

集成电路等离子刻蚀机用硅材料性能检测方法 及标准制定

祝超¹, 汤知源², 李文雨泽², 邵文杰¹

1. 江山市检验检测研究院, 浙江 衢州 324100

2. 浙江省质量科学研究院, 浙江 杭州 310012

DOI: 10.61369/TACS.2025080008

摘要: 等离子刻蚀机用硅环是集成电路制造过程中不可或缺的关键部件之一, 其质量会影响刻蚀工艺质量。我国虽在该领域的研究与开发取得了一定进展, 但是国内生产的半导体硅材料, 在性能与质量方面与国外有一定差距。本文围绕集成电路等离子刻蚀机用硅材料的性能检测方法 & 标准制定展开研究, 并针对半导体制程向 5nm 及以下突破及国产替代需求, 梳理出几何精度、电学特性、纯度、晶体质量、表面状态五大核心性能指标, 并建立对应检测方法, 期望能为硅材料性能评价提供科学统一的依据, 推动国内硅材料技术升级, 支撑半导体产业链安全稳定发展。

关键词: 集成电路; 等离子刻蚀机; 硅材料; 性能检测方法; 标准制定; 硅环; 纯度检测

Study on Performance Detection Methods and Standard Formulation of Silicon Materials for Plasma Etchers in Integrated Circuits

Zhu Chao¹, Tang Zhiyuan², Li Wenyuze², Shao Wenjie¹

1. Jiangshan Institute of Inspection and Testing, Quzhou, Zhejiang 324100

2. Zhejiang Academy of Quality and Science, Hangzhou, Zhejiang 310012

Abstract: Silicon rings for plasma etchers are one of the indispensable key components in the integrated circuit manufacturing process, and their quality directly affects the quality of the etching process. Although China has made certain progress in research and development in this field, there is still a gap in performance and quality between domestically produced semiconductor silicon materials and foreign counterparts. Focusing on the performance detection methods and standard formulation of silicon materials for plasma etchers in integrated circuits, this paper sorts out five core performance indicators—geometric accuracy, electrical properties, purity, crystal quality, and surface state—in response to the breakthrough of semiconductor process nodes to 5nm and below and the demand for domestic substitution. Corresponding detection methods are established to provide a scientific and unified basis for silicon material performance evaluation, promote the technological upgrading of domestic silicon materials, and support the safe and stable development of the semiconductor industry chain.

Keywords: integrated circuits; plasma etchers; silicon materials; performance detection methods; standard formulation; silicon rings; purity detection

一、集成电路等离子刻蚀机用硅材料关键性能指标

(一) 几何参数

几何精度会影响硅材料刻蚀机与刻蚀机电极、硅片的装配精度, 进而决定电场分布的均匀性^[1]。核心指标包括:

尺寸偏差: 适配8英寸-12英寸硅片的硅环直径范围为200mm-450mm, 允许偏差 $\pm 0.1\text{mm}$; 厚度允许偏差 $\pm 0.1\text{mm}$, 较国家标准 GB/T 41652-2022 的 $\pm 0.2\text{mm}$ 要求提升50%, 可减少刻蚀过程中因尺寸偏差导致的电场不均。

形位公差: 平面度 $\leq 20\mu\text{m}$, 确保硅环作为电极或掩模时的电场均匀性; 平行度 $\pm 0.05\text{mm}$ (新增指标), 保证安装时与硅片、电极的精准对准, 避免刻蚀图案偏移; 同心度 $\leq 0.1\text{mm}$ 、垂直度 $\leq 0.1\text{mm}$, 防止等离子体局部聚集。

(二) 电学参数

电学特性决定硅材料对等离子体的调控能力, 关键指标包括:

电阻率: p型(硼掺杂)硅材料电阻率分为 $\leq 0.02\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $1-4\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $65-85\Omega\cdot\text{cm}$ 三类, 满足不同刻蚀工艺的导电需

求；径向电阻率变化 $\leq 10\%$ ，确保电流分布均匀，避免电流分布不均导致的局部过热。

导电类型：明确为 p 型，需通过检测排除 n 型材料对刻蚀等离子体的干扰，符合刻蚀机电极的电学特性要求。

（三）纯度指标

杂质会污染刻蚀腔室、影响半导体器件性能，需严格控制：

氧含量：间隙氧含量 $\leq 1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ （即 20ppma），较 GB/T 41652-2022 的 24ppma 要求更严格，可减少高温下氧杂质释放导致的硅片污染。

碳含量：代位碳含量 $\leq 2.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ （即 0.5ppma），低于国标 1ppma 的限值，避免碳化物生成影响刻蚀选择比。

表面金属杂质：新增指标，表面金属杂质（Fe、Cr、Ni、Cu 等）残留 $<100\text{E}10\text{atoms}/\text{cm}^2$ ，远低于行业通用的 $200\text{E}10\text{atoms}/\text{cm}^2$ 要求，可有效降低器件漏电风险。

（四）晶体质量

晶体缺陷会导致硅材料腐蚀不均，核心指标包括：

晶向及偏离度：晶向为 $\langle 100 \rangle$ ，晶向偏离度 $\leq 1^\circ$ ，确保硅材料在刻蚀过程中具有均匀的物理腐蚀速率。

晶体缺陷：无位错、滑移缺陷及可见孔洞，需通过腐蚀检测排除晶体内部缺陷，避免刻蚀过程中出现局部破损。

（五）表面质量

表面状态直接影响等离子体与硅材料的相互作用，关键指标包括：

表面粗糙度： $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ ，保证等离子体接触时的均匀性，避免局部电场增强。

表面损伤层深度：新增指标，损伤层深度 $\leq 10 \mu\text{m}$ ，减少微观裂纹、污染物引入的刻蚀缺陷，提升器件可靠性。

二、硅材料核心性能检测方法

（一）几何参数检测

尺寸与形位公差检测

检测设备：采用全自动三坐标测量机（精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ）、激光高度仪（平面度测量精度 $\leq 1 \mu\text{m}$ ）。

检测依据：参照 GB/T 41652-2022《刻蚀机用硅电极及硅环》，直径、厚度测量需在硅环圆周上均匀选取 8 个测点，取平均值；平面度测量采用“三点法”确定基准面，计算最大偏差；平行度测量需分别检测硅环上下表面与基准面的平行偏差，取最大值。

操作要点：检测前需将硅环置于 $21 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度 $\leq 80\%$ 的环境中恒温 2 小时，消除温度变形影响。

（二）电学参数检测

1. 电阻率与径向电阻率变化检测

检测方法：电阻率采用 GB/T 1551《硅单晶电阻率的测定直排四探针法和直流两探针法》，选用直排四探针法，探针间距 1mm，施加恒定电流（10mA-100mA），测量电压计算电阻率；径向电阻率变化参照 GB/T 11073《硅片径向电阻率变化的测量方

法》，在硅环直径方向均匀选取 5 个测点，计算最大偏差与平均值的比值。

注意事项：检测前需用酒精清洁硅环表面，避免杂质影响接触电阻^[2]。

2. 导电类型检测

检测方法：依据 GB/T 1550《非本征半导体材料导电类型测试方法》，采用热探针法，将硅环置于恒温台（ 25°C ），两探针间距 5mm，一端加热至 50°C ，通过毫伏表测量温差电动势方向，判断为 p 型（正向电动势）或 n 型（反向电动势）。

（三）纯度指标检测

1. 氧含量与碳含量检测

检测方法：氧含量采用 GB/T 1557《硅晶体中间隙氧含量的红外吸收测量方法》，利用傅里叶变换红外光谱仪，在 1107cm^{-1} 波数处测量吸收峰强度，结合校准曲线计算氧含量；碳含量参照 GB/T 1558《硅中代位碳原子含量红外吸收测量方法》，在 1606cm^{-1} 波数处测量吸收峰，计算碳含量。

检测精度：氧含量检测下限 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，碳含量检测下限 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。

2. 表面金属杂质检测

检测方法：参照 GB/T 24582《多晶硅表面金属杂质含量测定酸浸取-电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）》，样品前处理采用硝酸-氢氟酸混合酸（体积比 3:1）常温浸取 30 分钟，提取表面金属杂质；采用 ICP-MS（检出限 $\leq 0.01\text{ng}/\text{g}$ ）测定 Fe、Cr、Ni 等元素含量，换算为原子数 $/\text{cm}^2$ 。

质量控制：需同步做空白试验，排除酸试剂引入的杂质干扰。

（四）晶体质量检测

1. 晶向及偏离度检测

检测方法：依据 GB/T 1555《半导体单晶晶向测定方法》，采用 X 射线衍射法，调整 X 射线入射角，测量衍射峰强度最大时的角度，确定晶向；偏离度通过旋转硅环，测量衍射峰半高宽对应的角度偏差，计算最大偏离值^[3]。

2. 晶体缺陷检测

检测方法：参照 GB/T 1554《硅晶体完整性化学择优腐蚀检验方法》，采用 Secco 腐蚀液（重铬酸钾-氢氟酸混合液）常温腐蚀 10 分钟，通过金相显微镜（放大倍数 200 倍）观察表面腐蚀坑，无位错腐蚀坑（直径 $>5 \mu\text{m}$ ）即为合格。

（五）表面质量检测

1. 表面粗糙度检测

检测方法：依据 GB/T 29505《硅片平坦表面的表面粗糙度测量方法》，采用原子力显微镜（AFM），扫描范围 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ，取 3 个不同区域的 R_a 值，平均值 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

2. 表面损伤层深度检测

检测方法：采用“逐层抛光-腐蚀法”，通过精密磨抛机（精度 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ ）逐层去除硅环表面材料，每去除 $2 \mu\text{m}$ 后，用 Secco 腐蚀液腐蚀，通过金相显微镜观察腐蚀坑，直至无新增腐蚀坑，此时去除的总厚度即为损伤层深度，需 $\leq 10 \mu\text{m}$ 。

三、集成电路等离子刻蚀机用硅材料标准制定依据与过程

(一) 标准制定原则

合规性：以 GB/T 41652-2022 为基础，参考国外同行 COMA 技术要求及中微半导体等高端客户需求，确保符合《标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写》(GB/T 1.1-2020)。

先进性：核心指标达到“国内一流、国际先进”，如尺寸精度、表面金属杂质控制优于国标，新增平行度、损伤层深度指标，匹配 5nm 制程需求^[4]。

可操作性：所有指标均明确对应的检测方法，可由第三方实验室（如中国电子科技集团第 48 研究所）验证，质量承诺可追溯。

(二) 标准核心框架

范围：明确标准适用于 p<100> 直拉单晶硅 / 区熔单晶硅加工的、直径 200mm-450mm 的等离子刻蚀机用硅环 / 硅电极，界定产品应用场景。

规范性引用文件：纳入 GB/T 1550、GB/T 1551、GB/T 24582、GB/T 41652-2022 等关键国标，确保检测方法的溯源性。

术语和定义：明确“平行度”“表面损伤层深度”等新增指标的定义，统一行业认知，例如“平行度”定义为“硅环两平面平行的误差最大允许值”。

技术要求：分维度明确几何参数、电学特性、纯度、晶体质量、表面状态的指标限值，参考《等离子刻蚀机用硅环》标准征求意见稿，确保指标科学合理^[5]。

检测方法：逐一对应技术要求，明确检测设备、依据标准、操作步骤及数据处理方法，例如几何参数检测引用 GB/T 41652-

2022，表面金属杂质检测引用 GB/T 24582^[6]。

检验规则：区分出厂检验与型式检验——出厂检验需覆盖几何尺寸、表面粗糙度等关键指标；型式检验需在新产品定型、工艺重大变更时开展，全项目检测，确保产品稳定性^[7]。

质量承诺：新增“质量承诺”章节，要求企业对客户咨询 12 小时内响应、24 小时内提供解决方案，产品具备唯一标识以实现全生命周期追溯，符合半导体行业对供应链可靠性的要求^[8]。

(三) 应用价值

推动国产替代：标准明确了高端硅材料的技术门槛，可引导国内厂商（如浙江盾源聚芯、深圳志橙半导体）提升产品质量，预计未来 3 年国内 12 英寸硅环国产化率从不足 10% 提升至 30%，减少进口依赖。

规范行业竞争：统一的检测方法与指标要求可避免“低价低质”竞争，提升国内硅材料厂商产品合格率^[9]。

支撑产业链安全：标准为半导体设备厂商提供了合格供应商筛选依据，中微、北方华创等企业可通过标准快速验证国产硅材料，降低供应链风险，助力我国集成电路制程向 2nm 突破^[10]。

四、结论

集成电路等离子刻蚀机用硅材料的性能检测与标准制定，是半导体产业链自主可控的关键支撑。本文梳理的五大类核心性能指标，及基于国标建立的检测方法，为硅材料性能评价提供了科学、可操作的依据；而标准制定的原则与全链条框架，可有效适配先进制程需求，引导行业技术升级。未来，还需进一步优化硅材料性能指标，开发原位检测技术，并加强与国际标准的衔接，持续完善标准体系，为我国半导体产业高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 靳立辉. 半导体硅片背面处理关键装备国产化研发及产业化. 天津市, 天津环博科技有限责任公司, 2024-09-24.
- [2] 杨道虹, 王石宇, 华健, 等. 半导体材料后发企业如何实现国产替代? ——基于湖北鼎龙的纵向案例研究 [J]. 管理世界, 2024, 40(09):21-41.
- [3] 阮润生. 产业链去库存仍在持续半导体硅片产能逆势扩张 [N]. 证券时报, 2024-05-15(A06).
- [4] 王亚飞. 半导体硅片抛光机精密加工技术. 浙江省, 德玛克(浙江)精工科技有限公司, 2023-09-26.
- [5] 武卫. 12英寸半导体硅片研发. 天津市, 天津中环领先材料技术有限公司, 2023-05-23.
- [6] 张果虎, 肖清华, 马飞. 我国半导体硅片发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(01):68-78.
- [7] 李洋. 集成电路刻蚀设备用硅部件制备技术. 山东省, 山东有研半导体材料有限公司, 2022-07-30.
- [8] 全国半导体设备和材料标准化技术委员会 (SAC/TC 203), 全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分技术委员会 (SAC/TC 203/SC 2). 刻蚀机用硅电极及硅环:GB/T 41652-2022[S]. 中国标准出版社, 2022.
- [9] 于畅, 邓洲. 工业化后期国产替代的方向调整与推进策略 [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(01):55-62.
- [10] 蔡恩泽. 半导体行业吹响国产替代进军号 [J]. 产权导刊, 2019, (09):5-7.