)所示。进一步地，计算了斯特列尔比，如图 10(c)所示。在 0°～40°入射角下斯特列尔比达到了 0.8 以上，具有衍射极限的光学性能，在更大的入射角下斯特列尔比有所下降，但总视场范围内聚焦性能保持良好。

4 结论

本文在近红外波长下设计并实现了总视场达到 120°的大视场角超透镜，将一个金属光阑直接集成在石英玻璃衬底上，不同角度的入射光经过光阑被分离，照射到超表面结构的不同区域，在焦平面的不同位置上实现聚焦成像。使用光线追踪算法对该超透镜的相位进行优化设计，并对所设计的器件进行了制造和表征。实验结果显示在各入射光角度下超透镜均具有良好的聚焦效果，平均聚焦效率达到 45%。本文所设计的近红外超透镜结构简单、视场角大，以及性能优异，在人脸识别、激光雷达、医学成像等领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] Kildishev A, Boltasseva A, Shalaev V. Planar photonics with metasurfaces[J]. Science, 2013, 339(6215): 1289.

[2] 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.

[3] Kuznetsov A I, Miroshnichenko A E, Brongersma M L, et al. Optically resonant dielectric nanostructures[J]. Science, 2016, 354(6314): agg2472.

[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(3054): 333-337.

[5] 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.

[6] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. Science, 2017, 358(6365): 896-900.

[7] He Q, Zhang F, Pu M B, et al. Monolithic metasurface spatial differentiator enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. Nanophotonics, 2021, 10(1): 741-748.

[8] Joo W J, Kyoung J, Esfandyarpour M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10,000 pixels per inch[J]. Science, 2020, 370(3515): 459-463.

[9] Zhang Z J, Luo J, Song M W, et al. Large-area, broadband and high-efficiency near-infrared linear polarization manipulating metasurface fabricated by orthogonal interference lithography[J]. Appl. Phys. Lett., 2015, 107(24): 241904.

[10] Dong Y, Xu Z J, Li N X, et al. Si metasurface half-wave plates demonstrated on a 12-inch CMOS platform[J]. Nanophotonics, 2020, 9(1): 149-157.

[11] 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.

[12] Divitt S, Zhu W Q, Zhang C, et al. Ultrafast optical pulse shaping using dielectric metasurfaces[J]. Science, 2019, 364(6443): 890-894.

[13] Hu Y Q, Luo X H, Chen Y Q, et al. 3D-integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. Light Sci. Appl., 2019, 8: 86.

[14] Zheng G N, Muehlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nat. Nanotechnol., 2015, 10(4): 308-312.

[15] 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.

[16] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for augmented reality[J]. Nat. Commun., 2018, 9: 4562.

[17] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. Nat. Commun., 2017, 8: 187.

[18] Liu W W, Li Z C, Cheng H, et al. Metasurface enabled wide-angle fourier lens[J]. Adv. Mater., 2018, 30(23): 1706368.

[19] Lin Z, Groever B, Capasso F, et al. Topology-optimized multilayered metaoptics[J]. Phys. Rev. Appl., 2018, 9(4): 044030.

[20] Zhang X Y, Li Q, Liu F F, et al. Controlling angular dispersions in optical metasurfaces[J]. Light Sci. Appl., 2020, 9(1): 76.

[21] Aieta F, Genevet P, Kats M, et al. Aberrations of flat lenses and aplanatic metasurfaces[J]. Opt. Express, 2013, 21(25): 31530-31539.

[22] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. Nat. Commun., 2016, 7: 13682.

[23] 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.

[24] Wang Y L, Zhang S, Liu M Z, et al. Compact meta-optics infrared camera based on a polarization-insensitive metalens with a large field of view[J]. Opt. Lett., 2023, 48(17): 4709-4712.

[25] Engelberg J, Zhou C, Mazurski N, et al. Near-IR wide-field-of-view huygens metalens for outdoor imaging applications[J]. Nanophotonics, 2020, 9(2): 361-370.

[26] Xie T, Zhang F, Pu M B, et al. Ultrathin, wide-angle, and high-resolution meta-imaging system via rear-position wavevector filter[J]. Laser Photonics Rev., 2023, 17(9): 2300119.

[27] Pu M B, Li X, Guo Y H, et al. Nanoapertures with ordered rotations: symmetry transformation and wide-angle flat lensing[J]. Opt. Express, 2017, 25(25): 31471-31477.

[28] 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.

作者简介：

陈若卉(1999—)，女，硕士研究生，主要从事超构表面光学器件方面的研究；

董　渊(1990—)，男，博士，教授，研究方向为应用于光通信、光传感、光计算的集成光电子器件设计与制造工艺。