

超快激光在多晶硅还原炉的应用技术优化研究

王丽梅

青海黄河上游水电开发有限责任公司新能源分公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i12.7533

[摘要] 本文系统研究了超快激光在多晶硅还原炉工艺中的应用,探讨了超快激光特性、与多晶硅材料的相互作用及其能量控制对材料去除效果的影响。基于实验和参数优化,超快激光在提升还原炉的清洁效率和材料纯度方面展现出显著优势。通过激光辅助加热及表面处理技术的应用,进一步优化了还原工艺,降低了能耗,提高了生产效率。

[关键词] 超快激光,多晶硅还原炉,材料去除,激光参数优化

Research on the application technology optimization of ultrafast laser in polysilicon reduction furnace

Wang Limei

Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., LTD. New energy Branch

[Abstract] This paper systematically studies the application of ultrafast laser in polysilicon reduction furnace process, and discusses the influence of ultrafast laser characteristics, interaction with polysilicon materials and its energy control on material removal effect. Based on experiments and parameter optimization, the ultrafast laser shows significant advantages in improving the cleaning efficiency and material purity of the reduction furnace. Through the application of laser assisted heating and surface treatment technology, the reduction process is further optimized, the energy consumption is reduced and the production efficiency is improved.

[Key words] ultrafast laser, polycrystalline silicon reduction furnace, material removal, laser parameter optimization

在现代光伏产业及半导体制造中,多晶硅材料的制备工艺对其品质及使用寿命至关重要。然而,传统的还原工艺面临效率低、能耗高及材料损伤的问题。近年来,超快激光技术凭借其高功率及超短脉冲宽度,成为提升多晶硅还原工艺的一项创新手段。超快激光不仅能够实现高精度、低热影响的材料加工,还能在多晶硅材料表面去除杂质,提高材料纯度和产品性能。本文基于多晶硅还原炉的工艺需求,系统分析了超快激光的应用机理和参数优化策略,为行业发展提供了理论支持和技术参考。

1 概述

1.1 超快激光技术概述

超快激光技术是激光加工领域中的一项重要创新,指具有超短脉冲宽度(通常在飞秒至皮秒量级)的激光脉冲技术。其极短的脉冲持续时间使得激光在与材料相互作用时能够实现极高的峰值功率密度,达到传统连续波激光难以实现的精细加工效果。这种高功率能在材料表面引发非线性光学效应,

并能够在不产生显著热量扩散的情况下,将能量精确地传递到目标位置,从而有效减少热影响区,避免材料的热损伤和边缘塌陷。此外,超快激光在微加工、精密切割、表面改性等应用中具有极高的灵活性与可控性,广泛应用于半导体、光电子、精密制造等多个高科技领域。由于超快激光加工具有极高的空间分辨率和时间分辨率,其加工效果精细、表面光洁度高、加工过程可控,已逐渐成为高精度制造工艺中的首选工具。

1.2 多晶硅还原炉的工作原理与应用背景

多晶硅还原炉是一种用于制备高纯度多晶硅材料的核心设备,广泛应用于光伏产业、半导体制造等高技术领域。其工作原理主要依赖于化学气相沉积(CVD)技术,将高温氢气和氯硅烷等硅源气体引入炉内,通过高温环境将硅原子沉积在基体材料上,逐渐形成高纯度多晶硅。在这一过程中,温度的精准控制以及反应速率的均衡调节对产品的纯度、结晶度等关键性能指标具有决定性影响。由于光伏行业的迅猛发展,对多晶硅材料的需求逐年增加,而传统的还原工艺在效率和成本控制

上面临巨大挑战。超快激光的引入可以有效改善还原过程中的加工精度，提高还原效率，同时确保产品的纯度和晶格结构完整性。通过在还原炉中应用超快激光，不仅可以优化反应速率、控制材料表面质量，还能实现微区定向加工，有助于提升多晶硅材料的光电转换效率，推动光伏行业的发展。

2. 超快激光在多晶硅还原炉中的作用机理

2.1 超快激光的特性及其优势

超快激光具有极短的脉冲持续时间（通常在飞秒至皮秒量级），能够实现高功率密度和精确的局部加热。与传统激光相比，超快激光在加工过程中会产生极小的热影响区，减少了对周围材料的热损伤。这一特性尤其适用于多晶硅还原炉的应用，因其能够在微观尺度上实现精细加工，从而提升还原炉内硅材料的纯度和均匀性。超快激光的高能量密度还能够实现快速的材料去除，有效提高生产效率。此外，超快激光在多晶硅材料处理过程中具有高重复性和稳定性，使得它在现代工业制造中被视为一种先进的、高精度的工具。对于多晶硅材料的处理需求，超快激光技术显得尤为关键，其极短的脉冲能有效避免传统热效应，确保材料特性的精确控制。

2.2 激光与多晶硅材料的相互作用

超快激光与多晶硅材料的相互作用主要通过光子能量的快速传递来实现。超快激光能量以极高的密度作用在多晶硅表面，使表层材料瞬间升温并产生微爆炸效应，造成表面材料的熔融、蒸发甚至等离子体形成。这一过程极其迅速，使得热量难以扩散到材料深层，从而降低了热影响区域的扩展。这种相互作用机理使超快激光能够在加工过程中保持极高的精度，避免了传统热加工带来的热变形或微裂纹问题。此外，通过控制激光波长、脉冲宽度以及能量密度，可以实现对多晶硅的深度选择性加工，达到精细化的材料处理效果，从而提高多晶硅还原炉的生产精度和最终成品的纯净度。

2.3 激光能量控制与材料去除效果的关系

在多晶硅材料加工过程中，激光能量控制直接影响材料去除效果。超快激光具有极短的脉冲宽度和高峰值功率，通过精确调节激光能量密度，可以控制材料去除的深度与范围。较高的激光能量密度能够实现快速且深层的材料去除，而较低的能量则适用于浅层微细加工。此外，激光的脉冲频率、光斑尺寸和扫描速度也是影响材料去除效果的重要参数。通过优化这些参数组合，可以获得理想的表面光洁度和切割边缘，避免材料结构的破坏。在多晶硅还原炉的应用中，激光能量控制不仅能够提高加工效率，还能够确保材料的结构完整性和表面质量，从而增强产品的导电性与使用寿命。这种精准的能量控制是超快激光应用的关键，使其在多晶硅加工领域中展现出不可替代的优势。

3. 多晶硅还原炉工艺流程中的激光优化

3.1 激光辅助加热技术在多晶硅还原中的应用

激光辅助加热技术在多晶硅还原工艺中具有显著的优势，其可控性和高效性显著提升了工艺的精确度。传统的还原工艺中通常采用整体加热，这种方式往往难以实现局部高精度的温度控制，容易造成能量浪费和材料过热。激光辅助加热则通过聚焦的激光束对特定区域进行精准加热，使得多晶硅的还原过程得以在均匀受热的条件下高效完成。该技术的应用不仅有效降低了能耗，还显著减少了温度波动对还原炉基盘的影响，从而降低了热应力引起的设备磨损。因此，激光辅助加热为多晶硅还原提供了一种更加经济高效的解决方案，是现代多晶硅还原技术中不可或缺的关键环节。

3.2 激光表面处理技术在提高材料纯度中的应用

激光表面处理技术在提升多晶硅材料的纯度和表面性能方面展现出显著优势。该技术利用激光的高能量聚焦特性，对多晶硅表面的微小颗粒和污染物进行选择性的去除。与传统的酸洗或化学清洗方法相比，激光表面处理具有非接触式、无化学残留的优势，避免了对基体材料的二次污染，确保了材料的高纯度。

4. 超快激光参数对还原效果的影响分析

4.1 激光脉冲宽度、频率与功率的影响

激光脉冲宽度、频率与功率是影响超快激光清洗效率和效果的关键参数。脉冲宽度的选择直接决定了激光能量的释放速度，较短的脉冲宽度能够在极短时间内高效释放能量，形成瞬间高温，有效去除多晶硅还原炉中的污染物，而不造成材料热损伤。频率的调整也影响了清洗效率，高频激光脉冲能够加速多晶硅表面的去污效果，特别是对于微小颗粒的去除具有显著效果。此外，功率的设置需要精确，以在不同清洗需求中平衡能量密度与表面完整性。高功率适用于去除较厚、顽固的污染层，低功率则能更好保护多晶硅基体的表面结构。

4.2 激光焦点位置与扫描速度的优化

激光焦点位置与扫描速度的优化对清洗效果同样具有重要影响。激光焦点位置的微小偏移可能会导致能量集中度的改变，影响清洗效率。因此，将激光焦点准确定位在污染物表面是确保清洗效果的一项重要操作。通过实验验证，激光焦点设置在污染物表面至 1 mm 的范围内效果最佳。此外，扫描速度的调整也直接关系到清洗的彻底性。较高的扫描速度在一定程度上加快了清洗进程，但可能导致污染物去除不彻底；相反，较低的扫描速度能充分作用于污染层，保证清洗效果。

4.3 不同激光波长在多晶硅加工中的适用性分析

激光波长对多晶硅的吸收效率、材料选择性去除以及清洗效果均有重要影响。不同波长的激光在多晶硅表面表现出不同

的吸收特性。短波长激光(如紫外和绿光波段)通常具有较高的能量密度,适用于去除较薄的污染物层,且其较浅的渗透深度有助于减少对基体的热效应。中波长(红外波段)的激光则适用于较深层的清洗,能量穿透力较强,适合去除较厚、顽固的污染层。在波长为 532 nm 的绿光激光条件下,多晶硅表面污染物的去除效率显著高于其他波长,这一波长下的激光具有较高的材料选择性,能够有效去除污染层而对基体材料保持较低的热负荷。此外,不同波长激光还需根据多晶硅表面的污染物特性选择,以确保清洗效果和表面完整性。因此,基于多晶硅材料的特性,合理选择激光波长可提升清洗效率,同时避免多晶硅表面的损伤。

5. 实验研究与数据分析

5.1 实验装置与测试方法

本次实验采用超快激光设备对电子级多晶硅还原炉的污染试件进行清洗,以评估其在去除残留物方面的效果。

实验装置包括超声清洗机、热风干燥箱、磁力搅拌器、高温烘箱以及手持静电喷粉机等。

材料方面,试件由多晶硅还原炉的基盘模拟制备,污染物包括无定形硅粉、氯硅烷水解物、二氧化硅粉尘、甲基硅油和多晶硅颗粒等。在实验过程中,通过控制激光功率、扫描速度及频率等参数,完成对各类污染试件的清洗测试,以测量不同激光参数组合下的清洗效果。

5.2 超快激光处理后多晶硅性能分析

实验结果显示,在超快激光清洗后,多晶硅试件的表面污染显著减少。对含有不同污染物的试件进行了处理,以电子扫描电镜观察其表面清洁度变化。超快激光的脉冲波长和扫描速度被调节至最优,以确保去除较大颗粒污染物的同时,减少对多晶硅基体的损伤。在高重复频率(10-18 kHz)和适当的扫描速度下,试件上颗粒较大的多晶硅已基本消除,有效地增强了基板的洁净度,同时保留了原有的材料特性。

5.3 不同激光参数组合下的还原效果对比

实验中对比了不同激光参数组合的清洗效果,包括功率 600 W 的激光在 5 至 18 kHz 频率和 500 $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$ 扫描速度下的清洗能力。结果表明,随着激光功率的增加,污染物的去除率显著提升。对于污染试件 1,在 1 次清洗后其多晶硅颗粒残留率降至 70.6%,而在 10 次清洗后进一步降低至 0.5%。通过多次清洗的方式,控制激光的扫描速度和频率可以实现对不同污染物的彻底去除。

6. 技术优化及应用效果评价

6.1 工艺参数优化方案总结

为提升超快激光清洗的效率与质量,参数优化集中于功率、重复频率和扫描速度。通过试验证明,在 600 W 激光功率

与扫描速度 500 $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,以 10-18 kHz 的频率进行多次清洗,可实现污染物高效去除。针对不同污染类型,适度调整激光频率和功率能有效改善清洗效果,确保多晶硅还原炉的基盘表面达到最佳清洁度,避免过高功率导致的表面损伤。

6.2 超快激光在提升还原炉效率与质量方面的效果评估

超快激光技术的应用显著提升了还原炉的运行效率。在重复频率和扫描速度经过优化后,每个试件的清洗时间大幅减少,整体清洗效率提高了约 30%。同时,电子级多晶硅还原炉的基盘在清洗后表现出更佳的导热和热膨胀系数一致性,表明超快激光能够保持材料性能的稳定性。通过对比实验,优化的超快激光清洗方案能够减少材料的二次污染。

6.3 经济性分析与节能效果评价

经济性分析表明,超快激光清洗在节省耗材和降低人工清洗成本方面具有显著优势。相比传统的化学清洗方式,超快激光的非接触性方法减少了化学试剂的使用量,进而降低了运营成本。同时,优化后的清洗工艺缩短了清洗周期,大幅提高了还原炉的利用率。此外,节能效果上,通过精确控制激光参数减少了能源消耗,使得每清洗周期的能耗降低约 20%,进一步提升了工艺的经济效益。

7. 结论

超快激光在多晶硅还原工艺中的应用展现了其极高的潜力,尤其是在提升材料去除精度、控制热影响区以及优化还原炉整体效率方面具有显著优势。通过对激光参数的精确调控,能够满足多晶硅高精度制造的需求,提高光电转换效率,并推动光伏产业的绿色生产。未来,随着激光技术的不断突破,超快激光在高纯度材料制备中的应用将更加广泛,为提升工艺质量、降低成本及推动技术创新提供更加广阔的前景。

[参考文献]

- [1]超快激光在玻璃内部诱导选择性晶化技术研究进展[J]. 张博; 王卓; 孙轲; 邱建荣. 硅酸盐学报, 2022 (04)
- [2]紫外纳秒激光制备高效的多晶硅减反绒[J]. 张丽; 孙耀宁; 贾天代; 王国建; 冯爱新; 陈欢. 太阳能学报, 2021 (12)
- [3]多晶硅表面周期性微结构的激光制备与性能研究[J]. 李甜甜; 孙耀宁; 张丽; 王国建; 贾天代; 冯爱新. 光子学报, 2021 (04)
- [4]基于数值模拟电子级多晶硅还原炉流动结构改进研究[J]. 梁世民; 张胜涛; 何银凤; 付昊; 赵丽丽. 人工晶体学报, 2019 (03)
- [5]基于 PolySim 电子级多晶硅还原炉三维数值模拟[J]. 李有斌; 张胜涛; 何银凤; 梁世民; 韩金豆; 付昊; 赵丽丽. 人工晶体学报, 2019 (01)
- [6]多晶硅还原炉底盘温度场均匀性分析[J]. 王晓静; 崔萌; 张芳. 现代化工, 2014 (02)