

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1205

基于 As_2Se_3 玻璃的厘米级长波红外超透镜研究

陈旭¹, 谷招峰^{1,2}, 陈益敏¹, 刘自军¹, 顾辰杰¹, 沈祥^{1*}

(1. 宁波大学 高等技术研究院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 长波红外超透镜是一种由亚波长尺寸的微结构单元构成的光学元件, 在夜视、医疗诊断等领域应用前景广泛, 但在材料表面大面积精确制造微结构单元困难, 超透镜尺寸通常被限制在毫米级, 导致其应用场景受限。为此, 基于碲化砷 (As_2Se_3) 硫系玻璃, 利用时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 设计了一种适用于长波红外 (LWIR) 的厘米级超透镜, 并研发了一套基于紫外光刻和电感耦合等离子体刻蚀的高效、大尺寸制备技术, 制备得到的超透镜直径和焦距均为 1 cm, 工作波长为 $9.78\text{ }\mu\text{m}$, 聚焦光斑的半高全宽 (FWHM) 为 $17.47\text{ }\mu\text{m}$, 能够对电烙铁和人手进行较为清晰的成像。

关键词: 硫系玻璃; 长波红外; 厘米级超透镜; 紫外光刻

中图分类号: TN215

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 04-0049-07

在光学系统中, 大尺寸光学元件对于增强光学系统探测能力, 提升成像质量至关重要。特别是在长波红外 (LWIR) 光学应用方面, 如热成像、环境监测以及军事侦察等, 更加需要大尺寸透镜来捕捉更多的红外辐射, 从而提高信号强度和空间分辨率^[1-2]。增大传统透镜尺寸面临诸多挑战, 如材料吸收变大、质量增加, 使得制造难度增大, 然而超透镜具备轻薄、易集成等优势^[3-5]。因此, 开发大尺寸的 LWIR 超透镜成为突破这一瓶颈的关键。超透镜通过亚波长尺度的微结构单元精准调控光场传播, 实现对入射光的高效聚焦^[6-8]。相比传统透镜, 超透镜具有设计灵活和轻量化等优势, 特别是在 LWIR 波段, 这种特性使其在大孔径光学系统中展现出巨大的应用潜力。大尺寸超透镜的应用可以显著减轻系统的重量, 尤其是在需要分辨率高、探测距离长的应用场景^[1-2]。

当前, 大尺寸超透镜的制备存在技术难点。已有研究^[9]采用电子束光刻 (EBL) 技术成功制备了直径为 2 mm 的 As_2Se_3 长波红外超透镜, 并展示出较好的成像性能。但是 EBL 作为一种逐点扫描的

曝光技术, 存在制备时间长、效率低、费用高等问题^[10-11], 虽然能够实现极高的图案分辨率, 但是其加工效率较低, 使得该技术难以适用于大尺寸超透镜的制造。朱世钰^[12]利用投影式光刻制备了 35 mm 口径的长波红外全硅介质透镜。She 等^[13]利用步进式光刻机制备了直径为 2 cm 的二氧化硅 (SiO_2) 和非晶硅 (a-Si) 介质的长波红外超透镜。与之相比, 紫外光刻技术在大尺寸超透镜制备中优势更为显著^[14-15]。紫外光刻技术具有高效并行的特点, 可以通过掩模版一次性将图案转移至整个基底, 提升加工效率。由于 LWIR 波长较大, 设计用于该波段的超透镜微结构尺寸也相应较大, 可以满足光波调控需求。紫外光刻技术能够在更短时间内高效制造厘米级超透镜, 充分展现其在大尺寸器件制造中的优越性。

目前在 LWIR 波段广泛应用的材料中, 晶体锗 (Ge) 和硫化锌 (ZnS) 价格昂贵、刻蚀困难、加工难度较大。氟化物材料 (CaF_2 和 BaF_2) 折射率较低, 需要纵横比较大的材料才能实现完整的 2π 相位覆盖, 增加了结构加工的难度。硅 (Si) 在中

收稿日期: 2024-12-11 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金创新群体项目 (LDT23F05015F05)

第一作者: 陈旭, 硕士研究生, 主要研究方向为硫系材料及其光电器件。E-mail: chenxu000221@163.com

*通信作者: 沈祥, 研究员, 主要研究方向为红外硫系玻璃材料与器件。E-mail: shenxiang@nbu.edu.cn

波红外波段的性能较佳,且 Si 材料的加工技术成熟,但 Si 在 LWIR 表现出较强的吸收特性^[16],导致基于 Si 材料制备的全介质超透镜存在较高的光学损耗,影响超透镜的聚焦效率。硫系玻璃材料如 As_2Se_3 ,在波长为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 范围具有极低的光学损耗和较高的透过率,能够在现有的微纳制造工艺框架内进行有效的加工和处理,不会出现工艺不匹配或难以加工的问题^[17],能够推动其在大尺寸超透镜中的应用。因此,选用 As_2Se_3 材料用来制备超透镜^[18]。

笔者基于 As_2Se_3 硫系玻璃材料,通过时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)仿真设计了一种用于 LWIR 的大尺寸超透镜,其直径和焦距均为 $1\ \text{cm}$,并通过紫外光刻和电感耦合等离子体(ICP)刻蚀技术进行高效制备。经实验测得超透镜的焦距 f 与设计一致,聚焦光斑的半高全宽(FWHM)为 $17.47\ \mu\text{m}$,能够对电烙铁和人手进行较为清晰的成像。表明基于 As_2Se_3 硫系玻璃材料的厘米级超透镜设计可以助力实现高效、轻量化的 LWIR 器件制备。

1 超透镜器件的设计

1.1 超透镜工作原理

超透镜是一种由亚波长尺寸的微结构特定分布在平面上,实现聚焦功能的平面透镜。主要工作原理是基于材料表面的微结构对电磁波的调控,通过控制表面的突变相位分布来实现对电磁波波束的控制,改变波前的相位分布,如图 1 所示。

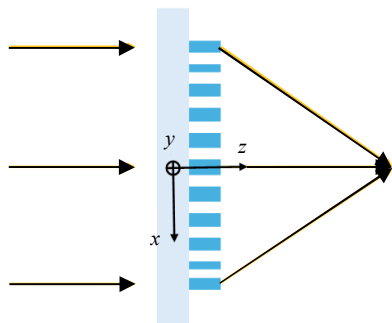


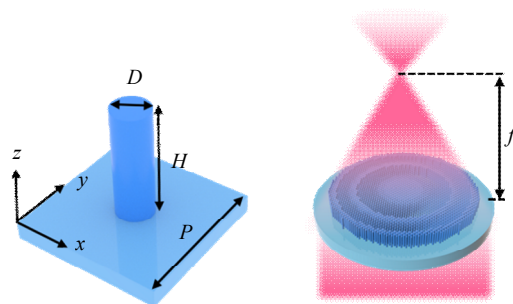
图 1 超透镜工作原理示意图

图 1 中 x 轴代表超透镜的宽度方向, y 轴代表超透镜的深度方向, z 轴代表电磁波的传播方向;柱子代表超透镜的微结构,箭头表示入射的电磁波。当电磁波通过这些微结构时,每个结构单元都

会对通过的波前产生特定的相位延迟,从而在宏观上改变波前的相位分布。这种相位调控使得电磁波在通过超透镜后实现聚焦和偏折,形成特定的波前形状,实现对电磁波波束的控制。

1.2 超透镜设计

根据对入射光偏振的敏感性,超透镜单元结构可以分为偏振敏感型和偏振不敏感型两类。偏振敏感型超透镜单元结构主要基于几何相位原理来调控光场,典型结构如长方体、椭圆柱体等;而偏振不敏感型超透镜单元结构主要基于传播相位调控光场,结构的形状具有旋转对称性,如圆柱和方柱等。根据超表面单元结构对入射光的偏振调控特性,选择对偏振不敏感的单元结构。为了实现超透镜阵列的偏振不敏感性,选择圆柱作为超透镜的单元结构,设计的单元结构如图 2(a) 所示,最终超透镜的聚焦如图 2(b) 所示。



(a) 单元结构

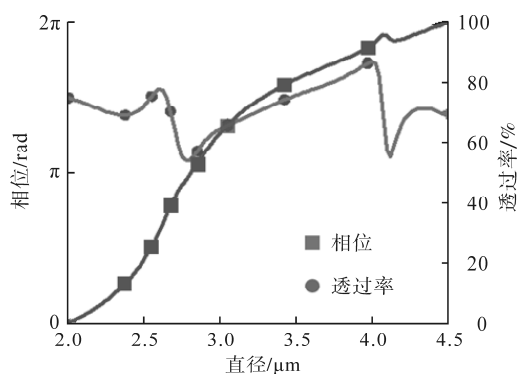
(b) 超透镜聚焦

图 2 超透镜结构示意图

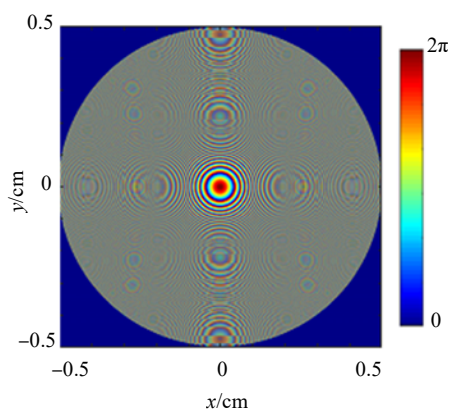
首先通过 FDTD 仿真软件对单元结构的几何参数进行优化。设置入射光波长为 $9.78\ \mu\text{m}$, x 和 y 方向上边界条件为周期性, z 方向边界条件为完美吸收层(PML), As_2Se_3 折射率 n 为 2.78。由于超透镜中单元结构的周期 P 和高度 H 决定超透镜的相位调制能力和透过率,直接影响超透镜的聚焦效果和成像质量,因此在设计单元结构时,需要综合考虑周期和高度。调整周期会影响相位分布的均匀性,而高度变化则会影响相位累积和透过率,只有两者相互协调,才能确保超透镜在实现精确相位控制的同时保持较高的透过率和良好的成像性能。

判断标准:对于波长 λ 和数值孔径 N_A ,微结构周期通常应满足奈奎斯特采样定理^[19],即 $P < \lambda / (2N_A)$ 。微结构的高度选择需要满足其对电磁波

0~2 π 的相位调控,且在保证足够相位变化的同时尽量降低单元结构的高度,以降低加工难度。经优化,最终选定超透镜周期为6.5 μm ,微结构高度为8 μm ,得到的透射相位曲线如图3所示。



(a) $P=6.5 \mu\text{m}$, $H=8 \mu\text{m}$ 时微柱透射率与相位关系



(b) 直径为1.0 cm的As₂Se₃超透镜离散相位分布

图3 微柱结构的透射率与离散相位分布

当圆柱体直径 D 在2.0~4.5 μm 之间变化时,选择8个基本单元,每个基本单元代表不同的相位值,能够确保超透镜实现全相位覆盖。基本单元尺寸见表1。

表1 圆柱体单元结构参数

单元编号	直径/ μm	相位/rad
1	2.000	0
2	2.375	$\pi/4$
3	2.550	$\pi/2$
4	2.675	$3\pi/4$
5	2.850	π
6	3.050	$5\pi/4$
7	3.425	$3\pi/2$
8	3.975	$7\pi/4$

通过图像可以看到这些单元的透射率均超过

56%,透过率良好,且能够完成0~2 π 调控。

通过式(1)可以计算得到超透镜平面上的相位分布,如图3(b)所示。根据选出的8个结构单元,按照相位的要求进行排布,构建整个超透镜,并导出版图文件用于制造光刻掩模版。

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

式中: $\varphi(x,y)$ 为超透镜上任一点的相位值;波长 λ 设为9.78 μm ;焦距 f 设为1 cm。

2 超透镜器件的制备

选择厚1.5 mm的双面抛光As₂Se₃玻璃作为制备超透镜的衬底材料,制备流程如下:

(1)用丙酮、乙醇和去离子水依次对As₂Se₃样品进行清洗,确保As₂Se₃样品表面完全洁净。将清洁后的样品放置在150 $^{\circ}\text{C}$ 热板上烘烤10 min,去除表面水分,随后转移到70 $^{\circ}\text{C}$ 低温热板备用。

(2)通过匀胶机将光刻胶(AZ5214E)均匀旋涂在As₂Se₃表面,匀胶机转速为6 000 r/min,匀胶时间1 min;将均胶后样品放置在95 $^{\circ}\text{C}$ 热板上烘烤2 min进行前烘处理。

(3)利用已设计的掩模版在德国SUSS公司的MJb4型紫外光刻机上对涂有光刻胶的As₂Se₃表面进行曝光,曝光光强为 $1.282 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$,曝光时间为2 s。

(4)将曝光后的样品放入显影液(ZX-238)中显影约2 min,待图形完全显影后,再将样品迅速浸入去离子水中定影约1 min。

(5)使用刻蚀机对样品进行刻蚀处理。其中射频功率设置为100 W,电感耦合功率为300 W,腔体气压为0.80 Pa,使用CHF₃和CF₄混合气体作为反应刻蚀气体,2种气体流量分别设置为 $2 \times 10^{-2} \text{ L/min}$ 和 $1 \times 10^{-2} \text{ L/min}$,刻蚀时间为3.5 min,以获得最终设计的圆柱高度。

(6)刻蚀完成后,采用N-甲基吡咯烷酮溶液(NMP)去除样品表面残留的光刻胶,彻底清洁表面。清洗过程中将样品置于60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温摇床上轻柔摇晃。

图4展示了超透镜的制备流程。在超透镜的制造过程中,使用奥林巴斯显微镜对不同工艺阶段的样品表面进行观察。

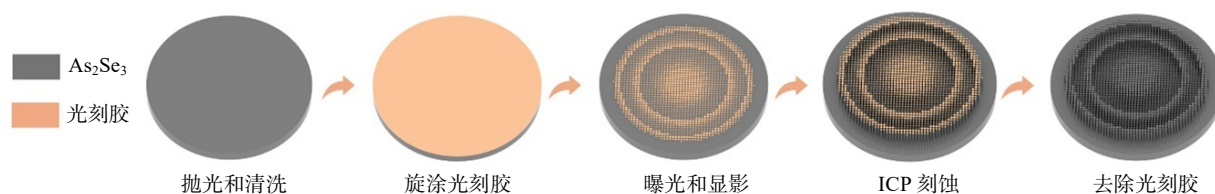
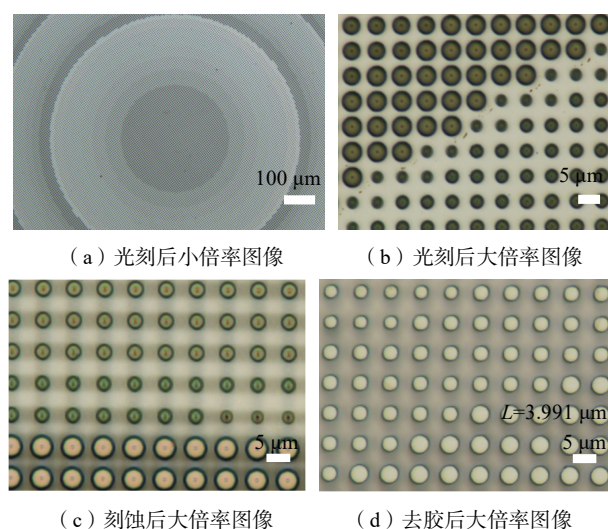


图4 超透镜制备流程

图5展示了光刻、刻蚀以及去胶后样品表面的形貌。光刻后的表面形貌如图5(a)所示,可以清晰看到超透镜图案已经成功转移至 As_2Se_3 基底表面,圆柱体微结构的形态和排列与设计图案一致。图5(b)显示了在圆柱体结构的中间部分出现了黑点,这可能是由于光刻过程中产生了泊松亮斑(Poisson's spot)。泊松亮斑通常出现在光刻胶层区域,是由圆形孔径衍射造成的亮点。图5(c)展示了经过电感耦合等离子体刻蚀技术刻蚀后样品的结构形貌,可以发现刻蚀后的圆柱体结构依旧存在黑点,这是由于AZ5214E光刻胶的耐刻蚀性较高,其与 As_2Se_3 玻璃的刻蚀比高达1:70,所以光刻胶只被刻蚀掉很小一部分(0.1~0.2 μm)。此外,整体刻蚀形貌较为清晰,圆柱体结构完整,说明刻蚀过程对图案的形变影响较小。图5(d)展示了经过NMP溶液处理后的结构,通过观察可以看到光刻胶已经完全被清除,圆柱体表面上的斑点随之消失,这进一步说明斑点存在于光刻胶层,对结构没有影响。通过显微镜对微结构的尺寸进行测量,发现去胶后圆柱体的结构尺寸与设计尺寸基本一致。



(a) 光刻后小倍率图像

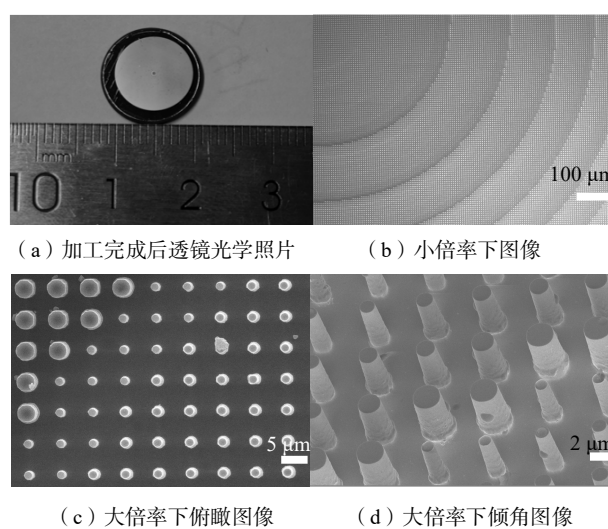
(b) 光刻后大倍率图像

(c) 刻蚀后大倍率图像

(d) 去胶后大倍率图像

图5 奥林巴斯显微镜图像

图6(a)展示了制备得到的1 cm超透镜的实物照片,能够看到整个透镜的轮廓,而且无明显的加工损伤。为了进一步了解超透镜样品的表面形貌及结构特征,采用扫描电子显微镜(SEM)对样品表面样貌进行观察。在小倍率SEM图像中可以看到超透镜表面较为洁净,未见明显的大尺度缺陷或污染物,如图6(b)所示。然而随着倍率的提高,样品表面开始暴露一些细微缺陷,如图6(c)所示。原因主要有2个方面:(1)这些不完美的斑点可能是NMP在去除光刻胶时未能完全反应,残留了部分光刻胶,尽管NMP能够有效清除大部分光刻胶,但是如果溶解时间不足或反应不充分,仍可能有微量残胶留在样品表面;(2)刻蚀过程中产生的副产物也可能附着在表面,导致这些不规则斑点的出现。图6(d)展示了倾斜角度下的SEM照片,可以看出圆柱体结构的垂直度相对较好,表明刻蚀过程中的各项参数得到了有效控制。SEM分析表明,尽管在光刻胶去除与刻蚀过程中可能会产生少量的表面瑕疵,但是总体而言,超透镜的制造工艺具备较高的精度与稳定性,能够有效控制微结构的形貌与尺寸。



(a) 加工完成后透镜光学照片

(b) 小倍率下图像

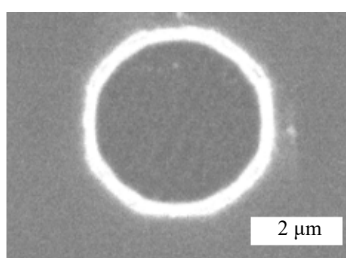
(c) 大倍率下俯瞰图像

(d) 大倍率下倾角图像

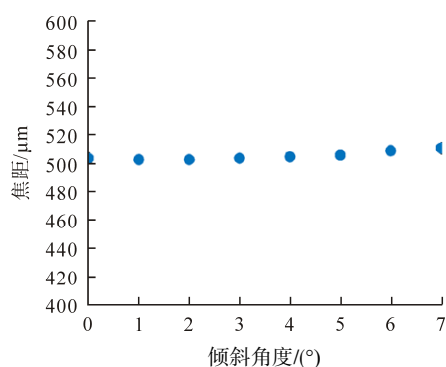
图6 超透镜实物及其SEM图像

图 6(d) 中的圆柱体结构由于加工误差产生了倾斜,呈现出类似圆台的形态。为了探究这种倾斜对焦距和聚焦效率的影响,进行了详细的仿真测试,并通过 SEM 对圆柱体顶部直径进行测量,得到倾斜角为 0.6958° , 小于 1° 。

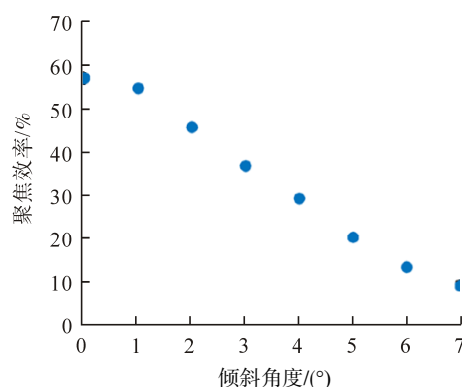
图 7 是单元结构的 SEM 图像以及相同 N_A , 直径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的超透镜仿真结果,可以看出当倾斜角小于 1° 时对焦距和聚焦效率的影响很小。



(a) 单元结构的 SEM 图像



(b) 不同倾斜角度下的焦距变化



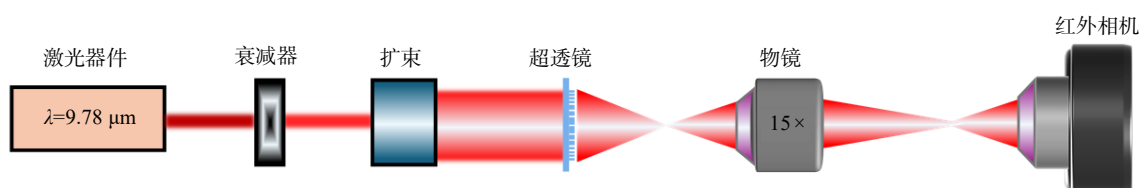
(c) 不同倾斜角度下的聚焦效率变化

图 7 顶部倾斜角对焦距和聚焦效率的影响

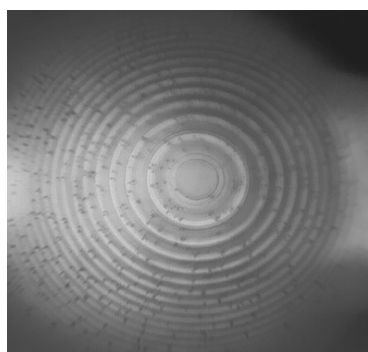
3 超透镜器件的性能测试

3.1 焦距测试

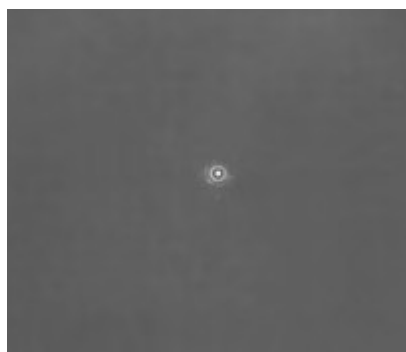
为了评估所制造的超透镜的光学性能,进行了焦距测量和成像测试。图 8(a) 为测试装置示意图。激光器发射波长 $9.78\text{ }\mu\text{m}$ 的准直光束,从无结构的背面垂直入射超透镜。透射光由物镜收集,物镜的焦距为 13.3 mm ,然后被引导到红外相机的焦平面阵列进行对焦斑成像。红外相机的分辨率为 $640\text{ Pixel}\times 512\text{ Pixel}$, 像元尺寸为 $12\text{ }\mu\text{m}\times 12\text{ }\mu\text{m}$ 。其中物镜和红外相机组装到一起并放于位移台。调整物镜的距离,使光束聚焦到超透镜表面,使用红外相机捕捉此时的图像,得到的结果如图 8(b) 所



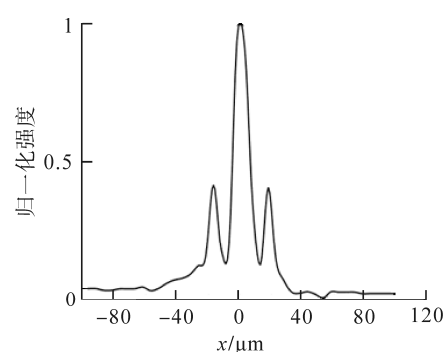
(a) 超透镜聚焦性能测试装置



(b) 聚焦图像



(c) 焦平面强度分布



(d) 焦平面沿 x 轴归一化光强度分布

图 8 超透镜焦距测试

示,记录此时数据。进一步调整物镜的位置,使光束聚焦到超透镜的焦点,使用红外相机捕捉此时的图像,得到的结果如图 8(c)所示,记录此时的数据。2个示数的差值即为超透镜的焦距,通过计算与设计基本一致。为了定量评估焦平面上的光斑,利用 Matlab 函数绘制沿 x 轴方向的横截面归一化强度曲线,如图 8(d)所示,该焦斑的 FWHM 为 $17.47\ \mu\text{m}$ 。

3.2 成像测试

为进一步验证超透镜成像能力,选择电烙铁和手掌作为成像目标进行成像。这 2 种物体都有发热特性,是常用的测试对象。成像装置如图 9(a)所示,由测试物体、制备的超透镜以及红外相机组成。首先将测试物体放置在超透镜前,再利用超透镜对成像目标进行聚焦,最后利用红外相机捕捉并记录经过超透镜处理后的图像,得到电烙铁和人手的成像结果,如图 9(b)和(c)所示。

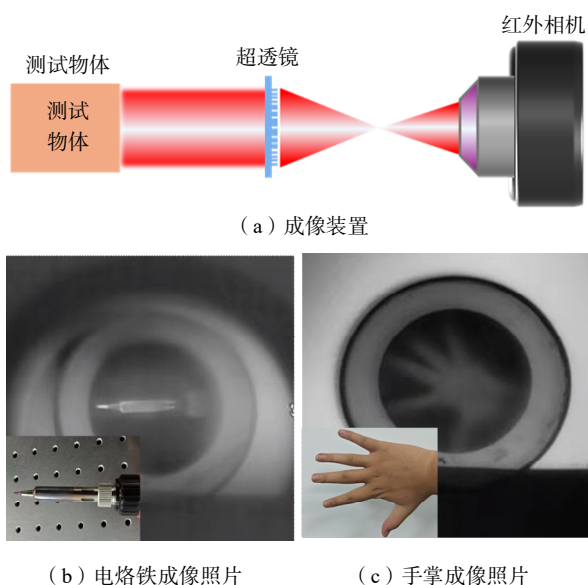


图 9 超透镜成像装置及成像照片

4 结论

利用 FDTD 仿真、紫外光刻和等离子体刻蚀技术,制备了能聚焦长波红外光的大尺寸 As_2Se_3 超透镜,得到的主要结论为

(1) 利用 FDTD 对超透镜单元结构的几何参数进行精确优化,确保在波长 $9.78\ \mu\text{m}$ 下超透镜具备优异的透过率和全相位覆盖能力,为超透镜性能优化提供了参考。

(2) 采用紫外和电感耦合等离子体技术制备得到的超透镜直径和焦距均为 $1\ \text{cm}$,聚焦光斑的 FWHM 为 $17.47\ \mu\text{m}$,验证了所采用制造工艺的精确性和可靠性,为大尺寸超透镜制造提供了有效的技术路径。

(3) 在实际成像测试中,能够清晰对电烙铁和人手成像,验证了超透镜在 LWIR 区域的应用潜力,表明文中提出的制造技术在实际应用中的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] ZHANG L D, CHANG S Y, CHEN X, et al. High-efficiency, 80 mm aperture metalens telescope[J]. Nano letters, 2023, 23(1):51-57.
- [2] PARK J S, LIM S W D, AMIRZHAN A, et al. All-glass 100 mm diameter visible metalens for imaging the cosmos[J]. ACS nano, 2024, 18(4):3187-3198.
- [3] HUANG L C, HAN Z Y, WIRTH-SINGH A, et al. Broadband thermal imaging using meta-optics[J]. Nature communications, 2024, 15(1):1662.
- [4] WEI Y P, WANG C M, YAO L, et al. High-efficiency achromatic metalens in long-wavelength infrared composed of topologically optimized building blocks[J]. Optical materials, 2024, 151:115314.
- [5] HU T, WEN L Q, LI H W, et al. Aberration-corrected hybrid metalens for longwave infrared thermal imaging[J]. Nanophotonics, 2024, 13(17):3059-3066.
- [6] 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]. Nature nanotechnology, 2015, 10(11):937-943.
- [7] GUO Y H, ZHANG S C, PU M B, et al. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation[J]. Light, science & applications, 2021, 10(1):636-647.
- [8] ZHU R C, WANG J F, QIU T S, et al. Direct field-to-pattern monolithic design of holographic metasurface via residual encoder-decoder convolutional neural network[J]. Opto-electronic advances, 2023, 6(8): 220148.
- [9] GU Z F, GAO Y X, ZHOU K S, et al. Surface-patterned chalcogenide glasses with high-aspect-ratio microstructures for long-wave infrared metalenses[J]. Opto-electronic science, 2024, 3(10):240017.
- [10] WANG S M, WU P C, SU V C, et al. A broadband

- achromatic metalens in the visible[J]. Nature nanotechnology, 2018, 13(3):23372-23381.
- [11] ISHIZUKA N, LI J, FUJI W, et al. Linear polarization-separating metalens at long-wavelength infrared[J]. Optics express, 2023, 31(14):23372.
- [12] 朱世钰. 基于超表面透镜的长波红外成像系统及其机理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [13] SHE A L, ZHANG S Y, SHIAN S, et al. Large area metalenses: design, characterization, and mass manufacturing[J]. Optics express, 2018, 26(2):1573-1585.
- [14] FAN Q B, WANG Y L, LIU M Z, et al. High-efficiency, linear-polarization-multiplexing metalens for long-wavelength infrared light[J]. Optics letters, 2018, 43(24): 6005-6008.
- [15] LI J W, WANG Y L, LIU S J, et al. Largest aperture metalens of high numerical aperture and polarization independence for long-wavelength infrared imaging[J]. Optics letters, 2022, 30(16):28882-28891.
- [16] SOREF R A, EMELETT S J, BUCHWALD W R. Silicon waveguided components for the long-wave infrared region[J]. Journal of optics A: pure and applied optics, 2006, 8(10):840-848.
- [17] ENGELBERG J, LEVY U. The advantages of metalenses over diffractive lenses[J]. Nature communications, 2020, 11(1):1991.
- [18] EGGLETON B J, LUTHER-DAVIES B, RICHARDSON K. Chalcogenide photonics[J]. Nature photonics, 2011, 5(3):141-148.
- [19] CHEN W T, ZHU A Y, KHORASANINEJAD M, et al. Immersion meta-lenses at visible wavelengths for nanoscale imaging[J]. Nano letters, 2017, 17(5):3188-3194.

Research on centimeter-scale long-wave infrared metalens based on As₂Se₃ glass

CHEN Xu¹, GU Zhaofeng^{1,2}, CHEN Yimin¹, LIU Zijun¹, GU Chenjie¹, SHEN Xiang¹

(1.Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: Long-wave infrared (LWIR) metalens is an optical element composed of sub-wavelength-sized microstructures, offering broad application prospects in night vision, medical diagnosis, and other fields. However, precise fabrication of microstructures over large areas on material surfaces is extremely challenging, thereby limiting the size of metalens to millimeter-scale levels and significantly restricting their applications. To address this issue, a centimeter-scale metalens suitable for LWIR was designed based on arsenic selenide (As₂Se₃) chalcogenide glass using the finite-difference time-domain (FDTD) method. An efficient and large-scale fabrication technology was also developed based on ultraviolet lithography and inductively coupled plasma etching. The fabricated metalens has a diameter and focal length of 1 cm, operates at a wavelength of 9.78 μm, and achieves a full width at half maximum (FWHM) of 17.47 μm for the focal spot. It is capable of providing relatively clear imaging of objects such as soldering irons and human hands.

Keywords: chalcogenide glass; long-wave infrared; centimeter-scale metalens; ultraviolet lithography

(责任编辑 史小丽)