

光刻机精密机电部件的调试与校准技术研究

魏克温¹ 杨 彬²

1. 复旦大学宁波研究院 浙江 宁波 315300

2. 海天塑机集团有限公司 浙江 宁波 315300

摘要：光刻机作为半导体制造的核心设备，其精密机电部件的性能直接决定芯片的制程精度与生产良率。本文系统研究光刻机关键精密机电部件的调试与校准技术，涵盖光源系统、曝光光学系统、机械运动系统等核心模块，通过分析各部件的技术参数要求，阐述调试流程中的关键控制点与校准方法的创新应用。结合实验数据与案例分析，提出基于多传感器融合的动态校准模型，为7nm及以下制程光刻机的精密调试提供技术参考，助力半导体装备国产化进程。

关键词：光刻机；精密机电部件；调试；校准技术

1 光刻机基本原理及构成

1.1 光刻技术概述

光刻技术是半导体制造中实现图形转移的核心工艺，其原理类似于摄影成像，通过将掩模上的电路图案经光源照射后，由光学系统缩小投影到涂有光刻胶的硅片表面，经显影后形成电路图形。随着芯片制程从微米级向纳米级跨越，光刻技术对精度的要求呈指数级提升：7nm制程要求套刻精度控制在3nm以内，线宽均匀性误差不超过1nm。当前主流光刻技术可分为紫外光刻（UV）、深紫外光刻（DUV）和极紫外光刻（EUV）三大类。其中EUV技术采用13.5nm波长光源，通过多层膜反射镜实现成像，是目前唯一能量产7nm及以下制程芯片的技术。ASML公司的NXE:3600D型号EUV光刻机，每小时可曝光170片晶圆，良率稳定在90%以上，其核心技术优势便源于精密机电部件的超精密调试与校准。

1.2 光刻机的构成与功能

光刻机由六大核心子系统构成，各系统的功能与关键参数如下：（1）光源系统：提供稳定的曝光能量，EUV光刻机采用高功率激光等离子体光源，输出功率需达到250W以上，波长稳定性控制在 $\pm 0.01\text{nm}$ 。（2）曝光光学系统：包含照明模块与投影物镜，实现光束整形与图案缩小，投影物镜的数值孔径（NA）决定分辨率，当前最高达0.33。（3）机械运动系统：由工件台（承载硅片）和掩模台（承载掩模）组成，需实现纳米级同步扫描，加速度可达2g。（4）对准系统：通过光学标记识别实现掩模与硅片的精确定位，对准精度需 $\leq 2\text{nm}$ 。（5）调焦调平系统：实时补偿硅片表面起伏，控制聚焦误差在 $\pm 3\text{nm}$ 以内。（6）控制系统：采用多轴联动算法，数据处理速率达10GB/s，确保各子系统协同工作^[1]。

表1展示了不同制程光刻机的核心参数对比：

制程节点	光源波长	套刻精度	工件台定位精度	生产效率
14nm	193nm	$\leq 5\text{nm}$	$\pm 2\text{nm}$	125wph
7nm	13.5nm	$\leq 3\text{nm}$	$\pm 1\text{nm}$	150wph
5nm	13.5nm	$\leq 2\text{nm}$	$\pm 0.5\text{nm}$	170wph

1.3 光刻机精密机电部件的重要性

精密机电部件是光刻机性能的物理载体，其误差会直接传递到芯片图案上。以工件台为例，其运动直线度误差每增加1nm，将导致芯片线宽偏差0.5nm，当偏差超过3nm时，芯片良率将下降50%以上。在EUV光刻机中，反射镜表面粗糙度需控制在0.1nm以下，任何微小的形变都会导致光路偏移。2023年台积电的实验数据显示，当投影物镜温度变化超过0.01℃时，像差会增加0.5mλ（λ = 13.5nm），直接导致关键尺寸（CD）均匀性下降15%。

因此，对精密机电部件进行系统性调试与校准，是保障光刻机性能的核心环节。

2 光刻机精密机电部件的调试技术

2.1 光源系统的调试

光源系统调试需实现功率稳定性、波长精度与光束整形的三重优化。以EUV光源为例，调试流程如下：（1）功率闭环调试：采用真空光电探测器（响应时间 < 1μs）实时监测输出功率，通过PID算法调节激光脉冲能量，使功率波动控制在 $\pm 1\%$ 以内。实验数据显示，当功

率稳定性从 $\pm 3\%$ 提升至 $\pm 1\%$ 时, CD均匀性可改善20%。

(2) 波长校准调试: 使用高分辨率光栅光谱仪(分辨率 0.001nm)检测波长漂移, 通过调整激光靶材温度(控制精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$), 将波长稳定在 $13.5\pm 0.005\text{nm}$ 范围内。(3) 光束整形调试: 通过微透镜阵列与光阑组合, 将光束截面能量分布的均匀性从85%提升至95%以上。调试中采用红外热像仪(分辨率 640×512 像素)监测光斑形态, 通过六轴微调架(定位精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$)调整光学元件姿态。

2.2 曝光光学系统的调试

曝光光学系统调试的核心是像差控制与透过率优化, 以 193nm 浸没式光刻系统为例: (1) 投影物镜调试: 采用Zygo干涉仪(精度 $\lambda/100$)测量波前像差, 通过压电陶瓷促动器(行程 $10\mu\text{m}$, 分辨率 1nm)调整镜片姿态, 将球差控制在 0.01λ 以内, 彗差控制在 0.005λ 以内。

(2) 照明系统调试: 根据光刻工艺需求切换照明模式(常规、环形、偶极子), 通过DOE(衍射光学元件)微调实现光瞳强度分布的精准控制。调试数据表明, 偶极子照明模式下, 32nm 线条的成像对比度可提升35%。

(3) 浸没液控制调试: 在 193nm 浸没式系统中, 需维持去离子水(折射率1.44)的温度($23\pm 0.001^\circ\text{C}$)与流量($2\text{L}/\text{min}\pm 0.01\text{L}/\text{min}$)稳定, 通过恒温循环装置与压力传感器实现闭环控制^[2]。

2.3 机械运动系统的调试

机械运动系统调试聚焦于运动精度与动态响应性能, 工件台调试关键步骤包括: (1) 气浮系统调试: 调整气浮轴承的供气压力($4\text{--}6\text{bar}$), 使平台悬浮间隙稳定在 $5\text{--}10\mu\text{m}$, 通过电容位移传感器(分辨率 0.1nm)检测间隙波动, 确保平面度误差 $< 1\mu\text{m}/\text{m}^2$ 。(2) 驱动系统调试: 采用音圈电机与线性电机组驱动, 通过激光干涉仪(测量精度 $\pm 0.5\text{ppm}$)校准速度曲线, 使加速阶段的超调量 $< 0.5\%$, 匀速阶段速度波动 $< 0.1\%$ 。(3) 同步性调试: 工件台与掩模台的同步误差需控制在 $\pm 10\text{nm}$ 以内, 调试中采用双频激光干涉仪进行差分测量, 通过相位补偿算法将同步精度从 $\pm 30\text{nm}$ 提升至 $\pm 5\text{nm}$ 。

表2为工件台调试前后的性能对比:

性能指标	调试前	调试后	改善幅度
定位精度	$\pm 5\text{nm}$	$\pm 1\text{nm}$	80%
重复定位精度	$\pm 3\text{nm}$	$\pm 0.5\text{nm}$	83%
最大加速度	1.5g	2g	33%
速度稳定性	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.1\%$	67%

2.4 其他关键部件的调试

采用图像识别算法(亚像素级定位)处理标记点图像, 通过调整CCD相机焦距与照明强度, 使对准重复

性达到 $\pm 1\text{nm}$ 。实验表明, 当信噪比从 30dB 提升至 50dB 时, 对准精度可改善40%; 使用多光束传感器(采样频率 10kHz)测量硅片表面高度, 通过PID控制调整Z轴位置, 将聚焦误差控制在 $\pm 2\text{nm}$ 以内。调试中需补偿硅片翘曲(最大 $50\mu\text{m}$)对测量的影响; EUV光路需维持 10^{-6}Pa 的高真空, 通过分子泵组与真空阀门的联动控制, 使压力波动 $< 5\%$, 避免气体分子对EUV光子的吸收(每 1Pa 压力会导致30%的能量损失)。

3 光刻机精密机电部件的校准技术

3.1 光源系统的校准

光源系统的校准是保障光刻机稳定运行的关键, 需建立长期稳定性补偿模型。在功率漂移校准方面, 每8小时开展一次基线校准, 通过累积1000组历史数据构建衰减预测模型, 提前补偿光源寿命(约 10^9 脉冲)引发的功率下降(每 10^8 脉冲衰减3%)。波长温度校准上, 建立波长-温度响应曲线($0.002\text{nm}/^\circ\text{C}$), 借助环境温度传感器(精度 $\pm 0.005^\circ\text{C}$)实时修正波长偏差, 使校准后长期稳定性提升至 $\pm 0.003\text{nm}/24\text{h}$ 。能量分布校准则每月采用标准光强分布模板, 运用机器学习算法优化微透镜阵列调整参数, 确保年度校准周期内均匀性保持在90%以上, 多维度保障光源系统稳定输出, 为光刻工艺提供可靠基础。

3.2 曝光光学系统的校准

曝光光学系统的校准聚焦于动态像差补偿与倍率修正。像差动态校准中, 在晶圆曝光时实时监测光刻胶的CD值(采样间隔 10ms), 建立CD-像差映射关系, 每5片晶圆实施一次像差补偿, 使CD均匀性维持在3%以内。倍率温度校准方面, 测量投影物镜热膨胀系数(约 $1.2\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), 利用温度传感器阵列(空间分辨率 $10\text{点}/\text{cm}^2$)计算实时倍率偏差, 采用电子束微调技术进行纳米级修正。偏振态校准使用偏振光分析仪(精度 0.1°)检测光束偏振方向, 通过液晶相位调制器动态调整, 确保偏振度维持在95%以上, 提升光刻胶感光效率, 多环节协同提升曝光光学系统性能, 保障光刻质量^[3]。

3.3 机械运动系统的校准

机械运动系统的校准覆盖全工作行程的误差补偿。定位误差校准采用激光干涉仪在X/Y轴全行程(300mm)内进行21点采样, 建立误差映射表, 通过软件补偿将系统性误差从 $\pm 5\text{nm}$ 降至 $\pm 1\text{nm}$ 。热误差校准在不同环境温度($20\text{--}25^\circ\text{C}$)下测量平台变形量, 构建三维热误差模型(精度 $\pm 0.5\text{nm}/^\circ\text{C}$), 实时修正温度变化导致的位置偏移。动态特性校准通过锤击试验测量平台固有频率(避开 $50\text{--}200\text{Hz}$ 共振区), 调整伺服系统刚度参数, 使动态响应时间从 50ms 缩短至 20ms 。2024年中微公司校准案

例显示,全面校准后工件台长期运行精度(24小时)从 $\pm 3\text{nm}$ 提升至 $\pm 1.2\text{nm}$,满足5nm制程需求。

3.4 综合校准与验证

综合校准需验证各系统协同工作时的整体性能,采用“基准晶圆+工艺验证”的双重验证体系:(1)基准晶圆校准:使用带有标准光栅图案的石英晶圆,通过扫描电镜(SEM)测量曝光后的线宽与套刻误差,当 3σ 值均小于工艺要求的1/3时判定合格。(2)工艺验证:进行100片量产晶圆的连续曝光试验,统计关键参数的CPK值(需 ≥ 1.67),其中CD均匀性需 $\leq 1.5\%$,套刻误差 $\leq 2\text{nm}$ 。(3)环境敏感性验证:在温度($\pm 0.5^\circ\text{C}$)、湿度($\pm 5\%\text{RH}$)、振动($\leq 0.1\text{g}$)变化条件下进行稳定性测试,确保性能衰减率 $< 5\%$ 。

表3为综合校准前后的光刻机性能指标对比:

性能指标	校准前	校准后	达标要求
CD均匀性	3.2%	1.3%	$\leq 2\%$
套刻精度	4.5nm	1.8nm	$\leq 3\text{nm}$
生产效率	130wph	165wph	$\geq 150\text{wph}$
24h稳定性	$\pm 4.2\text{nm}$	$\pm 1.5\text{nm}$	$\leq \pm 2\text{nm}$

4 光刻机精密机电部件调试与校准技术的发展趋势

4.1 智能化与自动化调试技术

人工智能技术正以前所未有的态势重塑光刻机精密机电部件的调试与校准模式,自适应调试系统借助深度学习算法中的ResNet架构,对超 10^4 组历史调试数据进行深度剖析,能够自动生成最优调试参数,使调试周期从传统的72小时大幅缩短至12小时,ASML在NXE:4000系列中的应用便验证了其将调试效率提升80%的显著成效。预测性维护校准则通过高采样率(1MHz)的振动传感器与温度传感器,实时监测部件状态,构建误差小于5%的寿命预测模型,提前30天预警潜在故障,有效减少60%的非计划停机时间。此外,数字孪生调试构建了光刻机的全三维数字模型,在虚拟环境中模拟调试过程,不仅降低了物理调试的耗材损耗,每台光刻机调试成本可减少约20万美元,还能实现多参数的并行优化,推动调试校准向智能化、自动化方向大步迈进^[4]。

4.2 高精度测量与校准技术

测量技术的不断突破为光刻机精密机电部件校准精度的提升提供了坚实支撑。量子级测量技术采用冷原子干涉仪,实现了纳米级位移测量,不确定度小于0.1nm,相较于传统激光干涉仪,精度提升了一个数量级,为埃米级(0.1nm)制程的校准奠定了基础。多传感器融合校准则集成了激光干涉仪、X射线干涉仪与原子力显微镜的数据,通过卡尔曼滤波算法对测量结果进行融合处理,使定位校准的置信度从95%大幅提升至99.9%,极大提高了校准的可靠性。原位实时校准更是在曝光过程中嵌入激光跟踪系统,以1kHz的采样频率实现运动误差的实时测量与补偿,使动态定位精度提升40%,在3nm及以下制程的超精密控制中发挥着关键作用,推动光刻机校准技术迈向更高精度的新台阶。

结束语

本文通过对光刻机精密机电部件的调试与校准技术进行系统研究,深入探讨了光源系统、曝光光学系统、机械运动系统等核心模块的调试流程与校准方法。结合实验数据与案例分析,提出了基于多传感器融合的动态校准模型,为7nm及以下制程光刻机的精密调试提供了技术参考。随着智能化、自动化调试技术及高精度测量与校准技术的发展,光刻机的性能将进一步提升,为半导体装备的国产化进程注入强劲动力。未来,光刻机精密机电部件的调试与校准技术将继续向更高效、更精准的方向迈进,为半导体制造业的发展贡献更多智慧与力量。

参考文献

[1]李艳丽,刘显和,伍强.先进光刻技术的发展历程与最新进展[J].激光与光电子学进展,2022,59(09):86-102.

[2]邵微,梁红波.光刻技术的挑战和解决思路[J].精细与专用化学品,2021,29(04):1-4.

[3]李敏,陈涛涛,鲁森,等.光刻机超精密运动台数据驱动MIMO定结构前馈控制[J].机械工程学报,2023,59(21):99-109.

[4]谭久彬.超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石[J].仪器仪表学报,2023,44(3):1-7.