材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023021702

硅微透镜阵列的制备工艺

乌李瑛，刘　丹*，刘　民，张　笛，权雪玲，瞿敏妮，马　玲，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： 开发了一种和 MEMS 工艺兼容的基于硅微加工技术的简易硅微透镜阵列制造技术。利用光刻胶热熔法和等离子体刻蚀法相结合的方法，实现了在硅晶圆上制作不同尺寸的硅微透镜阵列的工艺过程。实验中，对透镜制作过程中的热熔工艺、刻蚀工艺进行了深入的研究。最终确定了最优的工艺参数，制备了孔径在 20～90 μm、表面质量高的硅微透镜阵列。

关键词： 硅微透镜阵列；光刻胶热熔法；电感耦合等离子体刻蚀；刻蚀缺陷

中图分类号： TN248；O43　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0389－06

Fabrication Process for Microlens Array on Silicon

WU Liying, LIU Dan, LIU Min, ZHANG Di, QUAN Xueling, QU Minni, MA Ling, CHENG Xiulan

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

Abstract: A simple silicon microlens array manufacturing technology based on silicon micromachining technology compatible with MEMS process was developed in this paper. The photoresist hot melt method and plasma etching method were used to fabricate silicon microlens arrays of different sizes on silicon wafers. In the experiment, the hot melt technology and etching technology in the process of lens fabrication were studied deeply. Finally, the optimum technological parameters were determined, and the silicon microlens array with diameter of 20～90 μm and high surface quality was prepared.

Key words: silicon microlens array; photoresist hot melt method; ICP-RIE; etch defect

0　引言

微米与纳米尺度上的微光学元件在微光机电系统中发挥着重要的作用[1-2]。微透镜及微透镜阵列在显示器、立体成像、光纤耦合、探测器阵列以及光学处理器互联等方面得到了越来越广泛的应用。由硅制成的微透镜已被成功地应用于红外电荷耦合器件(CCD)和红外传感器[3-5]。研究发现，硅微透镜是提高红外探测器性能的非常理想的红外光学器件，研究者希望能将其有效地集成到红外微传感器和红外成像微系统中去[6-7]。微透镜的制备有多种工艺方法，本文总结了近年来有关微透镜的加工工艺，分类介绍了微透镜阵列的主要制作方法及其应用[8]。其中，热熔法制作微透镜工艺简单、成本低，利用普通常用的微机电系统(MEMS)加工工艺就可以完成，其重复性高，对仪器的精度要求也不高。但是这种方法对于大孔径的微透镜，当纵横比很大时，失败率较高，且微透镜的形状会产生塌陷，特别是对于硅微透镜的制备，仍具有挑战性。

本文介绍了一种基于热熔法，并采用电感耦合反应离子刻蚀(ICPRIE)的深硅刻蚀工艺相结合的方法，尝试在硅晶圆上直接制备大孔径(90μm)硅

收稿日期：2023－02－17.

基金项目：国家科技部“十三五”高性能计算重点研发计划项目子课题项目(2016YFB0200205)；2018 年度上海研发公共服务平台建设项目(18DZ2295400)；2021 年上海交通大学决策咨询重点课题项目(JCZXSJA-04)；2020 年上海交通大学决策咨询课题项目(JCZXSJB2020-010).

* 通信作者：刘　丹　E-mail：liudanqh@sjtu.edu.cn

球面型红外透镜的工艺过程。通过工艺参数的优化，最终成功地获得传统热熔法难以制作的大孔径(100 μm)硅球面型红外透镜。该工艺适用于在背入射式的红外电荷耦合器件的背面或红外探测器的正面直接制备孔径 20～90 μm 范围内的硅微透镜阵列。

1 硅基微透镜阵列工艺流程

本文基于热回流法进行实验。热回流法又称为光刻胶热熔法，是 Popovic 在 1988 年提出的[9]，在过去的几十年里，热回流法已经被广泛地应用于生产微透镜[10-14]。如图 1 所示，首先对基片进行预处理，然后旋涂一定厚度的光刻胶，之后再以设计好的一定孔径和形状的掩模作为遮掩，进行紫外曝光，之后进行显影，将掩模版上的图形转移至光刻胶后，形成独立柱状结构。再对独立的柱状光刻胶进行热处理，在一定温度作用下，胶体发生流动，柱状光刻胶由于表面张力的作用，最终形成以设计的图形孔径为边界的球冠结构。在这种方法下，微透镜阵列使用普通常用的 MEMS 加工工艺即可制作，操作较为简单，可重复性高且成本低，对仪器的精度要求不高，因此被广泛使用。但其缺点为接触角很难控制，因为它只受基底上光刻胶材料的浸润性和周围空气的影响，也就是说光刻胶对特定环境下的材料的接触角是一定的，并不是所有孔径大小和高度的胶都能热熔成功，如果横纵比很大，失败率会比较高，微透镜的形状会产生塌陷。

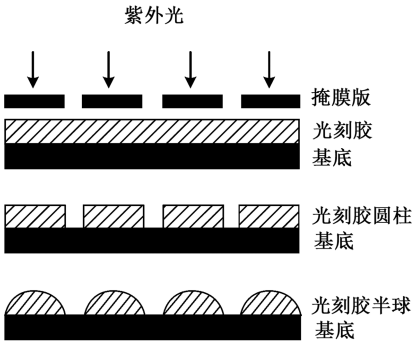


图 1 基于热回流法的微透镜阵列制作工艺[9]

实验中，我们希望在热回流法得到光刻胶球冠轮廓的基础上，通过电感耦合等离子体反应离子刻蚀的刻蚀工艺，将光刻胶球冠轮廓 1∶1 地转移到硅晶圆上，获得硅微透镜阵列，相较于图 1 所示传统的热回流工艺，增加了一步 ICPRIE 刻蚀工艺。如何优化刻蚀参数，将光刻胶球冠 1∶1 地转移到硅晶圆上，保证硅球冠形貌且粗糙度低是实验的关键。

电感耦合等离子体反应离子刻蚀设备如图 2 所示，设备内部为一个真空腔室，包括以下几个部分：刻蚀气体入口(Gas Inlet)，刻蚀气体等离子体发生器(ICP Generator)，用于加速等离子气体使其定向运动的等离子体加速器(Bias Generator)，样品放置台(Cryo Stage)，氦背冷(Backside Helium)用于控制刻蚀样品的温度和泵组(Pumping)等。刻蚀气体在刻蚀半导体材料过程中，存在两类刻蚀：物理刻蚀和化学刻蚀。对于不同材料、不同尺寸的微型图案，这两类刻蚀的强度不同，需要调节设备参数使其达到一个平衡的状态，最终得到理想的和需要的垂直刻蚀结果。物理刻蚀是利用离子轰击晶圆片表面进行刻蚀，具有方向性，刻蚀太强会形成倒锥台形；化学刻蚀是利用离子和晶圆片表面发生化学反应进行刻蚀，不具有方向性，刻蚀太强会向掩模下方刻蚀。当物理刻蚀和化学刻蚀达到平衡后，可以得到需要的理想垂直刻蚀效果。

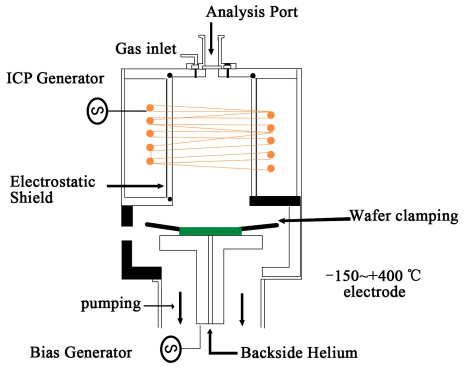


图 2 ICPRIE 系统设备示意图

ICPRIE 设备中不同参数对于物理刻蚀和化学刻蚀的影响是不一样的，刻蚀参数对刻蚀效果的影响如下：

(1)ICP 功率(对应 ICP Generator)：增加 ICP 功率将直接增加等离子体的密度，这对物理刻蚀和化学刻蚀都有影响，但主要是增强化学刻蚀；(2)RF 功率(对应 Bias Generator)：增加 RF 功率将直接增加离子的加速度，离子将具有更大的动能，这对物理刻蚀和化学刻蚀都有影响，但主要是增强物理刻蚀；(3)Pressure(对应泵组)：增大腔体内部的压力，会直接增加等离子体的密度，这对物理刻蚀和化学刻蚀都有影响，但主要是增强化学刻蚀；(4)温度(对应氦背冷)：温度的升高有助于刻蚀的副产物挥发，有助于提高刻蚀速率。

1.1 微透镜阵列设计

微透镜的孔径大小和涂胶的厚度均可通过理论计算得到。曝光后的圆柱底面直径即掩模版直径为 D，圆柱高度即涂胶厚度为 t，热熔后球冠曲率半径为 R，球冠高度为 h，球冠孔径为 d，$d=D$。在制作微透镜前，D，R 和 h 是设计器件仿真后已知的结果，假设融化后的球冠体积基本和圆柱体积相同，则涂胶厚度 t 可表示为：

$$t=\frac{4h^2\left(R-\frac{h}{3}\right)}{D^2} \tag{1}$$

1.2 光刻工艺

光刻胶透镜的直径取决于圆柱状光刻胶图形的直径和厚度。直径增加，相应光刻胶圆柱的厚度也需要增加。否则，后续的热熔会出现光刻胶内陷，无法形成球面轮廓。对于孔径在 100 μm 以下的微透镜阵列，使用光刻胶工艺，用一次旋涂法获得了期望胶厚。实验中透镜孔径分别为 30，50，60 和 90 μm。同时，选择 20～70 μm 内不同的透镜间距。实验优化后，光刻工艺的主要流程如下：将清洗干净的硅晶圆先放置于热板上，在 100 ℃以上温度下烘烤以去除水汽；进行均胶；用热板 100 ℃烘胶 2 min；曝光；显影后就得到了相对应的光刻胶圆柱体。光刻后测得的图形的线宽直径分别为 30，50，60 和 90 μm，对应的光刻胶圆柱胶厚为 4.05 um，且胶厚在整个硅晶圆上很均匀，间距对胶厚影响也不大。

1.3 热熔工艺

光刻胶的热熔工艺决定了光刻胶的轮廓，光刻胶的轮廓是影响硅微透镜的决定因素之一。热熔温度过高，或升温速率过快，会导致光刻胶的溶剂挥发过快而产生气泡，从而破坏形成的轮廓；如果热熔温度过低，也无法形成理想的球冠轮廓。保温时间也不能过短或过长，本文利用热板，通过调节热熔温度、保温时间及升温速率获得了光洁的球面轮廓。

实验发现，对于直径超过 70 μm 的光刻胶球柱，当热熔温度低于 150 ℃时，透镜的上部无法形成球面轮廓，中心出现了塌陷。低于 170 ℃热熔的透镜上表面有小平台，而 180 ℃热熔的透镜形貌较好。

最终确定的实验参数为：将硅晶圆放置于热板，从室温以 10 ℃/min 的速率升温至 180 ℃，保温 5 min 后，将硅晶圆随热板冷却至 120 ℃后取下，放至常温，可以获得较好的球面轮廓。实验发现，热熔升温温度如果大于 180 ℃，热熔后获得的球冠的形状与升温至 180 ℃下热熔时基本相同，且显微镜下没有观察到明显的气泡，但对后续的刻蚀工艺有影响，光刻胶在刻蚀和去胶清洗的过程，都十分困难，不利于制作硅微透镜阵列，可能是胶在高温下碳化变性所致。

1.4 ICPRIE 刻蚀工艺

硅微透镜阵列刻蚀的面形传递，要求光刻胶与硅基底具有相同或者接近的刻蚀速率，使光刻胶球冠的球面面形无失真地传递到硅基底上。因此，控制 ICPRIE 工艺，将光刻胶透镜阵列转移到硅衬底上的目的就是使光刻胶与基底的刻蚀速率比接近 1∶1 且横向无钻蚀、扩蚀现象。

对电感耦合反应离子束刻蚀进行的实验表明，影响刻蚀速率的主要因素有：RF 功率，ICP 功率，以及不同反应气体组合及其比例引起的化学刻蚀机理；影响样品刻蚀质量的主要参数还有离子刻蚀的温度效应，在对刻蚀速率产生影响的几个刻蚀参数中，反应气体对不同的刻蚀材料是敏感的，这使刻蚀过程具有较强的材料选择性，基底和光刻胶的刻蚀速率的差异主要由此产生。而其他参数对刻蚀速率虽然产生影响，但是不会有很大的差别。本文第二部分结果讨论中就微透镜阵列面形传递的刻蚀选择方法进行了阐述。

1.5 测试表征

实验过程中，为了表征所制备的石英微透镜阵列的几何形状，利用光学显微镜（STM7，Olympus）获得了二维图像、利用原子力显微镜（AFM，ICON，Bruker）获得粗糙度。此外，还利用场发射扫描电子显微镜（SEM，Ultra Plus，Zeiss），对微透镜的表面质量进行评价，并用其原位能量色散 X 射线光谱仪（EDX）对刻蚀缺陷进行分析。

2 结果与讨论

2.1 热熔工艺

将硅晶圆放置于热板上，从室温以 10 ℃/min 的速率升温至 180 ℃，保温 5 min 后，将硅晶圆随热板冷却至 120 ℃取下，放至常温，可以获得较好的球面轮廓。实验中，设计了不同的微透镜孔径及涂胶厚度，其热熔前、后的胶厚厚度的变化如表 1 所示，实验结果基本符合公式（1）的理论计算结果。热熔后所有的光刻胶球冠轮廓圆滑，以孔径为 90 μm 的样品为例，其台阶仪的测试结果如图 3 所示。

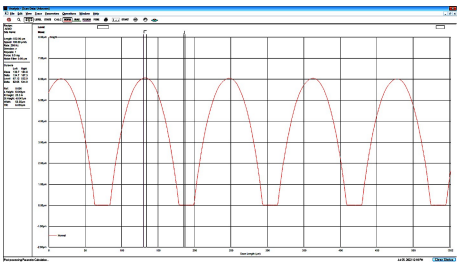


图 3 热熔(180 ℃,5 min)后孔径为 90 μm 的光刻胶球冠截面台阶仪轮廓图

表 1 不同孔径微透镜阵列热熔前后的胶厚

孔径 d/μm	热熔前高度 t/μm	热熔后高度 h/μm
30	4.05	5.4
50	4.05	6
60	4.05	6.05
90	4.05	6.05

2.2 刻蚀工艺

2.2.1 刻蚀气体种类的影响

对硅进行类似的反应离子束蚀刻过程一般用含 F 或 Cl 的气体进行蚀刻,生成 SiF_4 或 $SiCl_4$,其很容易挥发脱离基片表面。首先选择氟基气体 SF_6 和 Ar 混合气体,气体流量分别设置在 20 和 30 cm^3/min,进行反应离子束刻蚀,尝试了多组 ICP 功率和 RF 功率的组合,实验均发现刻蚀微透镜表面粗糙,刻蚀缺陷严重,在透镜表面形成了大量的硅坑,如图 4 所示。

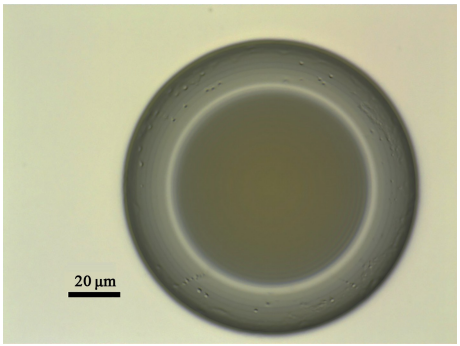
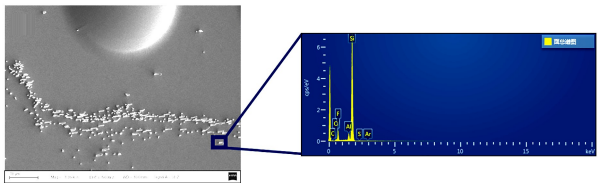


图 4 刻蚀气体为 SF_6 和 Ar 条件下 ICPRIE 刻蚀的硅透镜 SEM 图

为了解决这个问题,加入了含碳气体 CHF_3,其目的是在刻蚀的过程中,使用含碳气体对表面进行钝化保护。SF_6,CHF_3 和 Ar 气体的流量分别设置为 20,20 和 10 cm^3/min,在不同 ICP 功率和 RF 功率的组合下,进行反应离子束刻蚀,实验发现在最优 ICP 功率和 RF 功率组合下,刻蚀产生的硅坑缺陷明显减少,但是产生了大量新的刻蚀缺陷,如图 5(a)所示。对此刻蚀缺陷进行 SEM 原位能量色散 X 射线光谱仪(EDX)扫描,扫描图谱如图 5(b)所示,缺陷的元素成分及其原子百分比如表 2 所示。结果表明,该刻蚀缺陷应该为 SiC_xF_y 聚合物沉积(碳膜有机物)。



(a) SEM (b) EDX

图 5 ICPRIE 刻蚀硅微透镜刻蚀缺陷的 SEM 图和 EDX 谱

为解决碳膜覆盖的刻蚀缺陷问题,将 Ar 气换为氧气,O 与 C 反应生成 CO,CO_2 或碳氢化合物气体,用来改善有机物沉积问题,从而减少硅微透镜 C 膜覆盖缺陷。我们最终选取的气体为:SF_6,CHF_3 和 O_2。刻蚀实验表明,在优化的气体流量比例、等离子能量和温度等刻蚀工艺参数下,该气体组合能有效地将光刻胶球冠的球面面形无失真地传递到硅基底上,且无明显刻蚀缺陷。

表 2 EDX 表征硅透镜刻蚀缺陷元素的结果

元素	表观浓度/counts	原子百分比/%
C	0.20	6.57
O	1.14	3.66
F	12.03	14.56
Si	29.17	71.03

2.2.2 等离子体能量的影响

调节刻蚀过程中光刻胶对硅的刻蚀选择比是工艺的关键,也就是通过对 SF_6,CHF_3 和 O_2 流量、ICP 功率、RF 功率以及反应压力等刻蚀关键参数来控制刻蚀过程中的 Si 和光刻胶刻蚀速率,使得两者的刻蚀速率尽可能接近,以达到图形 1∶1 转移到硅衬底的目的。实验发现,等离子体能量对刻蚀过程中上述两种刻蚀缺陷(硅坑和碳膜沉积物)的形成有决定性影响:如果 RF 功率太大,刻蚀后会形成较多的碳膜沉积物;如果 ICP 功率过小,则刻蚀工艺不稳定,等离子体无法稳定启辉,反之,刻蚀的硅透镜表面形成较多的硅坑刻蚀缺陷。

在 ICPRIE 刻蚀中,固定 SF_6、CHF_3 和 O_2 气体流量,分别设置为 20,20 和 10 cm^3/min,不同 RF 功率和 ICP 功率组合下得到的实验结果如表 3 所示。可以得到如下结论:当 SF_6,CHF_3 和 O_2 气体流量分别设置为 20,20 和 10 cm^3/min 时,刻蚀的最优的 ICP 功率、RF 功率的组合为 700 和 150 W。

表 3　SF_6，CHF_3 和 O_2 流量分别为 20，20 和 10 cm^3/min 时，不同 RF 功率和 ICP 功率组合下的刻蚀实验结果

样品	ICP 功率/W	RF 功率/W	C 膜沉积物缺陷数量	硅坑缺陷数量
1	400	300	多	多
2	600	300	多	较多
3	600	200	较多	较多
4	600	150	较少	较多
5	700	200	较多	较少
6	700	150	少	少
7	750	150	较少	较多
8	750	120	较少	多

2.2.3　刻蚀气体流量及比例的影响

实验发现，O_2 的流量和 O_2 占总气体流量的比例（O_2 占比）对 Si 和光刻胶的刻蚀选择比和 Si 刻蚀速率的影响最为显著。表 4 总结了不同组分对 Si 和光刻胶的刻蚀选择比和 Si 刻蚀速率的影响。当固定 RF 功率为 150 W，ICP 功率为 700 W，改变 O_2 流量占比，从图 6 可以看出，随着 O_2 占总气体流量比例的增加，Si 对胶的刻蚀选择比减小，Si 刻蚀速率迅速减小，PR 刻蚀速率增加。

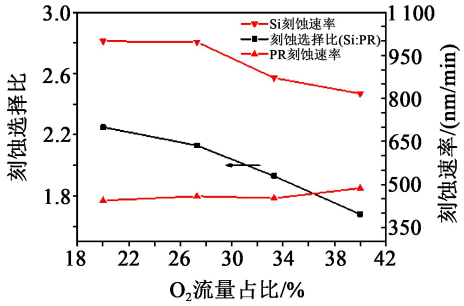
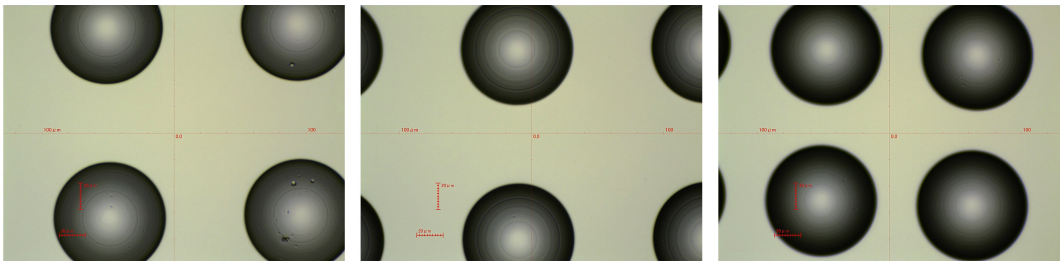


图 6　O_2 组分对刻蚀选择比和 Si 的刻蚀速率的影响

表 4　在不同刻蚀气体流量条件下的 Si 刻蚀选择比

CHF_3 流量/（cm^3/min）	SF_6 流量/（cm^3/min）	O_2 流量/（cm^3/min）	O_2 占比/%	Si 刻蚀速率/（nm/min）	PR 刻蚀速率/（nm/min）	选择比（Si/PR）
20	20	10	20	1 000	444	2.25∶1
20	20	15	27.3	997	459	2.13∶1
15	15	15	33.3	872	452	1.93∶1
15	15	20	40	817	487	1.68∶1

实验还发现，氧气流量大小及占比对刻蚀的质量也有重要的影响，当氧气流量占比较大（$CHF_3/SF_6/O_2$=15/15/20）时，即使刻蚀选择比更接近于 1，但硅微透镜的粗糙度增加，且硅坑缺陷增多，如图 7(a)所示。这可能是由于氧气在刻蚀过程中对硅表面起着减少碳膜沉积物的作用的同时也减少了 CHF_3 钝化作用，氧气流量过大则刻蚀的钝化不足，导致 SF_6 气体中的 S 离子撞击表面形成硅坑。当氧气占比逐渐减少（$CHF_3/SF_6/O_2$=15/15/15），如图 7(b)所示，硅坑数量减少，但硅透镜阵列表面仍十分粗糙。当氧气占比继续减少（$CHF_3/SF_6/O_2$=20/20/15），硅透镜阵列表面明显改善，如图 7(c)。



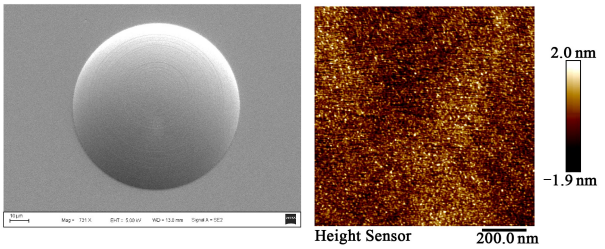
(a) $CHF_3/SF_6/O_2$=15/15/20 (cm^3/min)　(b) $CHF_3/SF_6/O_2$=15/15/15 (cm^3/min)　(c) $CHF_3/SF_6/O_2$=20/20/15 (cm^3/min)

图 7　当固定 ICP 功率为 700 W，RF 功率为 150 W，不通流量比下刻蚀形成的硅微透镜的光学显微镜图

基于数次试验后，由于 ICPRIE 的刻蚀必须同时满足：(1)Si 和光刻胶的刻蚀速率（选择比）接近 1∶1；(2)硅球冠粗糙度低；(3)硅球冠和球冠间的硅面上无任何刻蚀缺陷孔洞。确定的刻蚀最优化的参数为：RF 功率为 150 W，ICP 功率为 700 W，CHF_3，SF_6 和 O_2 的流量分别为 20，20 和 15 cm^3/min，此条件下的刻蚀比约为 2∶1。由于选择刻蚀比不是 1∶1，所以 1.1 节实验设计孔径大小和高度时，需考虑到转移系数的影响，光刻胶球冠的高度 h 应为微透镜仿真所需最终高度的 1/2.1 倍，球冠孔径 d 也是微透镜仿真所需最终高度的 1/2.1 倍。

图 8(a)为在最优工艺条件下，最终得到的硅微透镜阵列（孔径为 90 μm）的显微镜图。用 AFM 扫描微透镜阵列球冠任意区域，取样长度为 1 μm，结

果如图 8(b)所示。测得刻蚀所得的硅球冠侧壁的粗糙度均方根 R_q 仅约为 0.54 nm,表面十分光洁。



(a) 光学显微镜图 (b) AFM 图

图 8 ICPRIE 刻蚀后孔径为 90 μm 的硅球冠的光学显微镜图和 AFM 图

3 结论

本文通过优化热熔及 ICPRIE 刻蚀中的各项工艺参数,制备出孔径在 20～90 μm、表面光滑、整齐的硅微透镜阵列。热熔时,将硅晶圆放置于热板上,从室温以 10 ℃/min 的速率升温至 180 ℃,保温 5 min 后,将硅晶圆随热板冷却至 120 ℃取下,放至常温,可以获得较好的球面轮廓。刻蚀气体种类和等离子体能量对硅透镜表面质量有决定性影响。O_2 的流量和 O_2 占比对刻蚀选择比和刻蚀速率的影响最为显著,氧气的增加虽带来刻蚀选择比的优化,但是会给硅表面带来凹坑类刻蚀缺陷。

参考文献:

[1] 杨国光. 微光学与系统[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2008.
Yang Guoguang. Micro-Optics and System[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008.

[2] Motamedi M E. 微光机电系统[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京:国防工业出版社, 2010.
Motamedi M E. Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems[M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang (transl.). Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[3] Petroz K, Ollier E, Grateau H, et al. Integrated silica micro-opto-electromechanical steering device for laser beam scanning [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 1999, 73: 117-121.

[4] Chen C F, Tzeng S D, Chen H Y. Silicon microlens structures fabricated by scanning-probe gray-scale oxidation[J]. Opt. Lett., 2005, 30(6): 652-654.

[5] Ke Caijun, Yi Xinjian, Lai Jianjun, et al. Design, fabrication, and integration technology of large-scale microlens array for infrared charge coupled device application[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25(3): 439-449.

[6] Appleyard D C, Lang M J. Active particle control through silicon using conventional optical trapping techniques[J]. The Royal Society of Chemistry, 2007, 7: 1837-1840.

[7] He Miao, Yuan Xiaocong, Moh K J, et al. Monolithically integrated refractive microlens array to improve imaging quality of an infrared focal plane array[J]. Opt. Eng., 2004, 43(11): 2589-2594.

[8] 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.

[9] Kim J Y, Martin O C, Baek N S, et al. Simple and easily controllable parabolic-shaped microlenses printed on polymeric mesas[J]. J. Mater. Chem. C, 2013, 1(11): 2152-2157.

[10] Xia J, Qu D, Yang H, et al. Self assembly polymer microlens array for integral imaging[J]. Displays, 2010, 31(4/5): 186-190.

[11] Chang C Y, Yang S Y, Huang L S, et al. Fabrication of polymer microlens arrays using capillary forming with a soft mold of micro-holes array and UV-curable polymer[J]. Opt. Express, 2006, 14(13): 6253-6258.

[12] Pan C, Wu T, Chen M, et al. Hot embossing of micro-lens array on bulk metallic glass[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(2): 422-431.

[13] Yao D, Nagarajan P, Li L, et al. A two-station embossing process for rapid fabrication of surface microstructures on thermoplastic polymers[J]. Polymer Engineering & Science, 2007, 47(4): 530-539.

[14] Albero J, Nieradko L, Gorecki C, et al. Fabrication of spherical microlenses by a combination of isotropic wet etching of silicon and molding techniques[J]. Opt. Express, 2009, 17(8): 6283-6292.

作者简介:

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;

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。