光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024040302

基于光场拼接的消色差超透镜设计

黄永伟，郑少南，赵兴岩，邱　阳，董　渊，钟其泽*，胡　挺

（上海大学 微电子学院，上海 201800）

摘　要： 红外成像技术被广泛应用于医学诊断、光谱学、分子传感等领域，近年来，超透镜技术为红外成像提供了一个小型化和集成化的平台。由于超透镜固有色散的存在，极大地阻碍了其在红外成像中的应用。而目前设计消色差超透镜的主流方法是先对超透镜进行仿真，然后分析相关性能参数，这种传统方法需要大量的时间。为了解决这一问题，文章采用光场拼接的技术，结合粒子群算法，设计了一个直径为 100 μm，工作波段在 3.7～4.8 μm 范围内的全硅介质消色差超透镜，其计算的有效焦距为 219.01 μm，离焦系数为 1.87%，最高聚焦效率为 49.3%。并用 Lumerical FDTD 软件对所设计的超透镜进行仿真验证，将仿真结果和拼接结果在焦距、离焦系数、计算时间、半高全宽、聚焦效率和调制传递函数等方面进行了系统地对比，从而验证了光场拼接技术的可行性和正确性。这种方法可以扩展到其他波段，并为设计更大尺寸的超透镜提供了一个新的思路。

关键词： 红外成像；消色差；场拼接；离焦系数；聚焦效率

中图分类号： O439；TH74　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0805－06

Achromatic Metalens Design based on Light Field Stitching

HUANG Yongwei, ZHENG Shaonan, ZHAO Xingyan, QIU Yang,
DONG Yuan, ZHONG Qize, HU Ting

(School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN)

Abstract: Infrared imaging technology is widely used in fields such as medical diagnosis, spectroscopy, and molecular sensing. In recent years, metalens technology has provided a miniaturized and integrated platform for infrared imaging. However, the inherent dispersion of metalenses greatly hinders their application in infrared imaging. The current mainstream method for designing achromatic metalenses involves simulating the metalens and then analyzing relevant performance parameters, which is time-consuming. To address this issue, this study utilizes the field stitching technique, combined with a particle swarm optimization algorithm, to design a full-silicon achromatic metalens with a diameter of 100 μm, operating in the range of 3.7～4.8 μm. The calculated effective focal length of the designed metalens is 219.01 μm, with a coefficient of variation of 1.87% and a maximum focusing efficiency of 49.3%. The designed metalens was simulated and validated using Lumerical FDTD software. A systematic comparison between the simulation results and the stitching results was conducted in terms of the focal

收稿日期：2024－04－03.

基金项目：国家自然科学基金项目(62204149,62205193,U23A20356)；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)；上海大学市科与工程计算专业技术服务平台；上海市智能感知芯片技术协同创新中心.

* **通信作者：**钟其泽

length, coefficient of variation, computational time, full width at half maximum, focusing efficiency, and modulation transfer function, confirming the feasibility and accuracy of the field stitching technique. This method can be extended to other wavelength bands and provides a novel approach for designing larger metalenses.

Key words: infrared imaging; achromatic; field stitching; coefficient of variation; focusing efficiency

0 引言

超透镜是一种新型的二维周期性结构，通过精确设计微纳结构，超透镜可以调控入射光的振幅、相位和偏振状态等特性[1-4]，从而实现对光的精准操控和调节。这种技术在 3～5 μm 的中红外波段成像系统中有着广泛的应用，例如夜视、空间通信和天文观测等[5-8]。而超透镜固有的色散阻碍了它在中红外波段的应用发展。因此，研究中红外波段的宽带消色差超透镜具有重要的意义。

近年来已经有不少关于中红外波段的消色差超透镜的研究。2019 年，Zhou 等[9]利用潘查拉特里南-贝里(Pancharatnam-Berry，PB)相位实现基础相位，传输相位实现补偿相位的原理，设计工作波段为 3.7～4.5 μm 的中红外消色差超透镜，但是 PB 相位的引入使得超透镜只能工作在圆偏振态入射光模式。2022 年，Xie 等[10]应用传输相位原理，设计了 7 种复杂形状的纳米柱结构，以满足消色差透镜所需的相位和群延时，在 CaF_2 衬底上设计了 3～5 μm 波段的 Si 消色差超透镜。同年，熊等[11]设计了交叉中空单元结构进行相位补偿，在 CaF_2 衬底上设计了 3～5 μm 波段的 ZnSe 消色差超透镜，但该设计的结构单元比较复杂，大大增加了加工制作的难度。2023 年，Yuan 等[12]应用几何相位原理和随机搜索算法，在 CaF_2 衬底上设计了 4～5 μm 波段的 Si 消色差超透镜。

超透镜的性能参数都需要经过时域有限差分软件仿真后才能进行分析，并且这种仿真设计的方法通常需要大量的时间。为了解决设计过程中先仿真后分析和耗时的问题，本文运用光场拼接技术，结合粒子群算法，设计了工作波段为 3.7～4.8 μm 的全硅介质消色差超透镜，在仿真之前对超透镜的焦距、离焦系数、计算时间、半高全宽、聚焦效率和调制传递函数(MTF)等性能进行计算分析。同时运用 Lumerical FDTD 软件对设计的消色差超透镜进行了仿真验证，与光场拼接的性能进行了对比，验证了光场拼接技术设计消色差超透镜的准确性。

1 消色差超透镜的设计原理与方法

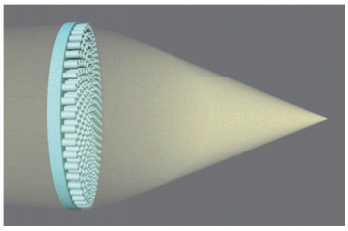
1.1 单元结构的相位与光场分布

图 1(a)展示了所设计的全硅介质消色差超透镜，硅是常见红外材料，在红外波段范围内具有较高的透过率，3.7～4.8 μm 波长的光经过超透镜后被聚焦在同一焦点处。为了实现对入射光的聚焦，超透镜上每一点的相位应满足以下公式[13]：

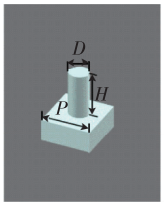
$$\varphi(r,\lambda)=-\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{r^2+f^2}-f)+C(\lambda) \quad (1)$$

式中，$r=\sqrt{x^2+y^2}$ 是超透镜上任意一点(x,y)到中心的距离，f 是设计的焦距，λ 是入射光的波长；$C(\lambda)$是额外引入的一个相位因子，对不同波长的入射光实现相位补偿，且不会对超透镜的聚焦性能产生影响，是实现消色差的关键。

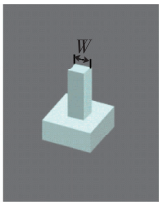
不同波长的光在超透镜上对同一位置纳米单元产生的相位不同，首先对不同形状的单元结构进行扫描，选取了具有较高透过率和覆盖 2π 相位的单元结构，最终确定为具有对称性的圆柱和方柱，如图 1(b)和(c)所示。图中，H 为纳米单元结构的高度，P 为单元结构的周期，D 为圆柱的直径，W 为方柱的边长。具体的参数是 $H=4$ μm，$P=1.5$ μm，D 范围为 0.5～1 μm，W 范围为 0.5～1 μm。



(a) 超透镜示意图



(b) 圆柱单元结构

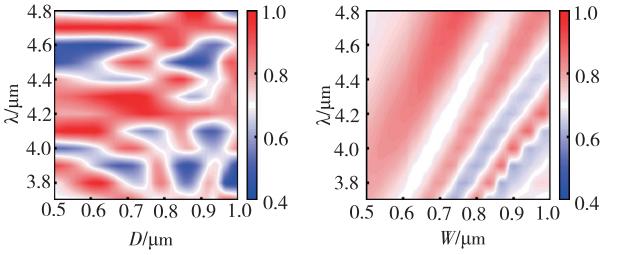


(c) 方柱单元结构

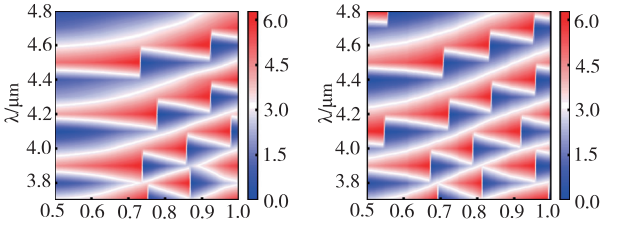
图 1 超透镜及单元结构示意图

图 2 展示了圆柱和方柱单元结构的透过率和相位分布。其中，图 2(a)和(b)分别是圆柱和方柱单元结构透过率随尺寸和波长变化的分布情况，绝大多数单元结构的透过率均在 0.6 以上，有助于提高超透镜的聚焦效率；图 2(c)和(d)是相位随尺寸和波长变化的分布情况，覆盖了 0～2π 的范围。

同时，用面监视器记录了圆柱和方柱单元结构在尺寸和波长变化时对应的光场分布。图 3(a)和(b)展示了圆柱单元结构在 D 为 1 μm，波长为 4.2 μm 电场和磁场分布；图 3(c)和(d)展示方柱单元结构在 W 为 1 μm，波长为 4.2 μm 电场和磁场分布，单元结构在同一个面监视器上的电场或磁场几乎完全相同。通过 Lumerical FDTD 仿真软件对单元结构的几何参数进行扫描，获得不同参数下单元结构的透过率、相位分布和光场分布，利用这些数据，建立光场拼接和全波仿真工作中所需要的数据库。

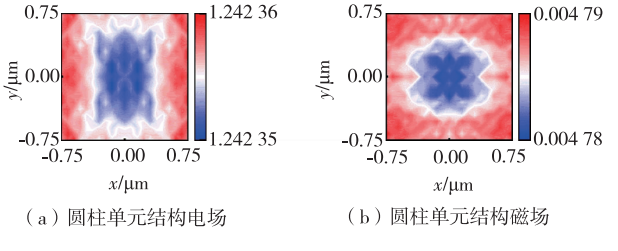


（a）圆柱单元结构透过率　（b）方柱单元结构透过率

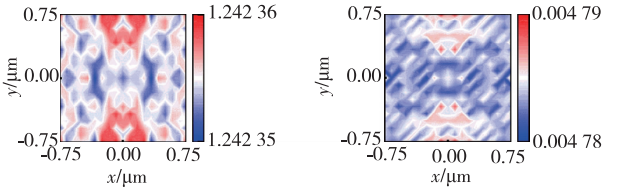


（c）圆柱单元结构相位　（d）方柱单元结构相位

图 2　单元结构的透过率和相位分布



（a）圆柱单元结构电场　（b）圆柱单元结构磁场



（c）方柱单元结构电场　（d）方柱单元结构磁场

图 3　单元结构的光场分布

1.2　基于光场拼接的粒子群算法优化

构建数据库之后，设计直径为 100 μm，工作波段为 3.7～4.8 μm 消色差超透镜的流程如图 4 所示。将相位因子 $C(\lambda)$作为粒子群算法[14]的输入进行优化，选取 3.8，4.1，4.4 和 4.7 μm，使得所需的理想相位和实际相位之间的误差最小，获取不同波长精确的相位分布。通过相位和单元结构的映射关系，得到同时满足不同波长相位分布所需的单元结构，以及单元结构在 3.7～4.8 μm 对应的电场和磁场，将电场和磁场置于相位对应的坐标位置，构成超透镜的近场光场分布。然后利用 Lumerical FDTD 内置的 farfieldexact3d 函数求得超透镜的远场分布，进而求得入射光在 3.7～4.8 μm 波段对应的焦距，引入焦距的离焦系数(CV)[15]作为目标优化函数(FOM)，其表达式如下：

$$CV=\frac{SD}{MN}\times 100 \tag{2}$$

式中，SD 是不同波长对应焦距的标准差，MN 是平均焦距。当 FOM 小于 5%时[16]，满足国际标准允许的消色差范围，即输出结果 $C(\lambda)$的值，否则更新粒子速度和位置继续优化。经过算法优化后，最终获得 3.8，4.1，4.4 和 4.7 μm 对应的相位因子分别为 6.28，1.31，6.28，0.26 rad。

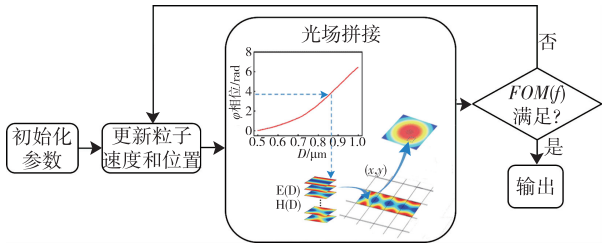
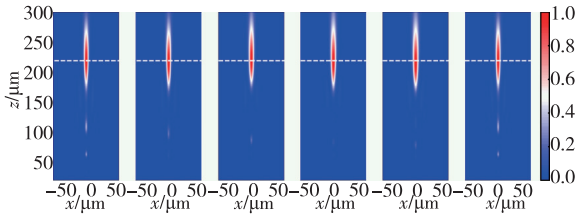


图 4　基于光场拼接的粒子群算法优化流程图

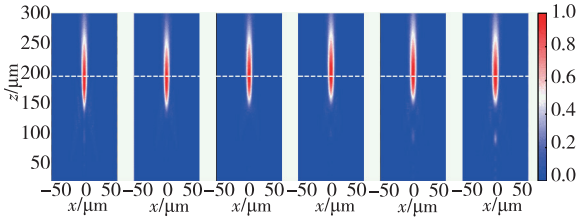
2　结果分析与讨论

优化结束后，经过光场拼接技术得到超透镜的最终近场光场分布，利用 farfieldexact3d 函数求得超透镜在 3.7～4.8 μm 的 12 个离散波长的远场分布。焦距的具体数值为：224.81，222.56，220.32，222.56，223.69，219.19，219.19，216.94，219.19，214.69，214.69，213.20 μm，其平均焦距为 219.01 μm，离焦系数为 1.83%。分别选取 3.7，3.9，4.1，4.3，4.5，4.7 μm 的离散波长，绘制在传播方向 x-z 平面的电场强度分布图，所有的光都聚焦在同一焦点处，如图 5(a)所示。同时，为了验证光场拼接技术的正确性，将满足要求的单元结构进行排列构成完整的

超透镜，使用 Lumerical FDTD 对超透镜进行仿真，实际入射的平面光为 3.7～4.8 μm，间距为 0.1 μm。仿真结果的焦距具体数值为：191.63，188.62，193.64，198.66，197.65，201.67，202.67，202.67，203.67，201.67，196.65，194.64 μm，其平均焦距为 197.82 μm，仿真的离焦系数为 2.37%，分别选取 3.7，3.9，4.1，4.3，4.5，4.7 μm 的波长并绘制 x-z 平面的仿真电场强度分布，结果图 5(b)所示，所有出射光均实现了聚焦的效果。光场拼接与仿真的焦距存在一定的差距，但这主要是由于以下原因造成的：光场拼接时的电场和磁场是单元结构周期性条件下的结果，而实际整个超透镜仿真时单元结构不再满足周期性条件。图 6 展示了光场拼接和实际仿真各个波长的焦距分布曲线，无论是光场拼接还是实际仿真，在 3.7～4.8 μm 的波段范围内均实现了很好的消色差聚焦，通过实际仿真的结果证实了光场拼接技术的正确性。重要的是，通过光场拼接技术构成超透镜完整的近场光场分布所需的时间是 338 s，而相同条件下利用 Lumerical FDTD 仿真完整的超透镜则需要 701 s，在实现相同的功能下，光场拼接技术将时间缩短了 1 倍以上，图 6(b)为光场拼接和实际仿真的时间对比。

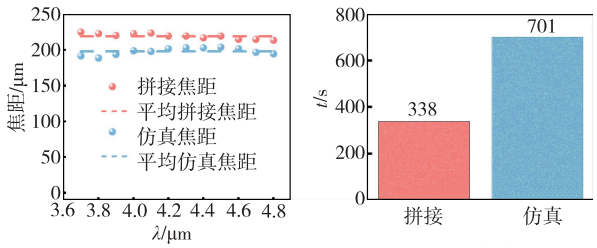


(a) 光场拼接的x-z平面电场分布



(b) 仿真的x-z平面电场分布

图 5 光场拼接和仿真的 x-z 平面电场分布

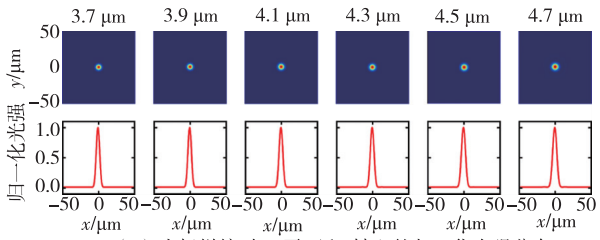


(a) 拼接和仿真的焦距　(b) 拼接和仿真的时间

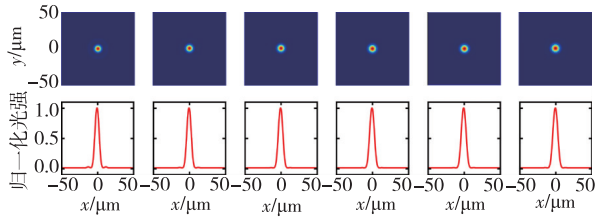
图 6 光场拼接和仿真焦距与时间对比

为了进一步研究所设计的消色差超透镜的性能，主要对光场拼接和仿真时焦平面的光斑分布、半高全宽、聚焦效率和 MTF 进行了对比分析。

首先，图 7(a)和(b)分别展示光场拼接和实际仿真时焦点处不同波长在 x-y 平面和沿着 x 轴方向的归一化光强分布曲线，可见不同波长的光斑保持相对的稳定。



(a) 光场拼接时x-y平面和x轴上的归一化光强分布

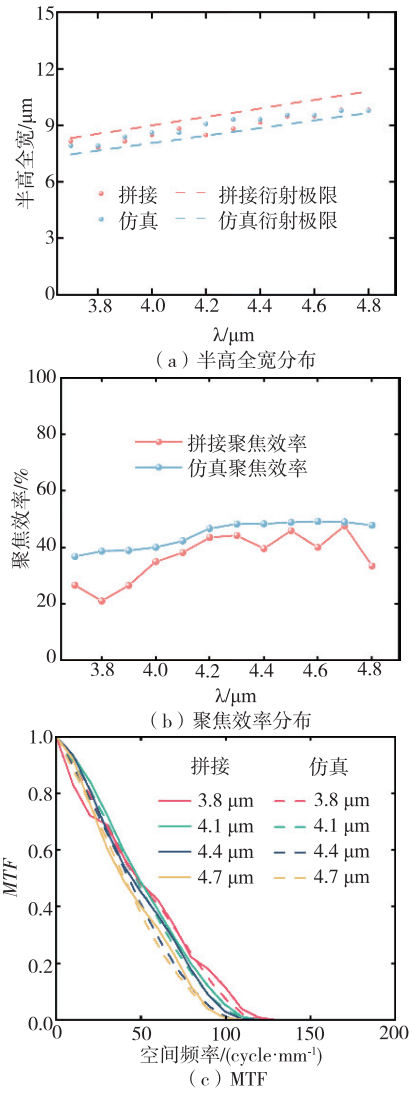


(b) 仿真时x-y平面和x轴上的归一化光强分布

图 7 光场拼接和仿真时 x-y 平面和 x 轴上的归一化光强分布

然后，根据沿 x 轴方向的光强分布曲线，求得对应的半高全宽[17]，分布曲线如图 8(a)所示，而理论衍射极限[18]为 $0.514\lambda/NA$（NA 为透镜的数值孔径），可以看到，无论是光场拼接还是实际仿真，计算得到的半高全宽均分布在衍射极限附近，说明在焦平面处各个波长都具备接近衍射极限的聚焦效果。接着分别计算光场拼接和实际仿真的聚焦效率，其中，聚焦效率定义是焦平面处半径为三倍半高全宽的圆内的光功率比上入射光的功率[19]。12 个波长的聚焦效率如图 8(b)所示，光场拼接和实际仿真的最高聚焦效率分别为 47.7%和 49.3%，并且聚焦效率随着波长的变大而逐渐增加，主要是因为聚焦效率和超透镜的透过率有关，在图 2(a)和(b)中，圆柱和方柱单元结构在短波段的透过率比长波段小，所以完整超透镜的聚焦效率符合单元结构透过率变化的趋势。最后，分别计算了光场拼接和实际仿真时不同波长的 MTF，其中 MTF 是焦平面处的点扩散函数经过傅里叶变换后得到光学传递函数的幅值[20]。图 8(c)展示了 3.8，4.1，4.4，4.7 μm 的 MTF 曲线，可以看到，光场拼接的 MTF 非常接近

仿真的 MTF，并且无论是光场拼接还是实际仿真的 MTF 均没有随着波长的变化而出现明显的降低，说明设计的超透镜可以在 3.7～4.8 μm 的波长范围内正常工作。



（a）半高全宽分布

（b）聚焦效率分布

（c）MTF

图 8　超透镜的性能参数

3　结论

本文应用光场拼接技术，结合粒子群算法，优化引入的相位因子，使得超透镜的离焦系数最小，设计了一个直径为 100 μm，工作波段为 3.7～4.8 μm 的全硅介质消色差超透镜。其有效焦距为 219.01 μm，离焦系数为 1.87%，最高聚焦效率为 49.3%。同时，使用 Lumerical FDTD 软件对超透镜进行了仿真，有效焦距为 197.82 μm，离焦系数为 2.37%，最高聚焦效率为 47.7%，并与光场拼接时的光强分布、焦距、半高全宽、聚焦效率和 MTF 做了系统全面地对比，证实了光场拼接技术的准确性。虽然设计的超透镜工作在中红波段，但是光场拼接的技术可以扩展到其他波段，并且应用光场拼接技术，可以在进行仿真之前，通过计算分析超透镜的相关性能，为设计更大尺寸的超透镜提供了一个新的思路。

参考文献：

[1] 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.

[2] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control [J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1041-1068.

[3] Lee G-Y, Yoon G, Lee S-Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. Nanoscale, 2018, 10(9): 4237-4245.

[4] He H, Yang H, Xie Z, et al. Broadband mid-infrared metalens with polarization-controlled at-will chromatic dispersion[J]. Nanoscale, 2022, 14(34): 12476-12482.

[5] Ou K, Yu F, Li G, et al. Mid-infrared polarization-controlled broadband achromatic metadevice[J]. Sci. Adv., 2020, 6(37): eabc0711.

[6] Ou K, Yu F, Li G, et al. Broadband achromatic metalens in mid-wavelength infrared[J]. Laser Photonics Rev., 2021, 15(9): 2100020.

[7] Jiang Y, Cui C, Zhao J, et al. Mid-infrared broadband achromatic metalens with wide field of view[J]. Materials, 2022, 15(21): 7587.

[8] Guo K, Wang C, Kang Q, et al. Broadband achromatic metalens with polarization insensitivity in the mid-infrared range[J]. Opt. Mater., 2022, 131: 112489.

[9] Zhou H, Chen L, Shen F, et al. Broadband achromatic metalens in the midinfrared range[J]. Phys. Rev. Appl., 2019, 11(2): 024066.

[10] Xie Y, Zhang J, Wang S, et al. Broadband achromatic polarization-insensitive metalens in the mid-wave infrared range[J]. Appl. Opt., 2022, 61(14): 4106.

[11] Xiong W, Sha C, Ding J. Polarization-independent broadband achromatic metalens in the mid-infrared (3～5 μm) region[J]. Appl. Phys. Express, 2022, 15(2): 022001.

[12] Yuan Y, Yan Z, Zhang P, et al. A broadband achromatic dielectric planar metalens in mid-IR range[J]. Photonic Sens., 2023, 13: 230126.

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

[14] Chen Q, Liu Y, Lei Y, et al. Recent progress on achromatic metalenses[J]. Prog. Electromagn. Res., 2022, 173: 9-23.

[15] Sun P, Zhang M, Dong F, et al. Broadband achromatic

polarization insensitive metalens over 950 nm bandwidth in the visible and near-infrared[J]. Chin. Opt. Lett., 2022, 20(1): 013601.

[16] Xiu D, Liu S, Li Y, et al. High NA and polarization-insensitive ultra-broadband achromatic metalens from 500 to 1 050 nm for multicolor two-photon endomicroscopy imaging[J]. Opt. Express, 2023, 31(19): 30092.

[17] Xiao G, Chen J, Yang H, et al. Doublet metalens for polarization conversion as well as focusing[J]. J. Lightwave Technol., 2024, 42(6): 2076-2082.

[18] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. Light Sci. Appl., 2018, 7: 85.

[19] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses[J]. Optica, 2019, 6(6): 805.

[20] Xiao X, Zhao Y, Ye X, et al. Large-scale achromatic flat lens by light frequency-domain coherence optimization[J]. Light Sci. Appl., 2022, 11: 323.

作者简介：

黄永伟(1996—)，男，广西壮族自治区博白县人，硕士，主要研究方向为超构表面光学器件；

钟其泽(1987—)，男，教授，博士生导师，主要从事集成光电子芯片与超构表面光学芯片的研究。