光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024040103

石英微透镜的制备及其测试技术研究

刘 丹，乌李瑛*，张文昊，盛嘉平，程秀兰

（上海交通大学 电子信息与电气工程学院 先进电子材料与器件平台，上海 200240）

摘 要： 提出一种利用光刻胶热熔和等离子体刻蚀技术相结合的石英微透镜阵列的制备工艺。详细研究了热熔和感应耦合等离子体刻蚀等关键工艺，并确定了最佳工艺参数。最终在石英衬底上制备了不同尺寸和形状的微透镜阵列。微透镜的几何形貌和光学性能测试结果表明，所制备的石英微透镜阵列具有很好的尺寸一致性，并且表面质量高，测试焦距与理论计算值相吻合。该方法制备的石英微透镜阵列具有良好的成像性能，可广泛应用于光学领域。

关键词： 微透镜阵列；石英；热熔；电感耦合等离子体刻蚀；光学性能

中图分类号： TN305.7 **文章编号：** 1001－5868(2024)05－0744－07

Study on Fabrication and Characterization of Quartz Microlens Array

LIU Dan, WU Liying, ZHANG Wenhao, SHENG Jiaping, CHENG Xiulan

(Center for Advanced Electronic Materials and Devices, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: This study presents the fabrication process of quartz microlens arrays (MLAs) using a combination of photoresist thermal reflow and plasma etching techniques. Key fabrication steps, including thermal reflow and inductively coupled plasma reactive ion etching (ICP-RIE), were investigated in detail. The optimal process parameters were determined, enabling the preparation of quartz MLAs in various sizes and shapes. The geometrical morphology and optical properties of the fabricated MLAs were evaluated, showing high uniformity and excellent surface quality. The measured focal lengths were found to be in close agreement with theoretical predictions. The results demonstrate that the fabricated MLAs exhibit excellent imaging performance, making them highly suitable for various optical applications.

Key words: microlens array; quartz; thermal reflow; ICP-RIE; optical performance

0 引言

微透镜阵列是一种多功能的微光学器件，可以对入射光进行扩散、聚焦、整形等调制，进而实现大视角、低相差、高时间分辨率和无限景深等传统光学元器件难以实现的功能，在集成光学成像领域、光通信系统和光信号处理系统中具有广泛的应用潜力[1]。

微透镜的制备方法主要分为直接法和间接法。直接法是当材料处于热塑性状态或液体状态时，利用表面张力效应来形成微透镜的形状，从而产生超光滑表面[2]。目前，直接法主要包括热回流法、微滴喷射法以及微模直压法等[3]。而间接法则是先制作凹型模具，然后通过热压成型、注塑成型等复制技术来生产最终的透镜[4]。这两种透镜制备方法各有优

收稿日期：2024－04－01.

基金项目：国家科技部“十四五”重点研发计划“高性能免疫现场检测系统研发”项目(2023YFC2413001)；上海市科技创新行动计划项目(22501100800)；国家自然科学基金重点项目(62335014)；上海交通大学决策咨询重点课题实验技术专项项目(JCZXSJA2023-05).

* **通信作者：**乌李瑛

缺点，其中，直接法操作过程简单、成本低且效益高，但精度控制较为困难，而间接法可以很好地控制微透镜阵列的形状，但是过程相对复杂[5]。基于热回流和干法刻蚀工艺的制备方法是一种能大批量生产高均匀度微透镜阵列的技术，因此被广泛采用[6-7]。

微透镜的制作材料通常有软质的聚合物材料，如聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)[8]、聚二甲基硅氧烷(PDMS)[9]等，这些材料具有很好的柔性，但材料的机械抗性和耐酸性的能力比较差，不适用于高温高压等特殊环境中。而另一种硬质材料如石英、硅等，由于具有极高的硬度和极强的化学稳定性，在光学窗口、光学元件等方面的应用更加广泛[10]。得益于石英优异的化学、机械和光学特性，石英微透镜在光束准直和聚焦(探测器阵列、光互连和光计算)、照明(平板显示、照明投影系统)和成像(光纤耦合器、信号与图像处理以及微透镜智能光刻)等领域得到了深入的应用[11-13]。

本文基于 AEMD 平台之前的研究基础[14]，对石英微透镜阵列的制造工艺及测试技术进行了深入研究。通过光刻胶热熔与电感耦合等离子体刻蚀(ICP-RIE)相结合的方法，在石英晶圆上生产微透镜阵列，透镜形状包括圆形孔径微透镜、方形孔径微透镜以及柱面透镜等，并对石英微透镜阵列的焦距及成像性能进行测试。实验中选用的熔融石英在紫外及可见光波段具有优良的透光性，制备的微透镜阵列可用于微透镜阵列光刻成像系统以及智能掩膜版光刻领域，为深紫外光刻技术以及表面非平整性大面积光刻器件的制作提供技术参考。

1　实验

1.1　石英微透镜阵列制备

本实验采用 4 英寸石英晶圆，厚度为 500 μm。制造工艺主要包括光刻工艺、热熔工艺以及干法刻蚀工艺，制备流程如图 1 所示[14]。

第一步，对基片进行预处理，以去除基片表面的残余物，确保基片与光刻胶之间良好的粘附性。

第二步，用匀胶机(650-8N，Laurell)在基片上涂覆一层均匀的光刻胶(AZ4330，Merk)，转速为 3 000～4 000 rpm。经热板前烘后，在光刻机(MA6，Karl Suss)上进行紫外曝光，显影后就形成了相对应的光刻胶柱体。

第三步，将上述实验样品放置于已设置好升降温程序的热板上，并严格控制工艺时间；热熔温度曲线如图 2 所示，其中升温速率为 15 ℃/min(升温时间 t_1)，降温过程为自然冷却(降温时间 t_3)。在热熔过程中，光刻胶加热成为可以流动的流体，在表面张力的作用下，柱状的胶体转变成球冠形微透镜。实验中，尝试了不同的热熔温度(T 范围为 150～190 ℃)和热熔时间(t_2 范围为 1～10 min)，并确定了最佳热熔条件。

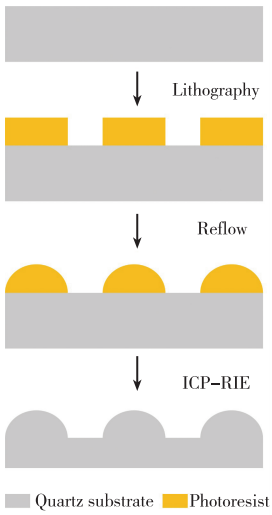


图 1　石英微透镜制作工艺流程

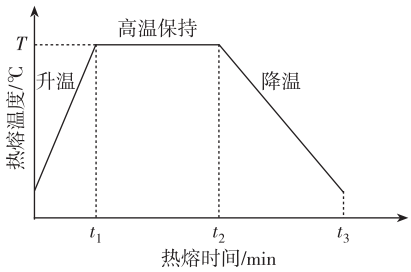


图 2　热熔工艺温度变化曲线

最终，光刻胶透镜向石英衬底的转移采用感应耦合等离子体刻蚀技术，实验中所用的刻蚀系统为 Sentech SI500 刻蚀机。通过调节刻蚀气体流量、ICP 功率、RF 功率、气压等参数，来控制刻蚀选择比和刻蚀表面质量。

1.2　测试表征

实验过程中，为了表征所制备的微透镜阵列的几何形状，利用台阶仪(KLA，P7)获得表面轮廓数据、光学显微镜(STM7，Olympus)获得二维图像、用激光共聚焦显微镜(LSM 800，Zeiss)获得三维图像、用原子力显微镜(ICON，Bruker)测试表面粗糙度。此外，还借助场发射扫描电子显微镜(Ultra Plus，Zeiss)，对微透镜的表面质量进行评价。

除透镜表面形貌及表面轮廓等物理参数外，光

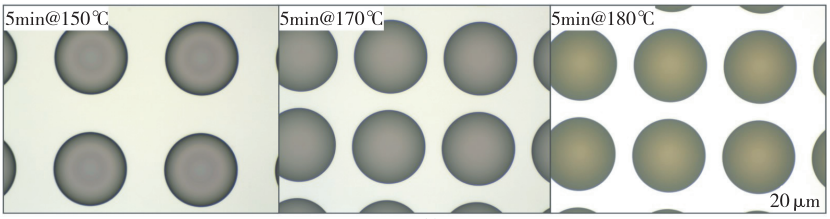
学性能也是评价透镜质量的重要参数。利用光学成像测试系统对石英微透镜的焦斑图样及焦距进行测试，并进行成像。

2 结果与讨论

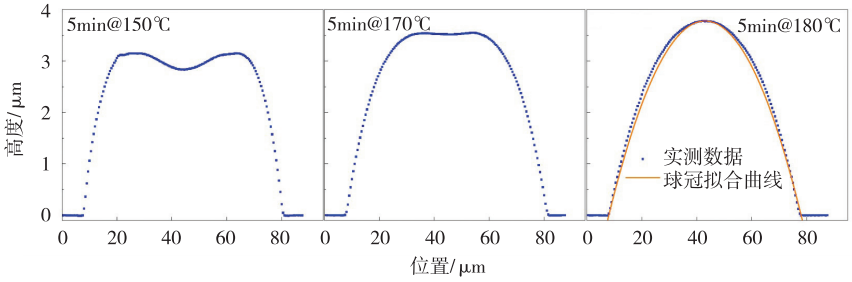
2.1 热熔工艺

光刻胶热熔工艺就是将光刻胶加热到玻璃转换温度 T_g 以上，胶体由橡胶态转变为玻璃态，在表面张力和基片附着力的共同作用下，最终形成光刻胶球冠的过程[15]，因此热熔温度是过程中的关键参数。

因热熔温度需高于 T_g，本实验中采用的光刻胶 AZ4330 的 T_g 为 145 ℃，所以，尝试的热熔温度起始点设置在 150 ℃，然后每增加 10 ℃进行观察测试。热熔时间 t_2 统一设置为 5 min。如图 3 所示为直径 70 μm 光刻胶圆柱分别经不同温度热熔后的光刻胶透镜经光学显微镜照片和经台阶仪测得的表面轮廓形貌。从图 3(a)中可以看出，在热熔条件为 5 min@150 ℃时，透镜顶部凹陷，而当热熔温度在 170 ℃及以上时，则无法通过光学显微镜区分具体差异，此时需要借助其他的测试方法来进一步判别，例如利用台阶仪测试表面轮廓并进行数据拟合。从图 3(b)中可以看出，170 ℃热熔的透镜顶部存在平台，而经 180 ℃热熔的透镜形貌较好且非常接近理想球冠。同时，实验发现对于直径超过 90 μm 光刻胶球柱，在 180 ℃热熔条件下，透镜的顶部无法形成球面轮廓，中心出现了塌陷，说明需要的原始胶柱更厚，因此，大尺寸的透镜在准备工艺中需要降低匀胶的转速或者选用粘度更低的光刻胶。



(a) 显微镜图片



(b) 台阶仪轮廓及拟合曲线

图 3 直径为 70 μm 的光刻胶圆柱经不同温度热熔后的台阶仪轮廓图及光学显微镜图

通过对实验结果的研究与分析，对于直径为 20～90 μm 的光刻胶圆柱阵列，确定了最优的热熔温度为 180 ℃，热熔时间 t_2 为 5 min。除圆形孔径微透镜阵列外，该热熔工艺参数同样适用于制造方形孔径和柱面微透镜阵列。在实验过程中，利用台阶仪和光学显微镜对热熔前后的光刻胶圆柱和透镜球冠高度及直径进行测试，并通过拟合和计算确定光刻胶圆柱体积 V_1、光刻胶透镜体积 V_2。结果表明，热熔前后透镜的直径保持不变[14]，而热熔后光刻胶体积为热熔前的 70%左右。光刻胶是一种对光敏感的混合液体，由溶剂、感光树脂和增感剂组成，其液体成分在热熔过程中有一定量的挥发，所以体积会变小。这些结论为微透镜的理论计算与工艺设计提供了十分有力的参考依据。

2.2 刻蚀工艺

为了在石英表面获得微透镜阵列，通过 ICP-RIE 设备刻蚀，将光刻胶球冠图形精确地转移至石英表面上。二氧化硅的干法刻蚀工艺大多采用含有碳氟化合物的气体进行刻蚀，如四氟化碳(CF_4)、八氟丁烷($C_4H_2F_8$)、三氟甲烷(CHF_3)等。碳氟气体经离化后在刻蚀表面形成具有一定厚度的碳氟聚合物，这层碳氟聚合物作为刻蚀前驱体与石英(SiO_2)表面生成中间反应产物(如 SiF_x 和 CO_2)，并在高能粒子的轰击作用下形成挥发性产物 SiF_4 和 CO_x 等，随后被泵体抽离腔室，从而实现刻蚀[16]。当石英和光刻胶的刻蚀选择比为 1∶1 时，光刻胶微透镜

可以 1∶1 转移至石英表面上，也可以通过调节不同刻蚀选择比来获得与光刻胶透镜不同的曲率半径石英微透镜。

对于高质量微光学器件制备，保持适当的刻蚀选择比及刻蚀质量是整体工艺过程的关键，其中，刻蚀过程中透镜表面的缺陷及瑕疵等是刻蚀技术的重要评价指标。如何优化选择等离子体刻蚀工艺参数是刻蚀工艺中重要的研究课题。

实验中选用 CF_4 和 CHF_3 作为工作气体并对石英微透镜阵列刻蚀效果进行研究，分析了不同工艺参数对刻蚀速率和石英透镜表面质量的影响。

2.2.1　刻蚀温度的影响

在实验中发现，随着刻蚀过程的进行，基片温度会随着等离子体的轰击不断升高，导致光刻胶表面发生碳化现象，从而影响最终刻蚀面的质量。为解决此问题，提出了等离子体循环刻蚀技术，即每刻蚀 60 s 后暂停若干秒，使基片积累的热量及时冷却，保证基片处于相对恒定的温度范围，避免了光刻胶碳化等情况的发生。

2.2.2　刻蚀气体的影响

如图 4 所示为不同气体组分下的刻蚀实验数据。从图中可以看出，在保持 CHF_3 和 CF_4 总气体流量（气体总流量为 25 sccm）不变的条件下，随着 CF_4 组分的增加，石英刻蚀速率先降低后基本维持稳定。这是由于在相同的压力下，CF_4 产生的反应离子浓度高于 CHF_3[17]，因此，随着 CF_4 组分的增加，在 SiO_2 表面形成较厚的碳氟聚合层，阻碍了能量的传递与挥发产物的扩散，刻蚀速率降低。当 CF_4 的流量超过 15 sccm 时，腔室中反应离子浓度已趋于饱和，不会随着 CF_4 含量的增加而继续增加，石英的刻蚀速率基本维持不变。同时可以从图中看出，随着 CF_4 气体比例的增加，光刻胶的刻蚀速率先有一个小幅降低后基本维持稳定。说明在

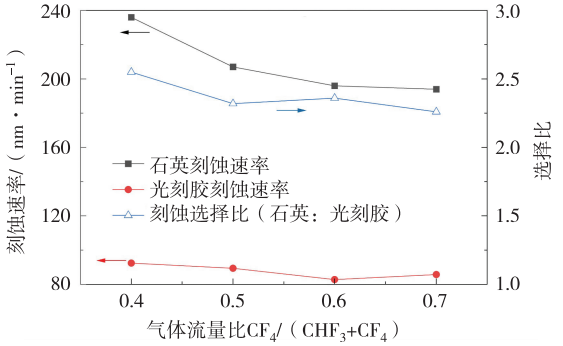


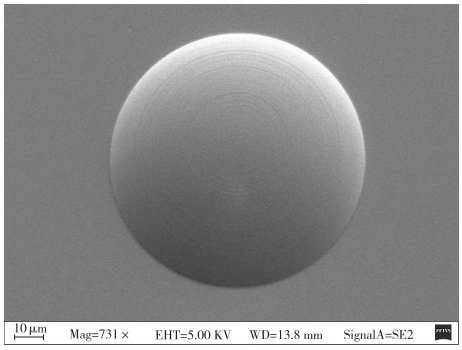
图 4　气体组分对刻蚀速率及选择比的影响（气体总流量为 25 sccm，ICP 功率 700 W，RF 功率 200 W）

总气体流量维持不变的情况下，光刻胶的刻蚀速率对于气体组分的变化不敏感。

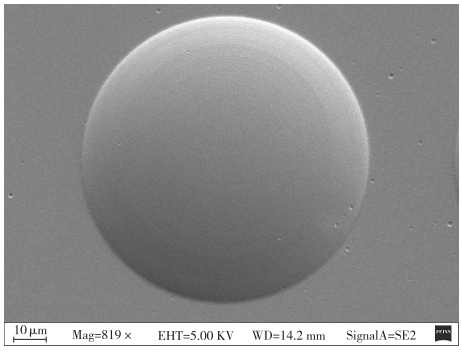
实验中，为了优化光刻胶与石英刻蚀选择比，使其尽量接近于 1∶1，固定 CHF_3 和 CF_4 流量，分别为 15 和 10 sccm，在刻蚀气体中引入少量氧气，流量为 5 sccm，刻蚀结果如表 1 所示，石英的刻蚀速率并无明显变化，而光刻胶的刻蚀速率明显增大，从 92.4 nm·min^{-1} 增至 128 nm·min^{-1}。这是因为在刻蚀气体中加入氧气后，增加了 CF_x 反应基团与 O_2 反应，降低了等离子体中活性 CF_x 的含量，因此，附着于刻蚀表面的碳氟聚合层厚度变薄，离子轰击能量更容易传递至 SiO_2 表面，即化学刻蚀作用减小，同时物理刻蚀作用增强，在综合作用的影响下，SiO_2 的刻蚀速率无明显变化。而光刻胶主要为碳氢化合物，氧原子易与其反应形成 CO 和 H_2O 等挥发性气体，从而被泵体抽走，因此光刻胶的刻蚀速率增加。最终石英对光刻胶的刻蚀选择比从 2.55∶1

表 1　干法刻蚀实验数据表

刻蚀条件	刻蚀气体流量/sccm			刻蚀速率/(nm·min^{-1})		刻蚀选择比
	CHF_3	CF_4	O_2	Glass	PR	Glass∶PR
1	15	10	0	236	92.4	2.55∶1
2	12.5	12.5	0	207	89.4	2.32∶1
3	10	15	0	196	82.8	2.36∶1
4	7.5	17.5	0	194	85.7	2.26∶1
5	15	10	5	238	128	1.86∶1



（a）刻蚀条件 1（CHF_3∶CF_4=15∶10）

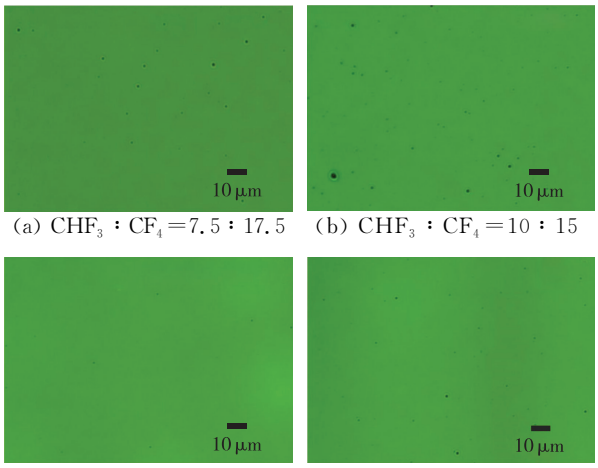


（b）刻蚀条件 5（CHF_3∶CF_4∶O_2=15∶10∶5）

图 5　不同刻蚀条件下石英微透镜的 SEM 图

降低至 1.86∶1，但从刻蚀形貌来看（图 5），由于增加氧气，物理刻蚀作用加强，离子轰击给石英表面带来了额外的凹坑类缺陷。

从上述实验结果中可以看出，在刻蚀气体中加入 O_2，刻蚀选择比出现一定程度的降低，但同时会给石英表面带来额外的凹坑类缺陷。刻蚀表面的缺陷密度也是影响透镜质量的关键因素。从图 6 可看出，在相同刻蚀时间下，CHF_3 占总气体流量的 50% 时，刻蚀表面缺陷密度最低，如图 6(c)所示。因此，最终确定的刻蚀条件为：ICP 功率为 700 W，RF 功率为 200 W，CHF_3 气体流量为 12.5 sccm，CF_4 气体流量为 12.5 sccm。



(a) CHF_3∶CF_4=7.5∶17.5 (b) CHF_3∶CF_4=10∶15

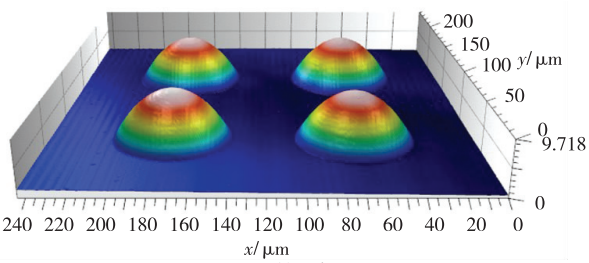
(c) CHF_3∶CF_4=12.5∶12.5 (d) CHF_3∶CF_4=15∶10

图 6 不同刻蚀气体比例下石英刻蚀表面的光学显微镜图片

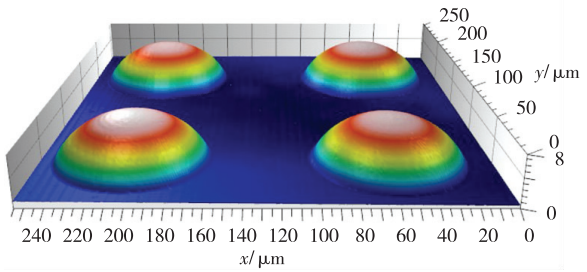
2.3 微透镜性能测试

2.3.1 石英微透镜物理参数测试

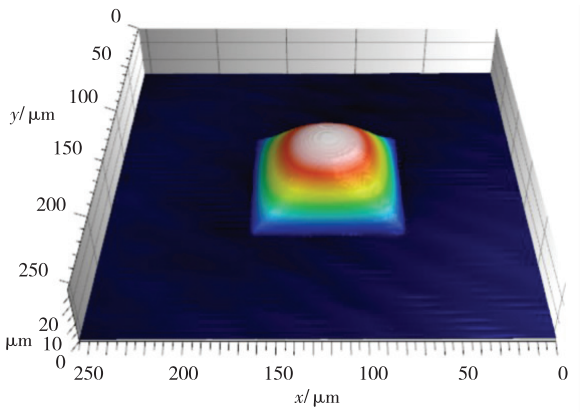
微透镜阵列的物理参数，即透镜的表面形貌及粗糙度等，是评价其质量的重要指标。用激光共聚焦显微镜对不同形状以及尺寸的石英透镜进行表面形貌测试，如图 7(a)和(b)所示分别为直径为 70 和 90 μm 的圆形孔径微透镜阵列，图 7(c)和(d)所示分别为正方形孔径微透镜以及柱面微透镜。从图中可以看出，所制备的石英微透镜表面光滑且一致性好。



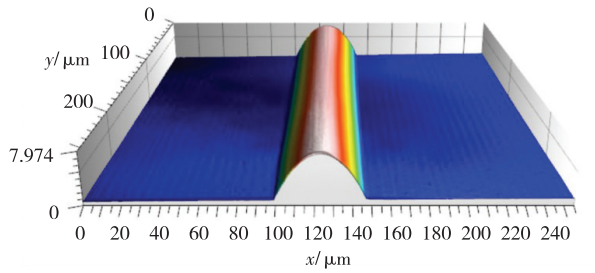
(a) 圆形微透镜：直径为 70 μm



(b) 圆形微透镜：直径为 90 μm



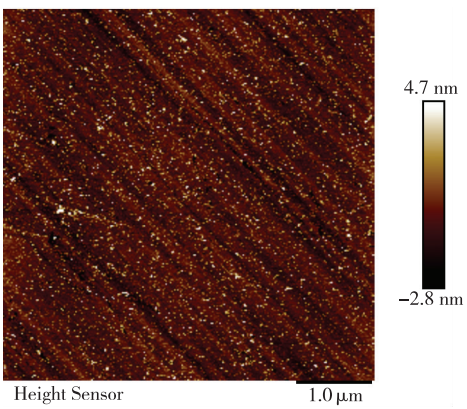
(c) 正方形微透镜：边长为 100 μm



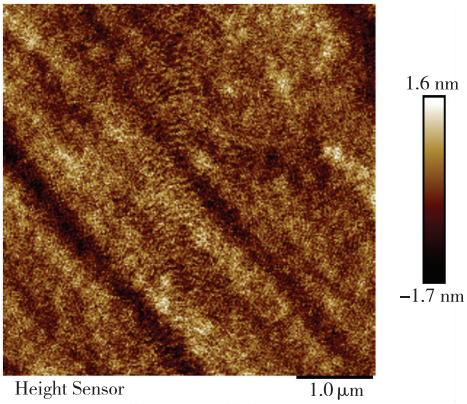
(d) 柱面微透镜：宽度为 50 μm

图 7 石英微透镜阵列表面三维形貌图

利用原子力显微镜（AFM）对刻蚀前后的石英表面进行了粗糙度测试，测量结果如图 8 所示。石英刻蚀前表面粗糙度 Ra = 0.701 nm，刻蚀后石英表面的粗糙度 Ra = 0.438 nm。结果表明，刻蚀后的石英表面十分光滑，刻蚀工艺并不会造成材料



(a) 刻蚀前石英表面 AFM 图



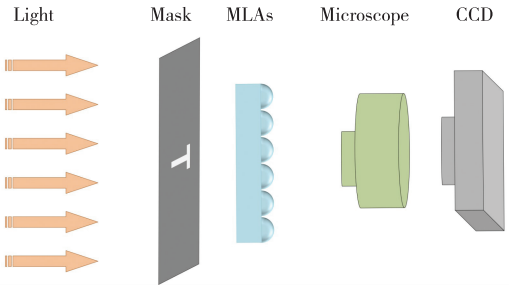
（b）刻蚀后石英表面 AFM 图

图 8　刻蚀前后石英表面粗糙度对比情况

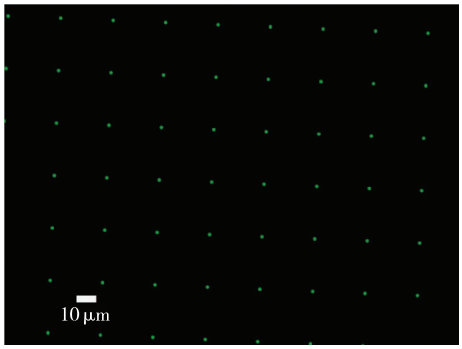
表面粗糙度增大，反而能在一定程度上改善其粗糙度，因此，所制备的石英微透镜在光学应用中不会造成光路畸变或者降低出光质量。

2.3.2　石英微透镜光学性能测试

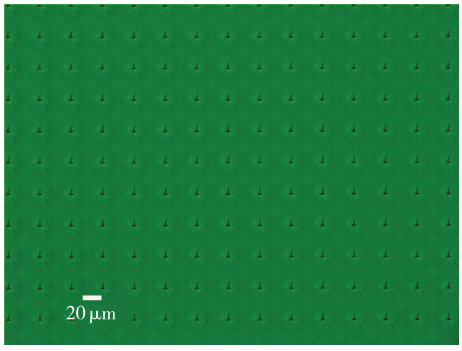
为表征石英微透镜的光学性能，利用本课题组搭建的光学测试系统测试了微透镜阵列的焦点分布和焦距，并进行成像。微透镜阵列的光学测试原理如图 9（a）所示。测试系统主要由光源、掩膜版（Mask）、成像物体、微透镜调节平台、显微镜、CCD 传感器等组成。光源发出的光束经微透镜聚焦后形成光斑，光斑经显微镜成像后被 CCD 传感器采集并显示。实验中，测试了不同直径的石英微透镜，并通过光学测试系统采集了直径为 20 μm 的微透镜阵列的微透镜焦斑图，如图 9(b)所示。焦斑在一定程度上可以表征微透镜的均匀性和聚焦性能。从图中可以看出，微透镜阵列的焦点分布均匀、焦斑清晰度高，这说明加工的透镜阵列均匀性好、球面质量高。我们利用光学测试系统对不同直径的石英微透镜阵列的成像能力进行了测试，手写字母“T”的掩膜版被放置于光源与微透镜之间，图 9（c）和（d）分别为直径为 30 μm 和直径为 60 μm 的石英微透镜的阵列成像分布图，成像清晰且均匀，说明微透镜具有很好的成像性能。



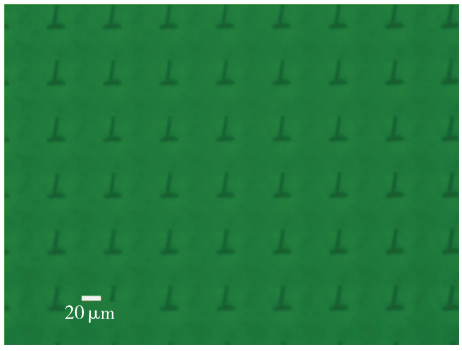
（a）光学测试系统示意图



（b）直径为 20 μm 的微透镜阵列焦斑图



（c）直径为 30 μm 的微透镜阵列成像图



（d）直径为 60 μm 的微透镜阵列成像图

图 9　石英微透镜阵列的光学性能测量

在光学性能测试中，通过调节微透镜调节平台 Z 轴方向的距离对微透镜阵列的焦平面进行连续成像来测定焦距。对于不同尺寸的透镜，分别进行了焦距的测试，测量结果如表 2 所示。从表中可以看出，实际测试的焦距与理论计算值之间非常接近。

表 2　石英微透镜焦距测试结果

透镜直径/μm	计算焦距/μm	焦距实测值/μm	偏差/%
30	31.634	30.4	−3.90
40	47.838	47.2	−1.33
50	69.112	68	−1.61
60	94.812	98	3.36

3　结论

本文采用 AZ4330 光刻胶，通过优化热熔及干法刻

蚀中的各项工艺参数，制备出直径覆盖 20～90 μm、表面光滑、一致性好的石英球形微透镜阵列以及正方形孔径和柱面微透镜阵列。在光刻胶透镜转移至石英表面的工艺中，采用循环刻蚀的方法能及时消散基片积累的热量，避免光刻胶的碳化。随着 CF_4 含量的改变，刻蚀选择比并无显著改变，而刻蚀表面缺陷密度却与刻蚀气体比例密切相关。氧气的增加虽带来刻蚀选择比的优化，但是会给石英表面带来凹坑类缺陷。所制备的石英微透镜阵列具有很好的一致性以及聚焦、成像性能，测试焦距与理论计算十分接近。基于光刻胶热熔和干法刻蚀工艺的微透镜阵列制作工艺具有简单、成本低、周期短等优点，已成为近年来的研究热点。基于热熔和干法刻蚀的石英微透镜制备技术研究为深紫外光刻技术以及非接触式光刻技术的发展提供了有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 李建军，褚春艳，卢玮彤，等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. 光学学报，2021，41(21)：9-32.
Li Jianjun，Chu Chunyan，Lu Weitong，et al. Development of microlens arrays:from fabrication to photonic applications[J]. Acta Optica Sinica，2021，41(21)：9-32.

[2] Moore S，Gomez J，Lek D，et al. Experimental study of polymer microlens fabrication using partial-filling hot embossing technique[J]. Microelectron. Eng.，2016，162：57-62.

[3] Yang H，Chao C K，Wei M K，et al. High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process[J]. J. Micromech. Microeng.，2004，14(8)：1197-1204.

[4] Ong N S，Koh Y H，Fu Y Q. Microlens array produced using hot embossing process[J]. Microelectron. Eng.，2002，60(3)：365-379.

[5] 乌李瑛，瞿敏妮，付学成，等. 微透镜阵列的制作及其在光场成像中应用的研究进展[J]. 半导体光电，2020，41(5)：611-617，631.
Wu Liying，Qu Minni，Fu Xuecheng，et al. Fabrication of microlens array and its application progresses in light field imaging[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(5)：611-617，631.

[6] Zhou X J，Song A G，Wang S，et al. Fabrication of refractive silicon microlens array with a large focal number and accurate lens profile[J]. Microsyst. Technol.，2019，26(4)：1159-1166.

[7] 乌李瑛，刘 丹，刘 民，等. 硅微透镜阵列的制备工艺[J]. 半导体光电，2023，44(3)：389-394.
Wu Liying，Liu Dan，Liu Min，et al. Fabrication process for microlens array on silicon[J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(3)：389-394.

[8] Yang J J，Liao Y S，Chen C F，et al. Fabrication of long hexagonal micro-lens array by applying gray-scale lithography in micro-replication process[J]. Opt. Commun.，2007，270(2)：433-440.

[9] 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]. Microelectron. Eng.，2009，86(11)：2255-2261.

[10] Ottevaere H，Thienpont H，Cox R，et al. Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies[J]. J. Opt. A：Pure Appl. Opt.，2006，8(7)：407-429.

[11] Nussbaum Ph，Völkel R，Herzig P，et al. Design，fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems[J]. J. Eur. Opt. Soc. Part A，1997，6(6)：617-636.

[12] Völkel R，Herzig H P，Nussbaum Ph，et al. Microlens lithography：A new approach for large display fabrication[J]. Microelectron. Eng.，1996，30(1/4)：107-110.

[13] Arai J，Kawai H，Okano F. Microlens arrays for integral imaging system[J]. Appl. Opt.，2006，45(36)：9066-9078.

[14] Liu D，Wu L Y，Liu M，et al. Study on the surface topography changes of photoresist in the design and fabrication of microlens array[J]. Opt. Eng.，2024，63(3)：034105.

[15] Rubico J T，Stern M B，Knowlden R E. Effect of refractive microlens array fabrication parameters on optical quality[J]. Proc. of SPIE，1993，1751：236-245.

[16] Nojiri K. Dry Etching Technology for Semiconductors[M]. London：Springer International AG，2014：39-41.

[17] Leech P W. Reactive ion etching of quartz and silica-based glasses in CF_4/CHF_3 plasmas[J]. Vacuum，1999，55(3/4)：191-196.

作者简介：

刘 丹(1984－)，女，上海市人，硕士，实验师，主要研究方向为薄膜刻蚀技术与微纳器件制备；

乌李瑛(1983－)，女，上海市人，博士，助理研究员，主要研究方向为薄膜生长技术和纳米器件。