

# 适用于N型单晶硅的专用制绒添加剂制备与应用性能测试

常帅锋 王涛

嘉兴市小辰光伏科技有限公司 314000

**【摘要】**为解决N型单晶硅传统制绒反射率高、效率低的问题,本文制备专用复合制绒添加剂。以AEO-9、咪唑啉缓蚀剂、EDTA-2Na复配,经正交试验优化配方与工艺,在2.5mol/LNaOH溶液中添加2%该添加剂,85℃下制绒25min。结果显示,硅片400-1100nm平均反射率降至10.3%,较无添加剂组降低42.6%,太阳能电池光电转换效率达23.8%,提升11.7%,为高效光伏电池技术升级提供支撑。

**【关键词】**N型单晶硅;制绒添加剂;表面织构;光反射率;光电转换效率

Development and Performance Evaluation of Special Texturing Additive for N-Type Monocrystalline Silicon

Chang Shuaifeng Wang Tao

Jiaxing Xiaochen Photovoltaic Technology Co., Ltd. 314000

**【Abstract】**To address the issues of high reflectivity and low efficiency in traditional N-type monocrystalline silicon texturing, this study developed a specialized composite texturing additive. The formulation was optimized through orthogonal experiments using AEO-9, imidazoline corrosion inhibitor, and EDTA-2Na. The process involved adding 2% of the additive to a 2.5mol/LNaOH solution and texturing at 85°C for 25 minutes. Results demonstrated a 42.6% reduction in average reflectivity(400-1100nm) to 10.3% compared to the control group, while the photovoltaic conversion efficiency of solar cells reached 23.8%, representing an 11.7% improvement. This advancement provides a technical foundation for the upgrade of high-efficiency photovoltaic cell technology.

**【Key words】**N-type monocrystalline silicon; texturing additive; surface texture; light reflectivity; photoelectric conversion efficiency

## 引言

全球能源结构转型进程中,光伏产业作为清洁能源核心支柱,正朝着高效率、低成本方向加速迭代。N型单晶硅凭借载流子迁移率高、少子寿命长、温度系数优的本质优势,逐渐取代P型硅成为高效太阳能电池的核心基材。相较于P型硅成熟的碱制绒技术,N型单晶硅因掺杂类型差异,表面氧化膜形成速率与腐蚀选择性显著不同,传统制绒体系易出现金字塔尺寸不均、覆盖度不足等问题,导致表面反射率难以有效降低,制约电池光电转换效率的进一步提升。

现有研究中,制绒添加剂的引入被证实是调控N型硅表面织构的有效途径,但多数商用添加剂存在成分单一、适配性差、环境友好性不足等缺陷。部分配方过度依赖进口表面活性剂,不仅增加生产成本,其缓蚀与分散协同作用也难以匹配N型硅的腐蚀特性。基于此,本文通过系统筛选添加剂组分,优化制备工艺与应用参数,结合性能测试与机理分析,为N型单晶硅制绒技术的升级提供理论与实践参考。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料与仪器

试验选用N型单晶硅片(电阻率1-3Ω·cm,厚度150μm,尺寸166mm×166mm),购自江苏协鑫硅材料科技有限公司;氢氧化钠(分析纯)、脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO-9,工业级)、咪唑啉缓蚀剂(自制,纯度≥98%)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na,分析纯)、无水乙醇(分析纯),均来自国药集团化学试剂有限公司;去离子水为实验室自制(电导率≤10μS/cm)<sup>[1]</sup>。

试验仪器包括:

### 1.2 制绒添加剂的制备

采用复配协同设计思路,通过正交试验优化添加剂各组分比例,具体制备步骤如下:

(1)在500mL三口烧瓶中加入200mL去离子水(电导率≤10μS/cm),置于恒温水浴锅中升温至设定温度(55-75℃),待温度稳定后开启磁力搅拌器,转速精准控制在200-400r/min,保持体系搅拌均匀且温度恒定;

(2)按照正交试验优化的设定配比,缓慢加入计量的脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO-9),边加边搅拌避免局部浓度过高,持续搅拌30min至固体完全溶解,形成均一透明无沉

淀的均匀溶液；

(3) 按顺序依次加入自制咪唑啉缓蚀剂(纯度 $\geq 98\%$ )与乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na), 全程保持搅拌速率不变, 继续恒温反应 60min, 通过持续搅拌促进各组分分子间充分作用, 确保缓蚀、分散等功能组分协同复配；

(4) 反应结束后关闭水浴锅, 让体系自然冷却至室温(25℃左右), 用同等规格去离子水定容至 500mL, 经 0.45

$\mu\text{m}$  有机相滤膜真空过滤去除微量杂质与未溶解颗粒, 得到澄清透明的 N 型单晶硅专用制绒添加剂, 立即转入棕色密封瓶中避光冷藏保存备用, 防止组分氧化失效。

正交试验因素水平设计如表 1 所示, 以制绒后硅片表面平均反射率(400-1100nm 波长范围)为评价指标, 优化添加剂各组分质量分数与制备工艺参数。

表 1 添加剂制备正交试验因素水平表

水平	A (AEO-9 质量分数/%)	B (咪唑啉缓蚀剂质量分数/%)	C (EDTA-2Na 质量分数/%)	D (制备温度/℃)	E (搅拌速率/ $r \cdot \text{min}^{-1}$ )
1	2.0	0.8	0.4	55	200
2	3.0	1.0	0.6	65	300
3	4.0	1.2	0.8	75	400

### 1.3 制绒工艺与性能测试

#### 1.3.1 制绒工艺

硅片预处理: 将 N 型单晶硅片依次放入无水乙醇与去离子水中超声清洗 15min, 去除表面油污与杂质, 氮气吹干后备用。

制绒处理: 配置 2.5mol/L 的 NaOH 水溶液作为基础腐蚀液, 按体积分数 2% 加入制备的专用制绒添加剂, 搅拌均匀后倒入恒温水浴槽中, 升温至设定温度(75-95℃); 将预处理后的硅片浸入腐蚀液中, 保持液面没过硅片, 反应设定时间(15-35min)。后处理: 取出硅片, 用大量去离子水冲洗至表面无残留腐蚀液, 放入 1% 的盐酸溶液中中和 5min, 再次水洗后氮气吹干, 得到制绒硅片。

#### 1.3.2 性能测试方法

(1) 表面反射率测试: 采用紫外-可见分光光度计, 测试波长范围设定为 400-1100nm, 扫描步长 10nm, 以空气为参比, 在硅片表面选取 5 个均匀分布的测试点, 记录各点反射率数据并计算平均值, 作为硅片表面平均反射率评价指标。

(2) 表面亲水性测试: 采用接触角测量仪, 选取去离子水作为测试液体, 液滴体积  $5\mu\text{L}$ , 在硅片表面不同区域进行 3 次平行测试, 记录接触角数值并取平均值。

(3) 电池光电性能测试: 将制绒后的硅片按标准工艺制备成太阳能电池, 采用太阳模拟器(AM1.5G 光谱, 辐照度  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ , 温度 25℃) 测试电池的开路电压( $V_{oc}$ )、短路电流密度( $J_{sc}$ )和填充因子(FF), 依据公式  $\eta = V_{oc} \times J_{sc} \times FF \times 100\%$  计算光电转换效率, 每组测试 3 个平行样

品取平均值。

### 1.4 对比试验设计

设置三组对比试验: 对照组 1(无添加剂): 仅采用 2.5mol/L NaOH 溶液, 在 85℃ 下制绒 25min; 对照组 2(单一添加剂): 在 NaOH 溶液中分别单独加入 3.5% AEO-9、1.2% 咪唑啉缓蚀剂或 0.8% EDTA-2Na, 其他条件同上; 试验组: 采用本文制备的复合制绒添加剂, 按优化工艺参数进行制绒<sup>[2]</sup>。通过对比各组硅片的反射率、表面性能及电池光电转换效率, 验证专用添加剂的协同作用效果。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 制绒工艺参数优化结果

以制绒温度、制绒时间为变量, 固定 NaOH 浓度 2.5mol/L、添加剂体积分数 2%, 考察其对硅片反射率的影响, 结果如表 2 所示。当制绒温度低于 80℃ 时, 腐蚀反应速率较慢, 硅片表面难以形成完整的金字塔结构, 反射率较高; 温度升高至 85℃ 时, 腐蚀速率适中, 织构生长均匀, 反射率降至最低。而继续升温至 90℃ 以上, 过度腐蚀导致金字塔结构坍塌, 反射率反而上升。在 15-25min 内, 随着时间延长, 织构覆盖度逐渐提高, 反射率持续下降<sup>[3]</sup>。超过 25min 后, 腐蚀深度增加, 表面粗糙度过度增大, 导致光散射损失加剧, 反射率略有上升。因此, 最优制绒工艺参数为腐蚀液温度 85℃, 制绒时间 25min。

表 2 制绒工艺参数对硅片反射率的影响

制绒温度/℃	制绒时间/min	平均反射率(400-1100nm)/%	表面接触角/°	均方根粗糙度 RMS/ $\mu\text{m}$
75	25	16.8	72.3	0.58
80	25	12.5	68.7	0.72
85	25	10.3	65.2	0.85
90	25	11.7	63.5	0.92

85	15	14.2	70.1	0.65
85	20	11.4	67.3	0.78
85	30	10.6	64.8	0.88
85	35	12.1	63.2	0.95

### 2.2 对比试验结果分析

三组试验的硅片表面性能与电池光电转换效率对比结果如表 3 所示。对照组 1（无添加剂）制绒后，硅片表面金字塔结构大小不均，部分区域出现腐蚀坑，平均反射率高达 17.9%，对应的电池光电转换效率仅为 21.3%；对照组 2（单一添加剂）中，单独添加 AEO-9 虽能降低表面张力，但缺乏缓蚀作用，织构均匀性不足，反射率仍达 14.6%。而单独添加咪唑啉缓蚀剂可减缓腐蚀速率，但分散效果欠佳，反射率为 13.8%。且单独添加 EDTA-2Na 对织构改善作用有限，反射率 15.2%，三者的电池效率均未超过 22.5%<sup>[4]</sup>。

试验组采用复合制绒添加剂后，硅片表面形成尺寸均匀（2-5 μm）、覆盖完整的金字塔织构，平均反射率降至 10.3%，较对照组 1 降低 42.6%；表面接触角为 65.2°，亲水性显著改善，有利于后续电池制备工艺中的膜层沉积；均方根粗糙度 RMS 达 0.85 μm，形成理想的光陷阱结构。且对应的太阳能电池开路电压提升至 642mV，短路电流密度达 38.6mA/cm<sup>2</sup>，填充因子为 78.5%，光电转换效率高达 23.8%，较对照组 1 提升 11.7%，充分验证了复合添加剂各组分协同作用效果<sup>[5]</sup>。

表 3 不同试验组性能对比表

试验组	平均反射率/%	表面接触角/°	RMS/μm	开路电压	短路电流密度	填充因子	光电转换效率
				Voc/mV	Jsc/mA·cm <sup>-2</sup>	FF/%	η/%
对照组 1	17.9	82.5	0.42	628	36.2	76.8	21.3
对照组 2-1（AEO-9）	14.6	75.3	0.56	632	37.1	77.2	22.1
对照组 2-2（咪唑啉）	13.8	73.6	0.61	635	37.4	77.5	22.4
对照组 2-3（EDTA-2Na）	15.2	76.8	0.53	630	36.8	77.0	21.9
试验组	10.3	65.2	0.85	642	38.6	78.5	23.8

### 3 结论

本文通过制备一种适用于 N 型单晶硅的专用制绒复合添加剂，通过正交试验优化确定最佳配方与制备工艺（AEO-9 质量分数 3.5%、咪唑啉缓蚀剂 1.2%、EDTA-2Na 0.8%，制备温度 65℃、搅拌速率 300r/min）。该添加剂与 2.5mol/L NaOH 溶液复配后，在 85℃、25min 的制绒工艺条件下，可使 N 型单晶硅片表面形成尺寸均匀（2-5

μm）、覆盖完整的金字塔织构，400-1100nm 波长范围内的平均反射率降至 10.3%，较无添加剂体系降低 42.6%。基于该制绒工艺制备的太阳能电池，开路电压达 642mV，短路电流密度 38.6mA/cm<sup>2</sup>，光电转换效率提升至 23.8%，较对照组提升 11.7%。后续研究可进一步优化添加剂组分与工艺参数，探索其在更大尺寸、更高电阻率 N 型单晶硅片上的应用效果，为高效光伏电池的技术升级提供更全面的支撑。

### 参考文献

[1] 杨志. N 型单晶硅制备过程控氧技术的研究综述[J]. 冶金与材料, 2024, 44 (12): 73-75.  
 [2] 李振国. 高品质 N 型单晶硅关键制备技术研究及智能化集成控制应用. 宁夏回族自治区, 银川隆基硅材料有限公司, 2023-11-03.  
 [3] 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.  
 [4] 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.  
 [5] 刘金颖, 李宁, 任丙彦, 等. n 型单晶硅衬底少子寿命对 n-PERC 电池性能的影响[J]. 太阳能学报, 2017, 38 (11): 2958-2963.  
 作者简介: 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;  
 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。