材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250408002

磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔技术研究

张文颉，毛东晨，朱　浩*

（江苏大学 机械工程学院，江苏 镇江 212013）

摘　要： 针对单晶硅通孔结构的高质量加工需求，提出一种磨粒辅助激光电化学复合加工方法。该方法在激光电化学复合加工的同时，利用激光诱导的空化效应驱动磨粒高速运动并冲蚀通孔内壁，去除表面的熔渣和氧化层。对比分析了磨粒辅助对加工质量的提升效果，并探究了激光功率和外加电压对加工结果的影响。结果表明，磨粒辅助加工显著提高了激光电化学复合加工的质量；当激光功率为26 W时，硅通孔内壁氧含量降低至3.27%，面粗糙度减小至454 nm，通孔锥度减小至3.26°，达到最佳加工效果；当电压为30 V时，硅通孔的形貌最佳，孔壁光滑且锥度最小。

关键词： 单晶硅；激光加工；磨粒冲蚀；电化学腐蚀；复合加工

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0484－09

Study on Abrasive-Assisted Laser-Electrochemical Hybrid Machining of Through-Silicon Vias

ZHANG Wenjie, MAO Dongchen, ZHU Hao

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

Abstract: To meet the demand for high-quality through-silicon via (TSV) machining, in this study, we propose an abrasive-assisted laser-electrochemical hybrid machining method. In this combined method, which leverages laser electrochemical processing and laser-induced cavitation effects, abrasive particles cause high-speed erosion of inner walls, effectively removing surface slag and oxide layers. The effects of abrasive assistance on machining quality are evaluated through a comparative analysis, and the influence of laser power and applied voltage on the processing results is systematically examined. The results show that abrasive-assisted machining substantially improves the quality of laser-electrochemical hybrid processing. At the optimal laser power of 26 W, the TSV inner walls exhibit low oxygen contents (3.27%), low surface roughness (454 nm), and small taper angles (3.26°), which confirm the superior machining performance of the proposed method. At an applied voltage of 30 V, the TSVs exhibit an optimal morphology with smooth sidewalls and a minimal taper angle.

Key words: single-crystal silicon; laser processing; abrasive erosion; electrochemical corrosion; hybrid machining

0　引言

单晶硅作为第一代半导体材料的典型代表，凭借其优异的物理化学性能，在集成电路、微机电系统(MEMS)、光电器件等领域占据重要地位[1-5]。随着三维集成技术的发展，硅通孔(TSV)作为芯片

收稿日期：2025－04－08.

基金项目：国家自然科学基金项目(52275431,51905226).

*通信作者：朱　浩

垂直互连的关键结构，其加工质量直接影响器件性能[6-7]。然而，单晶硅固有的高脆性和低断裂韧性使其精密加工面临严峻挑战。目前，传统的硅材贯通微结构加工方法众多，如机械开槽/钻孔、激光加工、化学腐蚀、电化学腐蚀和深度反应离子刻蚀（DRIE）等，这些方法各有优势但都存在明显局限。例如，机械加工难以实现复杂路径或通孔的高精度加工[8]；激光加工虽然可以实现复杂贯通结构加工，但所得微结构常伴有明显锥度和热损伤[9-10]；硅的化学腐蚀则依赖特殊设计的掩模，且需使用氢氟酸等高危试剂[11-12]；硅的电化学腐蚀通常会产生致密的钝化层，而硅较差导电性进一步降低了电化学腐蚀的效率[13]，尽管硅的 DRIE 刻蚀能实现高深宽比和垂直侧壁的加工，但仍然面临侧壁粗糙度大及设备成本昂贵等问题[14]，而两步刻蚀法[15]虽然改善了硅通孔的形貌，但其工艺复杂难度大。

近年来，复合加工技术为硅通孔加工提供了新思路。Long 等[16]提出激光与电化学腐蚀复合的方法，该方法能够有效减少微坑周围的热损伤，同时大幅提高刻蚀效率，但仍需强碱性电解液。Zhu 等[17-18]利用激光辐照与电化学复合的加工方法，在单晶锗上实现了中性电解液下高效定域电解加工，然而该方法应用于单晶硅加工时仍面临钝化层去除难题。

针对上述问题，本文提出一种磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔的新方法，旨在解决单晶硅通孔结构精密加工的难题。该方法在激光加工的同时，利用激光诱导的热效应和光电导效应，定域增强单晶硅的导电性，从而增强内壁上的电化学腐蚀并形成软质氧化层。同时，激光诱导的空化效应驱动悬浮的磨粒运动并冲蚀软化的内壁，实现磨粒冲蚀与电化学腐蚀的协同作用。这一方法不仅能够在中性电解液中对硅通孔进行绿色加工，还能显著提高加工效率和表面质量。

1　试验方法

1.1　试验材料与装置

试验材料选用 n 型〈100〉晶向的双面抛光单晶硅晶圆，厚度为 500 μm。

图 1 展示了磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔试验示意图。试验中，采用 YDFLP-60-M7-M-R 型掺镱纳秒脉冲光纤激光器，激光的波长为 1 064 nm，脉冲宽度为 20 ns，重复频率为 10 kHz，扫描速度为 150 mm/s。激光束聚焦于硅晶圆表面，聚焦光斑直径为 30 μm，加工路径为间距 30 μm 的同心圆阵列，最大圆的直径为 300 μm。

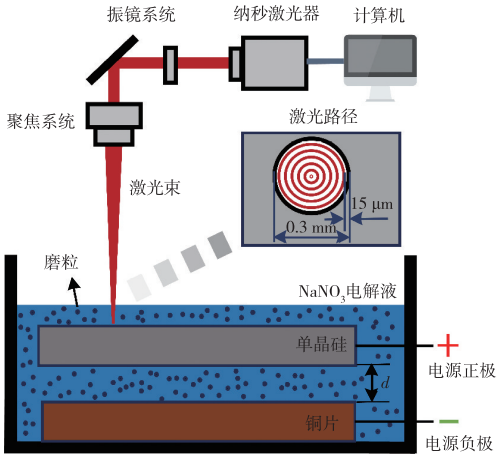


图 1　磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔试验示意图

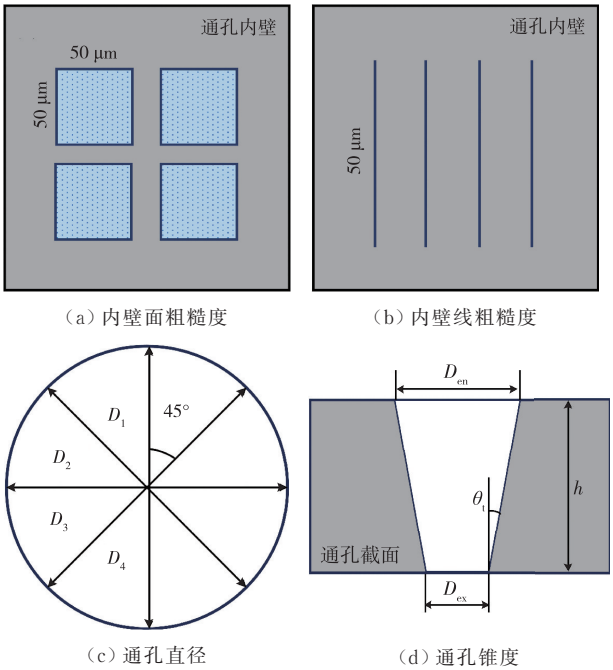
在电化学腐蚀中，单晶硅晶圆接电源正极作为阳极，铜片接电源负极作为阴极，两者间距（d）为 2 mm，浸没于含 0.5 wt% 金刚石磨粒的 10 wt% $NaNO_3$ 电解液中，平均粒径为 1 μm，液面高度控制在硅晶圆上表面 1 mm 处。试验采用 GKPT 型平波/可调单脉冲电源，工作模式设置为平波稳压，电压（V）设置为 0～50 V。在试验过程中，激光打孔、电化学腐蚀以及激光空化驱动磨粒交互协同减材。激光将硅晶圆打穿后，继续扫描一段时间，整个加工时间为 90 s。试验结束后，将硅晶圆样品置于无水乙醇中进行超声波清洗。

1.2　检测方法

采用扫描电子显微镜（SEM，Hitachi S-3400N）表征加工结果的典型形貌，并利用 X 射线能量色散谱（EDS）对样品进行元素含量分析。此外，利用激光扫描共聚焦显微镜（Keyence VK-X260）测量内壁的粗糙度。如图 2 所示，硅通孔相关参数的测量方法包括：（a）～（b）测量四次并取平均值作为粗糙度的测量结果；（c）每隔 45°测量一次硅通孔的直径（D），最终取平均值作为测量结果；（d）硅通孔锥度的方法，计算公式如下：

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{D_{en} - D_{ex}}{2h}\right) \tag{1}$$

式中，θ_t 为通孔的锥度，D_{en} 为入口直径，D_{ex} 为出口直径，h 为硅晶圆的厚度。



（a）内壁面粗糙度　（b）内壁线粗糙度

（c）通孔直径　（d）通孔锥度

图2　硅通孔相关参数的测量方法

2　加工机理

图3展示了磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔的机理，该复合方法结合了激光刻蚀、电化学腐蚀和磨粒冲蚀的作用，形成了多能场协同加工模式。

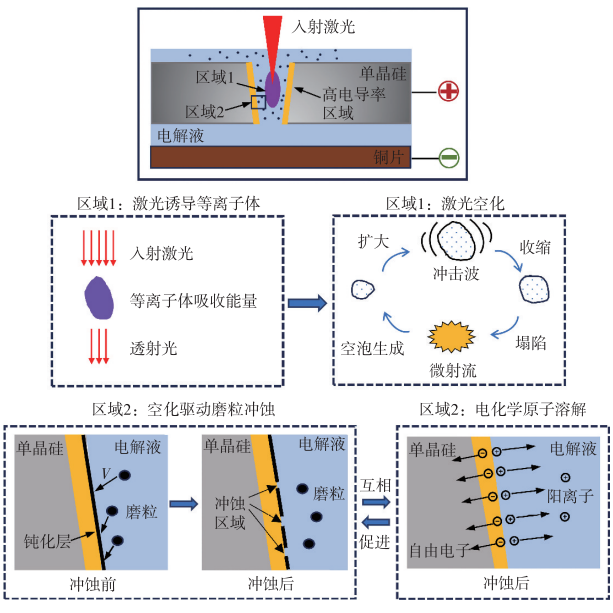


图3　磨粒辅助激光电化学复合加工硅通孔机理示意图

首先，激光诱导的热效应和光电导效应在激光辐照区域显著增强了硅通孔侧壁的电导率，而其他区域的电导率保持不变，从而形成了局部高电导率区域。这种局部电导率的提升不仅实现了精确的电化学腐蚀，还显著提高了腐蚀效率，为后续的材料去除奠定了基础。

其次，在强纳秒激光加工过程中，激光在液下能够产生空化效应。水分子通过多光子吸收机制获得足够的能量，使得部分电子脱离原子束缚成为准自由电子。这些电子在激光能场作用下不断加速，通过碰撞电离效应引发级联电离过程，最终形成高密度等离子体，即激光诱导击穿现象[19]。等离子体形成后快速膨胀，在液体中产生显著的压力波动。当局部压力降至饱和蒸气压时，会诱发空泡成核。在膨胀阶段，等离子体持续的能量输入使空泡保持扩张状态；随着能量耗散，空泡进入收缩阶段，最终溃灭时释放出巨大能量并产生强烈的冲击波作用[20]。冲击波在传播过程中会将能量传递给磨粒，使其获得运动动能。同时，等离子体膨胀还会诱导产生高速微射流[21]，两者共同作用推动磨粒冲击加工表面。这种动态的磨粒运动能够有效去除电化学腐蚀过程中形成的软质钝化层，同时清除附着在硅通孔侧壁的熔渣和加工残留物，从而显著改善了表面质量。

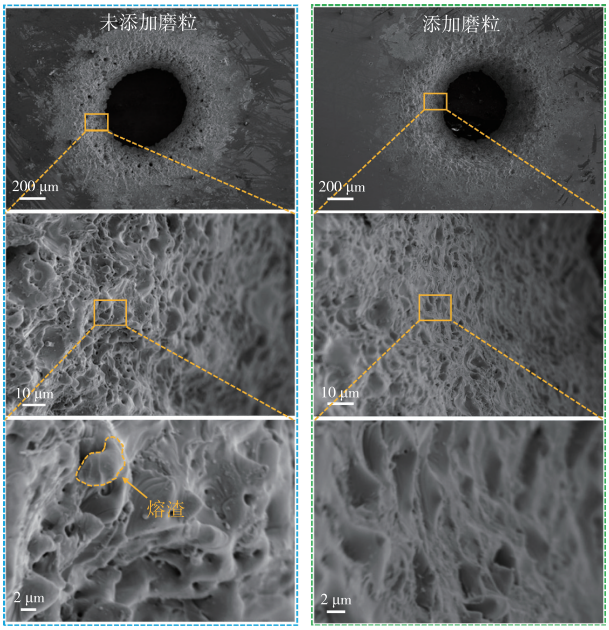
最后，电化学腐蚀在抛光过程中发挥了双重作用：一方面，它能够消除激光加工过程中产生的熔渣和机械损伤，减少表面缺陷；另一方面，电化学腐蚀在表面生成一层软质氧化层，显著降低了材料的硬度和强度，从而降低了磨粒冲蚀去除材料的难度。这种软质氧化层的形成为磨粒冲蚀机械去除提供了有利条件。

3　结果与讨论

3.1　磨粒辅助加工质量对比

为了探究磨粒在激光电化学复合加工过程中的作用机制，本节设计了系统的对比试验。图4展示了有无磨粒辅助的条件下激光电化学复合加工后硅通孔的形貌特征。

在未添加磨粒的对照组中，高功率纳秒激光加工导致孔入口及侧壁区域形成明显的重铸层和熔渣堆积，如图4(a)所示。虽然电化学腐蚀对激光加工形貌具有一定程度的修整作用，但由于单晶硅表面极易形成致密的钝化层，严重阻碍了电化学反应的进行，最终导致硅通孔内壁仍残留大量熔渣凸起，表面粗糙度较大。



（a）未添加磨粒　　（b）添加磨粒

图 4　激光电化学复合加工后硅通孔的形貌特征

在试验组中，向电解液中加入平均粒径为 1 μm 的金刚石磨粒后，加工质量得到了显著改善。孔的入口处重铸层显著减少，孔内壁平整度显著提高，基本未观察到明显的熔渣凸起，如图 4(b)所示。这一现象可归因于磨粒的加入增强了加工效果：激光在液下产生的空化效应能够驱动磨粒对单晶硅通孔内壁产生冲蚀作用。磨粒的冲击不仅能够有效去除表面的熔渣凸起，还能够破坏致密的钝化层，从而提高电化学反应的效率，优化了硅通孔的加工质量。

对硅通孔的内壁进行 EDS 面扫分析，如图 5 所示。结果显示，在加入磨粒辅助加工后，未检测到新的元素峰，且氧元素峰的强度显著降低，表明磨粒的加入能够有效去除表面的氧化物，且不会引入新的杂质元素。

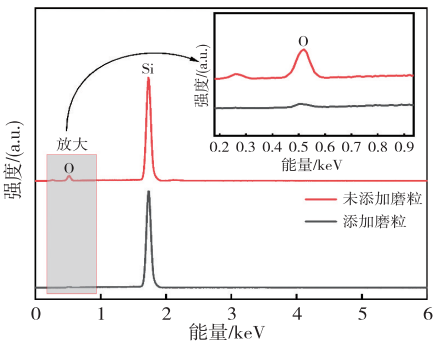
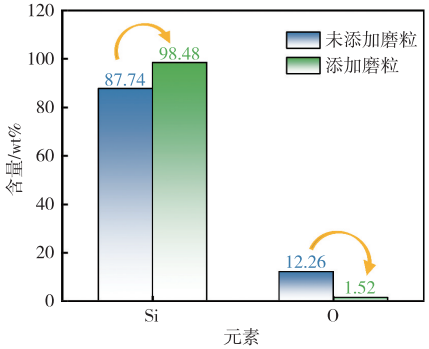
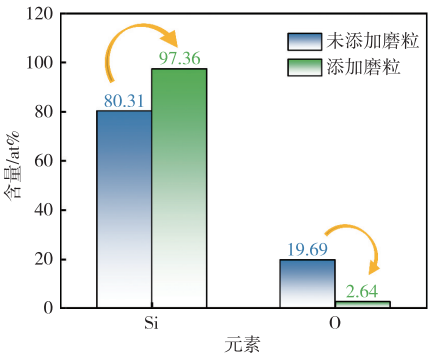


图 5　有无磨粒辅助加工对比的 EDS 谱图

此外，图 6 进一步对比分析了有无磨粒辅助加工的 Si 元素和 O 元素含量。结果表明，加入磨粒后，O 元素的质量百分比从 12.26% 降至 1.52%，原子百分比从 19.69% 降至 2.64%。这一显著变化证实了磨粒在激光电化学复合加工过程中对氧化层去除的重要促进作用。



（a）质量百分比



（b）原子百分比

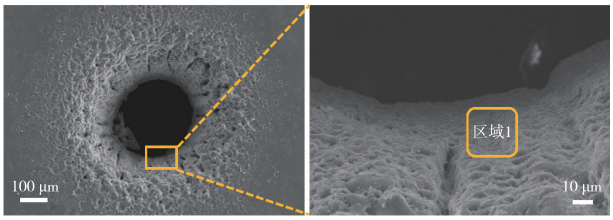
图 6　有无磨粒辅助加工下 Si 和 O 元素含量分析

3.2　激光功率对加工结果的影响

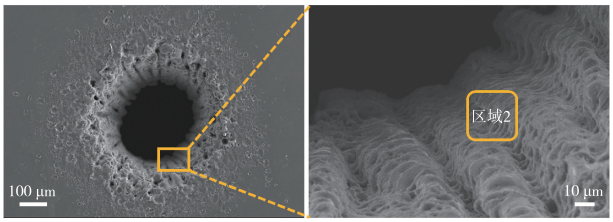
为了探究复合加工过程中关键参数对加工结果的影响规律，本节开展了系统的单因素试验研究。试验参数设置如下：激光频率为 10 kHz，脉冲宽度为 20 ns，扫描速度为 150 mm/s，加工时间为 90 s，电源电压为 30 V，激光功率分别选择 10，18 和 26 W，以探究激光功率对硅通孔加工结果的影响规律。

图 7 展示了不同激光功率下硅通孔的微观形貌图。试验结果表明，激光功率对孔形貌具有显著影响。当激光功率为 10 W 时，硅通孔周围虽然存在较大的热影响区，但孔内壁相对较为平整，微观结构起伏较小。这表明在较低激光功率下，材料的去除过程较为温和，但存在孔出口处材料未完全去除的现象。当激光功率提升至 18 W 时，孔壁的微观结构变得相对复杂，出现了更多的褶皱或波纹状结

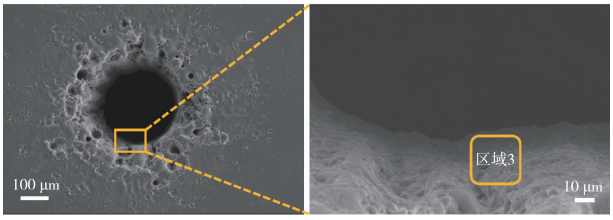
构。这一现象表明，随着激光功率的增加，材料在加工过程中受到更强烈的热作用，导致重铸层现象加剧。此外，孔入口处出现了更多的点蚀。



（a）P=10 W



（b）P=18 W



（c）P=26 W

图7 不同激光功率下硅通孔的微观形貌图

当激光功率进一步提升至26 W时，孔口热影响区显著减小，孔内壁再次变得较为平坦，孔入口处出现大量点蚀，且孔的圆度有所改善。这一现象可以从以下几个方面解释：首先，更高的激光功率使得硅通孔附近的局部温度显著升高，从而加速了电化学腐蚀速率，电化学腐蚀作用使得内壁区域更加平坦；其次，更大的激光功率可能引发更强的空化效应[22]，磨粒的冲蚀效果得到增强，进一步平整了孔壁表面；最后，点蚀的形成是由于局部电场强度过高，电化学腐蚀在局部区域集中发生。

对不同激光功率下硅通孔内壁的粗糙度进行分析，结果如图8所示。结果表明，随着激光功率从10 W增加到26 W，内壁粗糙度呈现先升高后降低的变化趋势，并在26 W时达到最优值。此时，面粗糙度S_a为454 nm，线粗糙度R_a为315 nm，表明内壁质量得到显著提升。线粗糙度数值略低于面粗糙度，但变化趋势一致。粗糙度随功率变化的非单调趋势与前述形貌演变机理直接相关：在10～18 W区间，增强的激光热作用使重铸层增加，导致粗糙度增加；而当功率升至26 W时，更强的空化效应和电化学腐蚀作用协同实现了表面再平整化。

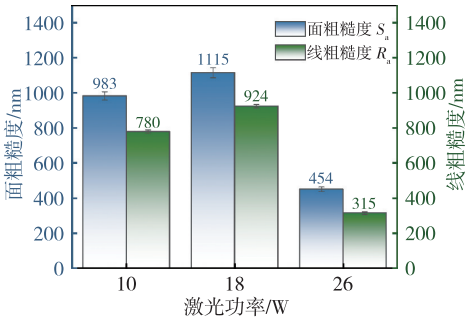
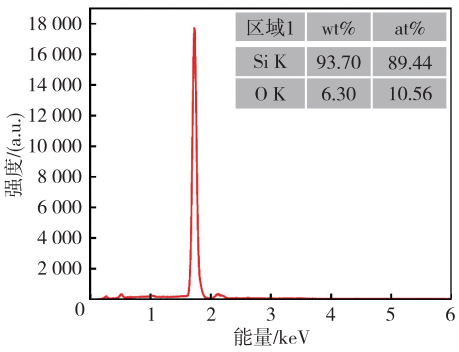
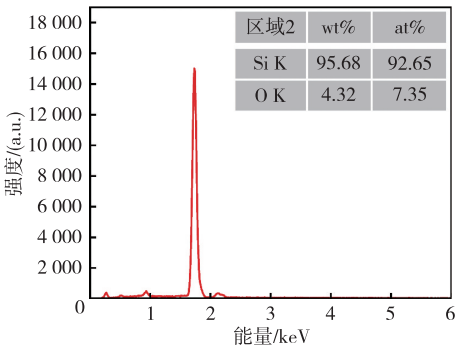


图8 不同激光功率下硅通孔内壁的粗糙度

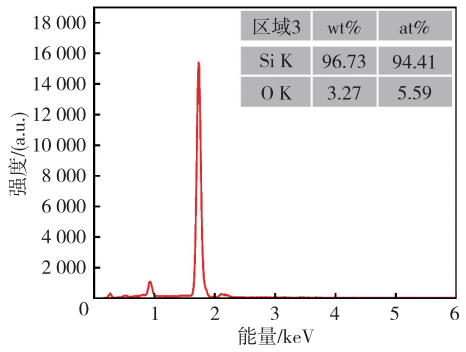
通过EDS能谱对硅通孔内壁的化学成分进行表征，如图9所示。结果显示，当激光功率从10 W提升至26 W时，O元素含量呈现明显的递减规律：其质量分数由6.30%显著降低至3.27%，原子分数则由10.56%下降至5.59%。与此同时，Si元素的相对含量则相应增加。这表明较高的激光功率可能会增强对硅通孔内壁表面氧化层的去除，导致Si元素相对含量上升，O元素含量下降。这是因为激光功率增大，电化学腐蚀作用和激光液下空化作用对复合加工有更强的促进作用，从而加速了氧化物的去除。



（a）P=10 W



（b）P=18 W



（c）P=26 W

图 9　不同激光功率下硅通孔内壁的 EDS 谱图

图 10 展示了不同激光功率下电流随时间的变化曲线。在加工过程中，电流随时间呈现逐渐下降的趋势，这一现象主要归因于钝化层的形成。结果表明，激光功率越大，加工过程中的电流也越大。根据法拉第电解定律[23]，材料的去除量（m）与电路电流（I）成正比，即：

$$m=\frac{MIt}{n\times F} \tag{2}$$

式中，F 为法拉第常数，M 为物质的摩尔质量，n 为其在反应中转移的电子数，t 为时间。因此，加工过程中电流增大则代表电化学腐蚀过程中材料去除量增加。

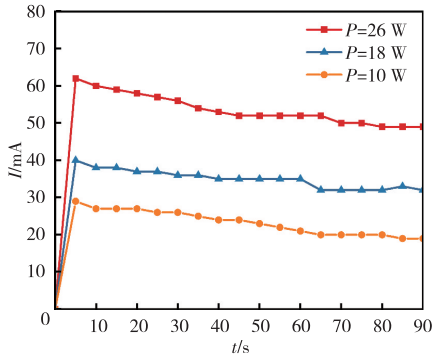


图 10　不同激光功率对加工电流变化影响

这一现象可以从以下两个方面进行解释：首先，随着激光功率的增加，硅晶圆表面吸收的能量显著增加，导致局部温度急剧上升。温度的升高增强了晶格振动，使得价带电子能够从晶格中获得更多的能量，从而更容易跃迁至导带，显著提高了自由电子和空穴的浓度。载流子浓度（n_i）与温度的关系可以描述为[24]：

$$n_i=\sqrt{N_cN_v}\exp\left(-\frac{E_g}{2k_BT}\right) \tag{3}$$

式中，N_c 和 N_v 分别为导带的有效态密度和价带的有效态密度，E_g 为禁带宽度，k_B 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度。根据半导体能带理论，载流子浓度的增加直接提升了硅的电导率，导致加工电流增大[25]。

其次，激光功率的增大还增强了光电导效应。当激光光子能量超过硅的禁带宽度时，光子能够直接激发价带电子至导带，产生更多的光生电子-空穴对[26]。这种非平衡态载流子的瞬时注入进一步提高了硅的电导率，导致加工电流显著增大。

图 11 展示了不同激光功率对硅通孔入口直径、出口直径和锥度的影响。结果显示，在其他因素保持不变的情况下，激光功率越大，入口直径显著降低，出口直径变化不显著，锥度也显著降低。当激光功率为 26 W 时，锥度降低至 3.26°。出现这一现象的原因是：随着激光功率增大，激光束在材料表面的能量密度显著提高，导致局部区域在极短时间内被快速加热并汽化。这种高能量密度的集中作用使得材料在入口处的去除效率显著提升，形成了更小的熔融区域，从而使得入口直径减小。此外，受激光能量在材料内部的衰减特性及溶液吸收作用的共同影响，随着孔深增加，孔底能量密度急剧下降，使得出口直径变化不显著。通孔入口与出口的直径差异减小，最终改善了孔的锥度。

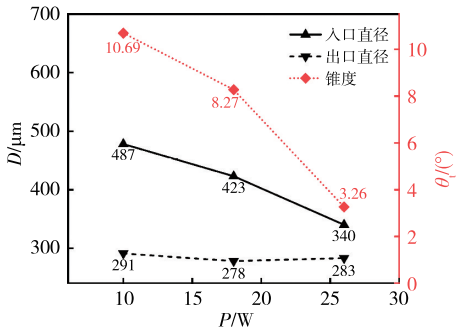


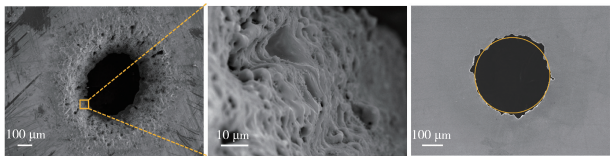
图 11　不同激光功率对出入口直径和锥度的影响

3.3　外加电压对加工结果的影响

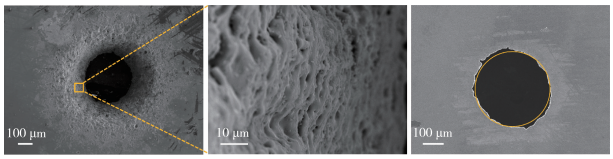
在保持激光功率为 13.8 W、激光重复频率为 10 kHz、脉冲宽度为 20 ns、加工时间为 90 s、$NaNO_3$ 溶液浓度为 10% 以及金刚石磨粒浓度为 0.5 wt% 的试验条件下，通过单因素试验探究了外加电压（20，30 和 40 V）对硅通孔形貌的影响。

图 12 展示了不同外加电压下硅通孔入口、侧壁和出口的形貌特征。试验结果表明，外加电压对硅通孔的形貌具有显著影响。随着电压的增大，硅通孔侧壁的平整度逐渐提高。当电压为 30 V 时，硅通孔的入口处形貌最佳，孔壁光滑且无明显缺陷。相

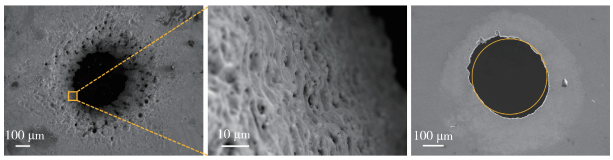
比之下，当外加电压为20 V时，由于电压较低，电化学腐蚀效果较弱，导致材料去除效率较低，孔壁表面相对粗糙。而当外加电压增至40 V时，虽然电化学腐蚀速率显著提高，但由于电压过高，入口处出现了明显的点蚀现象，这可能是由于局部电场强度过大，导致电化学腐蚀在局部区域集中发生。此外，当外加电压为30 V时，硅通孔的入口和出口处的圆度均优于其他电压条件下的结果。这表明在该电压下，电化学腐蚀与激光空化驱动的磨粒冲蚀达到了最佳平衡，既保证了高效的材料去除，又避免了过度的局部腐蚀。



（a）V=20 V



（b）V=30 V



（c）V=40 V

图12　不同外加电压下硅通孔的入口、侧壁和出口形貌图

图13展示了在不同外加电压下电流随时间的变化曲线。在加工过程中，电流随时间呈现逐渐下降的趋势，这一现象可能与电化学腐蚀过程中钝化膜的形成有关。

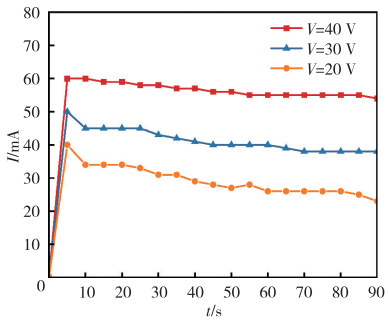


图13　不同外加电压对加工电流变化影响

此外，随着外加电压的增大，电路中的电流显著增加。根据法拉第电解定律，材料的去除量与电路电流成正比，因此更高的外加电压能够提高材料去除量。这一机制解释了在40 V电压下，硅通孔侧壁更加平坦的现象，因为更高的电流密度加速了电化学腐蚀过程，使得材料去除更加均匀和高效。

图14展示了不同外加电压对硅通孔入口直径、出口直径和锥度的影响。由于激光能量呈现高斯分布，导致通孔的入口直径比出口直径更大。随着外加电压的增加，入口直径和出口直径均呈现先减小后增大的趋势。具体而言，当外加电压为30 V时，入口直径和出口直径均达到最小值，且硅通孔的锥度也达到最小值，表明孔的几何形状更加规则，加工质量显著提升。这一现象可归因于铜片阴极放置在硅晶圆的下方，孔出口处的电场强度相对较大，导致电化学腐蚀在出口区域的材料去除速率更快，有助于减小硅通孔的锥度。

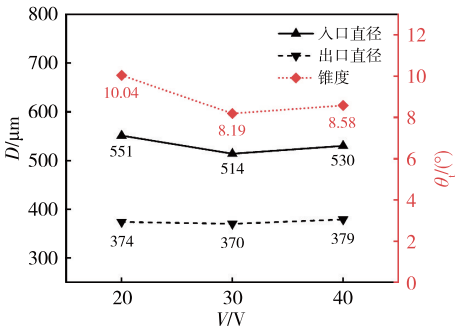


图14　不同外加电压对出入口直径和锥度的影响

4　结论

针对单晶硅通孔结构的高质量加工需求，提出并验证了一种磨粒辅助激光电化学复合协同加工方法，用于单晶硅通孔的高质量加工。通过系统的试验研究和理论分析，得出以下主要结论：

（1）磨粒辅助作用显著提升了复合加工质量。试验结果表明，在添加1 μm金刚石磨粒后，硅通孔内壁氧含量从12.26%降至1.52%，内壁质量得到显著改善。磨粒通过激光诱导空化效应产生的机械冲击作用，有效去除表面熔渣和氧化层，同时破坏电化学腐蚀产生钝化层，促进电化学反应进行。

（2）激光功率是影响加工效果的关键参数。当激光功率从10 W增至26 W时，加工电流显著增大，材料去除率提高。在本次试验参数范围内，当激光功率为26 W时，获得最佳加工效果：内壁氧含量降至3.27%，表面粗糙度S_a为454 nm，通孔锥度

减小至3.26°。

（3）外加电压对硅通孔的加工效果也具有显著影响。当外加电压从20 V增至40 V时，加工电流显著增大。当电压为30 V时，硅通孔的形貌最佳，孔壁光滑且无明显缺陷，入口和出口直径达到最小值，且锥度最小，表明孔的几何形状更加规则。

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] Xu Y, Hu X, Kundu S, et al. Silicon-based sensors for biomedical applications: a review[J]. Sensors, 2019, 19(13): 2908.

[3] 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.

[4] 张净植，余益明，吴韵秋，等. 硅基毫米波集成电路设计发展现状与挑战[J]. 中国科学：信息科学，2024，54(1)：68-87.
Zhang Jingzhi, Yu Yiming, Wu Yunqiu, et al. Developments and challenges of mm-Wave integrated circuits on silicon[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(1): 68-87.

[5] 邹丽雪，杨艳萍，产　健，等. 全球生物半导体发展现状与趋势[J]. 中国生物工程杂志，2025，45(1)：98-109.
Zou Lixue, Yang Yanping, Chan Jian, et al. Current situation and trends in global development of biosemiconductor [J]. China Biotechnology, 2025, 45(1): 98-109.

[6] Gambino J P, Adderly S A, Knickerbocker J U. An overview of through-silicon-via technology and manufacturing challenges [J]. Microelectronic Engineering, 2015, 135: 73-106.

[7] Jacobs K J P, Murakami H, Murakami F, et al. Characterization of through-silicon vias using laser terahertz emission microscopy[J]. Nature Electronics, 2021, 4(3): 202-207.

[8] Lin J W, Cheng M H. Investigation of chipping and wear of silicon wafer dicing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(3): 373-378.

[9] Gruner A, Naumann L, Schille J, et al. High pulse repetition frequency micro hole drilling of silicon using ultrashort pulse laser radiation[J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2019, 14(3): 190-197.

[10] Zhu H, Xie W, Du W, et al. Fabrication and quality improvement of film cooling holes via picosecond laser drilling assisted by waterjet and post-electrochemical machining[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 182: 112162.

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

[12] Kopani M, Mikula M, Kosnac D, et al. Effect of etching time in hydrofluoric acid on the structure and morphology of n-type porous silicon[J]. Applied Surface Science, 2020, 532: 147463.

[13] Allongue P, Jiang P, Kirchner V, et al. Electrochemical micromachining of p-type silicon[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2004, 108(38): 14434-14439.

[14] 马书英，付东之，刘　轶，等. 硅通孔三维互连与集成技术[J]. 电子与封装，2024，24(6)：87-100.
Ma Shuying, Fu Dongzhi, Liu Yi, et al. Three dimensional TSV interconnection and integration technology [J]. Electronics & Packaging, 2024, 24(6): 87-100.

[15] 田　苗，刘　民，林子涵，等. 基于两步刻蚀工艺的锥形TSV制备方法[J]. 半导体技术，2024，49(4)：316-322.
Tian Miao, Liu Min, Lin Zihan, et al. Fabrication method of tapered TSV based on two-step etching process [J]. Semiconductor Technology, 2024, 49(4): 316-322.

[16] 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.

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

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

[19] Noack J, Vogel A. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(8): 1156-1167.

[20] Wang L, Guo Z, Deng Y, et al. Experimental research into microgroove stamping by laser-induced cavitation[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 146: 107549.

[21] 吴灵锦，吕茗萱，薛建伟，等. 脉冲CO_2激光诱导液体微射流动力学特性及应用研究[J]. 中国激光，2023，50(9)：136-143.
Wu Lingjin, Lü Mingxuan, Xue Jianwei, et al. Dynamic characteristics and application of pulsed CO_2 laser induced liquid micro-jet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(9): 136-143.

[22] 陈铁牛，郭钟宁，曾柏文，等. 激光诱导空泡微孔抛光机理及实验研究[J]. 中国机械工程，2018，29(3)：273-278，285.
Chen Tieniu, Guo Zhongning, Zeng Baiwen, et al. Study on

micro-hole polishing mechanism and experiments based on laser-induced cavitation bubbles [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(3): 273-278, 285.

[23] Benedetto E, Capriolo M, Feoli A, et al. A little help for a better understanding and application of Faraday's law [J]. European Journal of Physics, 2012, 33(3): L15-L20.

[24] Green M A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 67(6): 2944-2954.

[25] Harris C, O'Reilly E P. Nature of the band gap of silicon and germanium nanowires [J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2006, 32(1/2): 341-345.

[26] Zhu H, Han J, Wang J, et al. Mechanisms and characterization of a novel hybrid laser-enhanced particle laden electrochemical fabrication process for high quality micro-dimples on germanium wafers [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 328: 118392.

作者简介：

张文颉(1999—)，男，江苏省镇江市人，硕士研究生，主要研究方向为半导体材料的激光电化学复合微加工技术研究。

朱　浩(1987—)，男，河南省周口市人，博士，副教授，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研究。