

晶硅制绒添加剂对电池片转换效率的影响及工艺参数优化

王涛 常帅锋

嘉兴市小辰光伏科技有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8668

[摘要] 在全球能源转型背景下, 晶硅电池因技术成熟占据光伏市场主导地位, 制绒工艺是提升其转换效率的关键环节, 但传统碱液制绒存在反射率高、结构不均的问题。本研究选取 CTAB 与 AEO-9 两种添加剂, 以 P 型单晶硅片为试验对象, 通过单因素变量法, 在不同浓度、温度、时间梯度下开展制绒试验, 结合反射率、形貌特征及转换效率测试进行分析。结果表明, AEO-9 优化效果优于 CTAB, 其最优工艺参数为浓度 0.8%、温度 85℃、时间 45min, 此时硅片反射率降至 10.1%, 电池转换效率达 23.7%, 较空白组提升 1.6 个百分点, 为工业化制绒工艺升级提供了实用参考。

[关键词] 晶硅电池; 制绒添加剂; 转换效率; 工艺优化

The influence of crystal silicon velvet additives on the conversion efficiency of battery cells and the optimization of process parameters

Wang Tao Chang Shuifeng

Jiaxing Xiaochen Photovoltaic Technology Co., Ltd.

[Abstract] In the context of global energy transition, crystalline silicon cells dominate the photovoltaic market due to their mature technology, and the velvet process is a key link to improve their conversion efficiency. However, traditional alkaline velvet production has problems with high reflectivity and uneven structure. This study selected two additives, CTAB and AEO-9, and used P-type single crystal silicon wafers as experimental objects. Through single factor variable method, velvet making experiments were carried out at different concentrations, temperatures, and time gradients, combined with reflectivity, morphology characteristics, and conversion efficiency tests for analysis. The results showed that the optimization effect of AEO-9 was better than that of CTAB. The optimal process parameters were a concentration of 0.8%, a temperature of 85 °C, and a time of 45 minutes. At this time, the silicon wafer reflectivity decreased to 10.1%, and the battery conversion efficiency reached 23.7%, which was 1.6 percentage points higher than the blank group. This provides a practical reference for upgrading the industrial velvet production process.

[Key words] crystalline silicon battery; Velvet additive; Conversion efficiency; process optimization

引言

全球能源结构转型进程中, 光伏发电因清洁低碳特性成为可再生能源领域的核心发展方向。晶硅电池凭借技术成熟度高、产业链完善等优势, 占据光伏市场 80%以上份额, 其转换效率的提升直接关系到光伏发电成本的下降。制绒工艺作为晶硅电池制备的关键前处理环节, 通过在硅片表面构建微纳级绒

面结构, 减少入射光反射损失, 延长光在电池内部的传播路径, 从而提升光吸收效率。传统制绒工艺依赖单一碱液体系, 存在绒面结构均匀性差、反射率偏高(通常在 15%以上)等问题, 制约了电池转换效率的进一步突破。

添加剂的引入为制绒工艺优化提供了新路径, 其通过吸附、催化等作用调控硅片表面的各向异性腐蚀速率, 进而改善

绒面形貌。现有研究多聚焦于单一类型添加剂的作用效果，对不同结构添加剂的作用机制对比分析不足，且工艺参数与添加剂性能的适配性研究缺乏系统性数据支撑^[1]。基于此，本文选取两类典型制绒添加剂，通过系统试验揭示其对绒面结构及转换效率的影响机制，优化工艺参数组合，为晶硅电池制绒工艺的工业化升级提供理论依据与技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用P型单晶硅片，规格为166mm×166mm，厚度150 μm，电阻率1~3 Ω·cm。制绒基础液为质量分数2%的NaOH水溶液，添加剂选取阳离子表面活性剂（十六烷基三甲基溴化铵，CTAB）与非离子表面活性剂（脂肪醇聚氧乙烯醚，AEO-9），纯度均≥99%（分析纯）。其他试剂包括氢氟酸（质量分数40%）、硝酸（质量分数68%），均为分析纯，试验用水为去离子水（电阻率≥18.2 MΩ·cm）。

1.2 试验设备

试验设备包括恒温磁力搅拌器（DF-101S）、超声波清洗器（KQ-500DE）、紫外-可见分光光度计（UV-2600）、扫描电子显微镜（SEM，SU8010）、太阳能电池量子效率测试仪（QE-R300）、电池片转换效率测试仪（CT-800）。

1.3 试验设计

1.3.1 试验分组

为精准探究不同类型制绒添加剂对晶硅电池性能的影响，本试验设计3组对照方案，分别为空白对照组、CTAB添加剂组与AEO-9添加剂组。空白对照组仅以质量分数2%的NaOH水溶液作为制绒基础液，不添加任何辅助试剂，用于明确传统制绒工艺的基础性能；另两组分别掺入纯度≥99%的阳离子表面活性剂CTAB、非离子表面活性剂AEO-9，以对比不同结构添加剂的作用效果。为保障试验数据的稳定性与准确性，每组均设置5个平行样本，所有样本均选用规格统一的166mm×166mmP型单晶硅片，且预处理、制绒环境等无关变量保持一致，确保组间差异仅由添加剂类型及后续工艺参数变化导致。

1.3.2 工艺参数梯度

添加剂浓度梯度：0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%（质量分数）；制绒温度梯度：75℃、80℃、85℃、90℃、95℃；制绒时间梯度：30min、35min、40min、45min、50min、55min。采用单因素变量法，依次优化浓度、温度、时间参数，以电池片转换效率为核心评价指标，结合绒面反射率与形貌特征进行综合分析。

1.4 试验流程

(1) 硅片预处理：试验所用P型单晶硅片规格为166mm

×166mm、厚度150 μm，预处理时先放入KQ-500DE型超声波清洗器，依次注入电阻率≥18.2 MΩ·cm的去离子水、分析纯乙醇，分别超声清洗10min，利用超声波40kHz的振动频率剥离表面附着的油污与微米级杂质颗粒，清洗完成后采用纯度99.99%的氮气以0.3MPa压力吹干，避免残留液体形成水渍影响后续制绒效果。

(2) 制绒处理：以质量分数2%的NaOH水溶液为基础液，按设定比例加入纯度≥99%的AEO-9或CTAB添加剂，配置成不同浓度的制绒液，将其倒入500mL烧杯中并置于DF-101S型恒温磁力搅拌器内，加热至目标温度后放入预处理后的硅片，调节搅拌子转速稳定在300r/min，确保制绒液与硅片表面充分接触，严格控制反应时间在30~55min的设定梯度值。

(3) 后处理：制绒反应结束后迅速取出硅片，用去离子水以1.5L/min的流量冲洗，直至用pH试纸检测表面溶液呈中性（pH=7），随后浸入质量分数40%的氢氟酸溶液中浸泡5min，彻底去除制绒过程中生成的氧化层，再用去离子水冲洗3min，最后以氮气吹干，全程避免硅片表面与油污、灰尘接触。

(4) 性能测试：采用SU8010型扫描电子显微镜在5kV加速电压下观察硅片表面形貌，选取5个不同视场统计金字塔结构的尺寸（精度0.1 μm）与密度（个/mm²）；使用UV-2600型紫外-可见分光光度计，在300~1100nm波长范围内，以5nm为间隔测试反射率；通过QE-R300型量子效率测试仪分析不同波长下的光吸收性能；利用CT-800型电池片转换效率测试仪，在AM1.5标准光强（1000W/m²）、25℃环境温度下测试电池片转换效率，每个样本重复测试3次取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 添加剂类型对绒面结构及转换效率的影响

不同添加剂组的反射率与转换效率测试结果如表1所示。空白对照组平均反射率为16.8%，转换效率为22.1%；CTAB添加剂组平均反射率降至12.5%，转换效率提升至23.3%；AEO-9添加剂组平均反射率最低，为10.8%，转换效率达23.6%^[2-4]。这一结果表明，非离子表面活性剂AEO-9对绒面结构的改善效果更显著，其分子结构中的聚氧乙烯醚链能更均匀地吸附于硅片表面，调控腐蚀速率的各向异性，形成更优的光陷阱结构，从而降低反射损失，提升光吸收效率。

表1 不同添加剂组的反射率与转换效率对比

试验组	平均反射率 (%)	转换效率 (%)	效率提升幅度 (百分点)
空白对照组	16.8	22.1	-
CTAB 添加剂组	12.5	23.3	1.2
AEO-9 添加剂组	10.8	23.6	1.5

2.2 工艺参数对 AEO-9 添加剂组性能的影响

不同制绒温度对 AEO-9 添加剂组性能的影响结果如表 2 所示。固定添加剂浓度 0.8%、制绒时间 45min, 不同温度对电池性能的影响如表 2 所示。温度从 75℃升至 85℃时, 转换效率从 22.8%提升至 23.8%, 反射率从 13.1%降至 10.2%; 温度超过 85℃后, 转换效率呈下降趋势, 95℃时转换效率仅为 22.7%, 反射率升至 12.8%。低温条件下, 腐蚀反应速率较慢, 金字塔结构形成不充分。高温下反应过于剧烈, 导致金字塔结构坍塌, 表面平整度下降, 光吸收性能恶化^[5-6]。因此, 最优制绒温度为 85℃。

表 2 不同制绒温度对 AEO-9 添加剂组性能的影响

制绒温度 (°C)	平均反射率 (%)	转换效率 (%)
75	13.1	22.8
80	11.5	23.5
85	10.2	23.8
90	11.3	23.3
95	12.8	22.7

3 讨论

晶硅制绒过程的本质是硅材料在碱液中的各向异性腐蚀反应, (100) 晶面的腐蚀速率显著高于 (111) 晶面, 最终形成金字塔形绒面结构。添加剂通过吸附作用调控这一腐蚀过程: AEO-9 作为非离子表面活性剂, 其分子中的疏水基团与硅片表面结合, 亲水基团与碱液相互作用, 形成均匀的吸附膜, 降低 (100) 晶面的腐蚀速率, 同时促进 (111) 晶面的选择性腐蚀, 从而形成尺寸均一、分布致密的金字塔结构。相比之下, CTAB 作为阳离子表面活性剂, 其吸附作用受硅片表面电荷影响较大, 易在局部区域聚集, 导致腐蚀速率不均, 绒面结构完整性略逊于 AEO-9 体系^[7-8]。

工艺参数的优化本质是协调腐蚀反应速率与结构形成效率的平衡。添加剂浓度过低时, 吸附膜不完整, 无法有效调控腐蚀方向; 过高浓度则会引发分子聚集, 阻碍反应传质过程。温度通过影响反应活化能调控腐蚀速率, 85℃时既能保证反应充分进行, 又能避免速率过快导致的结构破坏。制绒时间则直接决定腐蚀深度, 45min 时金字塔结构达到最优尺寸与覆盖率, 过长或过短都会影响光陷阱效应的发挥。

本研究的创新点在于系统对比了两类典型添加剂的作用机制, 明确了非离子表面活性剂在绒面结构优化中的优势, 同时建立了添加剂浓度、制绒温度、制绒时间的协同优化方案。但研究仍存在一定局限, 未考虑添加剂复配体系的作用效果,

且未深入分析绒面结构与量子效率的相关性, 未来可进一步开展相关研究, 为电池效率的持续提升提供更全面的技术支撑。

4 结论

制绒添加剂能显著改善晶硅片表面绒面结构, 非离子表面活性剂 AEO-9 的优化效果优于阳离子表面活性剂 CTAB, 其作用机制与分子吸附均匀性及腐蚀调控能力密切相关;

AEO-9 添加剂的最优工艺参数组合为: 浓度 0.8%、制绒温度 85℃、制绒时间 45min, 在此条件下, 硅片平均反射率降至 10.1%, 电池片转换效率达 23.7%, 较空白对照组提升 1.6 个百分点。添加剂浓度、制绒温度、制绒时间对绒面结构及转换效率均存在显著影响, 过低或过高的参数都会导致反射率上升、转换效率下降, 需通过协同优化实现性能最大化。本研究提出的优化工艺具有良好的稳定性与可重复性, 可为晶硅电池制绒工艺的工业化应用提供技术参考, 对推动光伏发电效率提升与成本下降具有重要意义。

[参考文献]

- [1]彭辉.N 型全钝化接触晶硅电池的薄膜沉积工艺与性能研究[D].扬州大学, 2025.
- [2]张维佳.BC 电池技术, 晶硅电池的“终极技术”? [N]. 中国电子报, 2025-08-22 (006).
- [3]赵孟钢, 郝培远, 郭宇.晶硅太阳能电池减反射膜光学参数测试的研究[J].太阳能, 2025, (05): 51-57.
- [4]王哲睿.间隙膜的制备及其在晶硅电池组件上的应用[D].桂林理工大学, 2025.
- [5]田海莹, 蔡媛, 贾蕊琪, 等.基于芳香环磺酸盐的制绒添加剂设计及其单晶硅表面织构化[J].硅酸盐学报, 2023, 51 (07): 1827-1834.
- [6]陈素素, 闫会珍, 刘苗, 等.“SE+PERC”单晶硅太阳能电池制绒工艺中微观绒面的研究[J].太阳能, 2022, (03): 82-86.
- [7]闫会珍, 刘苗, 武晓燕, 等.金刚线切割多晶硅片的高效制绒工艺研究[J].太阳能, 2020, (12): 39-43.
- [8]李宁, 吴闯, 康士贤, 等.制绒添加剂在单晶硅制绒的作用[J].太阳能学报, 2018, 39 (07): 1865-1869.
- 作者简介: 王涛, 出生年月: 1991-08, 男, 汉族, 籍贯: 安徽省六安市, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 应用化工、制绒添加剂研发;
- 常帅锋, 出生年月: 1994-02, 男, 汉族, 籍贯: 河南省郑州市, 学历: 硕士, 职称: 中级工程师, 研究方向: 化学工程、制绒添加剂、碱抛添加剂等产品开发。