

碳化硅衬底全流程颗粒物管控细化要求

一、引言

碳化硅 (SiC) 衬底作为第三代半导体材料, 广泛应用于高功率、高频和高温电子器件。其制造过程中, 颗粒物的管控直接影响衬底表面质量、器件性能和良率。本报告针对衬底制造中的线切、倒角、研磨及抛光工艺, 详细阐述颗粒物的大小、数量要求及管控措施。

二、颗粒物对 SiC 衬底的影响

表面缺陷: 颗粒物可能导致划痕、凹坑或微裂纹, 影响外延层生长均匀性。

器件失效: 残留颗粒在后续工艺中可能引发局部电场集中或短路。

污染风险: 颗粒物携带金属离子或其他杂质, 污染洁净室环境。

三、各制造工艺环节具体管控要求

1. 长晶 (Crystal Growth)

工艺描述: 物理气相传输法 (PVT 法) 生长 SiC 单晶。

颗粒物来源:

石墨坩埚/保温材料粉尘 (C、Si 颗粒)。

原料 SiC 粉末中的杂质颗粒 (金属、氧化物)。

管控要求:

颗粒尺寸: 原料粉末中杂质颗粒 $\leq 5 \mu\text{m}$ (SEMI 标准 M11-0315)。

颗粒密度: 晶锭内部宏观缺陷 (如微管、包裹体) 密度 $\leq 10 \text{ 个}/\text{cm}^2$ (ASTM F2136)。

检测方法:

X 射线衍射 (XRD): 分析原料纯度 ($\geq 99.9995\%$)。

红外显微镜: 检测晶锭内部包裹体 (分辨率 $\leq 1 \mu\text{m}$)。

管控措施:

使用高纯度石墨件 (灰分 $\leq 5 \text{ ppm}$, 颗粒度 $\leq 10 \mu\text{m}$)。

原料粉末通过 气流分级筛分 ($D_{50}=50 \mu\text{m}$, $D_{90}\leq 100 \mu\text{m}$)。

长晶炉内充高纯氩气 ($\text{O}_2\leq 0.1 \text{ ppm}$, $\text{H}_2\text{O}\leq 0.5 \text{ ppm}$)。

2. 晶锭加工 (Ingot Processing)

2.1 线切 (Multi-Wire Sawing)

颗粒物来源: 金刚石线磨损颗粒、SiC 碎屑。

管控要求:

切割表面颗粒尺寸分级:

- 0.1–0.5 μm : 密度 ≤ 80 个/ cm^2

- 0.5–1.0 μm : 密度 ≤ 20 个/ cm^2

--- >1.0 μm : 零容忍

总颗粒密度: ≤ 100 个/ cm^2

管控措施:

金刚石线径 ≤ 120 μm , 线张力控制 ± 2 N (减少线抖动碎屑)。

切割后立即用 SC1 清洗液 ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:5$) 超声清洗 30 分钟。

2.2 滚圆 (Cylindrical Grinding)

颗粒物来源: SiC 晶锭边缘磨削碎屑。

管控要求: 颗粒尺寸: ≤ 0.5 μm

颗粒密度: 晶锭表面 ≤ 50 个/ cm^2

检测方法: 激光共聚焦显微镜 (台阶高度 ≤ 2 μm)。

管控措施:

使用金刚石砂轮 (粒度 #2000, 转速 ≤ 2000 rpm) 减少热应力碎屑。

实时喷淋 纳米纯水 (电阻率 ≥ 18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$) 冷却。

3. 衬底切片 (Slicing) 与粗抛 (Rough Polishing)

颗粒物来源: 切片后的表面损伤层碎屑、抛光液残留。

管控要求: 切片后表面粗糙度: $R_a \leq 1$ μm (AFM 检测)。

粗抛后颗粒尺寸分级:

- 0.3–0.5 μm : 密度 ≤ 30 个/ cm^2

- 0.1–0.3 μm : 密度 ≤ 50 个/ cm^2

管控措施:

粗抛液采用 氧化铝 (Al_2O_3) 磨料 (粒径 0.5 μm , 浓度 10 wt%)。

多级过滤系统 (5 μm \rightarrow 1 μm \rightarrow 0.5 μm) 循环抛光液。

4. 化学机械抛光 (CMP)

管控要求:

最终表面颗粒尺寸分级:

- 0.05–0.1 μm : 密度 ≤ 5 个/ cm^2

- 0.1-0.2 μm: 密度 ≤3 个/cm²

- >0.2 μm: 零容忍

表面粗糙度: Ra ≤0.1 nm (AFM 检测, 扫描范围 5×5 μm²)。

检测方法:

全片表面扫描仪 (如 KLA Surfscan): 灵敏度 0.02 μm。

飞行时间二次离子质谱 (TOF-SIMS): 检测有机污染物 (≤1×10⁹ atoms/cm²)。

管控措施:

终抛液采用 胶体二氧化硅 (SiO₂) (pH=10.5, 粒径 30 nm)。

抛光后 兆声波清洗 (频率 1 MHz, 功率密度 1 W/cm²) 去除亚微米颗粒。

5. 外延前清洗 (Pre-Epitaxial Cleaning)

工艺目标: 确保表面无颗粒、有机物及金属污染。

管控要求:

颗粒尺寸: ≤0.05 μm (外延生长容忍极限)。

颗粒密度: ≤1 个/cm² (SEMI M73 标准)。

金属污染: Fe、Ni、Cu 等 ≤1×10¹⁰ atoms/cm² (ICP-MS)。

清洗流程:

1. RCA-1 清洗 (NH₄OH:H₂O₂:H₂O=1:1:5, 75°C) 去除有机物。
2. RCA-2 清洗 (HCl:H₂O₂:H₂O=1:1:5, 70°C) 去除金属离子。
3. 氢氟酸 (HF) 漂洗 (0.5% vol, 20°C) 去除氧化层。
4. 超临界 CO₂ 干燥 (压力 7.4 MPa, 温度 31°C) 避免水痕残留。

6 全流程颗粒物控制逻辑

工艺环节	最大颗粒尺	颗粒密度 (个/cm ²)	关键指标
长晶	5 μm	≤10 (内部缺陷)	晶锭纯度 ≥6N
线切与滚圆	1 μm	≤100	表面损伤层 ≤20 μm
粗抛	0.5 μm	≤80	粗糙度 Ra ≤1 μm
CMP	0.2 μm	≤8	Ra ≤0.1 nm
外延前清洗	0.05 μm	≤1	金属污染 ≤1×10 ¹⁰ atoms/cm ²

四、颗粒物超标根因分析与对策

长晶环节：石墨件粉尘→更换超高纯等静压石墨（灰分 ≤ 1 ppm）。

线切环节：金刚石线磨损→优化切割参数（进给速度 ≤ 0.2 mm/min）。

CMP 环节：抛光液团聚→添加分散剂（如 PEG 2000，浓度 0.1%）。

五、行业标杆数据参考

Wolfspeed 8 英寸 SiC 衬底：

CMP 后颗粒密度 ≤ 5 个/cm² (> 0.1 μm)，

外延层缺陷密度 ≤ 0.5 个/cm²。

外延前清洗颗粒残留 ≤ 0.3 个/cm²（通过超临界 CO₂干燥技术）。

六、结语

从长晶到外延的全流程颗粒管控需遵循“逐级净化”原则：

长晶阶段：控制原料纯度与热场稳定性，从源头减少缺陷；

加工阶段：分尺寸区间限值（如线切 1 μm →抛光 0.2 μm →外延前 0.05 μm ）；

检测闭环：结合离线分析（SEM/TOF-SIMS）与在线监控（Surfscan 实时反馈）。

通过 SPC（统计过程控制）与 FMEA（失效模式分析）实现工艺稳定性，满足车规级（AEC-Q101）与通信器件（5G NR）对 SiC 衬底的严苛要求。