材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260406001

晶硅微通孔激光冲击磨粒与电化学复合加工实验与仿真研究

谢文博,张文颉,朱　浩*

(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

摘　要: 针对激光加工单晶硅微孔过程中存在的重熔物堆积、圆度误差大及表面质量差等问题,文章提出一种微磨粒辅助激光电解复合加工方法。利用皮秒激光定域提升晶硅导电性,进而增强局域电化学阳极腐蚀,同时通过激光液下空化驱动微磨粒定域冲蚀,实现多场协同减材。通过对比实验系统分析不同加工工艺的效果,并进一步探讨激光功率对加工质量的影响,同时构建分子动力学模型揭示微磨粒冲蚀的微观机理。结果表明,该复合工艺可显著改善微孔加工质量:孔径由335.2 μm增至449.3 μm,提升34%,圆度误差由12.2%降至2.7%;在适宜激光功率范围内可获得良好的表面形貌,而过高功率会加剧电化学腐蚀及表面缺陷。仿真结果表明,微磨粒冲蚀减材主要由磨粒棱角与顶点的划擦作用主导。该研究为单晶硅高质量微孔加工提供了新的技术路径与理论依据。

关键词: 单晶硅;激光电化学;微磨粒冲蚀;分子动力学;微孔加工

中图分类号: TN305　**文章编号:** 1001－5868(2026)05－0912－07

Fabrication of Micro-Through-Holes in Silicon Wafers by Laser-Induced Cavitation-Driven Abrasive Erosion and Laser-Enhanced Electrochemical Etching: Experiments and Simulations

XIE Wenbo, ZHANG Wenjie, ZHU Hao

(**School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, CHN**)

Abstract: Aiming to address the problems of remelted material accumulation, large roundness error, and poor surface quality associated with the laser machining of micro-holes in monocrystalline silicon, this paper proposes a hybrid machining method using micro-abrasive-assisted laser-electrochemical machining. A picosecond laser is used to locally improve the conductivity of silicon crystal, thereby enhancing localized electrochemical anodic dissolution. In parallel, laser-induced cavitation in the processing liquid drives micro-abrasives to perform localized erosion, thereby enabling multi-field synergistic material removal. Comparative experiments are conducted to systematically analyze the effects of different machining processes, and the influence of laser power on the resulting machining quality is further investigated. In addition, a molecular dynamics model is established to provide further insight into the microscopic mechanism of micro-abrasive erosion. The results demonstrate that the proposed hybrid process can significantly improve the overall quality of micro-hole machining: the hole diameter increases from 335.2 μm to 449.3 μm, corresponding to an increase of 34%; the roundness error is reduced from 12.2% to 2.7%. Favorable surface morphology can be obtained within an appropriate range of laser power, while excessive power

收稿日期:2026－04－06.

基金项目:国家自然科学基金项目(52275431);江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX25_4174).

*通信作者:朱　浩

aggravates electrochemical corrosion and increases the occurrence of surface defects. Simulation results further reveal that material removal by micro-abrasive erosion is dominated by the scratching action exerted by abrasive edges and vertices. This study provides a novel technical approach and theoretical basis for the fabrication of high-quality micro-holes in monocrystalline silicon.

Key words: monocrystalline silicon; laser electrochemical machining; abrasive erosion; molecular dynamics; micro-hole fabrication

0　引言

单晶硅作为半导体工业的基石，凭借优异的物理化学特性，广泛应用于集成电路、微型机电系统（MEMS）及光电传感器等领域[1-2]。然而，单晶硅显著的本征脆性导致其在室温加工中极易产生微裂纹与崩边，严重制约了其在柔性电子及汽车芯片等高端领域的应用[3]。为此，超快激光加工技术凭借极短的能量沉积时间和非线性吸收效应，成为实现脆性材料微纳制造的核心方案[4-5]。其机制在于通过多光子电离诱导等离子体形成，引发非热熔融相变，实现原子尺度的定域去除，从而抑制宏观热损伤。但研究发现，在 1×10^6 Hz高频率加工下，残余热累积效应仍会增加晶格缺陷，并在边缘形成 50～200 nm 厚的重铸层，严重影响 PN 结器件的载流子寿命与电学稳定性[6]。为弥补单一激光加工的缺陷，激光-电化学复合加工技术应运而生。该技术结合激光的定域激活特性与电化学溶解的去除优势，通过激光瞬时提升局部电导率以构建溶解通道，可实现材料的选择性去除。相比单一工艺，该复合技术能有效降低热输入，减少重铸层与晶格缺陷，优化表面质量[7]。然而，该工艺仍面临两大瓶颈：一是单晶硅在电解液中易生成致密的 SiO_2 钝化膜，阻断电荷传输并导致反应停滞；二是加工产物易在区域内堆积并扰乱电场，限制加工精度与效率的进一步提升[8]。针对上述局限，研究者引入微磨粒射流辅助技术，构建了微磨粒射流辅助激光-电解复合加工体系。在电解液射流的带动下，微磨粒通过机械刮擦与冲击作用实时破除 SiO_2 钝化膜，保障电化学反应持续进行；同时，射流能快速清除熔融物与电解产物，避免电场畸变[9]。该工艺实现了激光激活、电化学溶解与机械强化的深度耦合，有望实现高效率、低损伤的精密加工。

目前，关于该复合工艺的研究多聚焦于实验层面，对于微磨粒与单晶硅表面的微观作用机制（如动态划擦过程、能量传递规律及晶格演变）尚缺乏深入探讨，限制了工艺参数的精确优化。分子动力学（MD）仿真作为研究微观加工行为的有效手段，能直观呈现原子级的位移与晶格畸变规律[10-11]。因此，本文采用实验与仿真相结合的方法，通过开展复合加工实验探究工艺参数对加工质量的影响，并借助 MD 仿真揭示微磨粒的微观作用机理，旨在为该复合加工工艺的参数优化与工程应用提供理论支撑。

1　加工机理及实验装置

1.1　激光辐照定域增强单晶硅电导率的机理

激光辐照定域增强电导率是微磨粒辅助超短脉冲激光电解复合加工的核心前提，其本质是超短脉冲激光通过多效应协同，实现单晶硅局部电导率的瞬时、精准提升，为后续电化学溶解构建有效导电通道。超短脉冲激光以极高峰值功率将能量瞬时沉积于单晶硅表面，在不破坏基体整体结构的前提下，通过光热效应、光电效应及瞬态晶体缺陷辅助三重作用，使辐照区域定域升温。高温与光子能量共同诱发价带电子向导带跃迁，导致非平衡载流子浓度急剧升高，进而使该区域电导率呈指数级提升。以单晶硅为阳极、金属铜板为阴极、NaOH 为电解液构建电解回路后，激光辐照的高导电区域成为优先导电通道，在外加电压作用下，硅原子发生阳极氧化反应，定域形成软质氧化层[12]；后续激光空化可驱动微磨粒高速冲蚀/划擦，有效去除氧化层，促进后续电化学反应持续进行。图 1 所示为三者协同加工原理示意图。

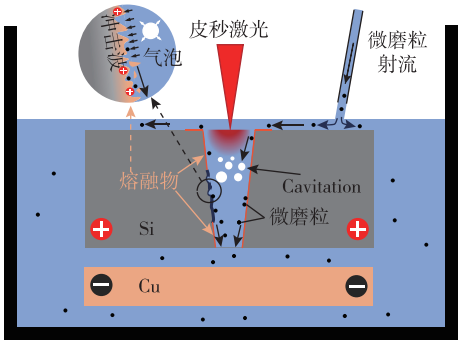


图 1　微磨粒辅助激光电解加工原理示意图

1.2 验证方案与加工装置

图2为微磨粒射流辅助激光电解加工单晶硅实验装置示意图。实验采用晶向〈100〉、厚度约500 μm的单面抛光单晶硅片作为电解阳极，且其上表面与电解液液面间距设为2 mm。实验前经无水乙醇超声波清洗5 min；电解阴极尺寸为100 mm×100 mm×3 mm铜板，平行置于阳极正下方2 mm处。电解液采用质量分数为10 wt%的NaOH溶液与质量分数为0.5 wt%、平均直径为0.5 μm的金刚石微粉混合而成。射流装置由ZX60 A-24T型直流增压泵提供动力，可稳定输出最大流速为6 m/s的电解液磨粒射流，保障加工过程稳定。皮秒激光加工系统采用德国EdgeWave公司PX100-1-GM型Nd:YAG红外皮秒脉冲激光器，其光斑直径为20 μm、脉宽为12 ps、最小脉冲频率为0.2 MHz、波长为1 064 nm、峰值输出功率为70 W；配套高倍影像(CCD)三坐标工作台及计算机控制系统，实现激光焦点在单晶硅上表面的精准对焦。实验电源采用GKPT平波脉冲可调电源，最高输出电压为50 V，满足电化学实验需求。此外，利用扫描电子显微镜(SEM，Hitachi S-3400 N、JEOL JSM-7800 F)观测单晶硅加工表面及孔壁的形貌特征。

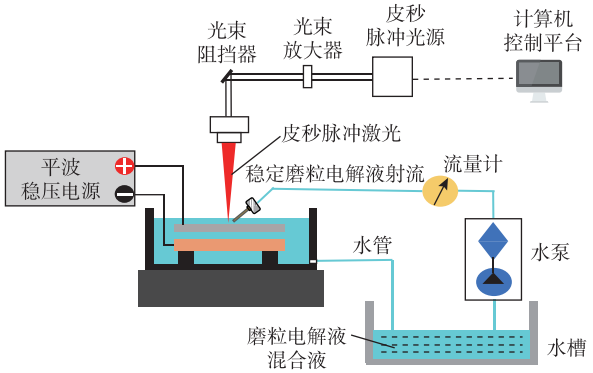
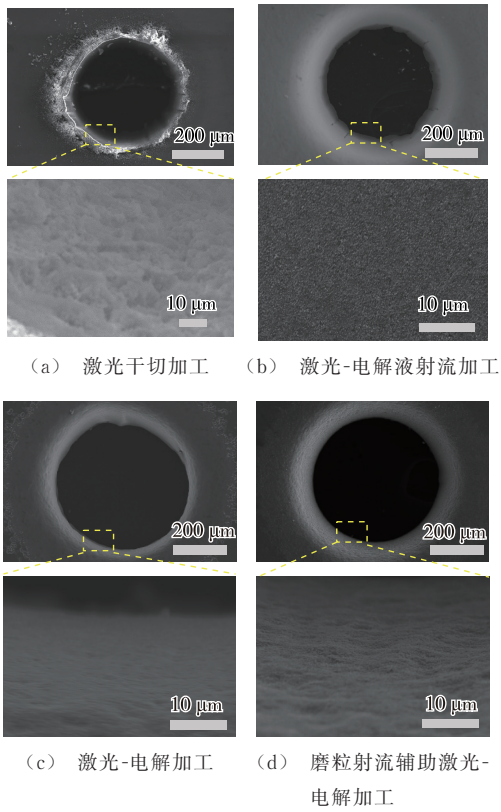


图2 微磨粒辅助激光电解加工单晶硅实验装置示意图

2 实验结果与讨论分析

2.1 对比实验验证

如图3所示，在相同激光参数条件下，分别采用激光干切、激光-电解液射流、激光-电化学以及磨料射流辅助激光电解复合加工工艺对单晶硅进行微孔加工。实验参数统一设定为：激光功率P=12.9 W、激光频率F=0.2 MHz、扫描次数N=150、图层次数n=12、单次进给量f=0.05 mm、扫描速度V=300 mm/s、电解电压U=30 V(平波稳压)、射流速度v=5 m/s、加工时间T=220 s。



(a) 激光干切加工 (b) 激光-电解液射流加工

(c) 激光-电解加工 (d) 磨粒射流辅助激光-电解加工

图3 硅晶圆微孔及内壁表面形貌

图3展示了四种不同工艺下单晶硅通孔的形貌特征。图3(a)的下部分为激光干切加工结果及孔壁形貌局部放大图，可以看出孔的周围存在大量重熔物，孔壁表面呈现明显的凹凸不平结构。这主要是因为理论上皮秒激光可实现“冷加工”，但实验中采用的兆赫兹高重复频率激光在极短时间内持续输入高能量，导致材料产生高温熔融或汽化产物，而这些高温产物尚未充分扩散，下一脉冲已到达，最终在加工结束后冷凝附着于孔周围，从而降低了表面质量。

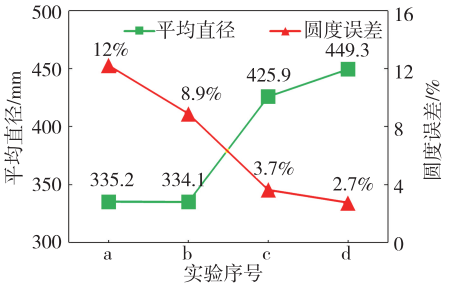
图3(b)为在激光干切基础上引入电解液射流的孔壁形貌图。尽管射流速度较低，但其有效带走了加工过程中产生的热量及部分熔融物和残渣，改善了孔的表面质量。局部放大图显示孔壁重熔物显著减少，内壁质量得到提升。然而，该方法所得微孔的圆度仍与理想状态存在较大差距，难以满足实际应用需求。

为进一步改善加工质量，在此基础上引入电化学溶解作用。如图3(c)所示，在图3(b)条件下施加30 V稳压电压，形成激光-电化学复合加工。结果表明，该方法可获得表面质量更高、孔径更大的微孔结构，相较于前两种工艺，孔周围的重熔物与残渣几乎完全消除，孔径增大约30%。但与此同时，

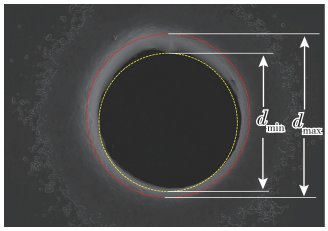
复合工艺引入了新的问题，即电解过程中产生的杂散腐蚀，在孔周围形成局部凹坑，影响了表面完整性与粗糙度。

针对上述问题，本文进一步在激光电化学加工基础上，在电解液射流中加入粒径为 0.5 μm 的金刚石微磨粒。如图 3(d)所示，在激光诱导空化作用下，微磨粒被加速并冲击熔融硅表面，其不规则结构对经激光软化的单晶硅产生高效划擦作用，从而显著提升加工质量。同时，磨粒的机械作用有效破除电解过程中的钝化层，显著提高微孔圆度，并抑制杂散腐蚀，使电化学腐蚀产生的凹坑基本消除。

图 4 给出了四种工艺下微孔直径与圆度误差的量化对比，其中，平均直径 $d=\frac{d_{\max}+d_{\min}}{2}$，圆度误差 $\lambda=\frac{d_{\max}-d_{\min}}{d_{\max}}\times 100\%$。由图 4(a)可知，在工艺优化过程中，加工性能呈现逐步提升的趋势：相较于激光干切，激光-电解液射流仅解决重熔物问题，孔径提升微弱，但圆度误差由 12% 降至 8.9%；在引入电化学加工后，阳极溶解提升材料去除效率，激光定域增强导电性并促进电化学反应，孔径由 335.2 μm 提升至 425.9 μm(增幅 27%)，圆度误差降至 3.7%；在添加微磨粒后，孔径进一步提升至 449.3 μm，磨粒划擦作用使圆度误差降至 2.7%。综上，通过逐步优化工艺，磨粒射流辅助皮秒激光电解复合加工相较于初始的激光干切，孔径提升 34%，圆度误差降幅超 4 倍，充分验证了该复合工艺的优越性。



(a) 四种工艺下微孔平均直径与圆度误差

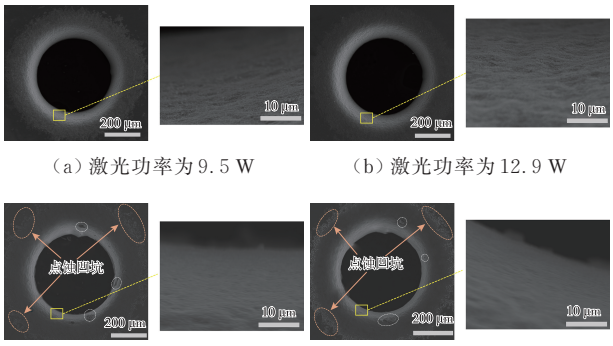


(b) 孔径测量示意图

图 4　四种工艺下微孔直径与圆度误差的对比图

2.2　激光功率的影响

尽管电化学作用和微磨粒均对材料去除过程产生影响，但主导机制仍为皮秒超快激光。因此，本节重点研究激光实际功率对加工效果的影响，其余参数与对比实验保持一致，实验结果如图 5 所示。



(a) 激光功率为 9.5 W　　(b) 激光功率为 12.9 W

(c) 激光功率为 17.9 W　　(d) 激光功率为 19.4 W

图 5　不同激光功率下微孔与侧壁形貌

如图 5(a)和(b)所示，当激光功率为 9.5 W 和 12.9 W 时，微孔圆度及表面形貌均表现良好，电化学腐蚀作用较弱，孔周围未出现明显腐蚀凹坑，且孔内壁质量基本一致，表明该功率范围适用于激光电化学复合加工。

如图 5(c)和(d)所示，当激光功率提高至 17.9 W 和 19.4 W 时，电化学腐蚀显著增强，微孔表面周围出现明显腐蚀凹坑，并随功率增加而加剧。然而，孔内壁未观察到明显腐蚀现象，这可能是由于孔径较小，电解液难以充分进入孔内，阳极溶解作用受限；在孔口区域，由于电解液射流持续存在，电化学反应得以持续进行，从而形成明显凹坑。

此外，在较高功率条件下，孔周围出现部分重熔物，表明随着激光功率增加，磨料射流不能及时带走激光产生的热量，导致熔融物在液体中冷凝，削弱了磨粒的辅助加工效果。因此，过高激光功率不利于复合加工过程的稳定进行。

图 6 进一步给出了微孔直径及圆度误差随激光功率的变化规律。结果表明，随着激光功率由 9.5 W 增加至 19.4 W，微孔直径仅由 443.1 μm 增加至 452.2 μm，变化幅度约为 1.97%，考虑测量误差后可认为变化不显著。这说明在本实验条件下，激光功率对孔径影响有限，可能受激光扫描路径的约束。相比之下，圆度误差随激光功率增加显著增大，由 2.7% 上升至 5.5%。其原因在于高功率下激光热效应增强，促进电化学反应，加剧材料局部溶

解，同时射流冷却能力不足，导致加工均匀性下降，从而使圆度变差。

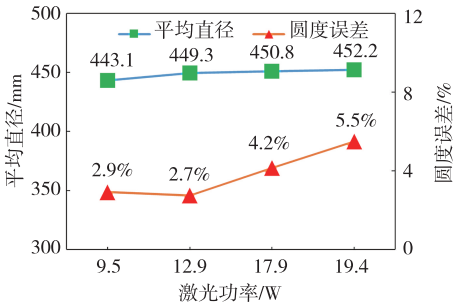


图6 不同激光功率下微孔平均直径与圆度误差

3 微磨粒冲蚀单晶硅仿真

3.1 分子动力学模型的建立

为深入揭示微磨粒在复合加工中的作用机制，本节开展微磨粒冲蚀单晶硅的MD仿真研究。MD方法能够从原子尺度解析材料去除过程中的微观演化行为，实时捕捉原子位移、晶格畸变及相结构转变等动态信息，且无需预设材料本构关系，可有效弥补传统有限元方法在原子尺度描述方面的不足，为实验现象提供理论支撑。

其物理机制为：当皮秒超快激光在液体环境中作用时，产生高能量密度等离子体并迅速膨胀，形成强烈压力脉冲；在该高压作用下，液体中产生空泡并经历膨胀与塌陷过程，在溃灭瞬间释放高能量并形成冲击波，从而驱动微磨粒高速冲击已软化的单晶硅表面。相关理论已在前期研究中进行了系统阐述[9,12]，此处不再展开。

需要特别指出的是，由于MD仿真受限于计算机的算力极限，模型中微磨粒的物理尺寸（40 Å）与实际实验尺寸（0.5 μm）存在跨尺度差异。若在微观尺度下直接采用实验中的宏观流体速度（如5 m/s），仿真模型中微磨粒质量极小，其所携带的动能（$E_k=1/2\ mv^2$）与冲量将远低于实际能量水平，因此无法有效激发单晶硅的微观去除行为。为解决上述尺度限制问题，本模型采用计算力学领域常用的等效动能补偿策略，即通过将微磨粒的初始冲击速度显著提升至15 Å/ps（即1 500 m/s），来补偿因空间尺度缩小而导致的质量缺失。这种通过提升冲击速度以等效复现宏观高能冲击响应的方法，目前已广泛应用于MD冲蚀跨尺度仿真，其可靠性也已得到证实[12-14]。

在模型构建方面，基于前期单晶硅冲蚀MD模型[12]，并结合图7中扫描电镜观察到的实际磨粒形貌，对微磨粒几何结构进行改进，建立如图8所示的三棱锥型微磨粒冲蚀模型。传统模型中常采用规则球形磨粒，与实际不规则磨粒存在较大差异，难以准确反映其划擦行为。相比之下，三棱锥结构能够更好地表征实际磨粒的尖锐棱角特征，其顶点在冲蚀过程中起主导作用，具有良好的代表性与建模可行性。



图7 硅通孔内壁上的不规则金刚石微磨粒

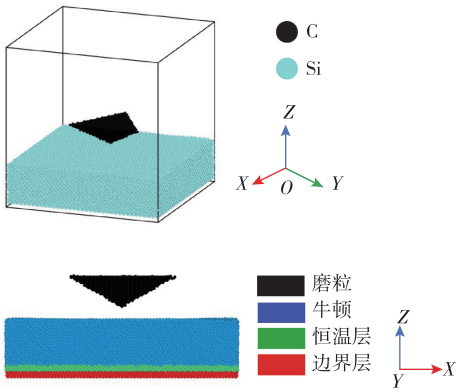


图8 三棱锥型微磨粒冲蚀单晶硅MD模型示意图

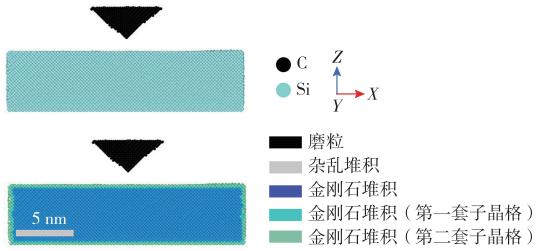
相互作用势函数方面，采用Tersoff三体势函数描述Si—Si、C—Si及C—C原子间作用，该势函数已被广泛应用于硅及金刚石体系模拟[15]。在LAMMPS平台上完成仿真，并借助OVITO软件进行结果可视化分析[16-17]，其余参数设置见表1。

表1 MD模拟关键参数

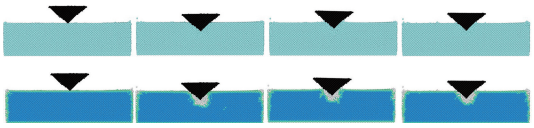
参数	数值
Si区域尺寸/mm^3	20×20×5
弛豫时间/ps	100
Si原子数量	101 306
C原子数量	6 053
牛顿层深度/nm	4
恒温层深度/nm	0.5
边界层深度/nm	0.5
模拟温度/K	300
时间步长/fs	1

3.2　结果与讨论

图 9 展示了三棱锥金刚石磨粒冲击单晶硅基底的全过程。如图 9(a)所示为初始时刻(t=0)，单晶硅原子呈金刚石堆积结构，根据原子在晶胞中的位置(顶点或内部)分为两套子晶格，模型边缘硅原子因晶胞不完整，均表现为子晶格堆积。然后，磨粒以 15 Å/ps 的速度冲击基底表面，部分硅原子受冲击后变为无序堆积。图 9(b)为 t=0.7 ps 时，粒与基底首次接触并开始减速。图 9(c)为 t=2.4 ps 时，磨粒速度首次降至零，此时单晶硅弹性与塑性形变达到最大，凹坑深度最深，原子发生显著位移，局部结构由金刚石晶格转变为无序结构，并形成最大深度的无定形层。图 9(d)为 t=3.7 ps 时，磨粒速度再次为零，此时基底塑性形变未恢复，细微弹性形变部分恢复，无定形层深度略有减小。此后磨粒经多次冲击-回弹过程，于图 9(e)t=10 ps 时仿真结束，基底凹坑与无定形层深度最终稳定。



(a) 仿真初始时刻单晶硅内部原子堆积方式

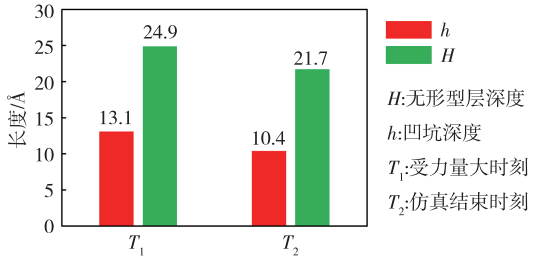


(b) t=0.7 ps　(c) t=2.4 ps　(d) t=3.7 ps　(e) t=10 ps

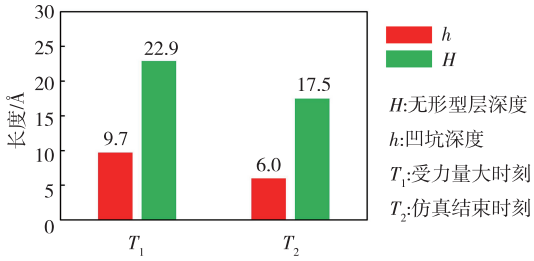
图 9　不同时刻微磨粒与单晶硅相互作用

图 10(a)为受力最大与冲击结束时刻凹坑深度与无定形层深度的对比图，可见碰撞过程中最大无定形层深度为 24.9 Å，最大凹坑深度为 13.1 Å。由于此时磨粒速度首次为零，基底承受最大压应力与弹性形变，仿真结束后，随内应力释放与弹性形变恢复，最大无定形层深度与凹坑深度分别回落至 21.7 Å 和 10.4 Å。该结果较相同速度、相同体积的球形磨粒(图 10(b))，无定形层深度与凹坑深度分别增加 4.2 Å 和 4.4 Å[12]。

图 11 为两种几何形状微磨粒嵌入单晶硅基底的对比图(等价于凹坑体积)，经计算：三棱锥型磨粒嵌入体积约为 1 915 Å^3，球形磨粒嵌入体积约为 2 035 Å^3。该结果表明，虽然三棱锥型磨粒造成的凹坑和无定形层深度更深，但在单晶硅基底上所留的凹坑体积却稍小。因此，在实际磨粒划擦过程中，不规则多面体的棱角与顶点起主要划擦作用，而其平面或椭圆曲面主要发挥碰撞作用，几乎不参与划擦。



(a) 不同时刻三棱锥型磨粒冲击效果



(b) 不同时刻球型磨粒冲击效果

图 10　不同时刻三棱锥与球形磨粒冲击效果对比

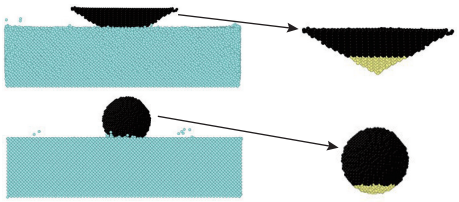


图 11　嵌入单晶硅基底的磨粒体积对比

4　结论

本文提出了一种激光冲击磨粒与电化学复合加工硅晶圆微孔的新型工艺方法，利用皮秒脉冲激光来定域提高单晶硅电导率，促进电解反应进行，同时激光空化驱动微磨粒去除电解钝化层而实现三者耦合协同加工。首先，开展了微磨粒辅助激光电解加工对比实验，研究结果表明该复合加工工艺相较于初始的激光干切，孔径由 335.2 μm 提升至 449.3 μm，提升 34%；圆度误差由 12.2% 降至 2.7%，降幅超 4 倍。其次，探究了激光功率对加工质量的影响，发现随着激光功率的提升，孔径略微增加，但圆度误差和表面点蚀现象严重。最后，通过建立三棱锥型磨粒对单晶硅基底的冲蚀效果仿

真模型，发现微磨粒的划擦作用主要来自于不规则磨粒棱角与顶点，为工艺优化提供了理论依据。

参考文献：

[1] Zarmai M T, Ekere N N, Oduoza C F, et al. A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly[J]. Applied Energy, 2015, 154: 173-182.

[2] 郭东明，康仁科. 半导体基片超精密磨削技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报，2023，59(19)：299-329.
Guo Dongming, Kang Renke. State-of-the-art and prospectives of ultra-precision grinding technology for semiconductor substrates [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(19): 299-329.

[3] Zarudi I, Zhang L. Subsurface damage in single-crystal silicon due to grinding and polishing[J]. Journal of Materials Science Letters, 1996, 15(7): 586-587.

[4] Harb N H, Mutlak F A H. Production and characterization of porous silicon *via* laser-assisted etching: effect of gamma irradiation[J]. Optik, 2021, 246: 167800.

[5] He Y, Yang J, Wang H, et al. Micro-dimple and micro-bulge textures: influence of surface topography types on stick-slip behavior under starved lubrication [J]. Applied Surface Science, 2022, 585: 152501.

[6] Hong M H, Luk'yanchuk B, Huang S M, et al. Femtosecond laser application for high capacity optical data storage [J]. Applied Physics A, 2004, 79(4): 791-794.

[7] Long Y, Shi T, Xiong L. Excimer laser electrochemical etching n-Si in the KOH solution[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(5): 570-574.

[8] Zhang J, Guo H, Lei L, et al. A critical review of the Butler-Volmer equation for the activation polarization of solid oxide fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2024, 613: 234871.

[9] 张文颉，毛东晨，朱 浩. 磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔技术研究[J]. 半导体光电，2025，46(3)：484-492.
Zhang Wenjie, Mao Dongchen, Zhu Hao. Study on abrasive-assisted laser-electrochemical hybrid machining of through-silicon vias[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(3): 484-492.

[10] Chen C, Zhang F, Zhang Y, et al. Single-pulse femtosecond laser ablation of monocrystalline silicon: a modeling and experimental study[J]. Applied Surface Science, 2022, 576: 151722.

[11] Liu J, Wu M, Sun Z, et al. The picosecond laser ablation mechanism of monocrystalline silicon by coupling two-temperature model (TTM)-Molecular dynamic (MD)[J]. Applied Surface Science, 2024, 661: 160022.

[12] Zhu H, Zhang W, Xie W, et al. Hybrid polishing of mm-TSVs using laser cavitation-driven micro-abrasive erosion and laser-enhanced electrochemical corrosion [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 155: 1113-1132.

[13] Chen R, Zhang D, Wu Y. Study on the influence of standoff distance on substrate damage under an abrasive water jet process by molecular dynamics simulation [J]. Friction, 2018, 6(2): 195-207.

[14] Li A C. Molecular dynamics simulations of shock in silicon and diamond[D]. San Diego: University of California San Diego, 2024.

[15] Erhart P, Albe K. Analytical potential for atomistic simulations of silicon, carbon, and silicon carbide [J]. Physical Review B, 2005, 71(3): 035211.

[16] Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics [J]. Journal of Computational Physics, 1995, 117(1): 1-19.

[17] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO-the Open Visualization Tool [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2010, 18(1): 015012.

作者简介：

谢文博(2000—)，男，河南省许昌市人，硕士研究生，主要研究方向为半导体激光电化学复合微加工；

朱 浩(1987—)，男，河南省周口市人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为半导体材料的微细加工技术、特种制造技术及复合加工技术。