

序号	模块名称	核心功能单元	关键技术规格
1	热蒸镀模块	高真空腔体及抽气单元	■ 极限真空 $\leq 5 \times 10^{-5}$ Pa
2			■ 真空抽速：常压条件约 40min 抽至 5×10^{-4} Pa；约 15min 抽至 ≤ 1 Pa（手套箱氮气氛围）
3		蒸发源	★ 电子束和热蒸发源 6 个
4		基片台	■ 基片台支持 0~30 r/min 连续旋转，蒸距约 350mm
5		蒸镀速率	■ 蒸镀速率在 0.1~10 Å/s 范围内可调；在设定速率为 1 Å/s 且晶振片剩余寿命 $\geq 99\%$ 的条件下，速率波动 $\leq 5\%$ ；
6		蒸发挡板	■ 各蒸发源配置独立挡板，基片工位配置主挡板；挡板应与蒸发电源、真空状态及膜厚控制系统联锁，避免预热阶段材料沉积及不同材料之间的交叉污染；
7		膜厚/速率监控单元	■ 速率显示精度 0.01 Å/s
8			# 膜厚不均匀性： $\leq 5\%$ （@100nm）片内膜厚不均匀性 $\leq 3\%$ ，同一载具片间膜厚不均匀性 $\leq 5\%$ ，连续 3 个批次的批间重复性 $\leq 3\%$ ；
9		多源共蒸单元	■ 支持不少于 3 源同步/时序共蒸；各源独立速率监控与闭环控制，支持配比和梯度程序设定
10		载具与镀膜区域	■ 有效镀膜区域 ≥ 230 mm $\times$ 230 mm，载具重复定位精度 $\leq \pm 0.2$ mm；
11		掩模板配置	■ 载具外形尺寸 ≥ 230 mm $\times$ 230 mm，
12		控制方式	▲ 上位机一体化自动控制。预留自动化设备及数据采集接口，用于与真空转运系统机械臂、上下料机构或主物流系统进行启动、停止、允许传送、到位、工艺完成及报警等信号交互；
13	磁控溅射模块	高真空腔体及抽气单元	■ 优于 5×10^{-5} Pa，12 小时内达到
14			■ 真空抽速：常压条件约 20 min 达到 5×10^{-4} Pa；常压至 ≤ 1 pa，15min

序号	模块名称	核心功能单元	关键技术规格
15			■整体漏率小于 $1.0 \times 10^{-8} \text{ Pa.m}^3/\text{S}$ ；抽到极限真空后，保压 12 小时 $\leq 5 \text{ Pa}$ ；
16		磁控靶组件单元	★ 采用 ≥ 5 英寸圆形平面靶，可安装 ≥ 3 个溅射靶
17		基片/均匀性控制单元	■片内膜厚不均匀性 $\leq 5\% @ 100 \text{ nm}$ 。设备应支持 ITO/IZO 等 TCO 薄膜制备
18		控制方式	■上位机一体化自动控制。设备应预留真空自动传输接口，可与手套箱或真空转运系统对接，实现溅射前后样品无空气暴露转运。
19	ALD 模块	ALD 反应/真空单元	■极限真空： $\leq 5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$
20			■真空抽速：常压条件约 15 min 达到 10Pa
21			■保压性能：氦漏率 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ Pa.L/s}$
22		前驱体源瓶	■3 个
23		前驱体路数	■支持至少 2 路前驱体气路，包含固、液态前驱体源瓶加热系统
24		基片/均匀性控制单元	■膜厚均匀性误差 $\leq 5\% @ 20 \text{ nm}$ 。单循环生长速率重复性 $\leq \pm 3\%$
25			■设备应支持 $\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温 ALD 工艺，适配钙钛矿/晶硅叠层电池界面钝化及保护层沉积需求。
26			■具备可加热的样品台，加热温度范围 RT-250 $^\circ\text{C}$ ；
27		工艺温度	■温度范围：RT~150 $^\circ\text{C}$ ；
28		控制方式	■上位机一体化自动控制。设备应配置器件转运平台实现自动翻转，配合正反面镀膜。
29	电极清边模块	清边单元	■清边通量： $\geq 2 \text{ 片/min}$

序号	模块名称	核心功能单元	关键技术规格
30			★应兼容玻璃、导电玻璃、硅片及玻璃/硅复合样品，并适用于 TCO、钙钛矿吸收层、传输层、金属电极及减反层等功能层。最终加工能力须通过实际膜系样品验证，不得仅以空白玻璃或单层膜验证。
31			# 颗粒物总体捕集效率应≥99%；针对有机分解气体和异味，应配置活性炭或等效气相等过滤单元。每片样品至少应记录以下数据：样品编号、批次号及载具编号；
32		控制方式	■设备应支持与氮气手套箱或局部惰性气氛腔体连接；接入氧、水指标≤1 ppm 的手套箱时，不应明显破坏原有气氛控制能力。
33	真空转运与暂存模块	真空缓存仓	■真空类设备应配置至少 1 个 Load Lock（预真空室），并支持与真空转运系统及器件转运平台对接，实现样品在真空环境下的无空气暴露转运。
34	自动化转运模块	自动搬运单元	▲可在真空环境下转运互联，与整线联动
35		高精度传输单元	■满足全行程多工位精准定位；支持位置校准、原点检测、限位及防碰撞联锁
36	手套箱系统	氮气纯化单元	■O ₂ ≤1 ppm；H ₂ O≤1 ppm
37		温控系统	■15 - 25℃；25℃时±1℃
38		真空泵	■抽速 12 m ³ /h
39	掩膜与图形化	自动掩膜版切换系统	■配置多掩膜位/掩膜库，支持蒸镀系统选取、定位、切换和归位，并与工艺配方关联
40	高通量物理气相沉积工作站自主控制系统模块	集中控制软件	# 真空抽气、自动翻片、工艺过程、膜厚监控全流程自动化
41		数字孪生系统	# 数字孪生系统实时映射设备状态；碰撞风险毫秒级报警；支持 Agent 实验方案的虚拟预演与工艺可行性仿真，提前识别工艺冲突与设备风险
42		AI 智能调度模块	▲Agent 自主实验智能体单元 基于大语言模型驱动的实验智能体，支持自然语言输入实验目标，自动拆解为沉积工艺步骤与设备控制序列；自主规划蒸发源温度、沉积速率、衬底温度、退火时间等工艺参数；

