

ICS 27.160

CCS F 12



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

钙钛矿/异质结叠层电池生产工艺技术规范

Technical specification for production process of perovskite/heterojunction
tandem solar cells

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 生产工艺流程 1

 4.1 原材料准备 2

 4.2 清洗与预处理 2

 4.3 钙钛矿层沉积 2

 4.4 电子传输层与空穴传输层制备 3

 4.5 中间连接层沉积 3

 4.6 硅异质结子电池集成 4

 4.7 电极制备与封装 4

 4.8 成品处理与初检 4

5 设备要求 4

 5.1 原材料处理设备 4

 5.2 钙钛矿层制备设备 4

 5.3 电子与空穴传输层制备设备 5

 5.4 中间连接层与电极制备设备 5

 5.5 封装设备 5

 5.6 检测与测试设备 5

 5.7 洁净与气氛控制设备 5

 5.8 设备校准与维护 5

6 环境要求 5

 6.1 洁净度要求 6

 6.2 光照条件要求 6

 6.3 电磁与静电要求 6

 6.4 振动与噪声要求 6

7 人员要求 6

 7.1 资质与培训 6

 7.2 防护与操作规范 6

 7.3 岗位分工 6

 7.4 记录与追溯 6

8 安全与环保要求 6

 8.1 化学品安全与应急要求 6

 8.2 设备安全要求 6

8.3 洁净室与气氛安全要求 7

8.4 废液与废气管理要求 7

8.5 环境与健康监测要求 7

8.6 总体要求 7

9 质量检验与判定 8

9.1 检验内容 8

9.2 判定规则与分级 8

9.3 记录与追溯 8

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

钙钛矿/异质结叠层电池生产工艺技术规范

1 范围

本文件规定了钙钛矿/异质结叠层电池的生产工艺流程、设备要求、环境要求、人员要求、安全与环保要求、质量检验与判定。

本文件适用于以晶体硅异质结或其他硅基底为底层，在其上叠覆金属卤化物钙钛矿吸收层的单体叠层电池的研发、试制与工业化生产。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GBZ 2.1 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素

GB/T 25915.2 洁净室及相关受控环境 第2部分：洁净室空气粒子浓度的监测

NB/T 11736 钙钛矿基叠层太阳电池I-V测试

ISO 14644-1 洁净室及相关受控环境—第1部分：空气洁净度按粒子浓度的分类（Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration）

3 术语和定义

NB/T 11736界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钙钛矿/异质结叠层电池 perovskite/heterojunction tandem solar cell

由钙钛矿太阳电池与硅基异质结太阳电池通过中间连接层串联组成的叠层结构电池。

3.2

叠层中间连接层 interconnection layer in tandem cells

位于钙钛矿电池与硅异质结电池之间，实现载流子高效传输与光学耦合的功能层。

4 生产工艺流程

4.1 生产工艺步骤

生产工艺步骤如图1所示。

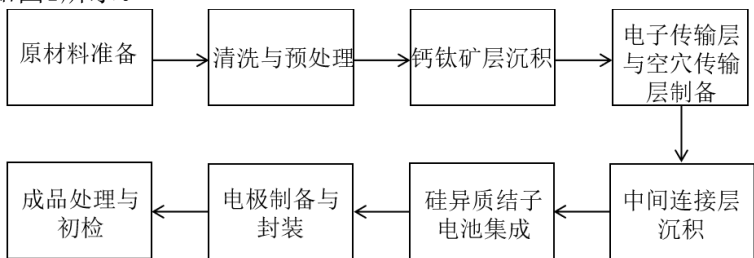


图1 生产工艺步骤

4.2 原材料准备

4.2.1 导电玻璃基底

导电玻璃基底要求如下：

- 材料：氟掺杂氧化锡（FTO）或铟锡氧化物（ITO）镀膜玻璃；
- 常用尺寸：25mm×25mm或100mm×100mm，厚度1.1mm；
- 表面电阻率： $\leq 10 \Omega/\square$ ；
- 清洗要求：使用去离子水、无水乙醇和丙酮依次超声清洗，每步10min，最后用氮气吹干。

4.2.2 钙钛矿前驱体

钙钛矿前驱体要求如下：

- 常用：碘化铅（ PbI_2 ）、溴化铅（ PbBr_2 ）、甲胺碘盐（MAI）、甲脒碘盐（FAI）等；
- 纯度： $\geq 99.99\%$ ；
- 储存条件：避光、真空密封，于干燥器中保存，相对湿度 $\leq 20\%$ 。

4.2.3 传输层材料

传输层材料要求如下：

- 电子传输层：二氧化钛纳米颗粒浆料或氧化锡粉体，纯度 $\geq 99.9\%$ ；
- 空穴传输层：聚三苯胺或Spiro-OMeTAD，纯度 $\geq 99\%$ ；
- 添加剂：锂盐、三氟甲磺酸盐等。

4.2.4 封装材料

封装材料要求如下：

- 封装玻璃或透明聚合物薄膜，透过率 $\geq 90\%$ ；
- 有机硅胶或环氧树脂密封胶，耐候性 $\geq 1000\text{h}$ （UV）；
- 阻隔膜：水汽透过率 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ 。

4.2.5 试剂与溶剂

试剂与溶剂要求如下：

- 溶剂：二甲基甲酰胺（DMF）、二甲基亚砜（DMSO）、氯苯、甲苯，水分含量 $\leq 50\text{ppm}$ ；
- 清洗用试剂：无水乙醇、丙酮（分析纯）。

4.3 清洗与预处理

4.3.1 清洗环境

在千级洁净室完成，操作人员应佩戴手套、防静电服和口罩。

4.3.2 清洗工艺

超声清洗（丙酮10min→异丙醇10min→去离子水10min）→氮气吹干→120℃烘箱30min。

4.3.3 工艺关键点

清洗后的玻璃表面应无可见残留颗粒或污渍。

4.4 钙钛矿层沉积

4.4.1 前驱体溶液制备

制备过程如下：

- 配方示例： PbI_2 :MAI（或FAI），按摩尔比配制，常用总浓度1.2~1.4mol/L；
- 溶剂体系：DMF:DMSO=4:1（体积比）；
- 工艺条件：在氮气手套箱中搅拌均匀（400r/min，2h），过滤（0.45 μm PTFE膜）后使用。

4.4.2 旋涂沉积法

旋涂沉积法要求如下：

a) 步骤：滴加前驱体溶液→第一段旋涂（1000r/min，10s）→第二段旋涂（4000r/min，30s）→抗溶剂滴加（第15s，50~100 μL 氯苯）→转移退火；

- 退火条件：120℃，15min；
- 膜厚控制：400~600nm，均匀性 $\pm 5\%$ ；

4.4.3 真空蒸发法

真空蒸发法要求如下：

- a) 真空度： $\leq 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ；
- b) 蒸发速率：甲胺碘盐和碘化铅分别控制 $0.5 \sim 1.0 \text{\AA/s}$ ；
- c) 基底温度： $60 \sim 80^\circ\text{C}$ ；
- d) 退火： $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ， $10 \sim 30 \text{min}$ ；
- e) 膜厚控制： $400 \sim 600 \text{nm}$ ，均匀性 $\pm 5\%$ 。

4.4.4 工艺关键点

工艺关键点如下：

- a) 湿度控制：旋涂和退火步骤相对湿度 $\leq 30\%$ ，避免钙钛矿分解；
- b) 溶液稳定性：配制溶液应在 24h 内使用，避免结晶前驱体沉淀；
- c) 基底清洁度：表面无颗粒和有机残留，否则导致膜层缺陷；
- d) 膜层质量：应连续、致密、无针孔与明显裂缝；
- e) 一致性控制：通过统计过程控制（SPC）方法，监控旋涂速率、退火温度与膜厚。

4.4.5 质量要求

质量要求如下：

- a) 光学性能：透过率 $\geq 80\%$ （波长 $> 750 \text{nm}$ ），吸收系数 $\geq 1 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ （波长 $350 \sim 750 \text{nm}$ 范围）；
- b) 结构性能：结晶度 $\geq 95\%$ ，晶粒取向一致；
- c) 电学性能：载流子寿命 $\geq 1 \mu\text{s}$ ，迁移率 $\geq 10 \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

4.5 电子传输层与空穴传输层制备

4.5.1 电子传输层制备

电子传输层制备应符合以下要求：

- a) 材料选择：二氧化钛或氧化锡，颗粒应均匀、纯度 $\geq 99\%$ ；
- b) 方法：溶胶-凝胶旋涂或磁控溅射，旋涂速度 $500 \sim 2000 \text{r/min}$ ，旋涂时间 $30 \sim 60 \text{s}$ ；
- c) 膜厚控制： $30 \sim 50 \text{nm}$ ，均匀性 $\pm 5\%$ ；
- d) 退火条件： 450°C ，保温 30min ，在空气中退火以形成晶相，提高载流子迁移率；
- e) 检测与控制：膜厚使用椭偏仪测量，电导率 $\geq 1 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ 。

4.5.2 空穴传输层制备

空穴传输层制备应符合以下要求：

- a) 材料选择：聚三苯胺或Spiro-OMeTAD，纯度 $\geq 99\%$ ，避免湿敏污染；
- b) 溶液配制：浓度 72mg/mL ，加入 0.1mol/L 锂盐及三氟甲磺酸盐作为掺杂剂，提高载流子浓度；
- c) 旋涂工艺： $2000 \sim 4000 \text{r/min}$ ， $30 \sim 60 \text{s}$ ；
- d) 膜厚控制： $50 \sim 80 \text{nm}$ ，均匀性 $\pm 5\%$ ；
- e) 干燥与固化：在氮气手套箱中 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ ，干燥 $10 \sim 15 \text{min}$ ，随后室温自然固化 15min ；
- f) 电学性能：导电性 $\geq 1 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ ，界面电阻 $\leq 1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

4.5.3 工艺关键点

工艺关键点如下：

- a) 旋涂环境相对湿度 $\leq 30\%$ ，避免水分引起的钙钛矿层降解；
- b) 所有操作在洁净室或氮气手套箱中进行，避免尘埃与氧化污染；
- c) 每批次生产应记录旋涂速度、膜厚、退火温度及时间，以保证批次间一致性；
- d) 膜层质量检测应包括光学显微镜表面检查、膜厚测量及界面电阻测试。

4.6 中间连接层沉积

中间连接层沉积工艺要求如下：

- a) 材料选择：常用透明导电氧化物（如氧化铟锡、氧化锌）及超薄金属层，光透过率 $\geq 85\%$ ；
- b) 沉积方法：可采用磁控溅射、原子层沉积（ALD）或溶液法，具体取决于量产需求与成本控制；
- c) 厚度控制：透明导电层 $60 \sim 80 \text{nm}$ ，金属辅助层 $0.5 \sim 2 \text{nm}$ ，厚度偏差 $\leq \pm 5\%$ ；
- d) 工艺环境：真空度 $\leq 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，基底温度 $50 \sim 100^\circ\text{C}$ ；
- e) 界面处理：沉积前应进行等离子体清洗或紫外臭氧处理，以降低界面电阻；

- f) 电学性能：界面电阻 $\leq 1\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ ，导电率 $\geq 1\times 10^3\text{S}/\text{cm}$ ；
- g) 光学性能：可见光区透过率 $\geq 85\%$ ，红外波段透过率不低于80%；

4.7 硅异质结子电池集成

硅异质结子电池集成工艺要求如下：

- a) 硅片选择：电阻率 $1\sim 3\ \Omega\cdot\text{cm}$ ，厚度 $150\sim 180\ \mu\text{m}$ ，单晶硅为主；
- b) 表面钝化：采用非晶硅氢化（a-Si:H）薄层，厚度 $5\sim 10\text{nm}$ ，确保表面复合速率低于 $10\text{cm}/\text{s}$ ；
- c) 电极沉积：透明导电氧化物（如ITO）厚度 $60\sim 80\text{nm}$ ，金属电极采用丝网印刷或溅射法；
- d) 集成方式：钙钛矿子电池与硅子电池通过中间连接层串联，要求界面接触电阻 $\leq 0.5\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ ；
- e) 工艺环境：温度 $20\sim 30^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 30\%$ ；
- f) 光学性能：硅子电池表面应具备减反膜处理，反射率 $\leq 5\%$ ；
- g) 电学性能：开路电压 $\geq 700\text{mV}$ ，填充因子 $\geq 78\%$ 。

4.8 电极制备与封装

4.8.1 电极制备

- a) 电极材料：正电极常用银或铝，背电极常用铝或银铝合金，应保证低电阻率（ $\leq 2\ \mu\ \Omega\cdot\text{cm}$ ）；
- b) 制备方法：可采用真空蒸发、磁控溅射或丝网印刷；
- c) 厚度：应控制在 $100\sim 200\text{nm}$ ；
- d) 电极接触电阻： $\leq 1\text{m}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

4.8.2 封装工艺

- a) 封装材料：常用EVA（乙烯-醋酸乙烯酯）胶膜、POE（聚烯烃弹性体）胶膜及高透光玻璃，透光率 $\geq 90\%$ ；
- b) 封装工艺：采用层压机在 150°C 、 0.6MPa 下保持 $15\sim 20\text{min}$ ；
- c) 可靠性：封装后组件应通过 85°C 、85%湿热试验 1000h ，功率衰减 $\leq 10\%$ ；
- d) 外观要求：无气泡、分层、裂纹等缺陷。

4.9 成品处理与初检

4.9.1 成品转移与存放

将封装完成的组件从封装区域转移至检测区，避免碰撞、污染或光照暴露。

4.9.2 外观初步检查

检查是否有明显气泡、划痕、分层、裂纹等可见缺陷，对存在明显缺陷的产品进行标记并隔离，等待后续处理或报废。

4.9.3 批次标识与记录

为每件成品粘贴批次二维码或标识，记录生产日期、批次号及关键工艺信息，为正式检验提供追溯信息，确保成品与工艺参数绑定。

5 设备要求

5.1 原材料处理设备

5.1.1 超声清洗机

频率 $40\sim 50\text{KHz}$ ，功率可调，容器容量适合导电玻璃尺寸，确保均匀清洗，并配备温控功能，温度范围 $20\sim 60^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

5.1.2 烘箱

具备温度可控范围 $20^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ ，温控精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

5.1.3 氮气吹干装置

氮气纯度应 $\geq 99.99\%$ ，流量可调，应能快速吹干基底表面，避免颗粒残留。

5.2 钙钛矿层制备设备

5.2.1 旋涂机

转速范围500~5000r/min, 控制精度 $\pm 2\%$; 自动滴液装置滴加精度 $\pm 2\mu\text{L}$; 配套洁净罩, 洁净度 ≥ 1000 级。

5.2.2 真空蒸发/蒸镀设备

蒸发速率可调, 误差 $\leq \pm 5\%$; 基底温度控制精度 $\pm 2^\circ\text{C}$; 配备膜厚监控系统, 保证膜厚均匀性 $\pm 5\%$ 。

5.2.3 原子层沉积设备

单层膜厚控制精度0.1~1nm; 温度范围50~300 $^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 1^\circ\text{C}$; 腔体气氛可控制在惰性或氧化环境; 脉冲/排气控制精度 $\pm 1\%$ 。

5.3 电子与空穴传输层制备设备

5.3.1 旋涂机

用于聚三苯胺或Spiro-OMeTAD旋涂, 转速2000r/min。

5.3.2 退火/干燥设备

温度范围50~450 $^\circ\text{C}$, 氮气或空气环境, 精度 $\pm 1^\circ\text{C}$, 确保电子/空穴传输层膜层性能稳定。

5.3.3 膜厚测量仪

椭偏仪或光学膜厚计, 测量精度 $\pm 1\text{nm}$ 。

5.4 中间连接层与电极制备设备

5.4.1 磁控溅射机

真空度 $\leq 1 \times 10^{-5}\text{Pa}$, 功率稳定度 $\pm 1\%$; 基底加热控制范围20~200 $^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

5.4.2 丝网印刷设备

用于金属电极印刷, 印刷厚度100~200nm, 精度 $\pm 5\%$ 。

5.4.3 真空蒸发设备

用于铝/银电极蒸镀, 蒸发速率精度 $\pm 5\%$, 膜厚均匀性 $\pm 5\%$ 。

5.5 封装设备

5.5.1 层压机

均匀施压, 保证EVA/POE胶膜及封装玻璃结合良好

5.5.2 UV固化设备

用于环氧树脂或有机硅胶固化, 功率 $\geq 500\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

5.6 检测与测试设备

5.6.1 光学性能检测设备

光谱透过率/反射率测量仪, 波长350~1200nm, 精度 $\pm 1\%$ 。

5.6.2 电性能测试设备

接触电阻测试仪, 精度 $\leq 1\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$; 界面电阻测量仪, 精度 $\leq 1\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

5.7 洁净与气氛控制设备

5.7.1 洁净室

等级不低于百级, 温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\leq 40\%$ 。

5.7.2 氮气手套箱

氧含量 $\leq 1\text{ppm}$, 湿度 $\leq 1\text{ppm}$, 用于钙钛矿及空穴传输层操作。

5.8 设备校准与维护

设备校准与维护要求如下:

a) 所有关键设备需定期校准, 周期不超过6个月;

b) 异常设备需建立维修及工艺调整方案, 保证生产连续性与产品一致性。

6 环境要求

6.1 洁净度要求

洁净度应符合以下要求：

- a) 关键工序（基底清洗、钙钛矿层沉积、传输层制备、中间连接层沉积）应在千级（ISO Class 6）及以上洁净室环境中进行；
- b) 成品组装与封装工序至少应在万级（ISO Class 7）洁净室内进行；
- c) 洁净室悬浮粒子浓度应符合GB/T 25915.2要求。

6.2 光照条件要求

光照应符合以下要求：

- a) 钙钛矿前驱体溶液和膜层在制备与转移过程中，应避免强光直射；光强控制 $\leq 5001x$ ，避免紫外波段光照引起材料分解；
- b) 光学检测区域需配备标准化照明系统（色温6500K，显色指数 $R_a \geq 90$ ）。

6.3 电磁与静电要求

电磁与静电防护要求如下：

- a) 生产环境应设置接地系统，确保静电电位 $\leq 100V$ ；
- b) 电磁干扰（EMI）控制：关键设备运行区域电磁场强度 $\leq 3V/m$ （10kHz~1GHz频段）。

6.4 振动与噪声要求

振动与噪声要求如下：

- a) 精密沉积及检测区域地面振动加速度 $\leq 0.5 \mu m/s^2$ （10Hz~100Hz频段）；
- b) 噪声水平 $\leq 65dB(A)$ ，确保检测设备及人员操作稳定性。

7 人员要求

7.1 资质与培训

操作人员应具备相关专业背景，经过工艺、设备、安全及质量培训并取得操作资格，培训记录需保存并定期复训。

7.2 防护与操作规范

洁净室或氮气手套箱操作时应佩戴防静电服、手套、口罩等防护用品，严格遵守操作规程，控制溶剂、前驱体及封装材料使用。

7.3 岗位分工

应明确工艺操作、检测与分选、设备维护及质量管理岗位职责。

7.4 记录与追溯

操作环节应记录关键参数及材料批次，与产品批次号或二维码绑定，确保可追溯。

8 安全与环保要求

8.1 化学品安全与应急要求

化学品安全与应急要求如下：

- a) 前驱体及溶剂有毒有挥发性，应局部排风操作，保证空气中溶剂浓度低于GBZ 2.1规定限值；
- b) 操作人员应佩戴防护手套、防静电服、口罩及护目镜，避免皮肤接触和吸入；
- c) 储存：避光、防潮，高毒化学品单独储存；
- d) 泄漏：使用吸附剂/中和剂收集，按危险废物处理；
- e) 应急：皮肤、眼睛接触应立即冲洗并就医，火灾用干粉或 CO_2 灭火。

8.2 设备安全要求

8.2.1 高温与旋涂设备

设备安全要求如下：

- a) 烘箱、退火炉及层压机等高温设备应设温控保护和超温报警；
- b) 旋涂机、真空蒸发设备操作时，确保所有防护罩关闭，操作人员不得触碰高速旋转部件或真空腔体；
- c) UV固化及等离子设备应设置防护屏蔽，禁止直接观察紫外光或等离子光。

8.2.2 电气安全与静电防护

电气安全与静电防护要求如下：

- a) 所有设备必须可靠接地，静电电位 $\leq 100V$ ；
- b) 电源、线路和接地装置应定期检查，每6个月校验一次；
- c) 在洁净室及操作区严禁使用易产生静电的材料和设备；
- d) 关键电子检测设备应有过载、短路和漏电保护。

8.3 洁净室与气氛安全要求

8.3.1 洁净室操作

洁净室操作应符合以下要求：

- a) 千级及以上洁净室操作必须穿戴防静电服、手套、口罩及鞋套，控制人体带入颗粒数量；
- b) 禁止在洁净区内饮食、吸烟及使用非授权化学品；
- c) 定期检测空气洁净度、温湿度、振动和噪声，异常及时处理。

8.3.2 氮气手套箱操作

氮气手套箱操作要求如下：

- a) 开箱、取样或操作前确认箱体气密性，防止氧或水分进入；
- b) 氮气气源应配备压力、流量及报警监控，异常立即停止操作并排查。

8.4 废液与废气管理要求

8.4.1 废液处理

废液处理应符合以下要求：

- a) 化学废液、溶剂废液必须收集于专用容器，标明化学性质及危险性；
- b) 废液不得随意排入排水系统，应交由危险废物处理单位或采用本地环保规定方法处理。

8.4.2 废气控制

废气控制应符合以下要求：

- a) 旋涂、退火及溶剂使用区应配备VOC吸附或回收装置，废气中有机物浓度 $\leq 50\text{mg}/\text{m}^3$ ；
- b) 排风口应设VOC监测系统并定期校验；
- c) 紫外光或等离子处理区域应配备屏蔽罩，避免人员暴露。

8.5 环境与健康监测要求

8.5.1 环境监测

环境监测要求如下：

- a) 定期监测洁净室温湿度、悬浮粒子浓度、噪声及振动水平；
- b) 检测频率：洁净度每日检查，温湿度及噪声每周检测一次，振动每月检测一次；
- c) 检测结果应记录归档，并与设备、工艺调整挂钩。

8.5.2 健康监测与培训

健康监测与培训要求如下：

- a) 操作人员应定期体检，关注皮肤、呼吸及眼睛健康；
- b) 所有人员必须接受安全、环保及应急操作培训，培训记录保存并每年至少复训一次；
- c) 定期组织化学品泄漏、火灾、急救及应急演练。

8.6 总体要求

总体要求如下：

- a) 所有安全与环保措施应与生产工艺、设备及环境要求相结合；

- b) 关键安全、防护及环保措施需在生产作业指导书中明确，操作人员必须严格遵守；
- c) 安全与环保记录应完整可追溯，异常情况必须及时处理并记录。

9 质量检验与判定

9.1 检验内容

9.1.1 外观检查

显微镜检查组件表面有无气泡、划痕、裂纹等缺陷。

9.1.2 电学与光学性能检验

电学与光学性能检验要求如下：

- a) 电学性能：在标准测试条件（25℃、AM1.5G、1000W/m²）下测量开路电压、短路电流、填充因子及光电转换效率；
- b) 光学性能：透过率与反射率测试，确保光学损耗≤5%。

9.1.3 可靠性检验

可靠性检验应按照以下要求进行：

- a) 湿热老化：85℃、85%相对湿度，持续1000小时；
- b) 热循环：-40℃~85℃，200次循环；
- c) 功率衰减≤10%为合格。

9.2 判定规则与分级

9.2.1 判定标准

成品需满足所有检验项目及性能指标，方可判定为合格。

9.2.2 分级标准

根据光电转换效率将产品分为四级：

- a) A级：≥25%；
- b) B级：23%~25%；
- c) C级：20%~23%；
- d) D级：<20%，不合格。

9.2.3 抽样方案

按批次抽样检验，抽样比例根据生产规模与历史质量水平确定，应至少覆盖关键工艺批次。

9.3 记录与追溯

记录与追溯要求如下：

- a) 检验结果应记录电学、光学及可靠性数据，与批次二维码关联；
 - b) 任何异常品应记录原因及处理方式，确保可追溯。
-