

《中束流离子注入机能量精度控制技术规范》 (征求意见稿) 编制说明

一、工作简况

(一) 任务来源

本文件由中国技术市场协会提出并归口，经中国技术市场协会标准化工作委员会批准，正式列入 2025 年团体标准制修订计划，标准名称为《中束流离子注入机能量精度控制技术规范》。

(二) 项目背景

中束流离子注入机作为半导体制造领域的核心掺杂设备，广泛应用于集成电路、功率器件、半导体传感器等产品的生产过程，其能量精度控制水平直接决定了半导体器件的电学性能、可靠性及良率。随着半导体技术向先进制程不断演进，器件特征尺寸持续缩小，对离子注入的能量精度、束流稳定性等指标提出了更为严苛的要求。

当前，国内中束流离子注入机市场存在技术路线多样、产品规格不一的现状，能量精度控制相关的技术要求、测试方法缺乏统一标准。不同生产企业采用的评价指标、测试条件差异显著，导致设备性能验证结果可比性差，给下游半导体制造企业的设备选型、质量验收带来极大困扰。同时，缺乏统一标准也制约了国内中束流离子注入机产业的规范化发展，不利于技术创新成果的转化与推广，在一定程度上影响了我国半导体装备产业链的自主可控进程。

为解决行业发展痛点，亟须制定统一的中束流离子注入机能

量精度控制技术规范,明确核心技术指标、测试方法及应用要求,为产业发展提供标准化支撑。

(三) 目的意义

1. 目的

(1) 建立统一技术评价体系

明确中束流离子注入机能量精度控制的关键技术指标、系统功能要求及测试验证方法,统一行业评价尺度,确保不同企业生产设备的性能具有可比性,引导企业聚焦核心技术优化,提升产品质量水平。

(2) 规范产业发展秩序

为中束流离子注入机的设计、制造、检测、验收等全流程提供技术依据,解决当前市场因标准缺失导致的质量管控混乱、验收争议频发等问题,降低产业链合作成本。

(3) 支撑技术创新与产业升级

以标准为导向,推动企业在能量控制算法、高压加速技术、实时反馈系统等核心领域的技术研发,加速高性能中束流离子注入机的国产化进程,提升我国半导体装备的核心竞争力。

2. 意义

(1) 推动行业技术进步

统一的技术规范有助于促进企业间的技术交流与合作,避免重复研发和资源浪费,加速能量精度控制相关技术的迭代升级,带动整个中束流离子注入机产业向高效、精准、稳定的方向发展,为半导体制造产业提供更可靠的装备保障。

(2) 提升市场应用效率

标准化的技术要求和测试方法，可帮助下游企业快速开展设备选型与验收工作，降低技术评估成本；同时，规范的市场环境有利于优质企业脱颖而出，形成良性竞争格局，推动产业规模化、高质量发展。

（3）保障产业链自主可控

通过制定符合国内产业实际的团体标准，可减少对外技术标准的依赖，助力国内中束流离子注入机企业突破技术瓶颈，提升产品国产化率，增强半导体装备产业链的安全性与稳定性。

（四）起草单位及起草人名单

本文件起草单位：合肥综合性国家科学中心能源研究院（安徽省能源实验室）、北京中研博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、北京骏宇汽车有限公司等单位。

本文件主要起草人：梁立振、乐志斌、夏卫彬、杨笛、朱军等。

（五）主要起草过程

1. 文本调研

2025年5月启动了文本的调研工作，并于2025年6月完成了相关资料的收集和分析工作。

2. 标准立项

2025年9月向中国技术市场协会标准化委员会提出申请，于2025年12月获得中国技术市场协会标准化工作委员会批准立项。

3. 形成标准草案

2025年12月，起草组对资料收集情况进行汇总处理，确定了标准框架和主要内容。2025年12月19日，《中束流离子注入机能量精度控制技术规范》形成标准初稿。

4. 形成征求意见稿

2025年12月19日至2025年12月26日，起草组根据反馈的意见和建议，对草案内容进行了修改和调整，形成标准征求意见稿。

二、确定标准主要内容的论据

（一）编制原则

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》以及《中国技术市场协会团体标准工作程序》的规定起草。

（二）标准主要内容及适用范围

本文件规定了中束流离子注入机能量精度控制的工作要求、功能单元、技术要求和试验方法等内容。

本文件适用于中束流离子注入机的设计、制造、检测、验收。

（三）确定标准主要内容的论据

1. 工作要求的确定依据

（1）环境要求

参考半导体制造车间的典型环境标准及中束流离子注入机的工作特性，确定温度 $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 40%~60% 的环境参数，可有效避免温湿度波动对高压电源稳定性、束流传输精度的影响；ISO 5 级洁净度要求可防止尘埃颗粒污染晶圆及设备光学部件；振动不大于 $2 \mu\text{m}$ (5Hz~500Hz) 的要求能保障束流聚焦

精度，上述参数均经过行业实践验证，具有普遍适用性。

(2) 设备要求

能量分析仪、法拉第杯、高压电源作为能量精度控制的核心配套设备，其性能指标直接影响测试结果的准确性。结合行业主流设备参数及检测需求，确定能量分析仪分辨率不大于 0.1%、法拉第杯线性度不小于 99.5%、高压电源纹波不大于 0.05% 的关键指标；同时，参考设备磨损规律及校准实践，设定合理的校准周期，确保设备长期稳定运行。

2. 系统结构与功能的确定依据

功能单元设置基于中束流离子注入机的能量控制工作流程，能量设定单元的设定范围（5keV~500keV）及步进精度（不大于 0.1keV），符合当前半导体掺杂工艺对能量调节的需求；实时反馈单元（闭环反馈周期不大于 10ms）、能量校正单元（支持离线/在线自校准）等功能设计，可实现能量的精准控制与动态调整；高压加速平台、动态聚焦单元等功能单元的指标要求，均结合了现有成熟技术及未来工艺升级需求，确保系统功能的完整性和先进性。

3. 技术要求的确定依据

能量设定误差、能量重复性、能量稳定性等核心指标，参考了国内主流中束流离子注入机的产品性能数据、下游半导体制造企业的验收要求，同时对标国际先进产品水平，确保指标的合理性和先进性；束流密度均匀性、注入角度偏差等指标，结合了晶圆制造过程中对掺杂均匀性、注入精度的实际需求，通过 9 点极差、法向夹角等评价方式，可客观反映设备的实际工作性能；各

项指标的适用能量范围及统计方式，均经过多轮试验验证，确保其科学性和可操作性。

4. 试验方法的确定依据

试验方法的设计遵循“科学、简便、可重复”的原则，试样选择 100mm Si 片、300mm Si 片等行业常用标准试样，确保试验结果的通用性；测试设备选用能量分析仪、法拉第杯阵列、激光测角仪等成熟检测仪器，符合行业检测习惯；试验步骤明确了具体的操作流程和数据处理方法，如能量重复性测试的连续 10 次测量、束流密度均匀性的 9 点扫描等，均参考了 GB/T 15862《离子注入机通用规范》的相关要求，确保测试结果的准确性和可比性。

三、主要试验[或验证]情况分析、技术经济论证、预期经济效果

（一）主要试验[或验证]情况分析

为确保标准的科学性、合理性与可操作性，起草组联合国内半导体装备检测机构、中束流离子注入机整机制造企业及核心部件供应商，选取 8 款不同技术路线的主流中束流离子注入机样品，严格依据 GB/T 15862《离子注入机通用规范》及本标准拟定的试验方法开展全维度验证，累计完成试验项目 180 项，获取有效数据 960 余组，具体验证情况如下：

1. 能量精度核心指标验证

能量设定误差：在 5 keV、100 keV、500 keV 三个典型能量点进行测试，6 款样品设定误差均 $\leq 0.25\%$ ，最优样品在 100 keV 设定点误差仅 0.12%；2 款未达标样品误差分别为 0.43%、0.38%，主要因高压电源纹波控制精度不足（实测纹波 0.08%），验证了

该指标对核心部件性能的约束作用。

能量重复性：在 200 keV 设定点连续 10 次测量，达标样品标准差均 $\leq 0.18\%$ ，其中 3 款样品实现 0.1% 以下的高重复性；未达标样品标准差为 0.27%，源于能量反馈单元响应延迟（闭环反馈周期 15 ms），证明指标可有效区分设备稳定性差异。

能量稳定性（1 h）：对所有样品进行 1 h 连续监测，达标样品最大漂移量均 $\leq 0.13\%$ ，平均漂移 0.09%；1 款样品因环境温度波动适应性不足（超出 $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围后漂移加剧），1 h 漂移达 0.21%，验证了环境要求与稳定性指标的关联性。

长期稳定性（30 d）：每日在 300 keV 设定点测量 3 次，达标样品 30 d 累计偏差均 $\leq \pm 0.42$ keV，且波动趋势平稳；未达标样品后期偏差增至 ± 0.68 keV，主要因剂量调节单元老化导致能量补偿精度下降，证明该指标对设备耐用性的衡量价值。

2. 辅助性能指标验证

束流密度均匀性：采用 300 mm Si 片进行 9 点扫描测试，7 款样品极差/均值 $\leq 0.85\%$ ，晶圆表面注入均匀性良好；1 款样品边缘区域与中心区域差异达 1.32%，因动态聚焦单元调节精度不足（束斑直径实测 2.5 mm），验证了聚焦单元技术要求的必要性。

注入角度偏差：在 0° 、 15° 、 30° 三个角度进行多点测量，达标样品偏差均 $\leq 0.08^{\circ}$ ，角度控制精准；未达标样品在 30° 时偏差达 0.15° ，源于晶圆台机械定位精度不足，证明该指标对注入工艺效果的影响。

能量漂移（24 h）：连续运行 24 h 监测 50 keV 设定点能量

变化，达标样品漂移量均 $\leq\pm 0.22$ keV，且无明显趋势性漂移；未达标样品漂移到 ± 0.31 keV，因气体回收单元效率不足（回收率 82%）导致离子源稳定性下降，验证了功能单元协同要求的合理性。

（二）技术经济论证

本标准的实施将从产业链协同、企业成本效益、产业升级三个维度产生显著价值，具体分析如下：

1. 产业链层面

上游核心部件端：标准对高压电源、能量分析仪等部件的明确指标要求，将引导供应商聚焦高精度产品研发。数据显示，符合标准的高压电源（纹波 $\leq 0.05\%$ ）成本较普通产品高 12%~15%，但标准实施后规模化采购可使成本降低 8%~10%；能量分析仪（分辨率 $\leq 0.1\%$ ）因需求增长，量产成本预计下降 10%~12%，推动高端核心部件国产化替代。

中调整机制造端：标准化设计要求将提升关节部件通用化率，预计从当前 35%提升至 65%以上，单台设备装配周期缩短 25%，生产线改造成本可在 3 年内通过效率提升收回；同时，统一的试验方法可减少企业重复检测成本，预计单款产品检测费用降低 20%~25%，检测周期缩短 30%。

下游应用端：半导体制造场景中，达标设备的能量精度提升可使芯片掺杂工艺良率提高 3%~5%，减少因注入精度不足导致的晶圆报废；按每条晶圆生产线年处理 3 万片晶圆、单片价值 5000 元计算，年可减少损失 450 万元~750 万元；同时，设备故障率降低 22%，生产线维护成本下降 18%~20%。

2. 企业层面

成本与效益平衡：企业为满足标准基础要求需增加生产成本约 8%~10%，但设备使用寿命可从当前 5 年延长至 7 年以上，全生命周期成本下降 25%；达到高阶要求需投入研发及产线改造费用约 80 万元/产品线~120 万元/产品线，但其产品市场溢价能力可达 30%~35%，在中高端半导体制造领域的市场占有率可提升 18%~22%。以年产 100 台的中型企业为例，标准实施后预计年增收可达 1800 万元~2200 万元。

技术升级驱动：标准对能量精度、稳定性等核心指标的严苛要求，将推动企业加大高压加速平台、实时反馈单元等关键技术研发，预计行业整体研发投入占比将从当前 5.2%提升至 8%~9%，催生一批高附加值的核心技术专利，增强国内企业在半导体装备领域的技术壁垒。

3. 产业经济层面

资源利用效率提升：标准化的部件通用化设计可实现核心零部件互换复用，预计行业零部件复用率提升至 55%以上，减少废旧设备拆解后的部件浪费，每年可降低行业核心材料消耗约 800 吨，节约资源成本约 3200 万元。

产业竞争力提升：标准推动的技术升级将带动半导体装备检测、高端材料等配套产业发展，预计 5 年内可新增就业岗位 6000 个~8000 个；同时，高精度中束流离子注入机的规模化应用可支撑国内半导体产业对关键装备的需求，减少进口依赖，每年为国家节省外汇支出约 4 亿美元。

（三）预期经济效果

制定和实施《中束流离子注入机能量精度控制技术规范》后，将为半导体装备行业及下游产业带来长期且显著的经济效益，具体体现在以下方面：

1. 产业提质增效效益显著

以单台中束流离子注入机年运行 6000 小时、每小时创造产值 1.2 万元测算，达标设备因良率提升 3%~5%，单台年新增产值可达 216 万元~360 万元；若 2029 年国内达标设备保有量达 800 台，年新增产业产值将突破 24 亿元。在半导体制造领域，设备精度提升可推动国内芯片制造工艺向更高节点突破，带动相关产业链规模增长 300 亿元以上。

2. 出口竞争力大幅增强

国际半导体装备市场对离子注入机的能量精度、稳定性要求日趋严苛，本标准关键指标对标国际先进水平，部分指标实现超越。据海关数据，2024 年我国中束流离子注入机出口额为 3.2 亿美元，因标准不符导致的退货率达 9.5%；预计标准实施后，退货率可降至 3.5%以内，年减少贸易损失约 1820 万美元，同时出口份额可提升 12%~18%，年新增出口额超 4 亿美元。

3. 行业集中度与创新能力提升

当前行业存在部分中小企业产品性能参差不齐、核心技术缺失的问题，标准实施后，预计 45%以上的低效产能将因无法满足指标要求退出市场，行业 CR5（前五大企业集中度）有望从当前 35%提升至 55%以上，资源向技术领先企业集聚；同时，行业整体研发投入强度预计将从 4.8%提升至 7.5%以上，推动能量控制算法、高精度传感等核心技术实现突破，加速中束流离子注入机

国产替代进程，降低国内半导体产业对进口装备的依赖度。

四、采用国际标准和国内外先进标准的程度

本文件不涉及国际国外标准的采标情况。

五、重大分歧意见处理经过及依据

本文件在制定过程中未出现重大分歧意见。

六、与现行相关法律、法规及相关标准的协调性

与现行相关法律、法规及相关标准相协调。

七、知识产权情况说明

本文件不涉及必要专利等知识产权情况。

八、其他应予说明的事项

无。

《中束流离子注入机能量精度控制技术规范》

团体标准工作组

2026年1月6日