

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.002

# 紫外皮秒激光单晶硅微孔加工研究

刘建, 张全利, 傅玉灿

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**单晶硅是目前微芯片、微传感器和光伏发电系统制造中应用最广泛的材料。超短脉冲激光加工硬脆材料时具有重铸层少、裂纹小、边缘平整等特点,在超精细的微孔加工中有着明显的优势。针对在硅片表面制作微通孔的实际需求,采用紫外皮秒激光器在单晶硅片上进行微孔加工,需研究激光环形钻孔中激光参数与微孔质量的依赖关系。选择激光功率、扫描速度、扫描次数作为独立的过程变量,进行相应的单因素实验和正交实验,并根据入孔直径、出孔直径、深度、锥度及表面质量对钻孔过程进行评价。最后基于优选的工艺参数,加工得到所需深度的微通孔。

**关键词:**单晶硅;超短脉冲激光;微孔;激光加工

**中图分类号:**TG665 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0007-06

## Research on Micro-hole Processing of Monocrystalline Silicon by UV Picosecond Laser

LIU Jian, ZHANG Quanli, FU Yucan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Monocrystalline silicon is a widely used material in microchips, microsensors, and photovoltaic systems, and ultra short pulse lasers, characterized by fewer recast layers, small cracks, and smooth edges in hard and brittle material processing, have unique advantages in ultra fine micro-hole processing. This article, with focus on the actual demand for making micro through holes on the surface of silicon wafers, conducts micro hole machining on monocrystalline silicon wafers using ultraviolet picosecond laser, and studies the dependence of laser parameters on micro hole quality in laser annular drilling. Laser power, scanning speed and scanning number are selected as independent process variables for corresponding one-factor and orthogonal experiments, and the drilling process is evaluated according to the inlet diameter, outlet diameter, depth, taper and surface quality. Based on the optimized process parameters, the micro-hole is processed, obtaining the required depth of the micro hole.

**Keywords:** monocrystalline silicon; ultra short pulse laser; micro holes; laser processing

### 0 引言

硅是一种极为常见的半导体材料,被广泛应用于诸多领域。单晶硅具有显著的半导体性以及耐高温、易掺杂等良好的物理特性,其在微型芯片、微型传感器和光伏发电系统的制造中具有十分重要的地位<sup>[1]</sup>。

然而,单晶硅对光线具有较高的反射率,其吸光度和传感性能都受到很大制约。研究发现,在硅表面制作微结构能有效降低硅对光波的反射率<sup>[2]</sup>。例如通过在硅片表面制作阵列微孔,能增大对光线的吸收,有效提高以硅为基底的光电传感器性能,如图1所示。此外,在硅表面制作微通孔,还有助于实现IC芯片的3D叠层封装,提高芯片集成度和降低芯片能耗<sup>[3]</sup>。在面对不断减小的

加工尺寸特征要求,如何有效、低损伤地对单晶硅材料的表面微孔进行加工已然成为了目前的研究热点。

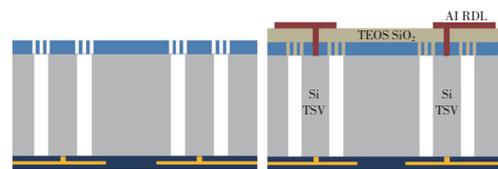


图1 硅基集成芯片中硅通孔技术

激光已广泛应用于诸多加工领域,微纳激光加工技术一直是激光应用的研究重点。超短脉冲激光有着极小的脉宽、极高的峰值功率以及较低的热效应,在加工单晶硅这类硬脆材料时具有重铸层少、裂纹微小、切口平整等特点,在超精细微孔加工时有其独特的优势<sup>[4-5]</sup>。王玺等<sup>[6]</sup>研究了

**基金项目:**国家自然科学基金项目(NSFC2175412);江苏省自然科学基金项目(BK20201033)

**第一作者简介:**刘建(1998—),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为激光微纳加工技术, jianliu@nuaa.edu.cn。

193 nm 紫外激光对单晶硅的损伤机制,建立了热力耦合模型,为高能激光加工中的损伤控制提供了理论依据。储成龙等<sup>[7]</sup>利用纳秒激光在单晶硅表面进行微结构加工研究,分析了激光参数对表面加工质量的影响,并制备了方形阵列微结构。陈海鹏等<sup>[8]</sup>采用紫外皮秒激光刻蚀硅表面,试验表明工艺参数需权衡加工效率与表面质量。LAAKSO 等<sup>[9]</sup>在使用超短激光脉冲激光钻孔过程中,利用水与激光的相互作用使孔横向膨胀,消除孔侧壁上的碎片和孔的形状变形。周嘉等<sup>[10]</sup>通过空化气泡动力学分析(CBDC)优化了超声辅助水下纳秒激光切割工艺,发现空化气泡干扰程度与切槽深度呈负相关。LEE 等<sup>[11]</sup>使用紫外纳秒激光在硅片上进行冲击钻孔加工,实验表明多脉冲数的低能量比少脉冲数的高能量情况更有利于获得更小直径的微孔。王锐等<sup>[12]</sup>针对红外纳秒激光单次扫描切割硅晶圆,揭示了重复频率和扫描速度对热影响区及断面形貌的调控规律。SHAHEEN 等<sup>[13]</sup>利用皮秒激光分别研究了激光能量、脉冲数和重复频率对激光烧蚀微孔形貌的影响。SINGH 等<sup>[14]</sup>利用最小烧蚀能量的高重复率激光条件,研究表明在一定数量的脉冲后微孔表面温度发生了饱和,最终导致了微孔深度的饱和。JIAO 等<sup>[15]</sup>提出了一种在皮秒激光钻孔过程中将硅片表面通入直流电的辅助加工方法,在直流状态下提高了硅的吸收系数,加工微孔时获得了更高的材料去除率。DÖRING 等<sup>[16]</sup>在真空环境下利用皮秒激光在硅表面钻孔,发现在真空环境下孔的横截面上几乎没有粘着残渣,相比大气环境更有利于大深径比的微孔加工。陈天琦等<sup>[17]</sup>基于后续脉冲与孔内喷出物的二次烧蚀原理,研究了不同双脉冲间隔对微孔烧蚀质量的影响。TANG 等<sup>[18]</sup>为了去除激光钻孔时孔边缘存在的重铸层和碎屑等缺陷,利用化学蚀刻剂对激光加工后的微孔进行湿式化学蚀刻,有效提高了微孔入口和孔壁质量。张喆等<sup>[19]</sup>提出平顶飞秒激光开槽技术,通过双温模型仿真与实验验证,展示了其在槽宽可控、侧壁陡直及均匀性方面的潜力。GAO 等<sup>[20]</sup>利用飞秒激光和选择性化学蚀刻技术制备了较高质量的微孔蜂窝阵列,展示了激光与化学刻蚀结合制备微孔阵列方法在硅微通道板和其他硅基先进器件制造中的应用前景。

目前研究人员使用超短脉冲激光,其在单晶硅表面加工微孔过程中依旧存在加工深度受限、锥度较大以及表面缺陷较多等问题,因而如何提高

微孔质量是目前加工单晶硅表面微孔结构的主要研究内容。

因此,本文通过单因素法研究了不同激光参数对单晶硅微孔表面形貌和质量的影响,并建立了微孔直径、深度、锥度以及表面质量对激光参数的依赖关系,同时选取合理的激光参数进行了三因素三水平的正交实验,并基于优化的工艺参数组合,在单晶硅表面加工出缺陷较少、入口圆度较高且锥度较小的微通孔。

## 1 实验材料与设备

### 1.1 实验材料

实验采用的材料为单面抛光单晶硅片(中国广州方岛硅晶材料有限公司),晶面为<100>,抛光面的表面粗糙度小于 10 nm,尺寸为 20 mm×20 mm×0.525 mm。在激光加工前后,利用丙酮和去离子水分别对样品进行超声波清洗 10 min 以减少材料附着的杂质。

### 1.2 实验设备

实验采用的激光装置为德国 Edgewave 公司生产的 PX50-3-GF 皮秒激光器,激光的光源波长为 355 nm,光斑直径为 10 μm,激光最大功率为 18 W,脉冲宽度为 12 ps,脉冲重复频率为 50~800 kHz,如图 2 所示。实验中使用西班牙 SENSOFAR 公司的 S-Neox-3D 三维激光共聚焦显微镜测量微孔三维轮廓,其分辨率最小为 128 nm。使用韩国 COXEM 公司的 EM-30PLUS 扫描电子显微镜观测微孔烧蚀表面特征,其分辨率为 5 nm。

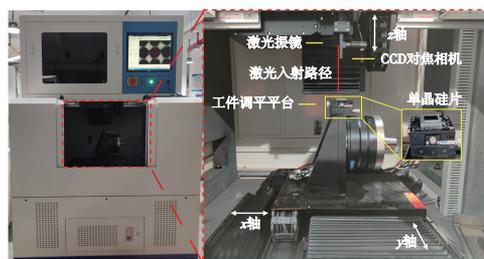


图2 皮秒激光加工设备

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 加工参数对微孔质量的影响

本文采用激光环切打孔方式在单晶硅表面进行微孔加工,激光光斑直径为 10 μm,通过控制加工路径保证 100 μm 的孔径大小。为了进行皮秒激光加工单晶硅微孔的工艺参数优化,本文开展

了相应的单因素实验,探究激光参数对烧蚀微孔形貌和质量的影响。通过分别改变激光功率、扫描次数和扫描速度等参数在单晶硅上进行微孔加工,总共 13 组单因素实验参数,其中 1 组—5 组改变激光功率,6 组—9 组改变扫描速度,10 组—13 组改变扫描次数,重复频率被固定为 400 kHz。实验参数如表 1 所示。

表 1 皮秒激光加工单晶硅单因素实验工艺参数

序号	最大激光功率比值/%	扫描速度/(mm/s)	扫描次数/次
1	60	100	20
2	70	100	20
3	80	100	20
4	90	100	20
5	100	100	20
6	80	50	20
7	80	200	20
8	80	400	20
9	80	600	20
10	80	100	10
11	80	100	30
12	80	100	40
13	80	100	50

图 3 为不同激光功率下单晶硅微孔的表面烧蚀形貌。可以发现,随着激光功率从 3.2 W 增加至 16.4 W,微孔烧蚀深度加深,微孔内部材料逐渐去除,而孔侧壁的熔融物质沉积情况明显增多,这种沉积现象的原因之一是由于皮秒激光和单晶硅作用时仍未能完全避免热效应。此外,随着激光功率的提高,微孔熔融层吸收的能量也更多更快,区域内形成了更高的气化压力,熔融向外喷溅沉积到侧壁以及边缘的现象更加明显,导致烧蚀微孔边缘粗糙和微孔圆度降低。

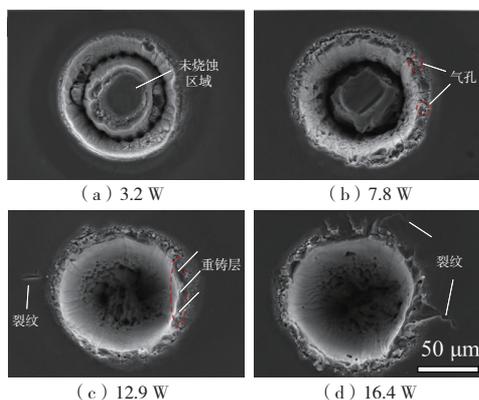


图 3 不同激光功率下单晶硅微孔的表面烧蚀形貌

图 4 为单晶硅微孔直径、深度以及侧壁锥度随激光功率变化的结果。微孔的最大烧蚀深度和直径随着激光功率的增大而增大,锥度随着激光功率的增大而减小。分析可知,激光能量越大,在硅表面沉积的总能量越多,并且达到烧蚀阈值的材料区域越大,导致更大范围和更大深度的材料被烧蚀去除。此外,由于在激光半径方向热扩散梯度远小于深度方向,使得深度方向材料去除量比半径方向多,导致微孔锥度减小。

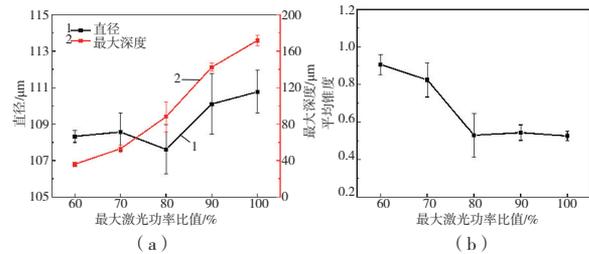


图 4 不同激光功率对微孔尺寸的影响

图 5 和图 6 分别给出了不同扫描次数下的微孔烧蚀形貌和扫描次数对微孔轮廓的影响规律。由图 5 可知,随着扫描次数的增加,微孔侧壁重铸层的厚度不断增大,边缘沉积的烧蚀产物也逐渐增多,同时微孔入口圆度均匀性也有所降低。从图 6 中可以看出,微孔的最大烧蚀深度随扫描次数增大而增大,锥度随扫描次数增大而减小,其主要原因与烧蚀区域沉积的总能量变多有关。但孔径随着扫描次数增加先上升后下降,分析其主要原因,可能是随着扫描次数逐渐增大,孔内以及底部的烧蚀去除物数量变多,逐渐向外喷溅和沉积到微孔边缘,使得半径减小,并超过了微孔边缘激光能量沉积对孔径增大的影响,最终导致在高扫描次数下的孔径变小。

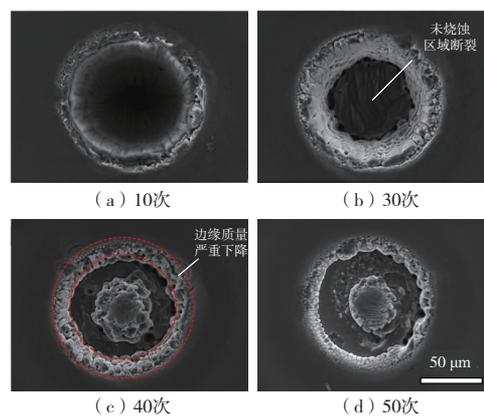


图 5 不同扫描次数下单晶硅微孔的表面烧蚀形貌

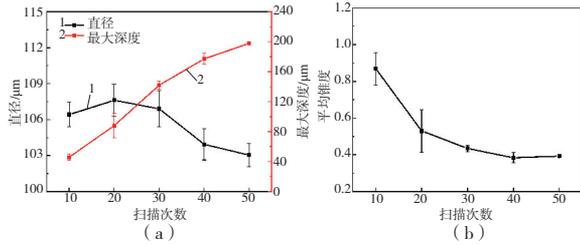


图6 不同扫描次数对微孔尺寸的影响

不同扫描速度加工出的微孔表面形貌和扫描速度对微孔轮廓的影响规律如图7和图8所示。从图7中可以发现,过低的扫描速度会加大烧蚀程度,使裂纹的产生增多,但微孔圆度会有所提高。提高扫描速度在一定程度上可以减少热影响区域的大小以及烧蚀碎屑的沉积,但刻蚀的微孔边缘不够均匀,会极大地影响微孔圆度和边缘质量。由图8可知,微孔直径和最大烧蚀深度随着扫描速度的提高而降低,微孔锥度随着扫描次数提高而增大,这是因为扫描速度的增加,激光脉冲数和重叠率都相应减小,导致材料去除率下降。综上所述,较低和较高的扫描速度都会对微孔的尺寸和表面质量造成严重影响,因此在激光加工微孔时需要合理选择激光扫描速度,使其能够同时保证孔口的表面质量和微孔的圆度。

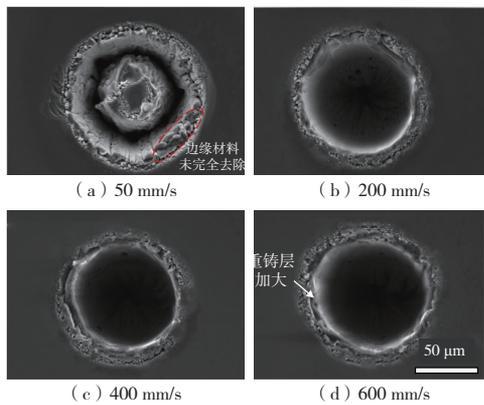


图7 不同扫描速度单晶硅微孔的表面烧蚀形貌

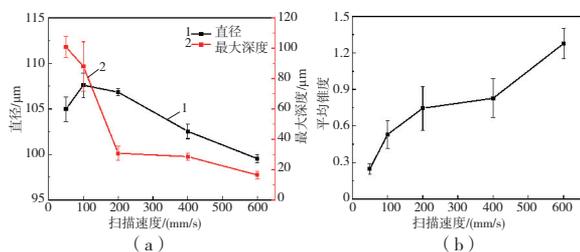


图8 不同扫描速度对微孔尺寸的影响

在综合考虑烧蚀质量和微孔圆度的情况下,初步选择的激光功率范围为7.8~16.4 W,扫描次数为20~40次,扫描速度为100~200 mm/s,并进一步采用正交实验来优化工艺参数。

### 2.2 激光加工工艺参数优化

针对激光功率、扫描次数、扫描速度3种主要的影响因素,分别选取3个水平来进行正交实验,因素水平如表2所示。实验选择的4个评价指标为:微孔孔径接近100  $\mu\text{m}$ 、最大孔深接近150  $\mu\text{m}$ 、锥度越低、圆度越高。每组实验参数钻取3 $\times$ 3个微孔,通过三维激光共聚焦显微镜对这些微孔的轮廓进行测量,计算整理出每个实验组下小孔的平均深度、平均孔径以及平均锥度作为有效参考值。正交实验要素设计及结果如表3所示。

表2 因素水平表

水平	A 平均功率/W	B 扫描速度/(mm/s)	C 扫描次数/次
1	7.8	100	20
2	12.9	150	30
3	16.4	200	40

表3 正交实验要素设计及结果

序号	水平			深度/ $\mu\text{m}$	孔径/ $\mu\text{m}$	锥度
	1	2	3			
1	1	1	1	54.06	109.54	0.546
2	1	2	2	59.09	112.27	0.497
3	1	3	3	60.37	111.71	0.503
4	2	1	2	140.25	118.04	0.262
5	2	2	3	147.01	106.52	0.280
6	2	3	1	54.10	120.03	0.651
7	3	1	3	213.27	115.86	0.160
8	3	2	1	90.53	124.20	0.445
9	3	3	2	105.80	117.27	0.430

图9为各参数组下皮秒激光烧蚀单晶硅微孔的三维轮廓形貌。通过对实验测量结果进行极差分析,如表4所示,并利用综合平衡法进行激光加工参数的优选。由于激光功率对烧蚀微孔深度、直径、锥度的影响权重依次位于1、1、3位,因此首先选取合适的激光功率,实验中发现过低或过高的激光功率会分别导致小孔中心材料残余、边缘重铸层加厚以及圆度降低等问题,故激光功率可选取符合要求的直径与深度,同时锥度适中的12.9 W;扫描次数对各评价指标的

影响权重分别排在 2、2、1 位,分析可知,较低的扫描次数下存在加工深度较浅以及小孔锥度偏大的问题,因此各项指标均较好的 40 次扫描次数为最优选择;扫描速度对各评价指标的影响权重仅分别排在 3、3、2 位,考虑其中符合要求直径与深度的参数,可取 100 mm/s、150 mm/s,但实

验中发现低的扫描速度会加大边缘碎屑堆积和烧蚀损伤,故选择锥度均值更加合适的 150 mm/s 的扫描速度。根据上述结果,优化后的激光参数组合为 12.9 W-150 mm/s-40 次-400 kHz,利用该参数单次加工的微孔孔径为 106.52  $\mu\text{m}$ ,孔深为 147.01  $\mu\text{m}$ ,锥度较低(0.280),基本符合预期指标。

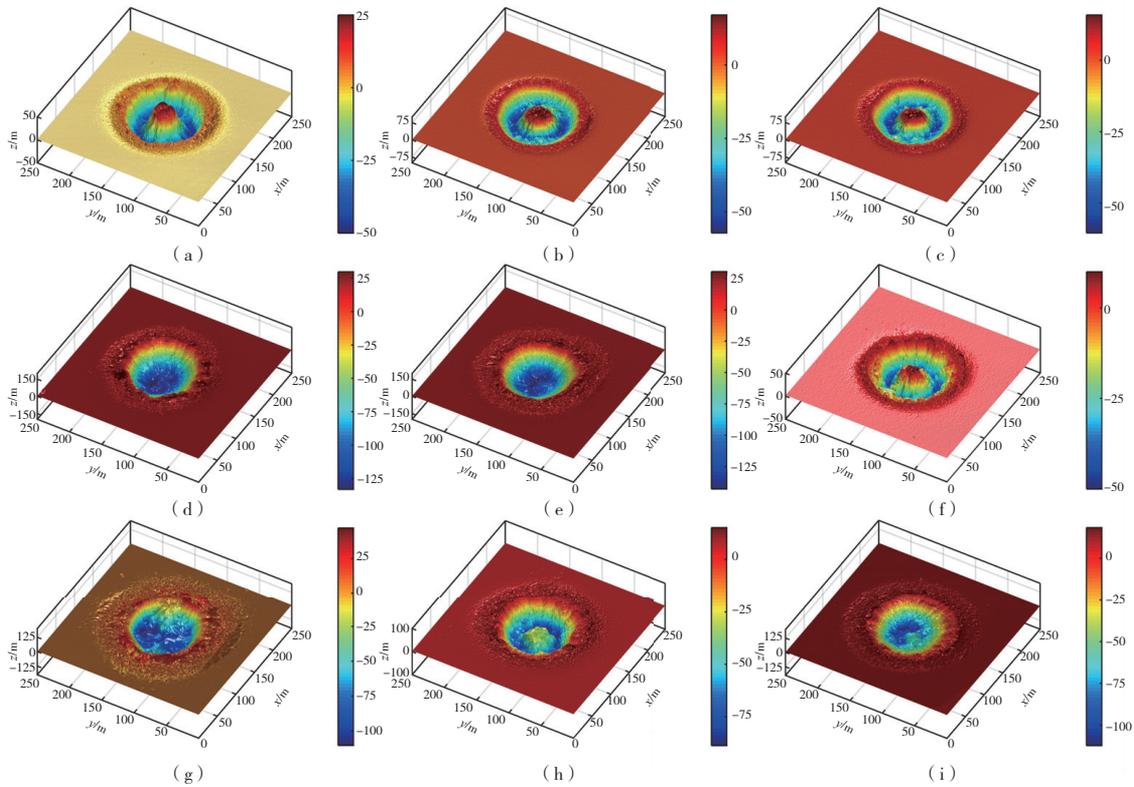


图 9 各参数下烧蚀单晶硅微孔的三维轮廓图像。(a)-(i) 参数组合 1 至参数组合 9

表 4 正交实验结果极差分析

水平	直径/ $\mu\text{m}$			最大深度/ $\mu\text{m}$			平均锥度		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K1	333.505	343.435	353.765	173.515	407.570	198.680	1.546	0.968 0	1.643
K2	344.590	342.985	347.575	341.355	296.625	305.135	1.193	1.222	1.188
K3	357.330	349.005	334.085	409.595	220.270	420.650	1.034	1.584	0.942
k1	111.168	114.478	117.922	57.838	135.857	66.227	0.515	0.323	0.548
k2	114.863	114.328	115.858	113.785	98.875	101.712	0.398	0.407	0.396
k3	119.110	116.335	111.362	136.532	73.423	140.217	0.345	0.528	0.314
极差	7.942	2.001	6.560	78.693	62.433	73.990	0.171	0.205	0.234

### 2.3 最优参数组合下的激光微通孔加工试验

基于最优参数组合(12.9 W-150 mm/s-40 次-400 kHz),进行了激光焦距分段进给的微通孔加工实验,用以制备深度为 525  $\mu\text{m}$ ,直径约为 100  $\mu\text{m}$ 的阵列通孔。实验中为尽量避免激光对孔烧蚀的影响,激光焦距的单次进给距离

为 0.15 mm,进给次数为 4 次,总计加工次数为 5 次。图 10 为微孔出口和入口处的表面烧蚀形貌。相比与没有进行优化参数时微孔存在的边缘缺失、大范围裂纹、圆度较低以及轮廓中心处未去除材料等现象,可明显地看出,优化参数下加工的微孔,其整个入口轮廓层次清晰,中心无沉积物堆积,边缘较为完整,出口处小孔圆度较高。最终计

算得到的微孔平均入口孔径为  $107\ \mu\text{m}$ , 出口孔径为  $35\ \mu\text{m}$ , 其锥度为 0.137。对于微孔出入口边缘存在的重铸层以及碎屑堵塞, 后续将通过氢氟酸腐蚀去除, 以提升微孔表面质量和微孔出口的孔径。

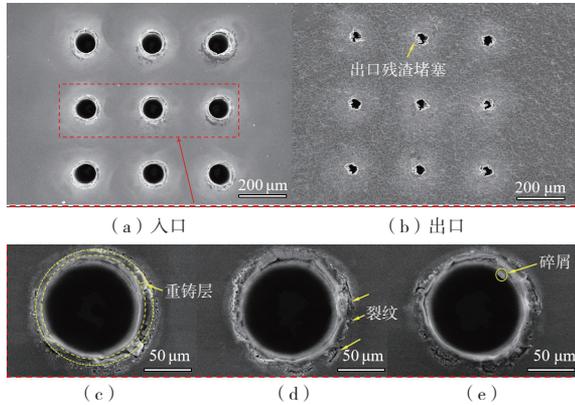


图 10 优化参数后的微孔烧蚀表面形貌

### 3 结语

通过皮秒激光单晶硅微孔加工实验, 得到了不同皮秒激光参数与单晶硅微孔质量的依赖关系。通过单因素实验, 分别研究了皮秒激光功率、扫描速度以及扫描次数对单晶硅微孔的表面质量、加工深度、入口直径以及微孔锥度的影响规律。基于单因素实验结果, 选取合理的激光参数范围进行了正交实验, 优化得到的最佳加工工艺参数组合为  $f=400\ \text{kHz}$ 、 $p=12.9\ \text{W}$ 、 $v=150\ \text{mm/s}$ 、 $n=40$ , 并最终在单晶硅表面加工出了直径为  $107\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $525\ \mu\text{m}$ , 锥度为 0.137 且质量较好的微通孔。

#### 参考文献:

[1] 王庆伟. 单晶硅的飞秒激光湿法刻蚀加工技术及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

[2] GAO Y F, YU C Y, HAN B, et al. Picosecond laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on crystalline silicon [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2020, 19:100538.

[3] 郎鹏, 高志方, 牛艳红. 3D 封装与硅通孔 (TSV) 工艺技术[J]. *电子工艺技术*, 2009, 30(6):323-326.

[4] WANG H J, YANG T. A review on laser drilling and cutting of silicon [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(10):4997-5015.

[5] GUO H M, CAO S B, LI L, et al. A review on the mainstream through-silicon via etching methods [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 137:106182.

[6] 王玺, 雷武虎, 张永宁, 等. 193 nm 紫外激光对单晶硅的损伤特性研究 [J]. *航天电子对抗*, 2023, 39(5):44-47, 64.

[7] 储成龙, 汪奇文, 张振, 等. 单晶硅表面微结构纳秒脉冲激光加工研究 [J]. *机械制造与自动化*, 2022, 51(1):23-26.

[8] 陈海鹏, 王浩, 欧阳文泰. 紫外超短脉冲激光硅表面微槽刻蚀研究 [J]. *应用激光*, 2024, 44(4):15-20.

[9] LAAKSO M J O, PAGLIANO S, SHAH U, et al. Water in contact with the backside of a silicon substrate enables drilling of high-quality holes through the substrate using ultrashort laser pulses [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2):1394-1407.

[10] 周嘉, 周辽, 欧阳励, 等. 基于 CBDC 优化超声辅助水下激光切割单晶硅的工艺 [J]. *激光技术*, 2024, 48(6):913-921.

[11] LEE Y H, CHOI K J. Analysis of silicon via hole drilling for wafer level chip stacking by UV laser [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(4):501-507.

[12] 王锐, 巫海文, 何俊杉, 等. 红外纳秒激光工艺参数对硅晶圆单次扫描烧蚀切割质量的影响 [J]. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2025, 43(2):55-60.

[13] SHAHEEN M E, GAGNON J E, FRYER B J. Studies on laser ablation of silicon using near IR picosecond and deep UV nanosecond lasers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 119:18-25.

[14] SINGH S, SAMUEL G L. Ultrashort pulse laser micro drilling of silicon [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 04:133.

[15] JIAO L S, ZHENG H Y, ZHANG Y L, et al. Picosecond laser drilling of silicon with applied voltage [J]. *SN Applied Sciences*, 2018, 1(1):80.

[16] DÖRING S, RICHTER S, HEISLER F, et al. Influence of ambient pressure on the hole formation in laser deep drilling [J]. *Applied Physics A*, 2013, 112(3):623-629.

[17] 陈天琦, 杨坚, 贾天卿. 飞秒激光脉冲序列烧蚀硅的孔型质量研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(6):116-125.

[18] TANG C W, LI K M, YANG M K, et al. Improving the dielectric breakdown field of silicon light-emitting diode sub-mount by a hybrid nanosecond laser drilling strategy [J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(3):420-427.

[19] 张喆, 宋琦, 张昆鹏, 等. 平顶飞秒激光开槽硅晶圆工艺仿真与实验研究 [J]. *中国激光*, 2023, 50(20):2002202.

[20] GAO B, CHEN T, CHEN Y, et al. Fabrication of through micro-hole arrays in silicon using femtosecond laser irradiation and selective chemical etching [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(10):107901.

收稿日期: 2024-01-12