材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023123001

石英玻璃刻蚀浅锥孔阵列的工艺研究

乌李瑛[1]，刘　丹[1*]，权雪玲[1]，程秀兰[1]，张芷齐[2]，
高庆学[2]，付学成[1]，徐丽萍[1]，张文昊[1]，马　玲[1]

（1. 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；
2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 医学检验技术研究室，江苏 苏州 215163）

摘　要： 介绍了石英玻璃刻蚀浅锥孔的制备方法。通过紫外接触式光刻系统在石英玻璃上形成光刻胶浅锥孔阵列图案，用电感耦合反应离子刻蚀机（ICP-RIE）进行刻蚀。研究了光刻参数和蚀刻参数（气体流量、气体成分、腔压、ICP 功率和偏置功率）对石英玻璃的刻蚀性能、表面轮廓、蚀刻速率和侧壁倾角的影响。结果表明：刻蚀气体种类对石英浅锥孔阵列刻蚀效果有显著影响，CF_4 和 Ar 的组合气体所刻蚀的石英锥孔阵列的效果最佳，随着 CF_4 气体流量比的增加，石英刻蚀倾角先降低后又小幅增加，当刻蚀气体（CF_4 ∶ Ar）流量比在 5∶3 时，石英刻蚀速率为 0.154 μm/min，光刻胶刻蚀速率为 0.12 μm/min，得到的石英浅锥孔倾角最倾斜。在其他刻蚀参数一定的情况下，ICP 功率由 600 W 升高至 800 W，石英刻蚀速率大幅降低，聚合物的沉积成为刻蚀工艺的主导；刻蚀石英的粗糙度 R_q 随着 ICP 功率的降低明显增加；RF 功率升高时刻蚀石英的速率增加，R_q 值增加后又降低，当 RF 功率升高至 200 W 时，光刻胶发生碳化现象。可为石英玻璃微器件的制备提供工艺参考。

关键词： 电感耦合反应离子刻蚀；石英玻璃；干法刻蚀；等离子体；刻蚀倾角；微透镜阵列；锥孔

中图分类号： TB43　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0434－08

Process of Etching Shallow Tapered-Hole Arrays in Quartz Glass

WU Liying[1], LIU Dan[1], QUAN Xueling[1], CHENG Xiulan[1], ZHANG Zhiqi[2],
GAO Qingxue[2], FU Xuecheng[1], XU Liping[1], ZHANG Wenhao[1], MA Ling[1]

(1. Center for Advanced Electronic Materials and Devices, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN; 2. Laboratory of Medical Laboratory Technology, Suzhou Institute of Biomedical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, CHN)

Abstract: We herein introduce a method for preparing shallow-tapered holes etched on quartz glass. The effects of lithographic and etching parameters (gas flow, gas composition, cavity pressure, ICP power, and bias power) on the etching properties, surface profile, etching rate, and sidewall inclination of quartz glass were investigated. The results showed that the type of etching gas significantly affected the etching of the shallow cone-hole array on quartz and that the combination of CF_4 and Ar yielded the best etching effect. As the CF_4 gas flow rate increased, the quartz etching angle first decreased and then increased slightly. When the CF_4 ∶ Ar gas flow ratio

收稿日期：2023－12－30.

基金项目：上海市科技创新行动项目；国家自然科学基金重点项目（62335014）；上海交通大学平湖智能光电研究所开放基金（22H010102520）；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）；2023 年上海交通大学决策咨询重点课题项目（JCZXSJA2023-05）.

* **通信作者：**刘　丹

was 5∶3, the quartz etching rate was 0.154 μm/min, the photoresist etching rate was 0.12 μm/min, and the inclination of the shallow quartz cone hole was the highest. When other etching parameters were applied, the ICP power increased from 600 to 800 W, the quartz etching rate decreased significantly, and polymer deposition became the dominant etching process. The roughness (R_q) of the etched quartz increased with decreasing ICP power. As the RF power increased, the rate of quartz etching increased, and the R_q value of the etched quartz first increased and then decreased. When the RF power was increased to 200 W, photoresist carbonization occurred. This study provides a technical reference for the preparation of quartz-glass microdevices.

Key words: inductively coupled reactive ion etching(ICP-RIE); quartz; dry etch; plasma; etching angle; microlens array; tapered hole

0　引言

玻璃微结构已被广泛应用于微机电系统的各个领域，如微机电系统(MEMS)[1-2]，光学器件[3-4]和生物芯片[5-6]。常用的玻璃基片有二氧化硅[7]、硼酸硅盐玻璃[8]、康宁 Pyrex7740 玻璃[9]和石英玻璃[10]等，这些材料普遍都具有优异的光传输性、表面较低的阻尼系数和很高的生物相容性等[11-12]。石英玻璃具有更多的优异性能，如有压电性、绝缘性高、硬度高及热稳定性好，被认为是用来发展光学组件最有潜力的材料之一[13-14]。

随着纳米光子学发展，零模波导(Zero-Mode Waveguide，ZMW)器件被广泛应用于生物研究[15]。ZMW 器件通常将金属膜沉积在透明的玻璃基底上，并且在金属薄膜中制作纳米孔结构。ZMW 结构可以将光学显微光谱的观察体积限制在 10^{-18}～10^{-21} L 的范围内[16]，相对于全内反射荧光显微镜 10^{-16} L 的观测体积[17]具有更小的观测范围，进一步降低了背景荧光的干扰，提升了检测的灵敏度。

国内外的研究人员对 ZMW 器件中纳米孔阵列的制备做了大量研究工作[18]，其中苏州生物医学工程技术研究所提出了在 ZMW 器件的基础上构建微透镜阵列结构以减少荧光串扰的方案[19]，与理想曲面微透镜结构稍有不同，其等效为石英玻璃浅锥孔阵列。目前对石英玻璃浅锥孔阵列加工的工艺报道不多。

理想微透镜阵列有多种制作方法，本文作者在文献[20]中，进行过详细的介绍。在本文中对石英玻璃浅锥孔阵列的加工进行工艺探索，尝试采用 MEMS 的加工工艺，并利用紫外光刻、干法刻蚀的直接法进行石英浅锥孔阵列加工，操作较为简单，可重复性高。同时也探讨了光刻参数和蚀刻参数(气体流量、气体成分、腔压、ICP 功率和偏置功率)对石英玻璃的刻蚀性能、表面轮廓、蚀刻速率和侧壁倾角的影响，最终得到了可用于 ZMW 器件的微透镜的最优化的光刻、蚀刻参数。

1　实验

1.1　光刻实验

使用等离子水清洗石英玻璃基片，在热板上烘烤 10 min，以去除石英玻璃表面的水汽，而后用等离子清洗机清洗 5 min。采用匀胶机对样片涂敷 AZP4330 光刻胶，用热板在 110 ℃下烘胶 2 分钟。在接触式曝光系统(SUSS，MA6)上进行光刻，用专用的 TMAH 显影液对曝光后的锥孔阵列进行显影后，放入等离子水清洗，最后用氮气气枪吹干样品。

1.2　刻蚀实验

使用电感耦合反应离子刻蚀机(ICP-RIE)对玻璃进行刻蚀。对电感耦合反应离子束刻蚀石英已有很多报道[21-25]，研究表明有很多因素对石英刻蚀质量产生影响，其中，RF 功率、ICP 功率，以及不同反应气体组合及比例是影响石英刻蚀速率的主要参数，其他参数加刻蚀的温度效应、腔体压力、石英材料组分等对石英刻蚀质量有影响。

增加 ICP 功率直接增加等离子体的密度，对物理刻蚀和化学刻蚀都有影响，但主要是增加化学刻蚀过程；增加 RF 功率直接增加离子的加速度，离子将具有更多的动能，主要是增加物理刻蚀过程；而对于腔体压力(对应真空泵组)而言，增大腔体内部的压力，会直接增加等离子体的密度，主要是增加化学刻蚀过程。刻蚀温度(对应氦背冷)的升高有助于刻蚀的副产物挥发，有助于提高刻蚀速率。从最终刻

蚀结果来看，以上因素都会对刻蚀侧壁倾角角度有一定影响。

在对刻蚀速率产生影响的几个刻蚀参数中，反应气体的类型对不同的刻蚀材料是最敏感的，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的。本文第二部分就刻蚀工艺参数对石英浅锥孔阵列的形貌影响进行了详细阐述。

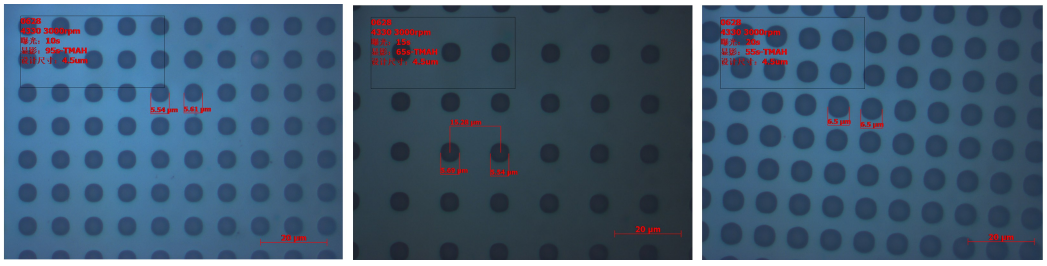
1.3 测试表征

实验过程中，为了表征所制备的石英浅锥孔的几何形状，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。利用双束聚集离子束系统((FIB)将石英刻蚀浅锥孔沿直径加工切开观察剖面，对石英锥孔的刻蚀倾角进行精确测量。此外，还利用场发射扫描电子显微镜(SEM，Ultra Plus，Zeiss)对刻蚀浅锥孔的质量进行了评价。

2 结果与讨论

2.1 曝光及显影时间对光刻效果的影响

当曝光时间小于 10 s 时，由于能量不够，观察到光刻胶底部还有一层残余的胶。在曝光时长分别为 10，15 和 20 s 且在最优的显影时长下(无残胶和没有过显现象)，可以观察到在不同曝光时间下的光刻效果如图 1 所示。表 1 总结了在三种光刻条件下，不同设计孔径最终光刻显影后，所对应的实际孔径的平均值，可以看出曝光显影后的尺寸均大于设定尺寸。随着曝光时间的延长，锥孔阵列显影直径宽度变宽，当增加至 20 s 时，由于紫外光的散射效果，使得侧部的光刻胶感光，从而造成显影尺寸的进一步增大。实验发现，随着曝光尺寸变大，光刻胶的形貌、倾角及尺寸控制对后续工艺也会有影响。



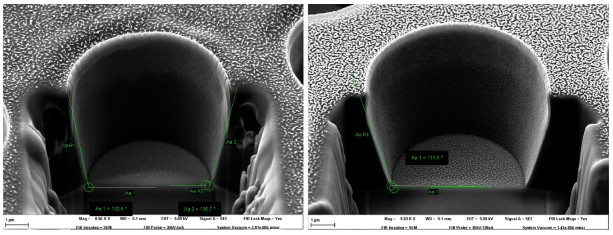
(a) 10 s (b) 15 s (c) 20 s

图 1 石英基底上不同曝光时长的光刻胶浅锥孔阵列光刻完成后的显微镜图

表 1 不同光刻条件下光刻胶浅锥孔阵列的实测孔径(平均值)及倾角

光刻条件	曝光时长/s	显影时长/s	实测孔径/4 μ	实测孔径/4.5 μ	实测孔径/5.2 μ	光刻胶倾角/(°)
A	10	95	4.69	5.52	6.5	80～78
B	15	65	4.87	5.63	6.94	78～74
C	20	55	6.21	6.5	7.00	71～69

为了得到显影后光刻胶倾角的确切角度，将光刻完成的样片沿直径剖开，图 2 为石英基底上设计直径为 4 μ 的圆孔在光刻条件 B 和 C 下形成的光刻胶锥孔的剖面 SEM 图。由表 1 还可以看出，光刻条件对光刻胶倾角有明显影响，增加曝光时间并缩短显影时间可以减小光刻胶锥孔倾角角度，这对后续的刻蚀工艺后的石英刻蚀倾角也有着较大影响。



(a) 光刻条件 B (b) 光刻条件 C

图 2 石英基底上不同光刻条件下光刻胶锥孔剖面 SEM 图

2.2 刻蚀气体种类对石英玻璃刻蚀效果的影响

石英玻璃的成分是 SiO_2。对 SiO_2 进行类似的反应离子刻蚀过程一般用含氟(F)或者含碳氟(CF)的气体进行刻蚀，刻蚀过程是化学反应与物理轰击共同作用的结果[26]。在等离子体内，氟基气体与石英玻璃在离子辉光放电过程中发生化学反应，含氟的气体解离出氟离子 F^+，活性的 F^+ 与 SiO_2 反应生成了气态的 SiF_4，SiF_4 随着分子泵排出，从而完成刻蚀石英。

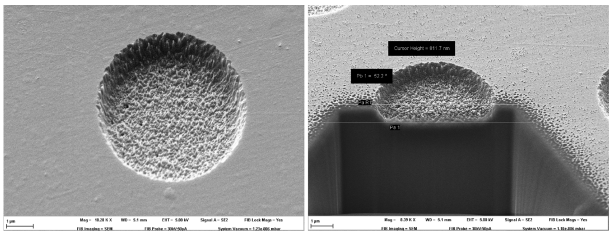
含碳氟的气体，反应离子刻蚀的反应机制主要为 CF_x 化学基团，主要是由中性粒子的反射以及 CF_x 解离产生的 CF_x^+($x=1,2,3$)构成。当 F 原子浓度较高时，会加速 CF_x 粒子在器壁的解离；当 F 原子浓度较低时，CF_2 浓度明显增加，容易形成较大的 C_xF_y 分子，进而电离成较大的 $C_xF_y^+$，即聚合物的前驱粒子。F^+ 和 CF_x^+($x=1,2,3$)为刻蚀提供了

化学反应粒子及轰击能量。在碳氟等离子体中，尽管 CF_2 和 CF_3 是活性粒子，但 F 原子为主要刻蚀粒子。聚合物则是形成侧壁保护的关键，其阻隔了侧壁表面与反应蚀刻气体的接触，使得侧壁不受侵蚀，而获得各向异性蚀刻。

在 2.1 节的光刻条件 B 下，实验选取了常见的氟基气体种类（SF_6，CF_4，CHF_3），分别和 Ar 气组成混合气体，进行反应离子刻蚀。

(a)SF_6 和 Ar 气体组合

首先选取氟基气体 SF_6 和 Ar 混合气体，尝试了多组流量（气体总流量尝试范围为 40～80 cm^3/min，流量比为 1∶1 和 2∶3），不同的 ICP 功率和 RF 功率的组合，实验均发现刻蚀石英浅微孔表面和侧壁很粗糙，刻蚀缺陷严重，如图 3 所示。为解决刻蚀粗糙度问题，将样品泡在 SPM 食人鱼溶液里清洗（浓硫酸与双氧水的浓度比为 4∶1），实验发现用 SPM 清洗 30 min，其粗糙度并无改善。用台阶仪测试刻蚀速率，刻蚀选择比（胶/石英）约为 2.2∶1，侧壁倾角约为 52.2 度。因粗糙度对器件影响很大，该刻蚀气体组合不适合石英器件的制备。



(a) 表面　　(b) 剖面

图 3　SF_6 和 Ar 气体组合（气体流量比为 1∶1）刻蚀石英浅锥孔 SEM 图

(b)CHF_3 和 Ar 气体组合

考虑到侧壁保护，选用碳氟基刻蚀气体进行尝试，利用碳氟基等离子体形成有机物。尝试了多组

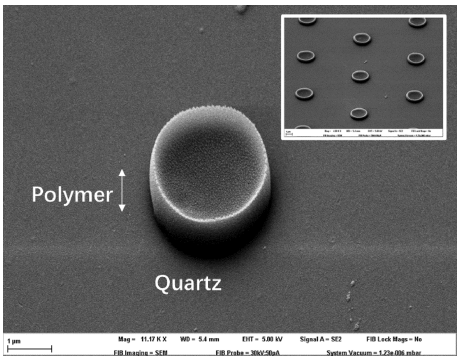


图 4　CHF_3 和 Ar 气体组合（气体流量比为 1∶1）刻蚀石英浅锥孔表面 SEM 图

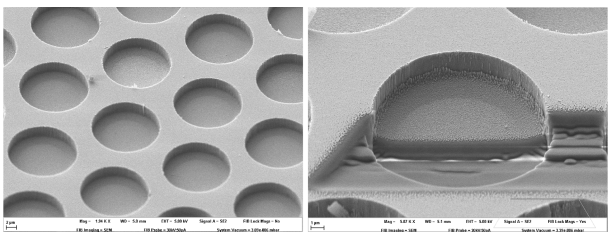
ICP power，RF power 和气体流量比（气体总流量尝试范围为 20～30 cm^3/min，流量比为 1∶1 和 2∶3），压强控制在 0.7 Pa，均发现刻蚀无法顺利进行，去胶清洗完成后，刻蚀实际没有发生，刻蚀工艺实际形成了碳氟聚合物的有机物沉积，光刻胶锥孔内形成了碳氟的有机物沉积圆柱，如图 4 所示。并发现，所形成的有机物圆柱，和石英基底的结合力极佳，用普通的有机超声清洗和等离子去胶法均无法轻易去除。

(c)CF_4 和 Ar 气体组合

实验发现，CF_4 和 Ar 的组合气体所刻蚀石英的效果最佳，图 5 为 CF_4 与 Ar 的总流量为 80 cm^3/min，流量比为 1∶1，ICP 功率为 600 W 和 RF 功率为 100 W 条件下时，所得石英锥孔阵列 SEM 图。

对刻蚀工艺参数进行调试，发现刻蚀石英的效果和倾角角度会有显著变化，在 2.3 节将进行详细的阐述。同时，光刻胶倾角角度也会对最终刻蚀石英的倾角角度有影响。

实验还尝试使用其他刻蚀石英的常规气体进行组合和工艺调试，结果均不理想，在保证石英刻蚀光滑形貌的前提下，刻蚀所得的倾角角度均趋近垂直。



(a) 表面　　(b) 剖面

图 5　CF_4 和 Ar 气体组合（气体流量比为 1∶1）刻蚀石英浅锥孔阵列 SEM 图

2.3　气体流量比对石英玻璃刻蚀倾角的影响

在相同的光刻条件下，实验研究了 CF_4 与 Ar 的气体流量比对石英玻璃刻蚀的影响。首先选择光刻条件 B 的情况下，对光刻显影后的光刻胶锥孔，利用 FIB 切开光刻胶锥孔的剖面，测量了光刻胶的角度。实验测得光刻胶锥孔侧壁的倾角均为 75 度左右。

在保持光刻胶锥孔侧壁的角度一致的条件下，其他刻蚀条件不变，仅通过改变 CF_4 与 Ar 气体流量比来尝试调试石英倾角。保持总流量为 80 cm^3/min 和腔室气压为 0.7 Pa，CF_4 与 Ar 气体流量比对石英浅锥孔阵列的倾角的影响如图 6 所示，可以观察到：(1)随着 CF_4 气体流量比的增加，石英刻蚀倾

角先降低后又小幅增加；(2)随着 CF_4 气体流量比的增加，光刻胶的刻蚀速率增加并趋于稳定，而石英的刻蚀速率则先降低后又小幅增加。仅改变刻蚀气体流量比对刻蚀的粗糙度影响不大，AFM 测试刻蚀石英的粗糙度 R_q 基本都保持在 3 nm 左右。

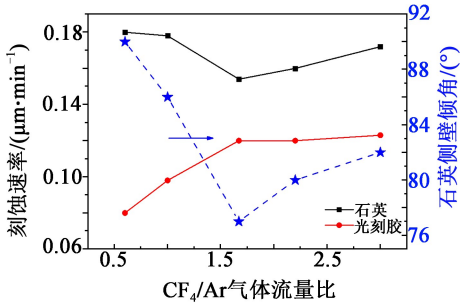
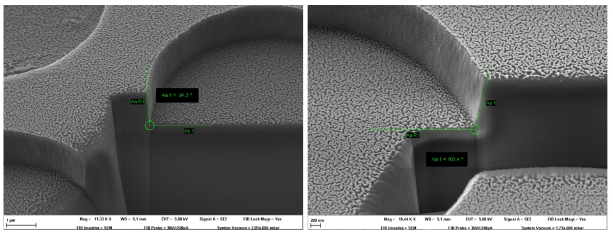


图 6 CF_4 与 Ar 气体流量比对石英刻蚀的影响

图 7 为当总流量为 80 cm^3/min 时，CF_4 增加至 50 cm^3/min 时，石英刻蚀浅锥孔的 SEM 图。可以观察到，在该条件下的石英的刻蚀倾角角度最大(77°)，但当 CF_4 气体流量继续增加时，刻蚀倾角不再降低，这可能是由于当 CF_4 流量继续加大时，这时的工艺气体达到了过饱和状态，辉光放电产生的离子过盛，增加了反应离子的碰撞，从而使这些本应轰击石英表面的反应粒子失去了较多的能量，消弱了粒子对石英的物理轰击。与此同时，在压强不变的情况下，增大的 CF_4 流量意味着抽走的活性物质也会加快，导致部分反应粒子未与石英反应，便与废气一起抽走，从而刻蚀角难以继续增加。表 2 总结了 CF_4 与 Ar 气体的不同流量比对石英刻蚀的影响。



(a) CF_4 与 Ar 流量比为 1∶1 (b) CF_4 与 Ar 流量比为 5∶3

图 7 CF_4 和 Ar 气体组合不同气体流量比条件下的刻蚀石英浅锥孔 SEM 图

表 2 CF_4 与 Ar 气体的不同流量比对石英刻蚀速率和倾角的影响

CF_4 流量/(cm^3·min^{-1})	Ar 流量/(cm^3·min^{-1})	CF_4/Ar 气体流量比	石英刻蚀速率/(μm·min^{-1})	光刻胶速率/(μm·min^{-1})	石英侧壁倾角/(°)
60	20	3	0.172	0.123	82
55	25	2.2	0.16	0.12	80
50	30	1.67	0.154	0.12	77
40	40	1	0.178	0.098	86
30	50	0.6	0.18	0.08	90

2.4 ICP 功率对石英玻璃刻蚀倾角的影响

ICP 功率对石英玻璃刻蚀效果影响显著，如图 8 所示。当保持 CF_4 和 Ar 的气体流量比为 5∶3(总流量 80 cm^3/min)，其他光刻(光刻条件 B)刻蚀条件不变的情况下，当 ICP 功率由 600 W 提高至 800 W，刻蚀石英速率大幅降低，聚合物的沉积成为工艺的主导。这可能是由于 ICP 辉光放电产生的能量过盛但活性粒子数量没有增加，所以增加了反应离子之间的碰撞，从而使这些本应轰击石英表面的反应粒子失去了较多的能量，反而消弱了粒子对石英的物理轰击，导致本应在石英表面反应刻蚀的 F 粒子数量减少，而 CF 大分子聚合物粒子的聚合反应增加，从而反应速率迅速下降。

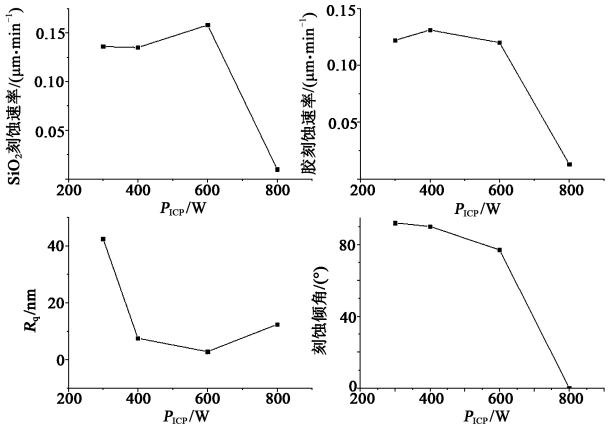


图 8 不同 ICP 功率对刻蚀石英浅锥孔的影响

当 ICP 功率由 600 W 降低至 300 W 时，刻蚀表面的粗糙度明显增加，AFM 测试的结果显示，粗糙度为裸石英玻璃的二十倍左右，R_q = 42 nm，同时，侧壁的粗糙度也很大，锥孔的截面 SEM 如图 9 所示。图 8 的结果也表明了随着 ICP 功率的增加，氧化硅刻蚀速率稍减小，石英锥孔的刻蚀角度趋于垂直。这个结果与 Lin 等[22]之前的研究工作并不一致，在他们的研究工作中，ICP 功率的增加可以有效

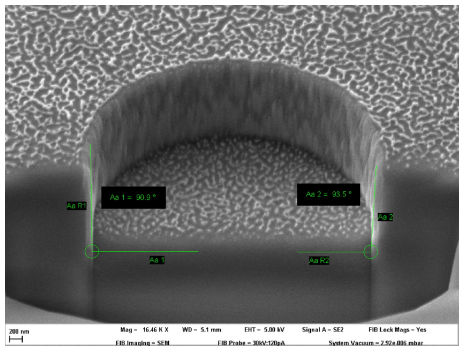


图 9 ICP 功率为 300 W 时刻蚀石英浅锥孔的 SEM 图

地减小石英刻蚀倾角(倾角从垂直逐渐倾斜),这可能是由于实验所选取的碳氟刻蚀气体与本研究不同。在 Lin 等的研究中,选取的刻蚀气体为 C_4F_8 与 Ar 的组合,其刻蚀气体 C 和 F 的比例为 1∶2,而本实验为 1∶4(CF_4),所以可能经过辉光分解所产生的碳氟活性粒子不同,进而与石英表面的反应机理存在差异,导致刻蚀现象的不同。表 3 总结了 ICP 功率对石英刻蚀速率、粗糙度和倾角的影响。

表 3　ICP 功率对石英刻蚀速率、粗糙度和倾角的影响

P_{ICP}/W	石英刻蚀速率/($\mu m \cdot min^{-1}$)	胶刻蚀速率/($\mu m \cdot min^{-1}$)	R_q/nm	刻蚀倾角/(°)
300	0.136	0.122	42.5	92
400	0.135	0.131	7.5	90
600	0.158	0.12	2.8	77
800	0.01	0.013	12.4	未形成

2.5　RF 功率对石英玻璃刻蚀倾角的影响

RF 功率对刻蚀效果也有明显影响,如图 10 所示。当 ICP 功率为 600 W 时,并保持其他刻蚀条件不变的情况下,当 RF 功率降低至 50 W 时,石英刻蚀速率明显降低,其刻蚀效率不适用于石英的刻蚀加工。RF 功率升高时,石英和光刻胶刻蚀速率均有增加,刻蚀石英的粗糙度增加后又降低。当 RF 功率升高至 200 W 时,光刻胶会发生碳化现象,但通过等离子去胶机清洗后,可以完全去除表面残胶,

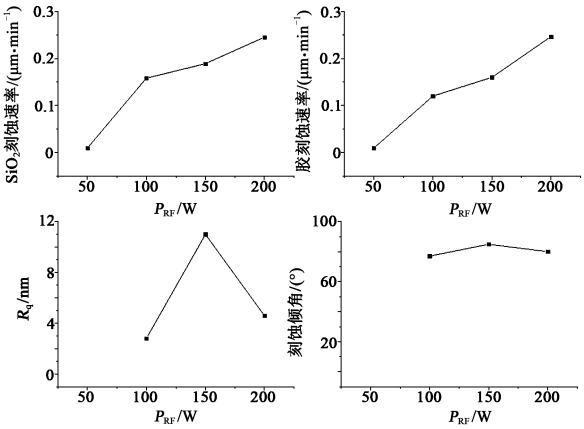


图 10　不同 RF 功率对刻蚀石英浅锥孔的影响

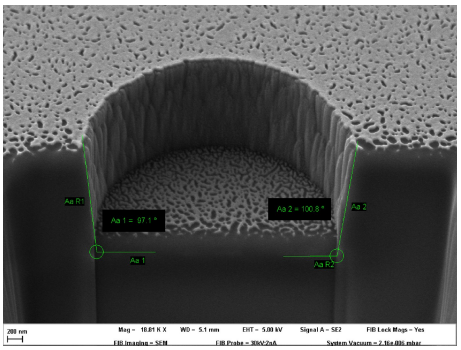


图 11　RF 功率为 200 W 时刻蚀石英浅锥孔的 SEM 图

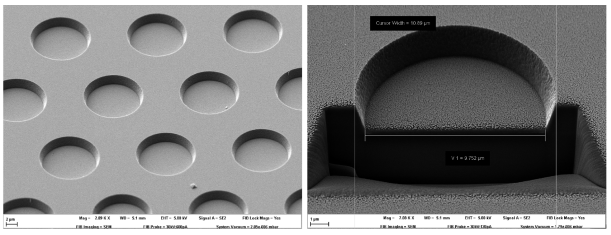
其石英表面粗糙度较小,R_q 为 4.6 nm,但发现石英锥孔内侧壁十分粗糙,不利于器件的性能提升,如图 11 所示。表 4 总结了 RF 功率对石英刻蚀速率、粗糙度和倾角的影响。

表 4　RF 功率对石英刻蚀速率、粗糙度和倾角的影响

P_{RF}/W	石英刻蚀速率/($\mu m \cdot min^{-1}$)	胶刻蚀速率/($\mu m \cdot min^{-1}$)	R_q/nm	刻蚀倾角/(°)
50	0.01	0.01	\	未形成
100	0.158	0.12	2.8	77
150	0.189	0.16	11	85
200	0.245	0.246	4.6	80

2.6　光刻条件对石英玻璃刻蚀倾角的影响

选择基于 CF_4 与 Ar 混合气体的石英刻蚀,发现光刻胶锥孔侧壁角度对最终刻蚀的石英锥孔阵列的角度有显著影响。因光刻曝光、显影条件的变化,有不同的光刻胶倾角。在上文中讨论的最优刻蚀条件下,发现当光刻胶倾角较小时,形成的石英刻蚀倾角较小。如图 12 所示,当光刻胶倾角角度为 69°时,最终刻蚀转移至石英的刻蚀倾角为 70°,刻蚀形貌基本达到 1∶1 转移。



(a) 表面　　(b) 剖面

图 12　石英浅锥孔阵列 SEM 图

3　结论

(1)采用 MEMS 的加工工艺,通过紫外接触式光刻系统在石英玻璃上形成光刻胶浅锥孔阵列图案;并用电感耦合反应离子刻蚀机对石英玻璃进行刻蚀,图案成功转移至石英玻璃,且加工得到的石英锥孔阵列表面光滑,石英侧壁倾角倾斜度可控,满足 ZMW 器件对于光性能的要求。

(2)刻蚀气体种类对石英浅锥孔阵列刻蚀效果有显著影响,CF_4 和 Ar 的组合气体所刻蚀的石英锥孔阵列的效果最佳。其他刻蚀石英的常规气体进行组合和工艺调试后,结果均不理想,如需满足石英锥孔阵列表面光滑形貌的条件,则刻蚀所得的石英倾角角度均趋近垂直。

(3)在 CF_4 和 Ar 刻蚀气体组合下,随着 CF_4 气体流量比的增加,石英刻蚀倾角先降低后又小幅增加,当 CF_4∶Ar 气体流量比在 5∶3 时,石英刻蚀速

率为 0.154 μm/min，光刻胶刻蚀速率为 0.12 μm/min，所形成的石英浅锥孔阵列倾角最倾斜。

(4)在其他刻蚀参数一定的情况下，ICP 功率由 600 W 升高至 800 W，石英速率大幅降低，聚合物的沉积成为工艺的主导，ICP 功率降低则刻蚀表面的粗糙度明显增加。RF 功率对刻蚀效果也有明显影响，当 RF 功率升高时，刻蚀速率增加，刻蚀石英的粗糙度增加后又降低，当 RF 功率升高至 200 W 时，光刻胶发生碳化现象。

(5)探讨了光刻参数和蚀刻参数对刻蚀石英浅锥孔性能影响，最终得到了可用于 ZMW 光学器件的微透镜阵列的最优化的蚀刻参数：刻蚀气体为 CF_4 和 Ar 组合，气体流量分别为 50 和 30 cm^3/min，RF 和 ICP 功率分别为 100，600 W，腔室压强为 0.7 Pa。

参考文献：

[1] Zeze D A, Forrest R D, Carey J D, et al. Reactive ion etching of quartz and pyrex for microelectronic applications[J]. J. Appl. Phys., 2002, 92: 3624-3629.

[2] Esashi M, Takinami M, Wakabayashi Y, et al. High-rate directional deep dry etching for bulk silicon micromachining [J]. J. Micromech. Microeng., 1995, 5(1): 5-10.

[3] Mohamed K, Alkaisi M M, Blaikie R J. Fabrication of three dimensional structures for an UV curable nanoimprint lithography mold using variable dose control with critical-energy electron beam exposure[J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 2007, 25(6): 2357-2360.

[4] Wang S, Zhou C, Ru H, et al. Optimized condition for etching fused-silica phase gratings with inductively coupled plasma technology[J]. Appl. Opt., 2005, 44(21): 4429-4434.

[5] Ujiie T, Kikuchi T, Ichiki T, et al. Fabrication of quartz microcapillary electrophoresis chips using plasma etching[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39(62): 3677-3682.

[6] Tathagata R, Haixin Z, Deirdre R M. Deep reactive ion etching of fused silica using a single-coated soft mask layer for bio-analytical applications [J]. J. Micromech. Microeng., 2010, 20(9): 097002.

[7] Rabe J, Buttgenbach S, Schroder J, et al. Monolithic miniaturized quartz microbalance array and its application to chemical sensor systems for liquids[J]. IEEE Sens. J., 2003, 3(4): 361-368.

[8] Park J H, Lee N E, Lee J, et al. Deep dry etching of borosilicate glass using SF_6 and SF_6/Ar inductively coupled plasmas[J]. Microelecron. Eng., 2005, 82(2): 119-128.

[9] Ok S J, Kim C, Baldwin D F. High density, high aspect ratio through-wafer electrical interconnect vias for MEMS packaging [J]. IEEE Trans. on Advanced Packaging, 2003, 26(3): 302-309.

[10] Abe T, Esashi M. One-chip multichannel quartz crystal microbalance (QCM) fabricated by deep RIE[J]. Sens. Actuators A, 2000, 82(1/3): 139-143.

[11] Lilienthal K, Stubenrauch M, Fischer M, et al. Fused silica 'glass grass': fabrication and utilization[J]. J. Micromech. Microeng., 2010, 20(2): 025017.

[12] Akashi T, Yoshimura Y. Deep reactive ion etching of borosilicate "glass using" an anodically bonded silicon wafer as an etching mask[J]. J. Micromech. Microeng., 2006, 16: 1051-1056.

[13] Morikawa Y, Koidesawa T, Hayashi T, et al. A novel deep etching technology for Si and quartz materials[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(12): 4918-4922.

[14] Zhu H, Holl M, Ray T, et al. Characterization of deep wet etching of fused silica glass for single cell and optical sensor deposition[J]. J. Micromech. Microeng., 2009, 19(6): 065013.

[15] Kurmoo Y, Hook A L, Harvey D, et al. Real time monitoring of biofilm formation on coated medical devices for the reduction and interception of bacterial infections[J]. Biomaterials Science, 2020, 8(5): 1464-1477.

[16] Ardui S, Ameur A, Vermeesch J R, et al. Single molecule real-time(SMRT) sequencing comes of age: applications and utilities for medical diagnostics[J]. Nucleic Acids Research, 2018, 46(5): 2159-2168.

[17] Kim S H. TIRF-based single-molecule detection of the reca presynaptic filament dynamics[J]. Methods in Enzymology, 2018, 600: 233-253.

[18] 魏清泉，李运涛，任鲁风，等. 零模波导原理、制备及其在单分子荧光检测中的应用[J]. 生物技术进展，2015，5(1)：10-21.
Wei Qingquan, Li Yuntao, Ren Lufeng, et al. Principle and preparation of zero mode waveguide and its application in single molecule fluorescence detection[J]. Current Biotechnology, 2015, 5(1): 10-21.

[19] 付博文，郭 振，俞鹏飞，等. 含微透镜的零模波导器件用于增强荧光信号强度[J]. 光学精密工程，2021，29(8)：1922-1930.
Fu Bowen, Guo Zhen, Yu Pengfei, et al. Zero-mode waveguide device with microlens for enhancing fluorescence signal intensity [J]. Opt. Precision Eng., 2021, 29(8): 1922-1930.

[20] 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.
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.

[21] 张名川，靖向萌，王 京，等. 应用于 TGV 的 ICP 玻璃刻蚀

工艺研究[J]. 真空科学与技术学报，2014，34(11)：1222-1227.

Zhang Mingchuan，Jing Xiangmeng，Wang Jin，et al. Formation of through-glass via by inductively coupled plasma etching[J]. Chinese J. of Vacuum Science and Technol.，2014，34(11)：1222-1227.

[22] Lin L C，Jing X M，Wang Q D，et al. Investigation of fused silica glass etching using C_4F_8/Ar inductively coupled plasmas for through glass via (TGV) applications[J]. Microsyst Technol.，2016，22：119-127.

[23] Metwalli E，Pantano C G. Reactive ion etching of glasses：composition dependence[J]. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B，2003，207(1)：21-27.

[24] Goyal A，Hood V，Tadigadapa S. High-speed anisotropic etching of quartz using $SF_6/C_4F_8/Ar/O_2$ based chemistry in inductively coupled plasma reactive ion etching system[J]. Proc. SPIE，2006，6111：61110.

[25] Bliznetsov V，Li B，Lee J W，et al. MEMS industry-worth etching to fabricate tapered structures in SiO_2[J]. J. of Microelectromechanical Systems，2017，26(6)：1400-1407.

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，硕士，主要研究方向为微纳器件加工与制造、硅基光电子器件研究与制备。