

面向光场调控的像素级红外超构透镜阵列设计与 制备

张风^{1,2}, 王芳芳^{2*}, 周建², 应翔霄², 周易^{1,2,3*}, 陈建新^{2,3}

(1. 上海理工大学, 上海 200433;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. 国科大杭州高等研究院, 物理与光电工程学院, 浙江杭州, 310024)

摘要: 超构透镜凭借其独特的光场调控特性以及高度集成化、小型化的显著优势, 在轻小型光电芯片一体化成像系统中具有广阔的应用前景。文中设计了面向像素级集成红外焦平面应用的超构透镜结构, 采用步进式光刻技术与电感耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺相结合的制备方法, 通过对气体流量、工作压强、功率等刻蚀参数系统优化, 有效地抑制了负载效应, 将刻蚀速率的标准差从 0.205% 降到了 0.073%, 并制备了面阵规模 640×512、像素中心距 30 μm 、Si 柱最大深宽比 3.42:1 的高均匀性超构透镜阵列, 对 4.3 μm 波长红外光的汇聚焦距为 35 μm , 焦距处中心区域 10 μm 和 20 μm 径向范围内测得的光场汇聚效率分别为 66.4% 和 84.9%, 光场能量较相同面积范围内未集成超构透镜时分别提升了 5.98 倍和 1.91 倍。本文将为像素级超构透镜阵列集成红外芯片提供结构设计与工艺基础。

关 键 词: 超构透镜; 全介质; 负载效应; 刻蚀均匀性; 光汇聚效率

中图分类号:O43

文献标识码: A

Design and fabrication of pixel-level infrared metalens arrays for light field control

ZHANG Feng^{1,2}, WANG Fang-Fang^{2*}, ZHOU Jian², YING Xiang-Xiao², ZHOU Yi^{1,2,3*}, CHEN Jian-Xin^{2,3}

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200433, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;
3. Hangzhou Institute for Advanced Study of USTC, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Zhejiang, Hangzhou, 310024)

Abstract: Metalenses, with their unique optical field modulation characteristics and remarkable advantages of high integration and miniaturization, have broad applications in the integrated imaging system of lightweight and small-sized optoelectronic chips. In this paper, a metalens structure for pixel-level integrated infrared focal plane applications was designed. The preparation of the structure adopted a method combining stepper lithography technology and Inductively Coupled Plasma (ICP) etching process. Through a systematic optimization of etching parameters, including gas flow rate, working pressure, and power, the loading effect was effectively suppressed and the standard deviation of the etching rate was decreased from 0.205% to 0.073%. Finally, a highly uniform metalens array was fabricated, with a pixel

基金项目: 国家自然科学基金(U24A20294, 62335017, 62222412, 62104236, 62104237); 国家重点研发计划(2022YFB3404405); 中国科学院先导项目(XDB0980000); 中国科学院青年创新促进会项目(Y202057); 上海市扬帆计划项目(22YF1455800, 21YF1455000); 上海市自然科学基金项目(23ZR1473500, 23ZR1473100); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-513, CX-512, CX-508, CX-567); 中国博士后科学基金资助项目(2024M75687); 红外探测技术国家重点实验室(IRDT-23-01)。

Foundation items: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant No. of U24A20294, 62335017, 62222412, 62104236, 62104237), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. of 2022YFB3404405), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB0980000), the Youth Innovation Promotion Association, CAS (Grant No. of Y202057), the Shanghai Sailing Program (Grant No. 22YF1455800, 21YF1455000); Shanghai Natural Science Foundation Program (Grant No. 23ZR1473500, 23ZR1473100), Special Innovation Program of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. CX-513, CX-512, CX-508, CX-567); China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. of 2024M750687); National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies (Grant No. of IRDT-23-01).

作者简介(Biography): 张风(1997-), 女, 山西运城人, 硕士学位, 主要研究领域为微纳光学超构表面研制, E-mail: 916145373@qq.com。

***通讯作者(Corresponding author):** E-mail: zhouyi@mail. sitp. ac. cn; wangfangfang@mail. sitp. ac. cn

center distance of 30 μm , an array of 640×512, and a maximum aspect ratio of 3.42 of Si pillars. The focusing distance for 4.3 μm wavelength infrared light is 35 μm . The measured optical field convergence efficiencies, within radial ranges of 10 μm and 20 μm in the centra area at the focal length, are 66.4% and 84.9%, respectively. The optical field energy is increased by 5.98 times and 1.91 times, respectively, compared with that without the integrated metalens within the same area range. This study will provide the structural design and processing foundation for the integration of pixel-level metalens arrays with infrared chips.

Key words: Metalenses, All-dielectric, Loading effect, Etching uniformity, Light convergence efficiency

PACS:

1 引言

针对集成化、小型化光学成像系统的需求,具有亚波长厚度的二维平面结构超构透镜,以其超薄的尺寸特性和功能上的灵活性,可以实现高数值孔径^[1,2]、宽带消色差^[3,4]、三维成像^[5,6]等一系列创新性功能,在光学成像领域具有巨大的应用前景。在传统光学系统中,光路校正通常依赖于复杂的光学透镜组,并且还需借助后期算法进行处理。而现在成像光路中可采用大尺寸平面超透镜代替传统透镜组,并通过像素级超透镜阵列与芯片集成可以校正光路中的像差、畸变等问题,从而实现超紧凑的一体化成像系统。

超构透镜主要分为等离激元型和介质型两大类,相较于等离激元型,介质型超构透镜在聚焦性能方面表现更为卓越,且能量损耗更低,因而在光学成像应用中受到了更为广泛的关注^[7-10]。为了满足所需要的相位覆盖范围,基于传播相位调制的介质型超构透镜在设计时,需要构建高深宽比的非均匀周期微纳结构,而光刻、薄膜沉积、刻蚀等工艺技术的迅猛发展,为超透镜的制备提供了坚实的技术支撑。Liu等人采用紫外光刻技术与反应离子刻蚀工艺相结合的方法,制备出了基于全硅超表面的无偏振红外微透镜阵列^[11]。Gu的研究团队在制备全硫族玻璃金属透镜时,采用电子束光刻与等离子体刻蚀技术在As₂Se₃玻璃表面成功制备了高度为8 μm 的微柱阵列^[12]。吴冉等人在研究长波红外宽角超透镜时,同样采用电子束光刻技术与深硅刻蚀技术相结合的方法,实现了长波红外宽角超透镜阵列的高精度制备^[13]。尽管电子束光刻技术具有极高的精度,但因其成本较高、效率较低,难以满足大规模量产的需求。与之相比,紫外光刻技术不仅能够精准控制结构的尺寸,而且具有良好的可重复性和较高的生成效率,在集成电路制造领域得以广泛应用^[14-17]。当前,超构透镜大规模量产面临诸多挑战,主动探索适配的制备工艺,减小加工误差、刻蚀不

均匀性等技术瓶颈是超构透镜从实验室走向实际应用的核心路径,也是推动产业发展、实现技术革新的重要基石。

本文针对红外像素级分焦平面超透镜阵列集成与应用,设计了纳米柱尺寸灵活可调的像素级超构透镜阵列结构,研究了非周期性复杂硅柱结构中刻蚀深度的均匀性和一致性的制备工艺,为像素级超构透镜阵列与红外芯片的集成提供关键的结构设计及工艺支撑。

1.1 实验

1.1.1 设计原理

根据对光场相位调控机制的差异,超构表面结构主要可分为三大类:共振相位超构表面、传播相位超构表面和几何相位超构表面。共振相位超构表面多以金属材料为基础构建而成,尽管能够在一定程度上实现对电磁波的有效调控,但却存在着带宽狭窄、吸收损耗较大以及能量转换效率偏低等诸多固有缺陷。介质材料传播相位超构表面的出现成功突破了这些局限^[18-21],其核心原理是控制电磁波在传播过程中所产生的光程差来实现相位的精准调控,根据公式 $\phi = nk_0d$ (其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波矢, λ 为波长, n 为介质的折射率, d 为传播距离)进行计算与设计。在实际应用中,通过灵活改变结构的占空比,能够有效调整等效折射率,进而保持厚度不变的情况下,实现多样化的平面相位型光学元件设计。当介质材料具有较大的等效折射率时,还能够进一步减小器件的整体厚度,从而为实现超构透镜的小型化与高性能化提供有力支撑。

本文采用不同半径大小的纳米Si柱结构组合,以此来精准调控等效折射率,进而实现对传播相位的有效控制,达到汇聚光的效果。硅元胞结构对应的梯度相位空间分布通过公式(1)确定:

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

其中 λ 是入射波长, r 是单个纳米柱到超构透镜中心的径向距离, f 为设计焦距。平面超构透镜的口径为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, Si元胞结构的周期为 $2 \mu\text{m}$, 柱高 $1.2 \mu\text{m}$, 半径变化范围为 $175 \text{ nm} \sim 825 \text{ nm}$ 。图1(a)-(c)为像素级超构透镜结构示意图。采用有限元法进行结构建模与仿真, 图1(d)为波长 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 和 $4.8 \mu\text{m}$ 的设计光场汇聚图, 对应的焦距分别为 $34 \mu\text{m}$ 、 $36 \mu\text{m}$ 和 $39 \mu\text{m}$ 。在 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波长范围内, 该超透镜结构的焦距存在 $5 \mu\text{m}$ 的色差。但是其汇聚光斑的景深超过 $5 \mu\text{m}$, 在与红外焦平面芯片完成像素级对准集成后, 依然能够实现一定程度的宽带光汇聚功能, 后续工作将围绕设计并制备宽带消色差超构透镜阵列展开。图1(e)为对应焦距处的光场分布平面图, 可以看出超构透镜将大部分光汇聚到像素中心区域。通过图1(f)光场强度分布可以计算得到 $10 \mu\text{m}$ 径向范围内的光场汇聚效率分别为 89.3% 、 81.3% 、 79.0% , $20 \mu\text{m}$ 径向范围内的光场汇聚效率分别为 93.7% 、 92.3% 、 93.2% 。

本文所设计的超构透镜是采用步进式光刻技术和等离子体刻蚀工艺相结合的方法制备的。超构透镜的基底选用 $500 \mu\text{m}$ 厚的双抛超平硅片。匀胶前, 先使用甩干机对硅片进行冲洗甩干, 确保其

表面洁净。随后, 将清洁后的硅片放置在 100°C 的热板上烘烤10分钟。待硅片烘干并自然降温后, 在其表面均匀旋涂一层厚度约为 500 nm 的G135光刻胶, 并烘烤使光刻胶固化, 等待后续曝光。光刻工艺采用的是步进式扫描投影光刻系统(PAS 5500/350C), 其光源为KrF, 波长为 248 nm 。曝光强度设定为 21 mJ/cm^2 。曝光结束后, 经过显影处理, 光刻图形得以清晰呈现, 其显微镜下的图像如图2(a)所示。随后, 采用ICP-RIE干法刻蚀系统(LEUVEN)对光刻后的硅片进行刻蚀处理, 刻蚀气体选用 SF_6/CF_4 作为化学反应气体, 同时引入Ar作为物理轰击气体。表1是日常实验设置的基础参数, 我们在表1设置的参数基础上进行优化调整, 刻蚀过程中通过系统调节气体流量、射频功率、气体压强等关键工艺参数, 不断优化刻蚀工艺条件。当刻蚀结束后, 利用等离子体去胶机去除超透镜表面残余的光刻胶, 具体的工艺过程如图2(b)所示。去胶后的硅柱形貌和刻蚀深度采用扫描电子显微镜(SEM)进行表征, 硅柱形貌如图2(c)所示。

现有的理论分析无法定量预测不同参数下的刻蚀结果, 因而需要大量实验以确定每种参数对刻蚀结果的影响趋势, 以得到满足我们所设计的超构

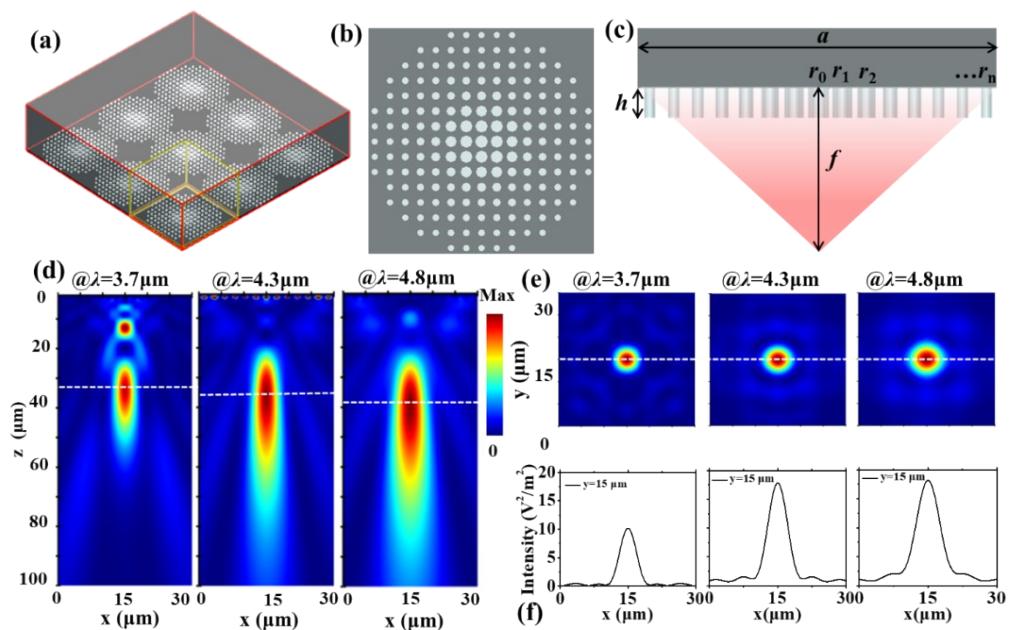


图1 像素级超构透镜结构示意图:(a)3D结构图,(b)x-y截面结构图,(c)x-z截面结构图、波长 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 、 $4.8 \mu\text{m}$ 光场分布图,(d)x-z截面($y=15 \mu\text{m}$),(e)x-y截面($z=34 \mu\text{m}$ 、 $36 \mu\text{m}$ 、 $39 \mu\text{m}$)和(f)光场强度分布图($y=15 \mu\text{m}$)

Fig. 1 Schematic diagram of the pixel-level metasurface structure: (a) 3D structure diagram, (b) x-y cross-sectional structure diagram, (c) x-z cross-sectional structure diagram light field distribution diagram at wavelengths of $3.7 \mu\text{m}$, $4.3 \mu\text{m}$, and $4.8 \mu\text{m}$, (d) x-z cross-section ($y=15 \mu\text{m}$), (e) x-y cross-section ($z=34 \mu\text{m}$, $36 \mu\text{m}$, $39 \mu\text{m}$), and (f) light field intensity distribution diagram ($y=15 \mu\text{m}$)

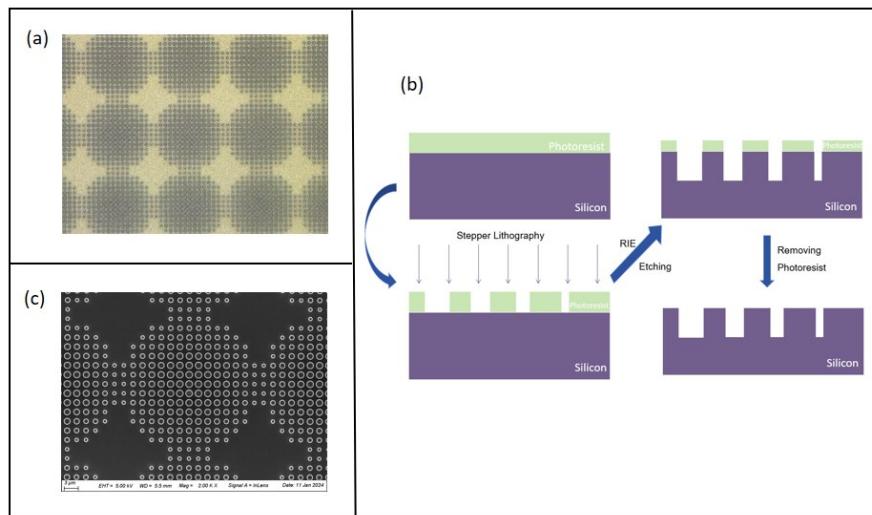


图2 超透镜的(a)显微镜图像,(b)制备过程示意图,(c)扫描电子显微镜图像

Fig. 2 (a) Microscope image, (b) schematic diagram of the preparation process, (c) scanning electron microscope image of the metasurface

表1 初始实验参数

Table 1 Initial experimental parameters

源功率/W	射频功率/W	压强/mTorr	气体流量/sccm	温度/℃
400	25	10	$SF_6/CF_4/Ar = 11: 105: 10$	20

透镜制备需求的工艺参数。制备过程中,侧壁的不陡直和硅柱高度的不均匀都可能会影响到超透镜的光学性能。根据超透镜的制备需求,主要以整体均匀性、掩膜选择比、各向异性度和刻蚀速率等作为工艺评判标准。从前期实验结果中发现,刻蚀过程中会存在由于反应等离子体不充足而引起的刻蚀速率降低或刻蚀不均匀的问题,即负载效应(Loading effect)。刻蚀速率与均匀性是优化超透镜制备工艺中最为重要的两个指标,为客观描述刻蚀后硅柱深度的变化即刻蚀均匀性,我们在此引入了刻蚀均匀度的概念。在晶圆上选取五个点,其刻蚀速率分别标记为 V_1, V_2, V_3, V_4 和 V_5 ,则刻蚀速率的平均值为 $\bar{V} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}{5}$;刻蚀速率的标 准 差 为 $\sigma = \sqrt{\frac{(V_1 - \bar{V})^2 + (V_2 - \bar{V})^2 + \dots + (V_5 - \bar{V})^2}{4}}$; 标准差不均匀度(百分比)定义为 $NU(\%) = \frac{\sigma}{\bar{V}} \times 100\%$; 最大不均匀度定义为 $NU_M(\%) = \frac{V_{max} - V_{min}}{\bar{V}} \times 100\%$ 。实验上,当刻蚀参数设置不合理时会造成刻蚀后硅柱不够陡直,形成

“收腰”现象,如图3所示。在定义横向刻蚀速率时,我们通常选取同一硅柱的上下两端以及中间部分,分别测量这三个位置处硅柱的宽度。通过计算横向的实际宽度与刻蚀之前宽度之差再除以刻蚀时间,就能获得这三处的横向刻蚀速率。同样也用上述刻蚀均匀度的公式来描述刻蚀结果,即可得到刻蚀侧壁的陡直度信息。

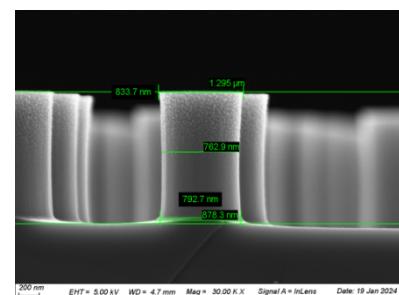


图3 硅柱的横向宽度测量示意图:n 2_结果及分析

Fig. 3 Example diagram of silicon pillar's lateral width measurement

在超构透镜刻蚀过程中,采用基础刻蚀工艺,会出现明显的负载效应,即大刻蚀区域(大沟槽)的刻蚀速率较快,而小刻蚀区域(小沟槽)的刻蚀速率相对较慢,这一现象主要是由于刻蚀过程中反应气体的供应与消耗之间的平衡机制被打破所导致的。为缓解该效应对刻蚀结果的影响,一方面需要更高密度、分布更均匀的等离子体,另一方面,可以在反应气体中加入辅助气体以稀释和均匀等离子体,提升真空系统性能,加快等离子体的交换和刻蚀产物

抽除等。整个ICP刻蚀系统中影响刻蚀速率和整体刻蚀均匀性的参数主要有射频源功率、腔体压强和气体流量等。为减小负载效应对刻蚀结构均匀性的影响,本文设计了三组不同变量的实验,研究了不同变量对刻蚀的侧壁形貌与刻蚀速率均匀性的影响。

2.1 射频功率影响

射频功率在刻蚀过程中起着关键作用,其主要通过控制离子轰击能量来影响刻蚀效果。实验中,在表1其它参数不变的基础上,将射频功率分别设定为15、25、50和75 W。每组实验条件下,我们至少重复做三次实验。表2给出了射频功率为50 W时的三次实验结果,包括刻蚀速率、刻蚀标准差、标准差不均匀度、最大不均匀度及选择比均值的信息,以及每组数据的标准偏差值。从表中可以看出三次重复实验的标准偏差均小于0.012,说明了刻蚀工艺的可重复性。

表2 射频功率为50 W时的三次刻蚀结果与标准偏差

Table 2 The results of the three etching processes and the standard deviation under 50 W RF power

	实验a	实验b	实验c	标准偏差
刻蚀速率/(nm·s ⁻¹)	6.60	6.55	6.58	0.012
刻蚀速率标准差/(%)	0.085	0.087	0.086	0.001
标准差不均匀度/(%)	1.33	1.31	1.30	0.012
最大不均匀度/(%)	3.34	3.33	3.34	0.005
选择比均值	2.58	2.59	2.60	0.008

表3给出了不同射频功率下获得的实验结果。从表中可以看出,刻蚀速率均值随射频功率的增大而增大,刻蚀的最大不均匀度值随之在减小,刻蚀的均匀性在慢慢提高。这是由于当射频功率变大时,等离子体的轰击能量变大,单位时间内的样品被轰击速率加快,从而纵向刻蚀速率增大。同时等离子体的轰击能量变大将更有利与较窄区域的刻

表3 不同射频功率下的刻蚀结果

Table 3 Etching results with different RF power

射频功率/W	速率均值/(nm·s ⁻¹)	刻蚀速率标准差/(%)	标准差不均匀度/(%)	最大不均匀度/(%)	选择比均值
15	5.51	0.106	1.93	5.45	6.01
25	6.02	0.078	1.30	3.65	4.70
50	6.58	0.086	1.30	3.34	2.60
75	6.78	0.082	1.20	3.25	2.10

蚀产物的脱附,反应离子也更易进入沟道与刻蚀物及时进行反应,使得大沟槽与小沟槽之间的刻蚀差异减小,带来刻蚀的纵向速率均匀性也同步提升。在图4也给出了硅柱横向刻蚀速率不均匀度的最大值与最小值,根据图像能够得出随射频的增大,硅柱的不均匀度值随之减小,且横向刻蚀速率的偏差范围也在缩小,说明侧壁的陡直度随射频的增大有所提高。这是因为加大射频功率在一定程度上能增加入射粒子的准直性,对侧壁的轰击频率减弱,从而提高侧壁陡直度和降低负载效应。但射频功率增大带来的代价是刻蚀材料与掩膜之间的刻蚀选择性变差,在刻蚀深度未达到设定值时,光刻胶掩膜已经消耗完毕,无法再对下层材料进行保护。因此,根据光刻胶厚度及结构刻蚀深度的需求,设定射频功率时,光刻胶与硅材料的刻蚀选择比需达到2.9以上。由表3中可得射频功率为50 W时,刻蚀选择比为2.60。综合刻蚀速率、刻蚀均匀度与刻蚀选择比等多方面考虑,射频功率可设定为25 W,此时刻蚀选择比为4.70,刻蚀平均速率为6.02 nm/s。

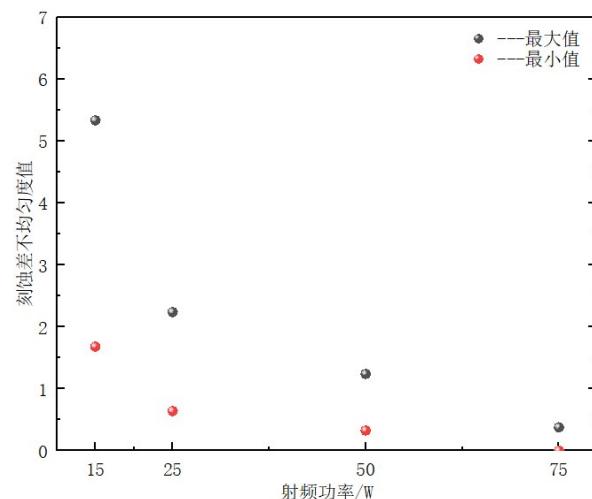


图4 硅柱侧壁的刻蚀速率不均匀度值

Fig. 4 Etching rate non-uniformity of silicon pillar sidewalls

在等离子体刻蚀过程中,射频功率与气体流量的协同作用,对优化工艺效果、提升生产效率至关重要。射频功率是控制离子轰击能量的关键参数,当射频功率发生改变时,等离子体中的离子能量随之改变,此时可以适当调节气体流量,保证有足够的气体分子与高能量的离子发生反应,以提高刻蚀速率与均匀性。

n 2.2 气体流量影响

刻蚀气体流量在刻蚀过程中发挥着至关重要的作用。 SF_6 和 CF_4 是硅基材料刻蚀的最常用气体。因为氟基气体电离后生成氟离子等活性粒子,与硅反应会生成易挥发的硅氟化合物,从而实现硅刻蚀。 SF_6 和 CF_4 混合使用时,二者存在竞争与协同作用。一方面, CF_4 和 SF_6 在电离、裂解以及与硅反应等过程中都需要消耗电子能量和占据活性位点,而等离子体中的电子能量和活性位点是有限的,二者在这个过程中会相互竞争,一方浓度的过高产生的过度消耗,必会抑制另一方的电离和反应。另一方面, CF_4 在刻蚀硅时,电离的含碳基团会在样品表面形成一定的聚合物, SF_6 的加入会与部分聚合物反应,或是提供更多氟自由基,从而打破聚合物的稳定结构,协助 CF_4 共同作用使刻蚀持续进行。而惰性气体Ar的加入不但可以稀释 CF_4 和 SF_6 气体,使二者在反应腔室中分布更均匀,避免局部浓度过高导致反应过于剧烈或不均匀,而且还可以增强离子对硅片表面的物理轰击作用,提高硅刻蚀的各向异性。

在基础的刻蚀工艺中, SF_6 和 CF_4 两种反应气体在总气体流量中占比约为92%,使得刻蚀方向偏向于各向同性。而由表1可以看出 CF_4 的气体流量占比较高,它在一定程度上会抑制 SF_6 的电离和反应。因此在实验参数设定时,保持其它气体流量不变,将 CF_4 的流量从105 sccm分别降为60、50和40 sccm。表4和图5分别给出了调整 CF_4 流量后测得的纵向和横向刻蚀实验结果。

刻蚀速率在 CF_4 流量减小后也随之降低, CF_4 流

量为40sccm时,刻蚀速率最小。产生该结果的原因可能是因为随着 CF_4 流量减少,单位时间内产生的活性粒子数量减少, SF_6 产生的活性粒子可能无法得到 CF_4 的有效配合,不能充分发挥刻蚀作用,刻蚀速率随之减慢;同时含碳基团减少,会使得适量的聚合物吸附在侧壁上形成一层薄的保护膜,阻挡活性粒子横向过度刻蚀,从而提高了侧壁的陡直度,如图5。表中刻蚀的标准差不均匀度与最大不均匀度值皆先减小后增大,在 CF_4 流量为50 sccm时,纵向的刻蚀速率差异最小。这是由于在 CF_4 流量初次减少时,氩气在腔体内提供了一个稳定的等离子体环境,同时物理轰击作用能更稳定地发挥;而随着 CF_4 流量二次减少时,含碳基团的降低带动样品表面聚合物生成量减少,对硅刻蚀的阻碍作用减弱使得刻蚀均匀度得到改善。但随着 CF_4 流量持续减少,活性粒子F等在反应腔室内分布变得不均匀,会造成在图形密集区域,活性粒子消耗快,补充不及时造成刻蚀速率大幅下降;而图形稀疏区域刻蚀相对正常,两者刻蚀速率差异增大,造成刻蚀均匀度变差。在刻蚀反应过程中,当 CF_4 流量为40 sccm时,刻蚀选择比最大,为3.73。这是因为 CF_4 产生的自由基会干扰 SF_6 气体对硅的刻蚀选择性,在降低后自由基之间的竞争关系得到优化, SF_6 等气体产生的自由基能更有效地针对硅材料进行刻蚀,从而提高刻蚀选择比。通过刻蚀速率标准差数据对比分析可知,气体流量的改变对刻蚀均匀性的影响要小于射频功率的变化。

此外,气体流量改变亦会导致气体压强的变化。在其他参数不变的情况下,减小气体流量,单位时间内进入刻蚀腔体的气体分子数量会减少,参与电离的气体亦会减少,等离子体密度随之降低,离子与气体分子碰撞频率下降,从而导致腔体内压强减小。但实验中抽气系统会根据气体流量自动调节抽气速度,以维持腔体内气体分子数量稳定,保证压强相对稳定。因此,抽气系统的调节能力会在一定程度上影响压强,打破气体流量与压强的直

表4 不同气体流量下的刻蚀结果

Table 4 Etching results of different gas flow rates

CF_4 流量/sccm	速率均值/(nm·s ⁻¹)	刻蚀速率标准差/(%)	标准差不均匀度/(%)	最大不均匀度/(%)	选择比均值
60	5.45	0.199	3.65	10.09	3.32
50	5.29	0.191	3.61	9.64	3.72
40	5.08	0.205	4.03	11.83	3.73

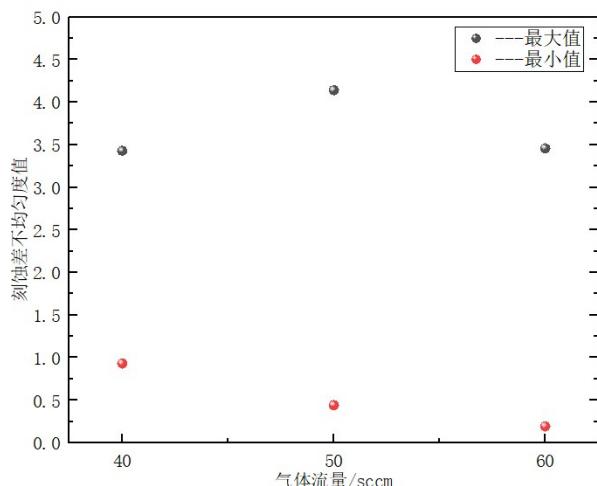


图5 硅柱侧壁的刻蚀速率不均匀度值

Fig. 5 Etching rate non-uniformity of silicon pillar sidewalls

接关联。

2.3 气体压强的影响

反应腔体内的气体压强是影响刻蚀过程的关键因素之一,其直接决定了电子与分子基团之间的碰撞自由程以及等离子体的状态。平均自由程可以通过腔体压力来控制,当等离子体处理腔体中的压力改变时,平均自由程也会改变,同时离子轰击能量和离子方向也会改变,这会影响刻蚀速率和刻蚀形貌。本文设计了一系列不同气压条件下的刻蚀实验,气压分别设定为6、7、8和10 mTorr。当气压处于较高水平时,电子与分子基团之间的碰撞频率显著增加,化学作用增强,这虽然在一定程度上有利于提高刻蚀速率,但同时也使得负载效应更加明显,导致刻蚀均匀性下降。表5给出了不同气压下的刻蚀结果。从表中可得出与上述分析相同的结论,8和10 mTorr时的不均匀度与最大不均匀度的值都在一个较高区间。相反,当逐步降低气压时,电子与分子基团的碰撞自由程增大,同时也有利于刻蚀气体更顺畅地进入窄沟槽区域,并且能够及时有效地将刻蚀副产物排出腔室,从而显著提高刻蚀均匀性。当气压降到6 mTorr时,刻蚀速率的标

准差由0.205%降到了0.073%。图6给出了侧壁陡直的不均匀度值随气压的变化关系。从图中可以看出,气压为8 mTorr时侧壁陡直的不均匀度值最小,此时硅柱的陡直度最高。

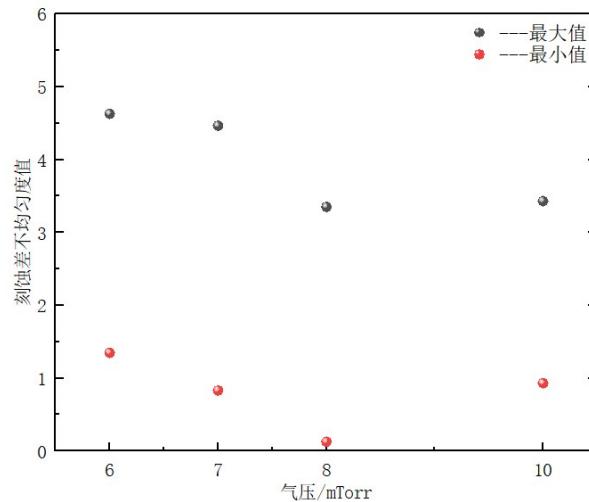


图6 硅柱侧壁的刻蚀速率不均匀度值

Fig. 6 Etching rate non-uniformity of silicon pillar sidewalls

在实际ICP刻蚀工艺中,气体压强、气体流量与射频功率之间紧密相关,各参数相互制约又共同作用。当对射频功率进行调节时,气体供应不足造成的反应受限或气体过量造成的腔体残留,会影响刻蚀速率;而过高的压强造成的离子能量利用率低或过低的压强带来的离子能量离散性大,会影响刻蚀形貌与选择比,它们最终都会影响刻蚀质量,因此必须考虑气体流量、压强与射频功率的适配性以达到最佳的刻蚀效果。在实际应用中,需根据具体的刻蚀系统和目标材料来优化这些参数,以实现高质量、高精度的刻蚀效果,满足不同半导体器件制造的工艺需求。

图7与图8分别给出了工艺参数优化前后超透镜结构的SEM对比图和刻蚀速率对比图。从图7中展示的SEM图可以看出,优化后的硅沟槽平面更为平滑,硅柱的侧壁形貌也更为陡直。从图8(a)的刻

表5 不同气体压强下的刻蚀结果

Table 5 Etching results of different gas pressures

气体压强/mTorr	速率均值/(nm·s ⁻¹)	刻蚀速率标准差/(%)	标准差不均匀度/(%)	最大不均匀度/(%)	选择比均值
10	5.08	0.205	4.01	11.76	3.73
8	5.16	0.208	4.04	11.86	3.77
7	4.88	0.154	3.16	8.85	3.90
6	4.89	0.073	1.48	3.68	3.42

蚀速率图可以看出,优化前的不同宽度的沟槽速率,对比差异较大。经过优化后的不同区域内的纵向刻蚀速率,差异与优化前的对比明显变小,此时刻蚀的硅柱高度约 $1.2 \mu\text{m}$ 。图 8(b)部分为硅柱直径设计尺寸,经过光刻与刻蚀工艺步骤后,硅柱尺寸会有部分横向缩减,与设计值相对比,其在不同点上缩减程度总体上保持一致,与设计预期相符。

图 9(a)给出了超构透镜阵列样片的实物照片,分焦平面阵列规模 640×512 ,单个像素中心距 $30 \mu\text{m}$ 。采用波长 $4.3 \mu\text{m}$ 激光器光源照射样品,经过光路矫正与放大系统,通过中波红外相机接受光场信号,测试光场分布如图 9(b-d)所示,其中图 9(b)为入射光经过 10×10 超构透镜阵列后的光场分布。图 9(c)为入射光经过单个像素后的纵向(x-z)截面光场分布,可以确定汇聚光场的焦距为 $35 \mu\text{m}$,此处

对应横向(x-y)截面的光场分布如图 9(d)所示。图 9(e)和(f)分别为单个像素光场强度分布图及光场汇聚效率随区域大小的对应关系图。通过积分计算可以得到中心区域 $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 径向范围内光场汇聚效率分别为 66.4% 和 84.9% ,光场能量较相同面积范围内未集成超构透镜时分别提升了 5.98 和 1.91 倍。后续工作将围绕超构透镜阵列与芯片像素级对准集成工艺研究,并同步进行器件测试与性能分析工作。

本文主要开展了像素级超构透镜阵列的结构设计与制备工艺研究,采用步进式光刻技术与 ICP-RIE 刻蚀工艺相结合的方法制备出了高度约为 $1.2 \mu\text{m}$ 的超构透镜。通过对刻蚀工艺参数系统优化,有效地提升了超透镜结构的刻蚀均匀性。其中,气压的降低对刻蚀均匀性的提升效果最为显著,通过

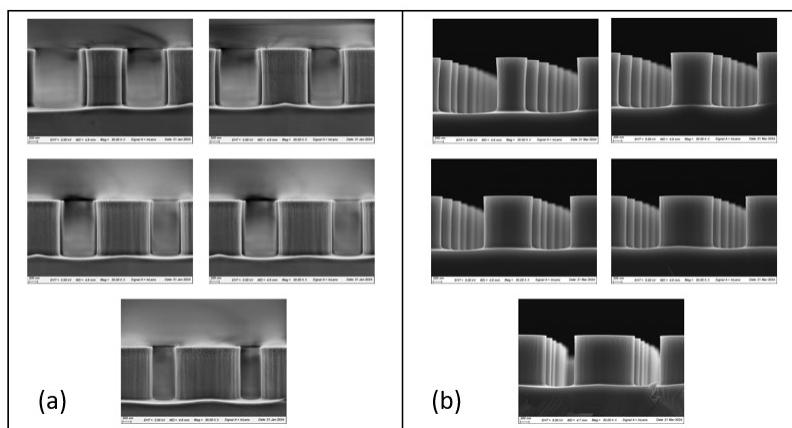


图 7(a) 优化参数前的 SEM 图;(b) 优化参数后的 SEM 图

Fig. 7 (a) SEM images before optimizing parameters; (b) SEM images after optimizing parameters

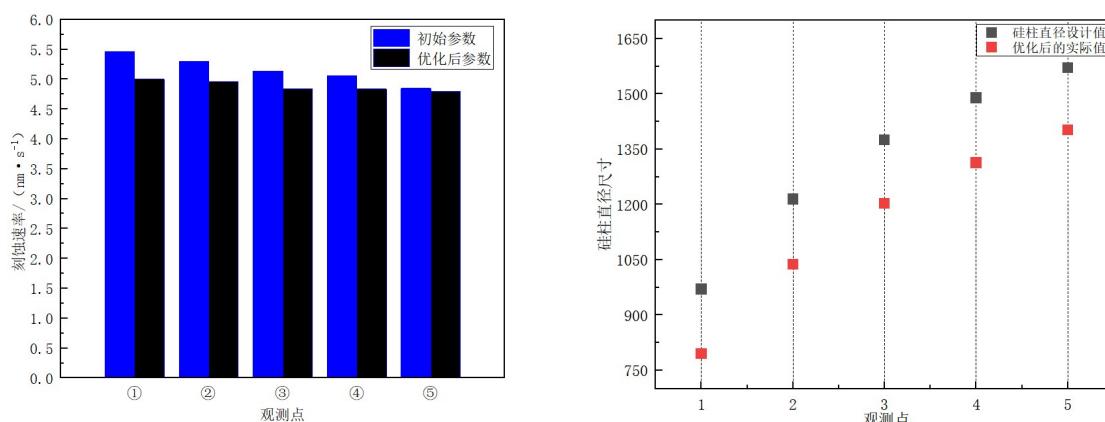


图 8(a) 优化参数前后的刻蚀速率对比图,(b) 硅柱直径设计值与优化参数刻蚀后的实际硅柱尺寸对比

Fig. 8 (a) Etching rate comparison before and after optimization parameters, (b) Comparison between the designed silicon pillar diameter and the actual one after etching with optimized parameters

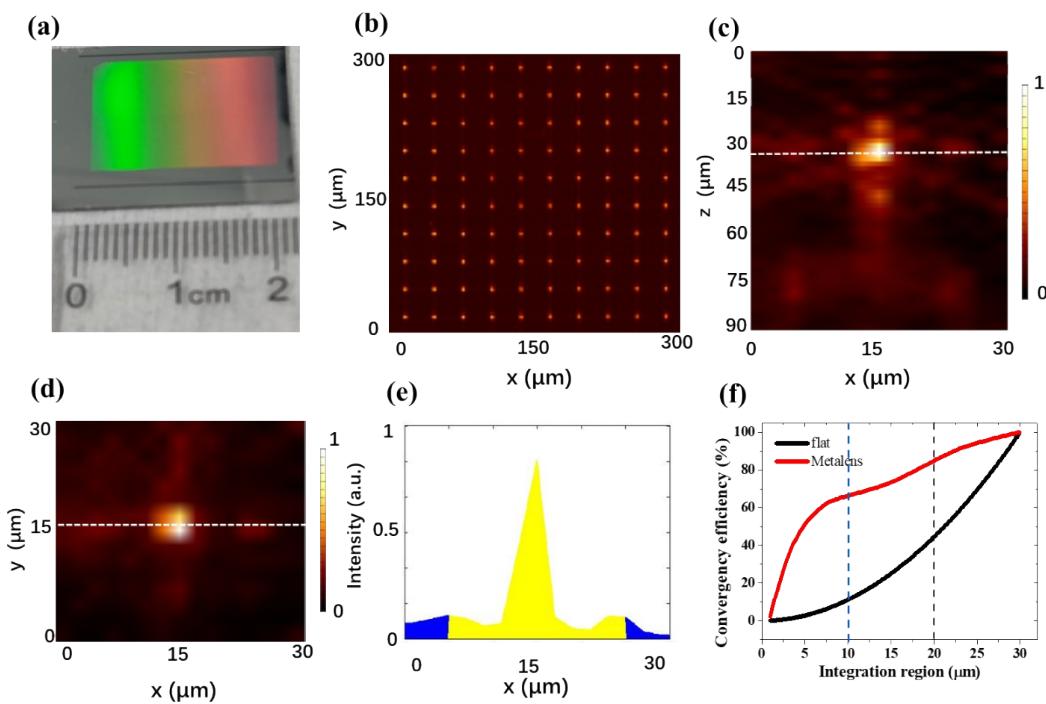


图9 (a) 超构透镜阵列样片实物照片;波长4.26 μm测试的光场分布中(b)10×10阵列x-y截面($z=35\text{ }\mu\text{m}$),(c)单个像素x-z截面,(d)单个像素x-z截面($z=35\text{ }\mu\text{m}$,图c中白色虚线位置),(e)单个像素光场强度分布图(图d中白色虚线位置)和(f)光场汇聚效率随区域大小的对应关系:n 3 _结论

Fig. 9 (a) Actual photo of the meta-lens array sample and (b)-(f) the tested light field distribution diagram at a wavelength of 4.26 μm: (b) 10×10 array x-y cross section ($z=35\text{ }\mu\text{m}$), (c) single pixel x-z cross section, (d) single pixel x-z cross section ($z=35\text{ }\mu\text{m}$, white dotted line position in Figure c), (e) single pixel light field intensity distribution diagram (white dotted line position in (d)) and (f) corresponding relationship between light field convergence efficiency and area size.

降低气压限制了反应气体在沟槽内的扩散范围,有效缓解了负载效应,从而大幅提高了刻蚀均匀性。射频功率优化调整在控制负载效应的同时,兼顾了刻蚀选择比,确保了在实现均匀刻蚀的前提下,能够精准控制刻蚀深度,满足超构透镜的设计要求。而气体流量的优化则进一步协同优化了整个刻蚀过程的性能,尽管其单独对刻蚀均匀性的改善效果有限,但与其他参数协同作用时,能够实现更好的刻蚀效果。优化后的射频功率为25 W,气体流量比为SF₆/CF₄/Ar=11/40/10,气压为6 mTorr,刻蚀不均匀度标准差由0.205%降至了0.073%,最后获得了选择比值为3.42、刻蚀深度约为1.2 μm的超构透镜,并对其进行了光汇聚性能测试。后续工作将聚焦于超构透镜阵列与红外焦平面芯片的像素级精准集成,研制面向光场调控的像素级红外超构透镜集成芯片。该芯片可实现入射光的像素级光场汇聚与调控,显著提升器件灵敏度,同时有效抑制像差与色差,为实现高质量成像提供关键技术支撑。

致谢:本文的光刻和刻蚀工艺是在上海科技大学材料与器件实验室(SMDL20191219)的支持下开展的,作者在此表示衷心的感谢。

References

- [1] Chung H , Zhang F , Li H , et al. Inverse design of high-NA metalens for maskless lithography [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13):2371–2381.
- [2] Jin Z , Lin Y , Wang C , et al. Topologically optimized concentric-nanoring metalens with 1 mm diameter, 0.8NA and 600nm imaging resolution in the visible. [J]. *Optics express*, 2023, 31(6): 10489–10499.
- [3] Yang F , Shalaginov M Y , Lin H I , et al. Wide field-of-view metalens: a tutorial [J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5 (3):033001–033001.
- [4] Hu Y , Jiang Y , Zhang Y , et al. Asymptotic dispersion engineering for ultra-broadband meta-optics [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1):6649.
- [5] Balli F , Sultan M A , Ozdemir A , et al. An ultrabroadband 3D achromatic metalens [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10 (4): 1259–1264.
- [6] Jing X , Wang Y , Huang L. Metasurface-Based Three-Dimensional Imaging Technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811003.

- [7] Ye Feng Yu , Zhu A Y , Paniagua- Domínguez R, et al. High - transmission dielectric metasurface with 2π phase control at visible wavelengths [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): 412–418.
- [8] Li J, Wu T, Xu W, et al. Mechanisms of 2π phase control in dielectric metasurface and transmission enhancement effect[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23186–23196.
- [9] Wang Y , Chen Q , Yang W , et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. *Nature communications*, 2021, 12(1): 5560.
- [10] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. *Nano letters*, 2016, 16(11): 7229–7234.
- [11] Liu M, Fan Q, Yu L E, et al. Polarization-independent infrared micro-lens array based on all-silicon metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10738–10744.
- [12] Gu Z, Gao Y, Zhou K, et al. Surface-patterned chalcogenide glasses with high-aspect-ratio microstructures for long-wave infrared metalenses [J]. *Opto-Electronic Science*, 2024, 3(10): 240017-1.
- [13] 吴冉, 马宗民, 黄伟. 长波红外宽角超透镜阵列的设计与制备 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44 (23) : 2323002–2323002–8.
- [14] Van Schoot J, van Ingen Schenau K, Bottiglieri G, et al. EUV high-NA scanner and mask optimization for sub-8nm resolution [C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VII. SPIE, 2016, 9776: 425–439.
- [15] Li Y, Zhu X, Yu S, et al. A study of the advantages to the photolithography process brought by the high NA EUV exposure tool in advanced logic design rules[C]//2021 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS). IEEE, 2021: 1–4.
- [16] LIN Nan, YANG Wen-He, CHEN Yun-Yi, et al. Research progress and development trend of extreme ultraviolet lithography light source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922002. (林楠, 杨文河, 陈韫懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*), 2022, 59(9): 0922002.
- [17] Fomenkov I. EUV Source for Lithography in HVM: performance and prospects[C]//Source Workshop. 2019: p S1.
- [18] Park J S, Lim S W D, Ossiander M, et al. All-glass, mass-producible, large-diameter metalens at visible wavelength for 100 mm aperture optics and beyond [C]// CLEO: Applications and Technology. Optica Publishing Group, 2022: AW4I. 1.
- [19] Ogawa C , Nakamura S , Aso T , et al. Rotational varifocal moiré metalens made of single-crystal silicon meta-atoms for visible wavelengths [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11 (9): 1941–1948.
- [20] Chen C , Song W , Chen J W , et al. Spectral tomographic imaging with aplanatic metalens [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 99.
- [21] Zhu Y, Liu S, Chang Y, et al. Broadband polarization-insensitive metalens with excellent achromaticity and high efficiency for the entire visible spectrum [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(20): -.