材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250311002

硅晶圆通槽激光电化学复合加工试验研究

毛东晨，张文颉，赵康程，朱　浩*
（江苏大学 机械工程学院，江苏 镇江 212013）

摘　要： 单晶硅作为半导体器件的核心基础材料，具有高硬度、高脆性和低断裂韧度等特性，在微纳加工领域面临显著挑战。激光加工技术广泛用于单晶硅微结构加工，但其固有的热效应易导致材料热损伤。针对这一问题，文章提出一种基于激光电化学复合的硅晶圆通槽加工新方法，用于硅晶圆通槽的高质量加工。该方法基于单晶硅导电性随温度升高的物理特性，通过激光的光-热耦合效应激发材料的导电活性，实现激光刻蚀与电化学溶解的协同作用机制。研究揭示了激光诱导电化学加工的物理化学机理，并据此设计了相应的试验装置与工艺方案。对比实验数据表明，激光电化学复合加工在表面质量方面优于传统激光干切方法。通过参数优化实验发现，当施加电压达到40 V时，加工表面粗糙度可显著降低至310 nm，相较于基础工艺有较大提升，展现出优异的加工质量调控能力。

关键词： 激光加工；电化学；硅晶圆；通槽结构
中图分类号： TN305.7　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0293－06

Experimental Study on Laser-Electrochemical Hybrid Machining of Through-Slots in Silicon Wafers

MAO Dongchen, ZHANG Wenjie, ZHAO Kangcheng, ZHU Hao
(**School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, CHN**)

Abstract: Monocrystalline silicon, a basic material for semiconductor devices, is characterized by high hardness, high brittleness, and low fracture toughness, which pose significant challenges to micro-nano processing. Laser machining is widely used to fabricate monocrystalline silicon microstructures, despite the accompanying notable thermal damage. To address this issue, a novel method is proposed for the through-groove machining of silicon wafers based on laser-electrochemical hybrid processing. This method leverages the photothermal coupling effect of lasers and increased conductivity of monocrystalline silicon with temperature, to achieve a combination of laser etching and electrochemical dissolution, thereby effectively improving the machining quality. The mechanism of laser-induced electrochemical machining is elucidated, and a corresponding experimental scheme is designed. Comparative experimental results demonstrated that laser-electrochemical hybrid processing surpasses traditional laser dry cutting methods in terms of surface quality. Further investigations into the effect of the applied voltage on machining surface quality revealed that at a voltage of 40 V, the surface roughness was significantly reduced to 310 nm, achieving optimal machining outcomes.

Key words: laser processing; electrochemistry; silicon wafer; through-slot

收稿日期：2025－03－11.
基金项目：国家自然科学基金项目(5521110022).
*通信作者：朱　浩

0 引言

以微机电系统、先进集成电路、生物医疗开发、太阳能光伏、红外光学材料等为代表的高端制造业深刻影响着社会经济的健康发展和国防安全的自主可控。以硅、锗为代表的第一代半导体材料在上述领域有着极为广泛的应用。然而,单晶硅固有的高硬度、高脆性和低断裂韧度等特性,是典型的脆性难加工材料,这对传统机械加工工艺提出了严峻挑战。在半导体晶片的制造过程中,超精密机械加工技术在切割与抛光等关键工序中发挥着不可替代的作用。Choong等[1]针对单晶硅在加工过程中易产生表面边缘崩碎等问题,通过全槽铣削试验结合天然金刚石刀具,系统研究了(001)晶面硅的微加工性能及边缘崩碎机制。通过对切削力、表面质量和边缘质量的表征,发现切削能受工件剪切应变加工硬化的显著影响,并证明通过采用小进给量、高切削速度以及沿(100)进给方向切削可增强应变加工硬化效应。试验实现了粗糙度为20 nm的良好表面质量和80 μm^3的小边缘崩碎体积,但微裂纹、刀具磨损、加工效率低等问题依旧存在。

激光加工作为一种非接触式加工方法,能够灵活高效地实现多种硬脆材料的微结构加工,有效避免了直接接触式加工导致的机械变形和刀具磨损等问题,其参数化设置对微特征结构的形成具有关键作用[2-4]。尽管如此,传统激光加工技术在实际应用中容易引发热损伤问题,例如热影响区(HAZ)的形成、微裂纹的产生以及重铸层的出现等,这些缺陷可能对加工质量和效率造成显著的不利影响。Zhang等[5]采用515 nm绿光高功率飞秒激光器,系统研究了硅(111)和(100)晶面在飞秒激光刻蚀加工中的差异,并结合电子背散射衍射(EBSD)技术对微观行为特性进行了深入分析。研究结果表明,随着激光平均功率和扫描次数的增加,刻蚀凹槽深度显著增大,其中(111)面的凹槽深度和底部粗糙度均高于(100)面。尽管飞秒激光在理论上可实现冷加工,但实际加工过程中仍存在热积累现象,导致热损伤[6]。此外,低加工效率和高设备成本也限制了飞秒激光加工的广泛应用。为有效控制热损伤并提高加工效率,研究人员引入了水射流技术以实现工件的快速冷却。Madhukar等[7]采用同轴光纤激光-水射流复合加工技术对单晶硅晶圆进行微切槽实验研究。通过该工艺能够有效制备出槽壁接近垂直、底面平整度良好、深度约为520 μm的凹槽结构,其加工质量显著优于氩气辅助激光开槽工艺。然而,同轴光纤激光-水射流复合加工技术在实际应用中仍面临诸多挑战,例如对射流稳定性的严格要求、激光波长范围的限制以及激光与水射流耦合质量的优化等问题。

化学刻蚀加工作为一种基础且重要的微纳加工技术,在单晶硅加工领域得到广泛应用,尤其在半导体制造业中具有重要地位。Li等[8]采用均匀金属辅助电化学刻蚀技术,利用Au催化剂和氢氟酸-过氧化氢水溶液体系,在室温条件下成功制备出晶圆级硅通孔结构,4小时内可高均匀性地加工超过百万个深度为162 μm、直径约为28 μm的微孔,展现出高产率、低成本及与后续工艺兼容的优势。然而,该方法需借助特质掩模层来确定减材位置,难以实现复杂结构加工,且依赖强腐蚀性物质,更适合安全规模化生产。电化学加工(ECM)作为一种特殊的化学蚀刻方法,通过在电解液中施加电流可实现高精度、复杂形状的零件加工。Chang等[9]利用电化学微加工(ECM)技术在HF溶液中对p型Si衬底进行微结构加工。研究结果表明,该方法对高掺杂衬底可实现微米级精度和无掩膜加工,具有各向同性且不受晶向限制的特点,但在低掺杂材料条件下仅适用于极短脉冲(小于3 ns)加工。值得注意的是,硅材电解加工过程中易生成致密钝化层,需借助氢氟酸腐蚀去除,同时硅材较差的导电性也制约了电化学加工效率。

激光与电化学协同作用已经在单晶锗晶圆表面微结构加工方面得到有效验证[10],但在单晶硅微加工方面相关研究尚显匮乏。有鉴于此,本研究基于激光的光-热耦合效应,结合单晶硅材料导电性随温度升高而显著增强的特性,提出了一种激光电化学复合加工硅晶圆通槽的新方法,为单晶硅贯通微结构制备技术的深入研究提供了创新性解决方案。

1 加工机理及试验验证

1.1 激光辐照定域增强单晶硅电导率的机理

Morin等[11-12]通过实验研究证实了单晶硅和单晶锗的电导率随温度升高而显著增大的现象。这一现象主要由两个机制引起:其一,价带电子通过吸收晶格热振动能量跃迁至导带,导致材料内部自由电子密度增加;其二,当半导体材料受到外部辐

照且单光子能量超过禁带宽度时，可激发电子跃迁并产生大量光生电子-空穴对，从而增强材料的导电性能，即产生光电导效应[13]。激光作为一种特殊光源，可在材料内部同时产生局域热效应和光电导效应。通过合理调控入射激光参数，可精确控制材料内部的激光能场和温度场分布，从而实现硅、锗等半导体材料导电性能的定域增强，为定域电解加工提供了可行性，如图 1 所示。上述电导率提升现象均源于入射激光的诱导作用，其增强范围与激光照射区域精确对应，而未受激光照射的区域则维持较低的电导率状态。Zhu 等[10]将纳秒激光辐照与射流定域电解相结合，利用激光在晶圆上表面定域提升材料电导率，同时在中性电解液射流作用下对晶圆下表面相应区域进行加工，成功制备出无氧化产物的高质量微凹坑结构。此外，在本试验中，激光脉冲宽度虽不影响加工结果，但更短的脉冲宽度有助于形成更集中的温度场，从而实现更精确的电导率定域调控。

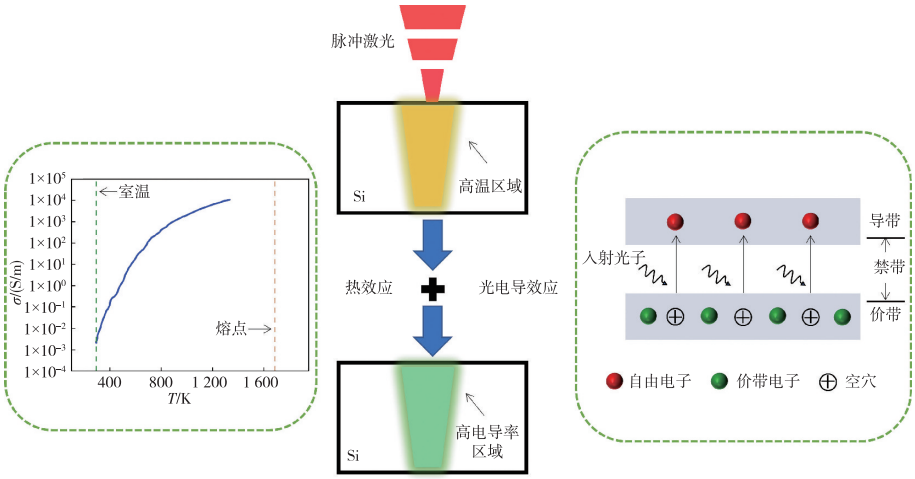


图 1　激光辐照定域提升单晶硅电导率原理示意图

1.2　验证方案与加工装置

图 2 为激光电化学复合加工硅晶圆通槽结构试验方案示意图。采用厚度约为 500 μm 的 n 型 Si 单晶片作为阳极，在其下表面的正下方 2 mm 处平行放置尺寸为 30 mm×30 mm×2 mm 的铜板作为阴极。电解液为质量分数 5 wt% 的 NaCl 和 5 wt% 的 NaOH 去离子水混合溶液。射流由自行设计的稳定低压电解液射流生成装置产生，保证硅片底部与铜片上表面之间充满电解液。本试验采用 JPT 公司生产的 YDFLP-60-M7-M-R 型纳秒脉冲光纤激光器作为光源，波长为 1 064 nm，光束模式为高斯分布，实际聚焦光斑直径约为 30 μm。试验中激光脉冲宽度为 500 ns，激光重复频率设定为 10 kHz，输出功率为 15 W，焦点位于硅片上表面。电解液射流的出口速度为 4 m/s，加工时间为 30 s。试验结束后，将样品在去离子水中进行超声清洗，并烘干备用。

对加工结果进行表征分析。使用扫描电子显微镜（SEMS，Hitachi S-3400N 和 JEOL JSM-7800F）观测加工表面的形态特征，通过 X 射线能量分散性光谱镜（EDS）进行元素组成分析，使用激光拉曼光谱仪（Thermo Fisher DXR）检测加工表面晶体结构的变化。此外，使用激光扫描共聚焦显微镜（Keyence VK-X260 K）测量通槽侧壁表面的面粗糙度。

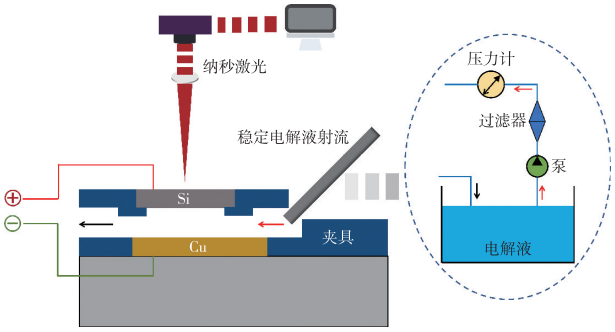


图 2　激光电化学复合加工硅晶圆通槽结构试验装置图

2　结果与讨论

2.1　对比试验验证

采用相同激光参数分别进行激光电化学复合加工（施加电压 40 V）与激光干切加工硅晶圆通槽试验，其通槽侧壁表面形貌对比如图 3 和图 4 所示。在图 3 中，激光干切加工的通槽侧壁表面存在显著的重熔氧化物，在加工的过程中硅材因高温而成熔融状态，当加工结束后便冷却凝固在侧壁表面，其

局部放大图上也显示出不规则氧化物的堆叠。相比之下，图4为相同激光参数下激光电化学复合加工所得的通槽侧壁表面形貌图，其表面则呈现较高平整度，仅残留少量氧化重熔颗粒。

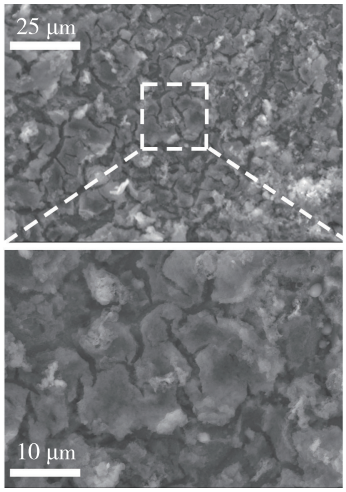


图3 激光干切硅晶圆通槽侧壁表面形貌

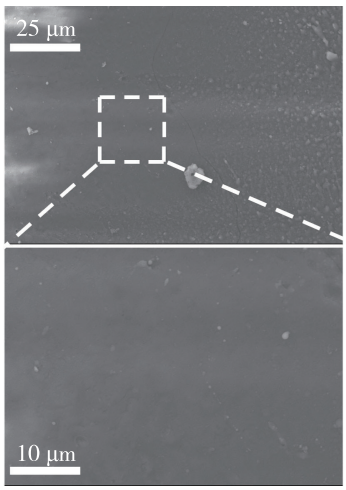
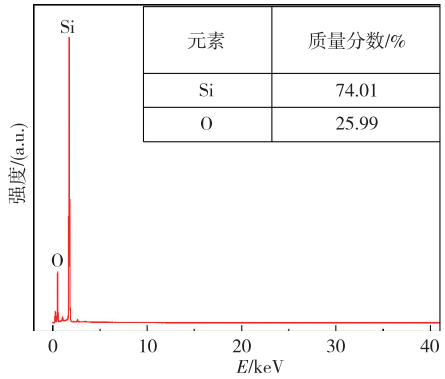


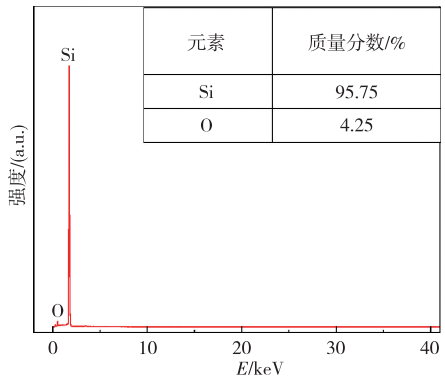
图4 激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面形貌

图5和图6的EDS分析表明，激光干切加工表面氧元素质量分数高达25.99%，而复合加工表面氧元素占比仅为4.25%，降幅达83.6%，与表面形貌特征变化相吻合。图7和图8的拉曼光谱显示，两种加工方式在520 cm^{-1}处均呈现单晶硅特征峰，960 cm^{-1}处均检测到微弱硅氧键伸缩振动峰，光谱一致性表明电化学加工的引入未显著改变表面晶体结构。激光共聚焦显微镜测试结果显示，激光干切加工表面粗糙度为720 nm，而复合加工表面粗糙度降至310 nm，降幅达57%，该结果与SEM形貌观察及EDS分析共同验证了激光电化学复合加工技术的优越性。



元素	质量分数/%
Si	74.01
O	25.99

图5 激光干切硅晶圆通槽侧壁表面EDS图



元素	质量分数/%
Si	95.75
O	4.25

图6 激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面EDS图

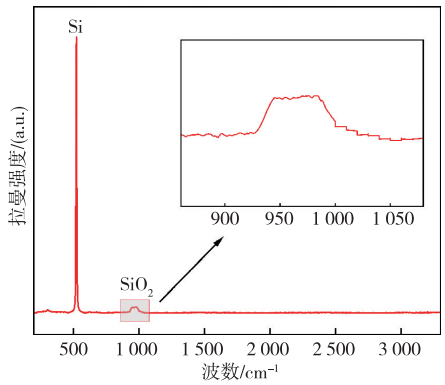


图7 激光干切硅晶圆通槽侧壁表面拉曼光谱

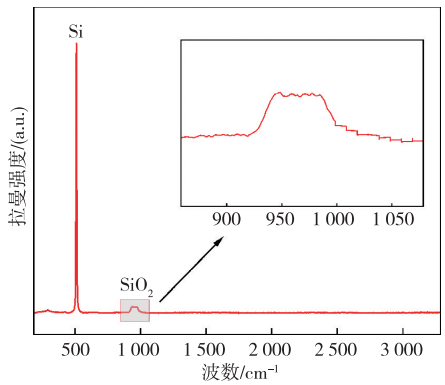
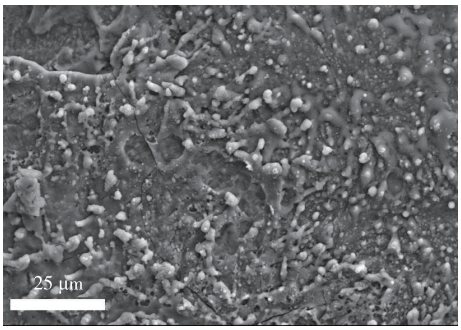


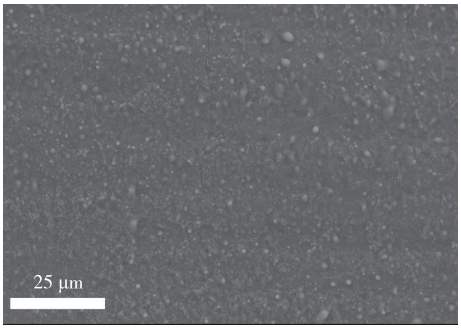
图8 激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面拉曼光谱

2.2　施加电压的影响

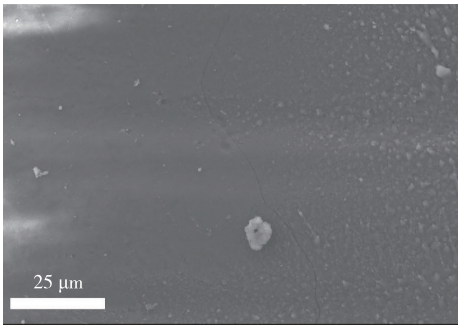
本小节系统考察了外加电压对硅晶圆通槽加工质量的影响规律。基于预设加工参数体系，通过扫描电子显微镜（SEM）对三种工作电压（20，30 和 40 V）下制备的通槽侧壁形貌进行表征分析，如图 9 所示。显微分析表明，当工作电压提升至 40 V 时，可获得表面质量最优的加工形貌。在电压为 20 和 30 V 的工况下，虽然较传统激光干切工艺产生的重熔氧化层厚度显著降低，但仍可观察到明显的残余重熔氧化层。该现象可能归因于电化学腐蚀强度与工作电压的正相关性：降低工作电压将削弱阳极溶解反应的驱动力，会致使电化学腐蚀程度减弱，进而导致电化学加工过程中的材料去除率下降，最终造成重熔氧化层残留量的增加。



（a）V=20 V



（b）V=30 V



（c）V=40 V

图 9　不同施加电压下激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面形貌

为进一步验证上述推论，采用能谱分析和拉曼光谱对表面组分进行定量表征，如图 10 和 11 所示。从图 10 的 EDS 结果图可以看出，通槽侧壁表面的氧元素质量分数也随着施加电压的增加而减小。而加工过程电流变化记录如图 12 所示，当外加电压为 20，30，40 V 时，对应的稳定电流分别约为 32，51，73 mA，即电流随电压增加呈现单调增加趋势。这两个变化趋势均为电压增强效应促进电化学腐蚀反应提供了直接证据。同时，从图 11 的拉曼光谱观察到，在 520 cm^{-1} 处呈现单晶硅峰，在 960 cm^{-1} 处呈现出轻微的硅氧键伸缩振动峰，且三个试样侧壁表面观测结果类似。拉曼光谱结果显示，加工过程中施加电压的变化对通槽侧壁表面晶体结构并无显著影响，拉曼峰之间的一致性证明了这一点。此外，表面粗糙度随电压的变化如图 13 所示，可以明显看出，随着施加电压增加，通槽侧壁表面的面粗糙度有效降低。其中，40 V 下的面粗糙度是 20 V 下的面粗糙度的 46% 左右，该数据趋势与 SEM 形貌观察及 EDS 元素分析结果具有良好的一致性。在电压为 20 和 30 V 的情形下，相较于电压为 40 V 时，

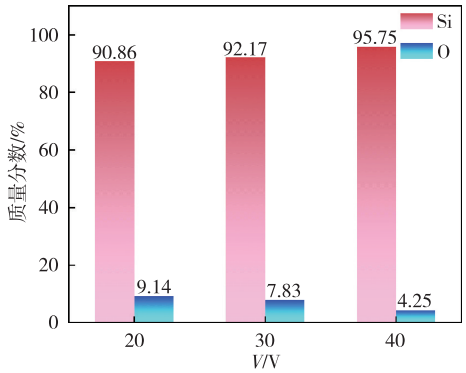


图 10　不同施加电压下激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面 EDS 图

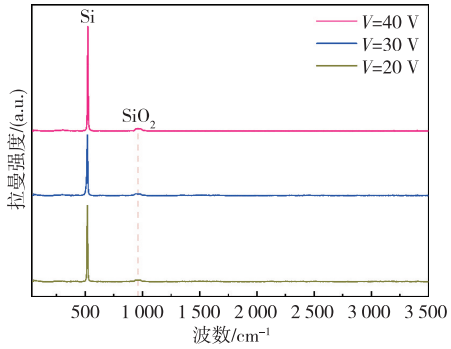


图 11　不同施加电压下激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面拉曼光谱

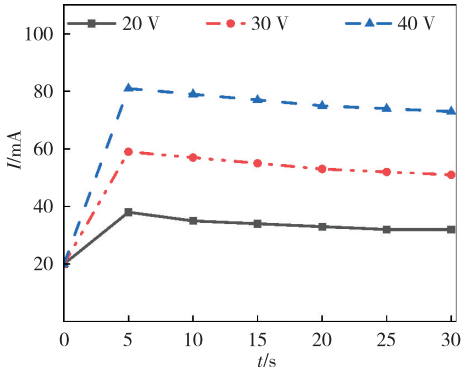


图 12 不同施加电压下激光电化学复合加工硅晶圆通槽的电流记录图

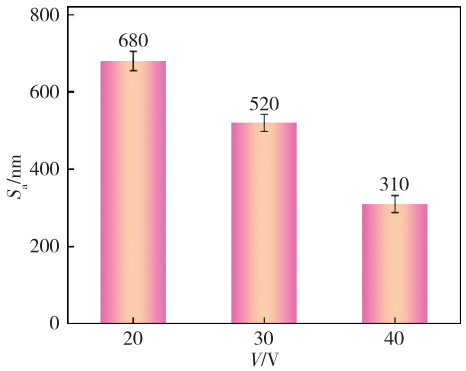


图 13 不同施加电压下激光电化学复合加工硅晶圆通槽侧壁表面的面粗糙度图

加工表面上的重熔氧化物数量更多且氧含量更高。根据法拉第电解定律，材料去除量正比于电流密度与作用时间的乘积，这合理解释了低电压工况下氧化层残留量较高、表面粗糙度较大的实验现象。

3 结束语

本文提出一种激光电化学复合加工硅晶圆通槽结构的新型工艺方法，该方法利用脉冲激光来定域提高单晶硅电导率，从而实现相对高质量加工。开展了激光电化学复合加工的对比试验，发现相较于激光干切加工的硅晶圆通槽侧壁表面，激光电化学复合加工表面的面粗糙度下降了57%。其次，探究了施加电压变化对激光电化学复合加工表面的影响，发现在40 V电压下可以获得最佳的加工表面，面粗糙度可减至310 nm。

参考文献：

[1] Choong Z J, Huo D, Degenaar P, et al. Micro-machinability and edge chipping mechanism studies on diamond micro-milling of monocrystalline silicon [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 93-103.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Zhu H, Zhang Z, Xu J, et al. Numerical study of picosecond laser micro-grooving of single crystalline germanium: Mechanism discussion and process simulation [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 351-367.

[5] 张 欣，黄 婷，肖荣诗. 晶面对单晶硅高功率绿光飞秒激光加工的影响[J]. 表面技术，2021，50(11)：362-371.
Zhang Xin, Huang Ting, Xiao Rongshi. Effect of crystal orientation on high power green femtosecond laser processing of single crystal silicon[J]. Surface Technology, 2021, 50(11): 362-371.

[6] Park M I, Kim C S, Park C O, et al. XRD studies of femtosecond laser ablated single-crystal germanium in air[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(12): 1322-1329.

[7] Madhukar Y K, Mullick S, Nath A K. Development of a water-jet assisted laser paint removal process [J]. Applied Surface Science, 2013, 286: 192-205.

[8] Li L, Zhang G, Wong C P. Formation of through silicon vias for silicon interposer at wafer level by metal-assisted chemical etching [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2015, 5(8): 1039-1049.

[9] Chang W H. Micromachining of p-type 6H-SiC by electrochemical etching [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 112(1): 36-43.

[10] Zhu H, Jiang Z, Han J, et al. Fabrication of oxide-free dimple structure on Ge via electrochemical jet machining enhanced by opposing laser irradiation [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 623-635.

[11] Morin F J, Maita J. Electrical properties of silicon containing arsenic and boron[J]. Physical Review, 1954, 96(1): 28-35.

[12] Morin F J, Maita J P. Conductivity and Hall effect in the intrinsic range of germanium[J]. Physical Review, 1954, 94(6): 1525-1529.

[13] Zhu H, Wang C, Mao S, et al. Localized and efficient machining of germanium based on auto-coupling between picosecond laser irradiation and electrochemical dissolution: Mechanism validation and surface characterization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 77: 665-677.

作者简介：

毛东晨(1999—)，男，江苏省无锡市人，硕士研究生，主要研究方向为激光电化学复合加工硅晶圆贯通微结构；

朱 浩(1987—)，男，河南省周口市人，博士，副教授，主要研究方向为微细加工/特种制造技术。