

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源 技术规范

Technical specifications for aluminum ion source of high-temperature and
high-energy ion implanter for silicon carbide

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 工作要求	2
4.1 人员要求	2
4.2 设备要求	2
4.3 环境要求	2
4.4 原材料要求	2
5 系统结构与功能	3
5.1 系统结构	3
5.2 系统功能	3
6 技术要求	4
7 试验方法	4

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。

本文件由核工业西南物理研究院提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：核工业西南物理研究院、北京中研华采技术服务有限公司、北京六只猫创意科技有限公司、北京彬诚科技有限公司、北京骏宇汽车科技有限公司。

本文件主要起草人：但敏、乐志斌、夏卫彬、杨笛、朱军。

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源技术规范

1 范围

本文件规定了碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源的工作要求、系统结构与功能、技术要求、试验方法等内容。

本文件适用于以碳化硅（SiC）半导体材料为注入对象，加速能量范围为50 keV~2 MeV、束流强度不小于100 μ A的高温高能离子注入机所用铝离子源，其他类型离子注入机的铝离子源可参照本规范执行。

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。

- GB/T 1196 重熔用铝锭
- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 3358.1 统计学词汇及符号 第1部分：一般统计术语与用于概率的术语
- GB/T 3875 钨板
- GB/T 5080.1 可靠性试验 第1部分：试验条件和统计检验原理
- GB/T 5080.4 设备可靠性试验 可靠性测定试验的点估计和区间估计方法（指数分布）
- GB/T 5231 加工铜及铜合金牌号和化学成分
- GB/T 6060.1 表面粗糙度比较样块 第1部分：铸造表面
- GB/T 12772 排水用柔性接口铸铁管、管件及附件
- GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件
- GB/T 13823.6 振动与冲击传感器的校准方法 基座应变灵敏度测试
- GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 15862 离子注入机通用规范
- GB/T 16292 医药工业洁净室（区）悬浮粒子的测试方法
- GB/T 17625.8 电磁兼容 限值 每相输入电流大于16A小于等于75A连接到公用低压系统的设备产生的谐波电流限值
- GB/T 18268.1 测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第1部分：通用要求
- GB/T 22572 表面化学分析 二次离子质谱 用多 δ 层参考物质评估深度分辨参数的方法
- GB/T 32218 真空技术 真空系统漏率测试方法
- GB/T 40344.3 真空技术 真空泵性能测量标准方法 第3部分：机械增压泵的特定参数
- GB/T 40965 回复反射的测量方法
- JJG 124 电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程
- JJG 159 双活塞式压力真空计检定规程
- JJG 707 扭矩扳子检定规程
- JJG 1157 直流电流互感器检定规程
- JJF 1637 廉金属热电偶校准规范
- JB/T 13390 红外线扫描测温仪

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源 aluminum ion source for high-temperature and high-energy ion implanter for silicon carbide

专为碳化硅半导体材料高温、高能离子注入工艺设计，能产生并输出铝离子束的核心部件，主要用于碳化硅器件的掺杂改性。

3.2

离子束纯度 ion beam purity

铝离子占离子源输出总离子的比例，以百分比（%）表示，直接影响碳化硅掺杂的准确性。

3.3

束流稳定性 beam stability

在规定时间内，离子束流强度的波动程度，用相对标准偏差（RSD）表示，体现离子源工作的可靠性。

3.4

灯丝寿命 filament life

离子源灯丝从开始使用到无法维持正常离子束输出的累计工作时间，单位为小时（h）。

4 工作要求

4.1 人员要求

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源人员要求应满足以下内容：

- a) 操作人员应具备半导体设备操作相关专业背景，经铝离子源原理、注机操作流程、安全防护等专项培训，考核合格后方可上岗；
- b) 维护人员应熟悉离子源结构与真空系统工作原理，能独立完成灯丝更换、真空检漏等维护作业；
- c) 检验人员应掌握本规范技术要求与试验方法，熟练操作束流测量仪、真空计等设备，考核合格后从事检验工作。

4.2 设备要求

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源设备要求应满足以下内容：

- a) 铝离子源配套的离子注入机应符合GB/T 15862中关于离子注入机的通用要求，注机加速管真空度不大于 5×10^{-5} Pa，靶室温度控制精度 ± 5 °C；
- b) 离子源供电系统应稳定，灯丝加热电源输出电压波动不大于 $\pm 1\%$ ，弧压电源输出电压波动不大于 $\pm 0.5\%$ ，符合GB/T 17625.8要求；
- c) 配套真空系统（分子泵、机械泵）应能使离子源腔体真空度在30 min内达到不大于 2×10^{-4} Pa，真空测量仪表精度不大于 $\pm 5\%$ ，符合GB/T 12772相关规定；
- d) 束流测量设备（如法拉第杯）测量范围0~500 μ A，测量精度 $\pm 2\%$ ，符合JJG 1157要求。

4.3 环境要求

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源环境要求应满足以下内容：

- a) 离子注入机运行环境温度应控制在22°C~28°C，相对湿度35%~55%，温度每h记录1次，湿度每2h记录1次，符合GB/T 2423.1、GB/T 2423.2中常规环境试验要求；
- b) 工作区域洁净度应达到GB/T 16292规定的洁净度，每月检测1次；
- c) 工作区域应远离强磁场、强振动环境，振动测量按GB/T 13823.6执行；
- d) 供电电压为380 V $\pm 10\%$ ，频率50 Hz ± 1 Hz，电网谐波含量符合GB/T 14549要求。

4.4 原材料要求

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源原材料要求应满足以下内容：

- a) 离子源灯丝采用钨丝，直径0.5 mm~0.8 mm，纯度不小于99.95%，表面粗糙度Ra不大于0.8 μm，符合GB/T 3875要求；
- b) 离子源腔体材质为无氧铜，纯度不小于99.97%，腔体表面粗糙度Ra不大于0.4 μm，经镀镍处理（镀层厚度5 μm~10 μm），符合GB/T 5231要求；
- c) 供铝原料为高纯度铝颗粒，纯度不小于99.999%，粒径1 mm~3 mm，无氧化、杂质，符合GB/T 1196中99.999级要求。

5 系统结构与功能

5.1 系统结构

5.1.1 离子产生单元

由离子源腔体、灯丝、供铝装置组成。离子源腔体为密闭式结构，容积50 cm³~100 cm³，设有原料添加口与真空接口；灯丝安装于腔体内部，通过加热使铝原料蒸发；供铝装置采用自动送料结构，可精准控制铝原料进给量。

5.1.2 束流引出单元

包括引出电极、聚焦电极。引出电极采用多极板结构，间距2 mm~5 mm，可施加10 kV~50 kV引出电压；聚焦电极能产生聚焦磁场，使离子束聚焦成直径不大于5 mm的束斑。

5.1.3 真空单元

由分子泵、机械泵、真空阀门、真空计组成，用于维持离子源腔体与注机加速管的高真空环境，真空计实时监测真空度并反馈至控制单元。

5.1.4 加热单元

包括腔体加热装置与靶室加热装置。腔体加热装置采用电阻加热，加热功率500 W~1000 W，可使腔体温度达到300℃~500℃；靶室加热装置采用红外加热，温度控制范围300℃~800℃，控制精度±5℃。

5.1.5 供电单元

由灯丝电源、弧压电源、引出电源、聚焦电源组成，为各单元提供稳定供电。

5.1.6 控制单元

由PLC控制器、人机交互界面（HMI）、数据采集模块组成。PLC 控制器实现对各单元的逻辑控制；HMI 可实时显示束流强度、真空度、温度等参数，支持参数设置与故障报警；数据采集模块采样频率不小于1 Hz，记录并存储关键运行数据。

5.2 系统功能

5.2.1 离子产生与输出功能

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源离子产生与输出功能包括以下要求：

- a) 灯丝加热后，使铝原料蒸发为铝蒸汽，在弧压作用下电离产生铝离子，通过引出电极将铝离子引出形成离子束，束流强度可在100 μA~500 μA范围内调节；
- b) 聚焦电极可根据注入需求调整聚焦磁场，离子束斑直径控制在2 mm~5 mm，确保离子注入精度。

5.2.2 参数控制与调节功能

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源参数控制与调节功能包括以下要求：

- a) 控制单元可精准调节灯丝温度、弧压、引出电压，实现束流强度与纯度的优化；
- b) 真空单元可自动控制真空阀门与真空泵启停，维持腔体真空度稳定在（ 1×10^{-4} Pa~ 5×10^{-4} ）Pa，真空度波动不大于（ $\pm 1 \times 10^{-5}$ ）Pa；
- c) 加热单元可通过PID控制算法调节腔体与靶室温度，温度调节响应时间不大于30 s，确保高温注入环境稳定。

5.2.3 监测与报警功能

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源监测与报警功能包括以下要求：

- a) 系统实时监测束流强度、真空度、温度、各电源参数，当参数超出设定范围时，立即发出声光报警，并在HMI上显示故障类型；
- b) 具备灯丝寿命预警功能，当灯丝累计工作时间接近额定寿命时，系统提示更换灯丝；若灯丝断裂，系统自动切断相关电源，防止损坏设备。

5.2.4 数据记录与追溯功能

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源数据记录与追溯功能包括以下要求：

- a) 数据采集模块实时记录束流强度、真空度、温度、供电参数等数据，记录频率1次/秒，数据可导出为Excel或CSV格式；
- b) 支持历史数据查询，可按时间、批次等条件检索，便于工艺优化与故障追溯。

6 技术要求

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源的技术要求应符合表1的规定。

表 1 碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源技术要求

技术指标	技术要求
束流强度	$\geq 100 \mu\text{A}$
束流稳定性 (RSD)	$\leq 3\%$
离子束纯度 (铝离子占比)	$\geq 95\%$
束斑直径	$\leq 5 \text{ mm}$
腔体极限真空度	$\leq 2 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
真空度恢复时间	$\leq 30 \text{ min}$
真空泄漏率	$\leq 1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$
腔体工作温度范围	$300 \text{ }^\circ\text{C} \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$
靶室工作温度范围	$300 \text{ }^\circ\text{C} \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$
温度控制精度	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
温度均匀性 (靶室)	$\leq 8 \text{ }^\circ\text{C}$
灯丝电源电压波动	$\leq \pm 1\%$
弧压电源电压波动	$\leq \pm 0.5\%$
引出电源电压波动	$\leq \pm 2\%$
灯丝寿命	$\geq 100 \text{ h}$
连续工作时间	$\geq 72 \text{ h}$
平均无故障时间 (MTBF)	$\geq 2000 \text{ h}$
表面质量	无划痕、变形、氧化，镀层无脱落
连接可靠性	各接口连接牢固，无松动、漏气

7 试验方法

碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源技术指标的试验方法应符合表2的规定。

表 2 碳化硅用高温高能离子注入机铝离子源试验方法

技术指标	试验方法	依据标准
束流强度	a) 将离子注入机加速能量设定为1 MeV，靶室温度升至500 °C，启动离子源； b) 调节引出电压至30 kV，待束流稳定后，用法拉第杯测量束流强度，连续测量3次，取平均值	GB/T 15862、 JJG 1157
束流稳定性 (RSD)	a) 按步骤启动离子源，维持束流稳定输出；	GB/T 15862、

	b) 每10min记录1次束流强度, 连续记录24次 (4 h); c) 计算24次数据的相对标准偏差	GB/T 3358.1
离子束纯度	a) 设定加速能量为500 keV, 靶室温度300 °C, 启动离子源; b) 采用质谱仪分析离子束成分, 记录铝离子与总离子的计数; c) 计算铝离子占比	GB/T 15862、 GB/T 26824
束斑直径	a) 在离子源引出口100 mm处放置荧光屏, 启动离子源输出束流; b) 用光学相机拍摄荧光屏上的束斑图像, 通过图像分析软件测量束斑直径 (取束斑最大直径与最小直径的平均值); c) 若平均值不大于5 mm, 判定合格	GB/T 40965
腔体极限真空度	a) 关闭离子源原料添加口, 启动机械泵与分子泵, 连续抽真空1 h; b) 用真空计测量腔体真空度, 记录稳定后的真空值	GB/T 16709、 JJG 2753
真空度恢复时间	a) 打开离子源腔体, 使腔内压力与大气平衡; b) 启动真空泵, 同时记录时间, 每隔5 min测量1次真空度; c) 记录真空度降至 2×10^{-4} Pa所需时间	GB/T 16709
真空泄漏率	a) 将腔体抽至极限真空 (不大于 2×10^{-4} Pa), 关闭真空泵与真空阀门, 开始保压; b) 初始时刻 (t_0) 记录真空度 P_0 , 24 h后 (t_1) 记录真空度 P_1 ; c) 计算泄漏率	GB/T 32218、 JJG 275
腔体温度范围与控制精度	启动腔体加热装置, 分别设定温度300 °C、500 °C、800 °C, 待温度稳定后, 用热电偶温度计在腔体内3个不同位置测量温度, 记录平均值与波动值, 若平均值在设定范围且波动不大于 ± 5 °C, 判定合格;	GB/T 2423.2、 GB/T 18268.1
靶室温度范围与均匀性	启动靶室红外加热装置, 设定温度300 °C、500 °C、800 °C, 用红外测温仪在靶室有效区域 (直径100 mm) 内均匀选取5个测量点, 记录各点温度, 计算最大温差与平均值	GB/T 2423.2、 GB/T 18268.1、 JJF 1637、 JB/T 13390
灯丝电源电压波动	a) 将灯丝电源输出电压调至额定值, 接入额定负载; b) 用数字万用表并联在电源输出端, 连续测量30 min, 每1分钟记录1次电压值; c) 计算电压波动	GB/T 17625.8、 JJG 124
弧压电源电压波动	a) 弧压电源输出调至额定值, 接入负载 (20 Ω), 将灯丝电源输出电压调至额定值, 接入额定负载; b) 用数字万用表并联在电源输出端, 连续测量30 min, 每1分钟记录1次电压值; c) 计算电压波动	GB/T 17625.8、 JJG 124
引出电源电压波动	引出电源输出调至额定值, 接入负载, 用高压探头 (分压比 1000:1), 用万用表测量, 波动不大于 $\pm 2\%$ 判定合格	GB/T 17625.8、 JJG 124
灯丝寿命	a) 安装新灯丝, 启动离子源, 维持束流强度100 μ A (加速能量1 MeV) 连续工作; b) 每2h测量1次束流强度, 记录数据; c) 当束流强度降至80 μ A (额定值80%) 时, 停止试验, 记录灯丝累计工作时间	GB/T 5080.1
连续工作时间	启动离子源, 设定束流强度100 μ A、加速能量1 MeV、靶室温度500 °C, 连续运行72 h, 期间每12h检查1次设备状态, 若无故障, 判定合格	GB/T 15862、 GB/T 5080.4
平均无故障时间 (MTBF)	统计1年内设备运行时间与故障次数, 计算MTBF, 若不小于2000 h, 判定合格	GB/T 6060.1
表面质量	在自然光下 (照度不小于500 lux), 距离子源500 mm处目视检查, 若表面无划痕、变形、氧化, 镀层无脱落, 判定合格	GB/T 6060.1、 GB/T 13384
连接可靠性	用扭矩扳手检查各接口连接螺栓, 无松动; 将腔体抽至 2×10^{-4} Pa, 保压1 h, 真空度下降不大于 5×10^{-5} Pa, 判定合格	JJG 707