

基于AZ5214光刻胶激光直写与热回流的高质量微透镜阵列制备

龙炳良 许升 樊夫 周宇 祝远锋 侯起超

Fabrication of high quality microlens arrays based on AZ5214 photoresist by laser direct writing and thermal reflow

LONG Bingliang, XU Shengyuan, FAN Fu, ZHOU Yu, ZHU Yuanfeng, HOU Qichao

引用本文:

龙炳良, 许升, 樊夫, 等. 基于AZ5214光刻胶激光直写与热回流的高质量微透镜阵列制备[J]. 应用光学, 2026, 47(5): 1158–1165. DOI: 10.5768/JAO202647.0513017

LONG Bingliang, XU Shengyuan, FAN Fu, et al. Fabrication of high quality microlens arrays based on AZ5214 photoresist by laser direct writing and thermal reflow[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(5): 1158–1165. DOI: 10.5768/JAO202647.0513017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0513017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于匀光变焦的激光切割、焊接光学系统设计

Design of cutting and welding optical system based on laser uniform light and zoom

应用光学. 2026, 47(2): 278–287 <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0201007>

光束整形技术及其应用的研究进展

Research progress of beam shaping technology and its application

应用光学. 2025, 46(4): 776–785 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0401009>

光子集成干涉成像系统微透镜排布设计与图像复原

Arrangement of microlens and image restoration technology of photon integrated interferometric imaging system

应用光学. 2022, 43(2): 213–220 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201005>

哈特曼传感器检测微透镜波前方法

Method of detecting microlens wavefront by Hartmann sensor

应用光学. 2025, 46(2): 380–387 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203003>

基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

Synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

应用光学. 2021, 42(4): 703–708 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002>

高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟

Numerical simulation of thermal effects in high-power diamond Raman lasers

应用光学. 2023, 44(6): 1201–1211 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 05-1158-08

引用格式: 龙炳良, 许升媛, 樊夫, 等. 基于 AZ5214 光刻胶激光直写与热回流的高质量微透镜阵列制备[J]. 应用光学, 2026, 47(5): 1158-1165.

LONG Bingliang, XU Shengyuan, FAN Fu, et al. Fabrication of high quality microlens arrays based on AZ5214 photoresist by laser direct writing and thermal reflow[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(5): 1158-1165.



在线阅读

基于 AZ5214 光刻胶激光直写与热回流的高质量微透镜阵列制备

龙炳良², 许升媛³, 樊夫¹, 周宇¹, 祝远锋², 侯起超¹

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 江西师范大学 微电子学院, 江西 南昌 330022;

3. 湖南大学 粤港澳大湾区创新研究院, 广东 广州 511340)

摘要: 微透镜阵列在成像、显示和微光学等方面都有一定应用,但在制备过程中,要同时兼顾填充因子、尺寸均匀性和形貌一致性并不容易。以 AZ5214 正性光刻胶为材料,研究了在石英玻璃基底上制备球冠状微透镜阵列的方法。工艺上采用紫外激光直写与热回流相结合的方式,并对旋涂、前烘、曝光、显影和热回流等关键环节进行了优化。结果表明,所得微透镜阵列周期约为 16.5 μm , 平均直径约为 15.1 μm , 平均高度约为 2.82 μm , 曲率半径约为 11.6 μm 。所制备结构表面较光滑、形貌较规整, 体积平均收缩率约为 8.98%, 直径和高度的最大相对偏差分别约为 1.7% 和 1.5%。上述结果表明,在本文工艺参数下,紫外激光直写与热回流相结合可实现球冠状微透镜阵列的制备。

关键词: 微透镜阵列; AZ5214 光刻胶; 激光直写; 热回流工艺

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0513017

Fabrication of high quality microlens arrays based on AZ5214 photoresist by laser direct writing and thermal reflow

LONG Bingliang², XU Shengyuan³, FAN Fu¹, ZHOU Yu¹, ZHU Yuanfeng², HOU Qichao¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Microelectronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 3. Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Innovation Institute, Hunan University, Guangzhou 511340, China)

Abstract: Microlens arrays (MLAs) are widely used in imaging, display, and micro-optical applications. However, it remains challenging to achieve a high fill factor together with good dimensional uniformity and morphological consistency during fabrication. In this study, dome-shaped MLAs were fabricated on quartz substrates using AZ5214 positive photoresist. The process combined ultraviolet (UV) laser direct writing with thermal reflow, and the key steps, including spin coating, prebaking, exposure, development, and thermal reflow, were optimized. The results show that the fabricated MLAs have a period of about 16.5 μm , an average diameter of about 15.1 μm , an average height of about 2.82 μm , and a radius of curvature of about 11.6 μm . The resulting structures exhibit relatively smooth surfaces and regular profiles. The average volumetric

收稿日期: 2026-05-12; 修回日期: 2026-08-21

基金项目: 广州市重点研发计划项目 (ZF202500140)

第一作者: 龙炳良, E-mail: 202441600028@jxnu.edu.cn

通信作者: 祝远锋, E-mail: yuanfengzhu@jxnu.edu.cn

侯起超, E-mail: hqc1121@hnu.edu.cn

shrinkage is about 8.98%. The maximum relative deviations in diameter and height are approximately 1.7% and 1.5%, respectively. These results demonstrate that dome-shaped MLAs can be fabricated by combining UV laser direct writing with thermal reflow under the present process conditions.

Key words: microlens array; AZ5214 photoresist; laser direct writing; thermal reflow process

引言

随着微光学、光电子学和集成光子学的快速发展,微透镜阵列(microlens arrays, MLAs)已成为微光学系统的重要组成部分。与传统宏观透镜相比,微透镜阵列具有尺寸小、易集成、填充率高以及适于阵列化批量加工等特点,因此在三维成像^[1]、光场成像^[2]、光通信^[3]以及波前探测^[4]等领域得到了广泛应用。

围绕不同应用需求,研究人员已发展出多种微透镜阵列制备方法,包括超精密机械加工^[5]、纳米压印光刻^[6]、灰度光刻^[7]、光刻胶热回流^[8]、聚合物光刻/光聚合^[9]等工艺。光刻胶热回流法由于设备要求相对较低、工艺流程较为简便,并能够获得表面较光滑的球面或球冠面结构,在微透镜阵列制备中应用广泛^[10]。O'NEILL F T 和 SHERIDAN J T 较早系统研究了光刻胶热回流形成球面/球冠微透镜的实验规律与解析模型,为热回流微透镜的几何设计和工艺控制奠定了基础^[11-12]。后续学者持续优化工艺,ASHRAF M 等^[13]将多种几何表征方法引入回流微透镜轮廓的定量分析,验证了热回流工艺可实现较低表面粗糙度和可控的几何参数。ROY E 等^[14]通过增强型热回流工艺制备出高数值孔径的聚合物微透镜阵列,用于提高荧光芯片的收光效率。WU Y 等^[15]将光刻胶热回流与电感耦合等离子体(inductively coupled plasma, ICP)刻蚀相结合,在硅基上实现了大面积、高填充因子球面微透镜阵列的高精度转移。CHUNG C K 等^[16]则从热处理方式出发,对采用不同热处理路径(热板/烘箱)制备的回流微透镜焦距及聚焦性能差异进行了系统分析。总体来看,热回流工艺兼顾了工艺简便性与成形质量,但现有研究主要集中于 SU-8、PMMA 等材料体系,针对 AZ5214 正性光刻胶的系统工艺研究仍相对不足。

同时,无掩模激光直写(laser direct writing, LDW)技术的发展为微光学器件的制备提供了新的途径。该技术通过计算机直接控制光斑的扫描路径和曝光剂量,使微透镜的阵列周期、孔径尺寸以及版图布局可以灵活调整,从而有效克服了传

统掩模光刻在掩模制作周期长、成本高及版图修改受限等方面的局限,特别适合小批量、多品种的原型验证^[17]。将激光直写与光刻胶热回流工艺结合,可为微透镜结构的灵活制备提供一种可行途径。

AZ5214 作为高分辨率正性光刻胶,具备良好的光刻成形性与热流变特性,在微纳图形制备中应用广泛,但将其用于微透镜阵列热回流制备的工艺研究仍较为欠缺。基于此,本文以石英为基底、AZ5214 为成形材料,构建标准化的激光直写——热回流制备工艺流程,结合前期加工经验确定一组可复现的最优工艺参数,通过激光扫描共聚焦显微镜对微透镜阵列的形貌、尺寸、体积变化进行系统表征,并据此验证该工艺路线的可行性与稳定性,为基于 AZ5214 光刻胶的微透镜阵列小批量制备提供工艺参考。

1 微透镜阵列的制备原理及工艺流程

光刻胶的热回流过程可视为加热后光刻胶在表面张力作用下向低表面能形态演化的过程。通常先通过光刻工艺在基底上形成规则排列的光刻胶微柱阵列,然后将样品加热至高于 AZ5214 光刻胶玻璃化转变或热软化温区的温度范围(约 105 ℃~120 ℃ 以上)^[18]。在该温区内,微柱侧壁逐渐软化,并在表面张力驱动下发生形貌重排,最终形成以柱底为边界的球冠状微透镜。

在理想情况下,若忽略重力、溶剂挥发和界面黏附等因素,微透镜表面可近似为标准球面。然而在实际加工中,温度梯度、溶剂残留以及基底表面浸润性等因素都会对最终形貌产生影响。因此,为获得高度一致的微透镜阵列,通常需要通过合理选择和优化工艺参数加以控制。基于前期加工经验,本文通过多轮工艺调试,确定了一组代表性的工艺条件,以验证该工艺路线的可行性。

本文制备微透镜阵列的主要流程包括光刻胶旋涂、前烘、激光直写曝光、显影以及热回流成型 5 个关键步骤,其工艺示意如图 1 所示。

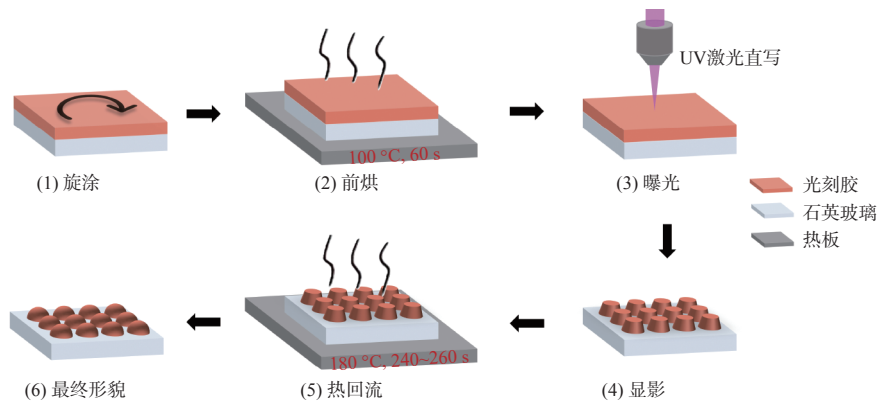


图 1 石英玻璃基底微透镜阵列的光刻—热回流制备工艺流程示意图

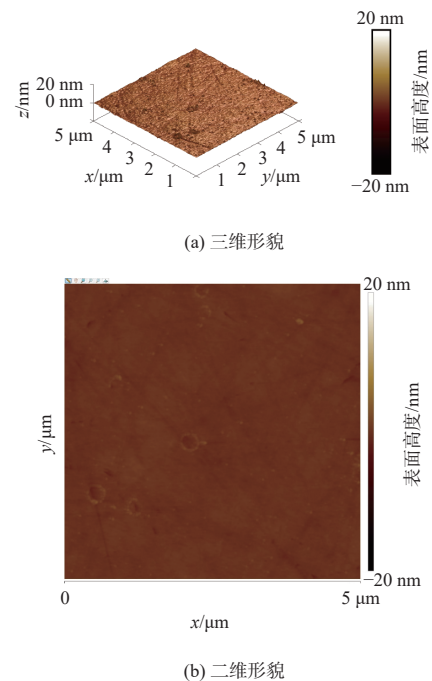
Fig. 1 Schematic of photolithography-thermal reflow fabrication process flow for microlens arrays on quartz glass substrates

1.1 基底材料与前处理

在微透镜阵列的制备过程中,基底作为光刻胶结构的承载平台,其性能和表面状态会直接影响后续的光刻及热回流效果。本文选用光学性能优良的石英玻璃作为基底材料。一方面,石英在紫外至近红外波段具有较高的透光率,可满足微透镜阵列在宽波段下的光学应用需求;另一方面,其低热膨胀系数有助于在 180 °C 热回流过程中保持尺寸稳定,减小热应力导致的形变。

基底表面状态是影响光刻胶涂覆及后续微结构成形的因素之一。为定量表征所用石英玻璃基底的表面粗糙度,采用原子力显微镜(atomic force microscope, AFM; 型号: AFM-Piccolo, 富睿思(苏州)仪器有限公司, 中国),配合 NCHV-A 型硅探针(Bruker, 美国),在轻敲模式下对同一基底表面的 3 个不同区域进行测量。扫描区域为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$,图像分辨率为 256×256 像素,扫描速率为 1 Hz。3 个区域的算术平均粗糙度 R_a 分别为 0.274 nm、0.244 nm 和 0.235 nm,均方根粗糙度 R_q 分别为 0.406 nm、0.325 nm 和 0.321 nm, R_a 和 R_q 的平均值分别为 (0.251 ± 0.020) nm 和 (0.351 ± 0.048) nm(平均值 $\pm$ 标准差, $n=3$)。代表性 AFM 表面形貌如图 2 所示。结果表明,在该扫描尺度下,所用石英玻璃基底的局部表面粗糙度处于亚纳米水平。

在光刻胶涂覆前,为去除基底表面的有机残留物、颗粒杂质及吸附水分,本文采用如下清洗及预处理流程:首先,将石英基底依次浸入丙酮、异丙醇和无水乙醇中,每步约 5 min,以去除表面的有机残留物和颗粒杂质;随后,使用高纯氮气将基底彻底吹干。清洗后的基底置于 110 °C 热板上进行约 6 min 的脱水烘烤,以进一步去除表面吸附水分,并提高光刻胶涂覆的附着力。

图 2 石英玻璃基底代表性区域的 AFM 表面形貌(扫描区域: $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$)Fig. 2 AFM surface topography of representative area of quartz glass substrate (scan area: $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$)

1.2 AZ5214 光刻胶旋涂与前烘

完成基底前处理后,光刻胶的涂覆质量及其与基底的附着情况是形成规整微结构的关键。本文选用 AZ5214 正性光刻胶,该光刻胶通常用于图形反转工艺,在适当工艺条件下, AZ5214 亦可按正性模式使用,并可用于微米尺度光刻胶结构的图形化^[19]。已有研究表明, AZ5214 光刻胶微结构经适当温度热处理后能够发生热回流,并在表面张力作用下形成较为平滑的曲面轮廓,可用于微透镜结构的制备^[20]。

在本文实验中,结合匀胶设备的性能参数及实

验室前期加工 AZ 系列光刻胶的经验, 确定了适用于 AZ5214 的两步旋涂工艺。首先在 500 r/min 下旋涂 10 s, 使光刻胶在基底表面充分铺展; 在此基础上, 保持第一步参数不变, 将第二步旋涂转速分别设为 1 000 r/min、2 000 r/min、3 000 r/min、4 000 r/min 和 5 000 r/min, 并保持 60 s, 以获得不同转速条件下的胶膜厚度数据。胶膜厚度采用椭圆仪进行测量, 每组条件测量 3 次, 结果分别记为厚度 1、厚度 2 和厚度 3, 平均厚度为 3 次测量结果的算术平均值。相应数据见表 1。

表 1 光刻胶匀胶厚度数据

Table 1 Thickness data of photoresist films under different spin speeds

转速/(r/min)	胶膜厚度/ μm			
	厚度1	厚度2	厚度3	平均厚度
1 000	3.267	3.235	3.079	3.194
2 000	2.142	2.155	2.136	2.144
3 000	2.010	2.005	1.983	1.999
4 000	1.884	1.875	1.869	1.876
5 000	1.775	1.789	1.757	1.774

旋涂完成后立即将样片转移至 100 $^{\circ}\text{C}$ 热板上前烘 60 s, 以蒸发光刻胶中的大部分溶剂, 防止后续显影过程中图形塌陷或脱落。

1.3 激光直写曝光

在获得均匀且稳定的光刻胶膜后, 采用紫外激光直写技术将预设阵列图形转移至光刻胶层。本文所采用的 AZ5214 光刻胶工作于正性模式, 即曝光区域的光刻胶在显影过程中被溶解去除, 而未曝光区域得以保留。因此, 为获得后续热回流所需的圆形光刻胶微柱, 直写过程中采用反向版图曝光方式, 即对微透镜单元之间的背景区域进行曝光, 而直径为 15.8 μm 的圆形微柱区域保持未曝光。显影后, 背景曝光区域被去除, 未曝光的圆形光刻胶区域保留下来, 形成周期排列的圆形光刻胶微柱。阵列周期设定为 16.5 μm , 曝光频率为 80 kHz, 激光输出功率为 1.269 mW, 上述曝光参数均通过前期工艺实验确定。

曝光完成后, 将样片浸入与 AZ 系列光刻胶匹配的 3038 显影液中显影约 21 s~25 s, 使曝光区域的光刻胶充分溶解以形成预设的圆柱阵列。随后立即转移至去离子水中漂洗约 5 s, 以终止显影反应并去除残留显影液。最后, 使用 0.2 MPa~0.3 MPa 高纯氮气轻吹样片表面, 实现快速干燥并降低水迹残留的风险。经上述步骤, 可获得轮廓完整、排

列规则的光刻胶微柱阵列, 为后续的热回流成型提供可靠的结构基础。

显影后获得的光刻胶微柱阵列形貌如图 3 所示, 其中图 3(a) 为 20 $\times$ 物镜下观察到的阵列整体形貌, 图 3(b) 为 100 $\times$ 物镜下的局部放大形貌。

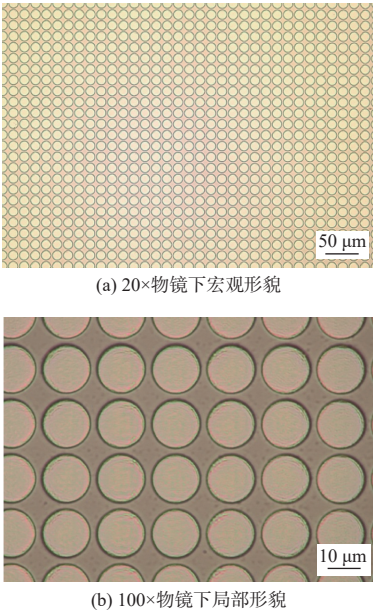


图 3 微柱阵列光学显微镜形貌

Fig. 3 Optical microscope images of micropillar array

1.4 热回流成型

在获得规则的光刻胶微柱阵列后, 热回流是形成微透镜球面轮廓的关键步骤, 其回流温度和保温时间会直接影响透镜的高度、曲率半径及表面形貌。结合 AZ5214 光刻胶的热软化特性及前期工艺经验, 本文将回流温度设定为 180 $^{\circ}\text{C}$, 回流时间控制在 240 s~260 s。具体操作中, 将显影后的样片置于预热至 180 $^{\circ}\text{C}$ 的热板中心区域, 并保持恒温约 240 s~260 s。在加热过程中, 光刻胶逐渐软化, 并在表面张力作用下发生形貌重排, 微柱侧壁逐渐外扩, 最终形成以初始微柱底面为口径的球冠状微透镜。

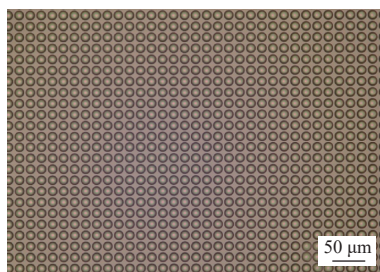
在上述条件下, 由于热板温度分布较均匀, 阵列内各单元经历的热历程差异较小。实验结果显示, 所得微透镜的高度和曲率分布集中, 表明该参数组合下具有良好的形貌一致性和重复性。此外, 在 180 $^{\circ}\text{C}$ 条件下未观察到明显气泡或分解现象, 透镜轮廓完整, 表面未见明显缺陷。

2 结果与讨论

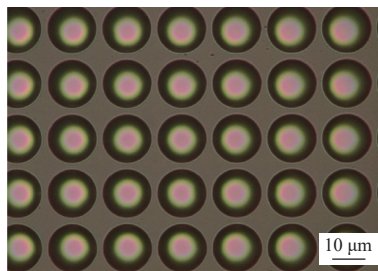
为验证上述制备工艺的可行性与重复性, 对所

得微透镜阵列的形貌特征、几何尺寸及热回流前后的体积变化进行了系统表征。采用激光扫描共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscope, LSCM; 型号: LEXT OLS5100-SAF, Olympus, 日本)对阵列进行三维形貌测量, 以获得较为准确的结构参数和表面轮廓信息。本文的讨论主要围绕阵列整体成形质量、单元尺寸一致性以及热回流过程中的体积变化规律展开。

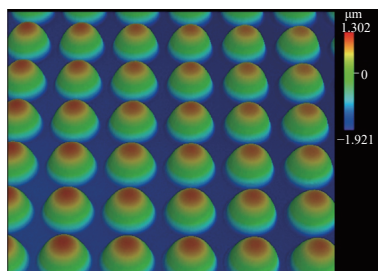
图 4(a) 给出了微透镜阵列在 20×物镜下的大视场形貌。从图中可以看出, 阵列中各单元透镜呈规则周期性排布, 在观测范围内未见明显的排布畸变或整体形貌起伏。图 4(b) 为 100×放大倍率下的局部阵列形貌, 可以看出单个微透镜轮廓清晰完整, 边缘过渡平滑, 无明显锯齿状起伏或塌陷痕迹, 表明热回流过程能够有效削弱初始图形边缘的不规则性。图 4(c) 为微透镜阵列在扫描共聚焦显微镜下获得的三维形貌图。由图可见, 各透镜呈均匀、连续的球冠状凸起, 表面较为光滑, 顶



(a) 光学显微镜20×放大倍率下的阵列宏观形貌



(b) 光学显微镜100×放大倍率下的阵列局部形貌



(c) 扫描共聚焦显微镜100×放大倍率下的阵列三维形貌

图 4 MLAs 形貌表征

Fig. 4 Morphological characterization of microlens arrays (MLAs)

部区域未见明显平顶或尖峰结构, 侧壁坡度变化平缓, 说明在当前工艺参数下, 热回流过程较为稳定, 阵列整体具有较好的形貌一致性。

2.1 热回流前后体积变化分析

在形貌表征基础上, 体积变化是评估热回流过程中光刻胶流变行为及结构稳定性的重要指标。理想情况下, 光刻胶在热回流前后总体积应基本保持不变; 但在实际工艺中, 残留溶剂的进一步挥发以及材料内部结构致密化等因素往往会导致体积出现一定程度的收缩。因此, 对热回流前后微结构体积变化进行分析, 有助于进一步理解 AZ5214 光刻胶在本文工艺条件下的成形特征。

为直观描述热回流前后的几何形貌变化, 图 5 给出了热回流前后结构示意图。其中, 图 5(a) 为热回流前的圆台状微柱结构, 图 5(b) 为热回流后的球冠状微透镜结构。

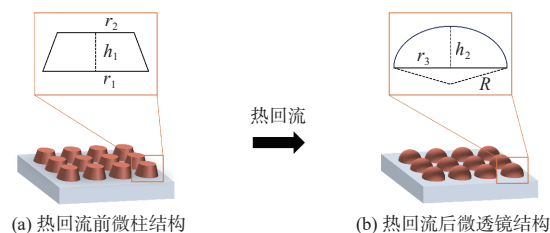


图 5 热回流前后光刻胶结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of photoresist structures before and after thermal reflow

对于回流前的圆台状微柱, 其体积可按圆台体积公式估算, 公式如下:

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi h_1 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) \quad (1)$$

式中: h_1 为圆台高度; r_1 为圆台下底半径; r_2 为圆台上底半径。三者均通过 LSCM 对微柱横截面轮廓的实测数据提取。

回流后形成的球冠微透镜体积可由球冠体积公式给出:

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi h_2^2 (3R - h_2) \quad (2)$$

式中: h_2 为球冠高度; R 为球面拟合得到的曲率半径。在几何上, 球冠微透镜的曲率半径 R 、球冠高度 h_2 与底面半径 r_3 之间满足关系:

$$R = \frac{r_3^2 + h_2^2}{2h_2} \quad (3)$$

受实验条件限制, 本文采用分组统计策略: A 组样品在显影后于室温下进行 LSCM 测量, 获得光刻胶微柱(圆台模型)的几何参数(r_1 、 r_2 、 h_1)

及初始体积 V_1 (表 2); B 组样品工艺参数与 A 组相同, 经 180 °C/(240 s~260 s) 热回流并冷却后进行 LSCM 测量, 获得微透镜(球冠模型)的几何参数(r_3 、 h_2 、 R)及最终体积 V_2 (表 3)。由于两组样品在加工条件上保持一致, 其统计结果可用于反映热回流前后体积变化的总体趋势。

表 2 热回流前圆台状微柱尺寸数据

Table 2 Dimensional parameters of frustum-shaped micro-pillars before thermal reflow

序号	热回流前圆台微柱尺寸			
	$r_1/\mu\text{m}$	$r_2/\mu\text{m}$	$h_1/\mu\text{m}$	$V_1/\mu\text{m}^3$
1	7.641	6.900	1.767	293.69
2	7.541	6.955	1.781	294.09
3	7.420	6.886	1.741	279.98
4	7.506	7.093	1.748	292.68
5	7.558	7.052	1.771	297.02
6	7.444	6.919	1.757	284.80
7	7.444	6.927	1.766	286.58
8	7.536	6.961	1.783	294.46
9	7.582	7.099	1.775	300.58
10	7.490	6.961	1.757	288.30
11	7.457	7.026	1.789	294.81
12	7.440	7.026	1.778	292.31
13	7.440	6.974	1.785	291.37
14	7.405	6.939	1.812	292.91

表 3 热回流后微透镜尺寸数据

Table 3 Dimensional parameters of microlenses after thermal reflow

序号	热回流后微透镜尺寸			
	$r_3/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$R/\mu\text{m}$	$V_2/\mu\text{m}^3$
1	7.457	2.846	11.192	260.66
2	7.609	2.802	11.732	266.34
3	7.617	2.816	11.710	268.33
4	7.617	2.842	11.628	271.03
5	7.589	2.838	11.566	268.71
6	7.646	2.805	11.823	269.14
7	7.509	2.821	11.404	261.61
8	7.578	2.792	11.680	263.25
9	7.601	2.789	11.752	264.47
10	7.572	2.799	11.642	263.56
11	7.587	2.804	11.666	265.08
12	7.441	2.855	11.124	260.49
13	7.567	2.865	11.425	270.00
14	7.567	2.839	11.504	267.33

此外, 旋涂、显影及热回流等工序均在弱黄光环境下完成, 以尽量避免环境宽谱白光中近紫外成

分带来的额外曝光。AZ5214 属于对 i-line(365 nm) 和 h-line(405 nm) 具有响应的光刻胶体系, 额外曝光可能改变其溶解特性, 导致微柱尺寸偏离设计值, 从而影响回流后形貌及体积分析的准确性^[19]。本文的 LSCM 测量在显影或回流完成后进行, 样品不再经历后续化学处理, 因此测量光照对最终结构的影响可忽略。

需要说明的是, 表 2(回流前)与表 3(回流后)所列数据并非来源于同一批微结构单元的原位跟踪测量, 而是基于两组工艺等效样品获得的统计结果。这主要受限于测量条件与工艺条件之间的兼容性: 热回流过程需在 180 °C 条件下完成, 无法同步进行 LSCM 实时三维表征; 而在“测量-回流-复测”的实验方案中, 样品在多次取放与装夹过程中难以保证单个微结构单元的精确复位, 且反复热循环与搬运还可能引入污染或形貌扰动, 从而影响体积对比结果的准确性。

为量化体积变化程度, 定义平均体积变化率 $\bar{\eta}$ 为

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{\bar{V}_1} \times 100\% \quad (4)$$

为降低极端值对统计结果的影响, 体积计算时分别剔除各数据集中的最大值与最小值。经计算, 热回流前微柱平均体积 $\bar{V}_1=291.92 \mu\text{m}^3$, 热回流后微透镜平均体积 $\bar{V}_2=265.71 \mu\text{m}^3$, 代入式(4)求得平均体积收缩率 $\bar{\eta}$ 为 8.98%。结果表明, 在本文工艺条件下, AZ5214 微结构经过热回流后平均体积收缩约 8.98%, 这一收缩主要归因于高温下残留溶剂的进一步挥发以及光刻胶本身可能发生的热交联致密化过程。

2.2 几何尺寸及均匀性统计

除体积变化外, 微透镜阵列的几何尺寸均匀性也是评价其加工质量和后续光学应用潜力的重要指标。为定量评估阵列中微透镜单元的加工一致性, 分别从阵列中心区域及靠近边缘区域选取若干单元透镜, 提取其横截面轮廓, 并对口径直径和高度进行统计分析。版图设计中, 微透镜阵列周期为 16.5 μm , 单元图形采用圆形孔径, 设计口径直径为 15.8 μm 。实测结果表明, 微透镜口径直径主要分布在 14.9 μm ~15.3 μm 之间, 平均值约为 15.1 μm , 相较设计值略有减小; 高度主要分布在 2.79 μm ~2.87 μm 之间, 平均高度约为 2.82 μm 。上述结果表明, 实际成形尺寸与版图设计尺寸之间存在一定

偏差,可能与显影过程中的侧向溶解、热回流过程中轮廓重整及光刻胶轻微收缩等因素有关。

图 6 给出了采用上述 LSCM 测得的微透镜阵

列截面高度轮廓。可以看出,相邻微透镜的轮廓形状和峰值高度较为接近,表明该区域内微透镜具有较好的一致性。

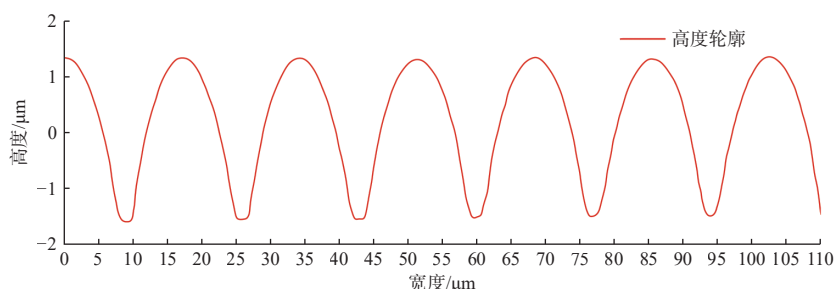


图 6 微透镜阵列横截面高度轮廓

Fig. 6 Cross-sectional height profile of the microlens array

本文将尺寸均匀性 U 定义为各测量值与其平均值之间偏差的相对百分比,即:

$$U = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: x_i 为单个测量值; $\bar{x}$ 为对应尺寸的平均值。据此计算,直径和高度的最大相对偏差分别约为 1.7% 和 1.5%,这一结果表明,在本文所采用的工艺参数下, AZ5214 光刻胶通过激光直写与热回流相结合的方式,能够较稳定地形成尺寸一致性较好的微透镜阵列。

3 结论

本文以 AZ5214 正性光刻胶为成形材料,结合紫外激光直写和热回流工艺,在石英基底上制备出了球冠状微透镜阵列。实验结果表明,所得阵列整体排布较规则,单个微透镜轮廓完整,表面较为平滑,具有较好的形貌一致性。其周期约为 16.5 μm ,平均口径约为 15.1 μm ,平均高度约为 2.82 μm ,曲率半径约为 11.6 μm ,直径和高度的最大相对偏差分别约为 1.7% 和 1.5%。对热回流前后体积变化的统计结果显示,结构平均体积收缩率约为 8.98%,说明 AZ5214 在本文工艺条件下能够实现较稳定的回流成形。总体来看,紫外激光直写结合热回流可在本文工艺参数下制备形貌较规整、尺寸一致性较好的球冠状微透镜阵列。

参考文献:

[1] WANG D, ZHANG Z, ZHAI J, et al. High-spatial-resolution light field 3D perception based on unidirectional object motion[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(11): 3672-3675.

[2] LI Y F, LI P Y, ZHENG X Y, et al. Design of a novel microlens array and imaging system for light fields[J]. *Micromachines*, 2024, 15(9): 1166.

[3] HAO J Q, GAO Y S, DONG C C, et al. The design of a fiber-coupling micro-lens array for an $M \times N$ wavelength-selective switch[J]. *Micromachines*, 2024, 15(3): 307.

[4] SONG X Y, LI H, LI Z, et al. Deep optics framework utilizing a liquid crystal microlens array for dynamic wavefront sensing and correction in atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(11): 3584-3587.

[5] ZHAO Z J, YIN T F, TO S, et al. Material removal energy in ultraprecision machining of micro-lens arrays on single crystal silicon by slow tool servo[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 335: 130295.

[6] 龚健文, 王建, 刘俊伯, 等. 基于投影光刻技术的微透镜阵列加工方法[J]. *光电工程*, 2023, 50(12): 230281-1-230281-10.

GONG Jianwen, WANG Jian, LIU Junbo, et al. fabrication method of microlens arrays based on projection lithography technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(12): 230281-1-230281-10.

[7] ZHU J J, LI M J, QIU J F, et al. Fabrication of high fill-factor aspheric microlens array by dose-modulated lithography and low temperature thermal reflow[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(4): 1235-1241.

[8] SUN R, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Fabrication of microlens arrays with high filling factors by combining a thermal reflow and parylene CVD technique and the applications on OLEDs[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(11): 3048-3053.

[9] CAI S X, SUN Y L, CHU H H, et al. Microlenses arrays:

- p>
fabrication, materials, and applications[J].
- [Microscopy Research and Technique](#)
- , 2021, 84(11): 2784-2806.
- [10] YUAN W, LI L H, LEE W B, et al. Fabrication of microlens array and its application: a review[J]. [Chinese Journal of Mechanical Engineering](#), 2018, 31(1): 1-9.
- [11] O'NEILL F T, SHERIDAN J T. Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments[J]. [Optik](#), 2002, 113(9): 391-404.
- [12] O'NEILL F T, SHERIDAN J T. Photoresist reflow method of microlens production part II: analytic models[J]. [Optik](#), 2002, 113(9): 405-420.
- [13] ASHRAF M, GUPTA C, CHOLLET F, et al. Geometrical characterization techniques for microlens made by thermal reflow of photoresist cylinder[J]. [Optics and Lasers in Engineering](#), 2008, 46(10): 711-720.
- [14] ROY E, VOISIN B, GRAVEL J F, et al. Microlens array fabrication by enhanced thermal reflow process: towards efficient collection of fluorescence light from microarrays[J]. [Microelectronic Engineering](#), 2009, 86(11): 2255-2261.
- [15] WU Y, DONG X S, WANG X F, et al. Fabrication of large-area silicon spherical microlens arrays by thermal reflow and ICP etching[J]. [Micromachines](#), 2024, 15(4): 460.
- [16] CHUNG C K, HONG Y Z. Fabrication and analysis of the reflowed microlens arrays using JSR THB-130 N photoresist with different heat treatments[J]. [Microsystem technologies](#), 2007, 13(5): 523-530.
- [17] WANG S, ZHOU Z, LI B, et al. Progresses on new generation laser direct writing technique[J]. [Materials Today Nano](#), 2021, 16: 100142.
- [18] GOGOLIDES E, TEGOU E, BELTSIOS K, et al. Thermal and mechanical analysis of photoresist and silylated photoresist films: application to AZ 5214™[J]. [Microelectronic Engineering](#), 1996, 30(1-4): 267-270.
- [19] ŠKRINIAROVÁ J, PUDIŠ D, ANDOK R, et al. Investigation of the AZ5214E photoresist by the laser interference, EBDW and NSOM lithographies[J]. [Applied Surface Science](#), 2017, 395: 226-231.
- [20] ZHU Y, ZHANG C, HONG M. Free-form micro-lens array fabrication via laser micro-lens array lithography[J]. [Journal of Laser Micro/Nanoengineering](#), 2024, 19(1): 67.