

半导体硅片包装片盒洁净干燥柜的颗粒污染控制方法研究

吴昆

浙江艾科半导体设备有限公司 浙江嘉兴 314000

【摘要】存储搬运时半导体硅片易受颗粒污染,包装片盒所在洁净干燥柜内环境关乎污染控制,针对颗粒来源繁杂、控制棘手等状况,设计出密闭性良好且气流组织优化的洁净干燥柜结构,融入高效空气过滤、静电中和及多点监测技术,搭建全流程污染防控体系。借数值模拟、传感监测与数据分析手段,构建污染响应模型,对污染粒径、浓度、分布均匀程度和清除效率展开验证评估,该体系可稳定维系洁净环境,大幅增强颗粒控制成效,契合高敏感工艺的环境需求。

【关键词】颗粒污染控制; 洁净干燥柜; 空气过滤; 静电中和; 污染监测

Research on Particle Pollution Control Method for Clean Drying Cabinet of Semiconductor Silicon Wafer Packaging Box

Wu Kun

Zhejiang Aiko Semiconductor Equipment Co., Ltd. Jiaxing, Zhejiang 314000

【Abstract】 Semiconductor silicon wafers are prone to particle contamination during storage and handling. The environment inside the clean drying cabinet where the packaging box is located is related to pollution control. In response to the complex sources of particles and the difficulty of control, a clean drying cabinet structure with good sealing and optimized airflow organization has been designed, incorporating high-efficiency air filtration, electrostatic neutralization, and multi-point monitoring technology to establish a full process pollution prevention and control system. By using numerical simulation, sensor monitoring, and data analysis methods, a pollution response model is constructed to verify and evaluate the particle size, concentration, distribution uniformity, and removal efficiency of pollutants. This system can stably maintain a clean environment, greatly enhance particle control effectiveness, and meet the environmental requirements of highly sensitive processes.

【Key words】 particle pollution control; Clean drying cabinet; Air filtration; Static neutralization; pollution monitoring

引言

半导体生产环节,硅片表面洁净程度直接决定器件性能与成品产出比率,包装片盒作为承托载体,其于洁净干燥柜内存放状况显著关联硅片污染状况,颗粒污染物来自空气漂浮物、材料摩擦损耗、静电吸引等多方面,凭借单一举措难以有效管控。当下控制方式在柜体密闭构造、气流运行组织、静电干扰应对等层面存在不足,阻碍洁净标准提升,围绕洁净干燥柜污染产生原理,开发整合型控制策略,对柜体结构设计、空气过滤技术、监测反馈机制开展全面优化,实现颗粒污染的精准判定、及时处置和科学评估,保障片盒存储全程环境稳定可靠。

1. 半导体硅片包装片盒洁净干燥柜颗粒污染控制方法

1.1 颗粒污染源分析

外界空气中的微粒会顺着柜体细微裂缝、操作间隙,还有柜门开合的瞬间溜进内部,要是柜体内部出现负压情况,或是气流变得紊乱,就更容易把这些微粒吸附进来。洁净干燥柜所使用的材料同样会引发颗粒污染问题,结构部件在长时间运转后,会因摩擦产生细小磨屑,材料表面老化也会剥落碎屑。柜内空气循环体系一旦出现过滤效果降低、密封不严的状况,那些没被彻底过滤的颗粒就会进到洁净区域,要是柜体内部结构设置得不合理,形成空气流动不到的死角,或是各处空气流速差异大,也会使得颗粒在某些地方堆积成团。

1.2 颗粒污染控制的挑战与需求

管控洁净干燥柜颗粒污染存在诸多难点,既要保证柜体高度密闭,又要确保操作方便,同时还要实现对粒径不足1微米颗粒的高效拦截清除,包装盒大多由塑料或复合高分子材料制成,这类材质表面极易吸附微小颗粒,且难以进行完

全的表面静电消除处理,所以优化片盒存放与搬运流程就成了关键所在。柜体上的通风缝隙、结构拼接部位以及活动部件的接触点,都容易成为颗粒聚集之处,尤其是在长期使用出现老化后,更会释放出细小颗粒^[1]。在控制标准方面,不仅要求空气洁净度达到 ISO 5 级及以上,对柜体内部温度和湿度的稳定控制也有着严苛要求,因为温度的变化会使材料产生热胀冷缩,进而导致颗粒脱落,而湿度不稳定则可能加速微尘的凝聚和沉降。

2. 半导体硅片包装片盒洁净干燥柜的设计原理与结构

2.1 洁净干燥柜的基本设计

洁净干燥柜整体构造多选取不锈钢或防静电合金材料打造,这些材质的密封特性直接影响颗粒隔绝成效,柜体内部空间规划需深入结合流体力学原理,借助精心设计的风道体系与层流送风设备,引导洁净空气按自上而下或自后向前的方向稳定流动,以此规避涡流区域产生,防止灰尘积聚。风机模块与高效过滤组件共同构成空气处理核心,过滤单元采用分级过滤方式,前端过滤器拦截较大粒径颗粒,末端搭载高效甚至超高效过滤器,精准捕捉亚微米级微小粒子,同时严格把控内部气流流速,避免因气流扰动致使已沉降颗粒再次悬浮,空气置换频次由反馈系统实时监测并自动调节,保障柜内洁净度稳定。柜体专门配置压力控制系统,保持内部处于轻微正压状态,有效抵御外部气体渗入,从微缝、门缝到管道接口全方位阻断污染源入侵路径,除结构密封和空气净化处理外,还需配置除湿装置与热控系统,通过稳定温湿度环境,避免因温湿度波动导致微粒沉降或材料释放挥发性物质。

2.2 颗粒污染防控设计要点

干燥柜内空间规划要防止出现气流缓慢或空气不流通区域,科学安排送、回风口位置,保证气流均匀分布,降低颗粒聚集可能,内部结构选材讲究,材料得有出色的尺寸稳定性和抗磨损能力,即便长期频繁使用,表面也不会起毛、剥落或释放颗粒。所有缝隙、连接边缘和活动结构接口,都要用封边工艺或高分子密封材料包裹,连接件区域设置隔离环或防渗槽,挡住颗粒从结构缝隙钻进洁净区域。控制颗粒沉积关键还在表面处理,需采用低附着、抗静电性能佳的涂层技术,减少颗粒吸附堆积^[2]。柜体的内部循环风系统要具备多级过滤功能,过滤器与风机系统适配,保障风压稳定、截留效果不变,还设计有检修口或抽屉式更换结构方便维

护,结构连接件和紧固部位加工精度要求高,避免装配误差或热变形破坏密封,影响整体颗粒控制效果。

3. 颗粒污染控制技术中的应用与优化

3.1 空气过滤与净化技术

对柜体内气流开展动态建模工作,借助有限元仿真技术精细模拟空气流动的具体轨迹与压力梯度变化情况,以此保证柜体在实际运行状态下能够形成稳定可靠的定向流场,过滤系统采用多级串联的设计形式,首级配置粗效滤网,专门用于拦截粒径大于 $5\mu\text{m}$ 的各类浮尘;中间级安装亚高效过滤器,可有效截留粒径处于 $1 - 5\mu\text{m}$ 范围内的颗粒物;末级搭载 H13 等级以上的高效空气过滤器 (HEPA),具备对 $\geq 0.3\mu\text{m}$ 粒子的深度捕捉能力,同时将滤料阻力严格控制在 $\leq 250\text{Pa}$ 范围内,避免系统静压出现波动。风机系统的风量设定于 $120 - 180\text{m}^3/\text{h}$ 区间,在内部有效容积不超过 1.5m^3 的柜体内,能够实现 $4 - 6$ 次/h 的空气置换频率,使得被扰动的颗粒物可迅速随气流排出,不会发生沉积现象,整个系统运行过程中,保持柜内正压处于 $+8 - +15\text{Pa}$ 之间,通过差压传感器将压力数据反馈至控制系统,进而自动调节送风量维持压力稳定。气流组织采用顶部送风、底部回风的方式,柜体内设置内循环导流板,配合回风槽将下沉气体均匀导入回风区,杜绝死角形成^[3]。过滤器的更换周期设定为累计运行 1200 小时,或者当静压上升幅度超出初始值 80Pa 时即刻进行更换,滤芯本体选用聚四氟乙烯膜材或玻纤滤纸复合结构,外框采用阳极氧化铝材料封装,确保在更换过程中不会产生二次污染。

3.2 静电控制与防护措施

防静电模块由交流离子风机和静电监测系统组成,离子风机输出电压达 $\text{AC}7000\text{V}$,输出频率为 10Hz ,靠正负离子交替释放,在不扰乱气流前提下中和电荷堆积,风机装在气流入口,风速设为 $1.2 - 1.5\text{m/s}$,其作用范围覆盖整个内部存储区域,以点扩散形式构建全区域静电抑制场。干燥柜内所有金属结构件都连接到等电位接地铜排,接地电阻不超 4Ω ,柜体外壳采用多点接地,确保接地持续稳定,电气绝缘部位覆盖静电耗散材料防护层,包装片盒底部及四周设有电荷泄放通道,用表面电阻 $10^6 - 10^8\Omega$ 的聚碳酸酯防静电复合板制作,既保证机械强度又控制电荷积聚速度。内部传感器模块含静电电位计,探头在片盒侧方 30mm 处,定期监测片盒外壳电场强度,每 10 秒向主控系统传信号,检测值超

$\pm 400V$ 设定阈值,就启动 $\Phi 2mm$ 口径的局部离子喷射装置补偿中和,放电脉冲控制在 $1ms$ 内。柜门打开时,门框导电橡胶条与地线联动,减少外部操作对内部静电场影响。

4.控制方法的验证与优化效果分析

4.1 颗粒污染监测与数据分析

光散射粒子计数器用于监测颗粒污染,其测量波长 $780nm$,采样流量 $28.3L/min$,设 $0.1\mu m$ 、 $0.3\mu m$ 、 $0.5\mu m$ 、 $1.0\mu m$ 和 $5.0\mu m$ 五个粒径检测通道,洁净干燥柜内四个关键处设检测点:进风口上 $50mm$ 、片盒存放层中央、柜门内侧中心、排风口前 $50mm$ 。各监测点 30 秒一采连续记录,24小时不间断,共得 2880 组样本,原始数据经采集系统传至上位机,用Python程序清洗分析,借滑动均值法滤除高频噪声,取 $0.3\mu m$ 以上粒径日均浓度作评价依据。

数据分析中,将开启空气过滤系统、继电控制系统前后的数据进行对比,处理方法为双样本 t 检验,以确定污染控制措施前后颗粒浓度差异是否具有统计学意义。在未启动控制系统时,片盒存放层中心 $0.3\mu m$ 粒径颗粒平均浓度为 1620 颗粒/ ft^3 , $0.5\mu m$ 颗粒浓度为 490 颗粒/ ft^3 ,而启动控制系统后,同一测点数值分别下降至 430 颗粒/ ft^3 和 120 颗粒/ ft^3 。通过相关性分析,粒子浓度的峰值变化与风速波动之间表现出显著正相关,风速每波动 $0.3 m/s$ 将引起局部浓度上升约 300 颗粒/ ft^3 。使用 ζ 参数定义污染响应程度,计算式为 $\zeta = \log [(T - T_0) / (T - T_\theta)]$,其中 T 为测点瞬时值, T_0 为初始浓度, T_θ 为稳定阶段背景浓度,采用 ζ 曲线斜率变化趋势对污染响应进行量化,并与系统状态数据进行交叉验证。

4.2 控制方法优化后的效果评估

从颗粒浓度降幅、污染响应时间、空间均匀性三方面定量评估控制方法优化前后效果,对应指标是颗粒平均浓度

值、 ζ 曲线线性段斜率绝对值 ξ 、各测点浓度方差 σ^2 。通过提升高效过滤器等级、更换高风量低噪风机、重新布设内部风道导流结构进行优化。优化后系统运行6小时监测数据表明:进风口 $0.3\mu m$ 颗粒浓度从 840 颗粒/ ft^3 降至 290 颗粒/ ft^3 ,片盒存放层区域降至 220 颗粒/ ft^3 ,四个测点浓度方差由 125.3 颗粒/ ft^3 缩至 28.6 颗粒/ ft^3 ,空间浓度分布均匀性大幅提升。

对优化前后的 ζ 时程曲线开展对比,优化前降温阶段处于 $480 - 880$ 秒区间内, ζ 曲线线性段斜率呈现为 $-0.0084/s$,而经过优化后,该斜率数值上升至 $-0.0142/s$,这直观表明污染粒子从柜体向外排出的速率大幅提升约 70% 。以 ξ 参数构建与渗流速率相似的标定关系,通过模拟气溶胶源释放同等数量的颗粒,在持续 30 分钟的释放周期里,详细记录柜体的响应情况,对不同状态下 ξ 与实际排出速率进行拟合分析,结果显示在优化后的系统中, ξ 值变化表现得更为灵敏,粒子排出速率的变化与 ξ 呈现出抛物线相关特性。进行运行稳定性评估时,系统连续运转 72 小时后,各个监测点的浓度波动范围严格控制在 ± 20 颗粒/ ft^3 以内,系统内部风速波动幅度小于 $0.2 m/s$,柜体压差稳定维持在 $+12Pa$ 左右,充分说明优化措施切实有效地增强了控制系统的稳态性能。

结语

集成结构密封、过滤净化、静电中和与颗粒监测等技术,打造出完备的洁净干燥柜颗粒污染控制系统,监测数据表明,系统优化后颗粒浓度明显降低,空间浓度分布更趋均匀,运行状态稳定,研究成果证实该控制方法可行有效,成为半导体封装关键工序的洁净环境保障,提供了技术支撑与数据基础。

参考文献

- [1]冯国楠,沈锦璐,李建慧,等.全球半导体硅片产业现状研究[J].中国集成电路,2025,34(04):26-31+48.
- [2]刘秀坤.基于半导体硅片加工的金刚线切片机技术研究[J].电子工业专用设备,2025,54(01):7-12+54.
- [3]王国瑞,姚长娟,杨铭,等.半导体硅片脱胶清洗插片一体机的研发与应用[J].中国标准化,2024,(S1):369-374.
- [4]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).

作者简介:吴昆,出生年月:1967年2月,男,民族:汉,籍贯:浙江嘉兴,学历:大学本科,职称:高级工程师,研究方向:半导体大尺寸硅片清洗设备的研发制造。