

射线源在高端芯片光刻的应用

2026 春季学期射线源导论调研报告.

1. 介绍

高端芯片光刻中的“射线源”是可工程化的短波长, 高亮度, 高稳定性曝光光源. 光刻光源的演进始终围绕 Rayleigh 分辨率关系 $CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$ 展开: 缩短波长, 提高数值孔径, 并通过工艺和计算光刻降低有效 k_1 [1]. 当前量产高端逻辑芯片的核心光源路线是两条: 193 nm ArF 浸没式 DUV 光刻以及 13.5 nm EUV 光刻 [2-4]. 本次调研总结了高端芯片光刻中主要射线源的物理基础, 工程形态和发展趋势. 并且讨论 DUV 准分子激光的成熟边界, EUV 锡等离子体源的工作机理, EUV 源功率和转换效率优化, 氢背景气体中的 EUV 诱导等离子体, High-NA EUV 对光源和工艺窗口的影响, 以及自由电子激光和储存环相干 EUV 等下一代候选源.

2. 光刻的发展

集成电路制造中的光刻把掩模图形转移到涂有光刻胶的晶圆上. 对于高端芯片, 光刻通常是制程中成本最高, 设备最复杂, 且最直接限制图形尺寸的环节之一. 从射线源角度看, 光刻机要把一个具有规定波长, 谱宽, 空间相干性, 角分布和时间稳定性的辐射场送入复杂的照明和投影系统. 因此, 光源性能会同时影响分辨率, 线宽粗糙度, 叠加误差, 缺陷率, 吞吐量和单位晶圆成本.

高端光刻的光源演进大致经历了三段. 早期接触式和接近式光刻大量使用汞灯谱线. 当集成电路进入更小特征尺寸后, 投影式 DUV 光刻成为主流, KrF 248 nm 和 ArF 193 nm 准分子激光取代汞灯, 谱线更窄, 脉冲重复频率更高. 随后, 193 nm ArF 浸没式光刻利用水作为最后一片透镜与晶圆之间的介质, 把有效 NA 提高到空气光刻难以达到的范围, 并长期支撑先进节点量产 [3].

EUV 光刻则是另一类技术跃迁. 它把曝光波长缩短到 13.5 nm, 对应光子能量约 92 eV. 这个波段已经不能用常规透镜透射成像, 空气也会强烈吸收 EUV, 因此整机必须在真空和低压氢环境中工作, 光学系统使用 Mo/Si 多层膜反射镜, 掩模也是反射式结构 [4]. EUV 光源本身通常不是传统意义上的激光器, 而是由高功率激光驱动锡微滴或锡靶, 产生高电离态锡等离子体, 再从复杂谱线中收集 13.5 nm 附近的带内辐射.

这一变化使“射线源”的工程内涵显著扩大. 在 DUV 时代, 核心问题是准分子激光的线宽, 频率稳定性, 脉冲能量控制和光学材料寿命. 在 EUV 时代, 光源还必须解决锡靶供应, 激光-靶耦合, 等离子体辐射输运, 收集镜污染, 快离子和碎屑抑制, 氢自由基化学, 真空系统, 以及光源功率与光刻胶随机效应之间的折中. 因此, 高端光刻光源已经从光学部件, 转变为由等离子体物理, 激光技术, 材料科学和半导体工艺共同约束的系统.

3. 光刻分辨率与光源指标

投影光刻的第一性约束通常用 Rayleigh 形式表示:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

其中 CD 是可解析的关键尺寸, λ 是曝光波长, NA 是投影物镜数值孔径, k_1 表示照明方式, 掩模增强技术, 光刻胶和工艺控制共同形成的工艺因子 [1,5]. 这个式子说明, 光源只提供分辨率的一部分: 缩短 λ 可以直接改善分辨率, 但若光源稳定性, 光刻胶吸收, 掩模缺陷或曝光剂量不满足要求, 更短波长并不会自动转化为更好的量产工艺.

从射线源角度看, 高端光刻至少需要同时考察下列指标.

指标	物理含义	对工艺的影响
波长与谱宽	决定衍射极限和色差控制. DUV 为 248 nm/193 nm, EUV 为 13.5 nm.	影响分辨率, 焦深, 投影物镜设计和掩模/光学材料选择.
平均功率与剂量稳定性	单位时间可送达晶圆的有效曝光能量及其脉冲间波动.	决定吞吐量, 线宽均匀性和随机曝光缺陷概率.
空间角分布与相干性	照明系统入口处的光场分布, 以及不同照明模式的可塑性.	影响 OPC, 离轴照明, 源掩模优化和复杂图形成像.
污染与碎屑	光源产生的离子, 中性粒子, 碳沉积, 锡污染和氢等离子体副作用.	决定收集镜寿命, 掩模污染, 传输效率和维护周期.
电光转换效率	从墙插电功率或驱动激光能量转化为可用带内光子的效率.	影响能耗, 热负荷, 源体积和先进节点的经济性.

因此, “更短波长”只是高端光刻光源研发的起点. DUV 准分子激光胜出, 是因为它在合适波长处同时满足高稳定性和工业可维护性. EUV 锡 LPP 源成为主流, 也不是因为它是唯一能产生 13.5 nm 辐射的物理机制, 而是因为它在可收集功率, 谱线位置, 靶材供应和整机集成之间形成了目前最可行的工程折中.

3.1. 技术参数总览

把光刻源放到设备参数中看, 可以更清楚地看到 DUV, EUV 和 High-NA EUV 之间的差异. 这里的“分辨率”不是芯片最终线宽, 而是设备和照明条件下的标称成像能力; 实际量产图形还要经过 OPC, 多重图形化, 光刻胶和刻蚀转移.

路线/设备	波长	光子能量	NA	标称能力	光源与工艺要点
汞灯 i-line	365 nm	3.40 eV	约 0.5-0.7	微米到亚微米级	谱线光源, 设备简单, 主要服务成熟工艺.
KrF DUV	248 nm	5.00 eV	约 0.8-0.93	约百纳米级	248 nm 准分子激光, 透射式投影物镜.
ArF immersion NXT:2000i	193 nm	6.42 eV	1.35	40 nm/38 nm 量级	水浸没, 26 x 33 mm 全场, 4x 掩模缩小, 低 k_1 照明[6].
Low-NA EUV NXE:3800E	13.5 nm	91.8 eV	0.33	13 nm 量级	锡 LPP 源, 反射式光学, 30 mJ/cm ² 剂量下高吞吐量[7].
High-NA EUV EXE:5000	13.5 nm	91.8 eV	0.55	8 nm 量级	半场反射光学和更快台架, 目标是减少多重图形化[8].

表 1 主要光刻源和扫描仪参数. 光子能量由 $E = h\frac{c}{\lambda}$ 计算.

对同一 k_1 值, 三条主线的 Rayleigh 缩放非常直观. 取 ArF 浸没式 NA = 1.35, Low-NA EUV NA = 0.33, High-NA EUV NA = 0.55, 若 $k_1 = 0.35$, 对应的 Rayleigh 关键尺寸约为 50 nm, 14 nm 和 8.6 nm. 这解释了为什么 193i 需要多重图形化才能继续覆盖先进节点的关键层, 也解释了 High-NA EUV 为什么仍然使用 13.5 nm 却能继续推进单次曝光能力.

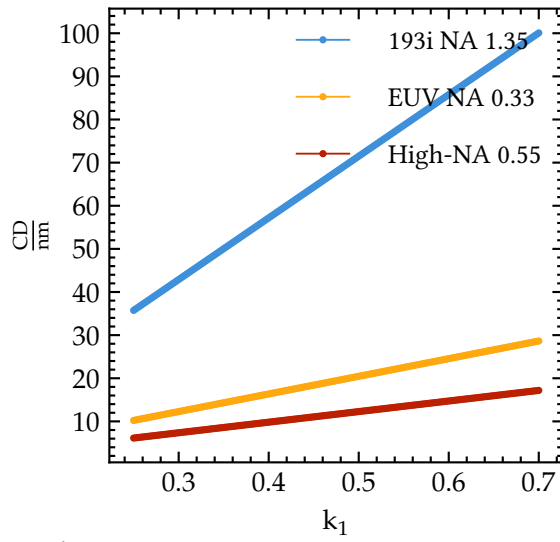


图 1 由 $CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$ 得到的分辨率缩放. 纵轴只表示光学成像标称量级.

另一个容易被忽略的参数是焦深. 近似地,

$$DOF \approx k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (2)$$

因此 High-NA 的收益伴随着焦深急剧变小. 如果只比较 $\frac{\lambda}{NA^2}$ 这一因子, 193i 约为 106 nm, Low-NA EUV 约为 124 nm, High-NA EUV 约为 45 nm. 也就是说, High-NA 的纵向工艺窗口大约只有 Low-NA EUV 的三分之一量级.

4. DUV 准分子激光光源

DUV 光刻使用的 KrF 和 ArF 准分子激光是高端芯片制造中最成熟的短波长光源. KrF 工作在 248 nm, ArF 工作在 193 nm. 准分子激光的基本机理是稀有气体卤化物在受激态形成短寿命分子, 在基态呈排斥势, 因而能够产生高效紫外跃迁. 这类激光以脉冲方式工作, 可通过线宽压窄, 能量稳定和重复频率控制, 满足投影光刻对窄谱和高平均功率的要求.

在参数上, ArF 浸没式光刻的关键不是单个 193 nm 数字, 而是 $NA = n \sin \theta$ 中的介质折射率. 空气中 $NA < 1$, 而 193 nm 水浸没把最后透镜和晶圆之间的介质换成水, 使工业系统可达到 1.35 NA. 这相当于在不改变光子能量的情况下提高光学孔径. 但 193 nm 光子能量只有 6.42 eV, 主要通过光刻胶的光化学反应和化学放大实现溶解度切换; EUV 的 91.8 eV 光子则直接进入电离和二次电子主导的能量沉积机制. 因此 DUV 与 EUV 的差别不只是波长, 也是光刻胶反应物理的差别.

DUV 的工程优势在于光学系统和材料体系相对成熟. 193 nm ArF 仍可使用透射式光学元件, 光刻胶, 掩模和计量体系经过长期量产优化. ArF 浸没式光刻进一步把高折射率液体引入最后一块透镜与晶圆之间, 提高有效 NA, 从而在不改变光源波长的情况下继续压缩可成像尺寸[3]. 配合相移掩模, 离轴照明, OPC 和多重图形化, 193i 技术长期承担逻辑和存储器制造中的大量关键层.

DUV 的局限也同样清楚. 第一, 当 λ 固定在 193 nm 时, 继续缩小图形只能依靠更高 NA 和更低 k_1 , 工艺窗口会变窄. 第二, 多重图形化可以突破单次曝光分辨率限制, 但会带来额外掩模, 额外曝光和刻蚀步骤, 增加叠加误差和成本. 第三, 对最先进逻辑节点的若干金属层和接触孔层, DUV 需要把一个目标图形拆成多次曝光, 而 EUV 可用更少曝光次数实现相似或更好的图形能力. 这正是 EUV 进入量产的主要经济动因之一.

在先进制程中, EUV 用于最受分辨率限制且多重图形化代价最高的层, DUV 则继续用于大量非最小尺寸层, 成熟节点和封装相关工艺. 从光源工程角度看, DUV 代表的是“稳定可靠的工业激光器”, EUV 则代表“可量产的等离子体辐射源”.

5. EUV 锡激光等离子体源

EUV 量产光刻选择 13.5 nm 波段, 与 Mo/Si 多层膜反射镜在该波段附近具有较高反射率有关 [9]. 锡是主流靶材, 因为多重电离锡离子在 13.5 nm 附近存在密集的 4d-4f/4p-4d 跃迁, 可形成适合光刻的带内辐射. 现役 EUV 光源通常采用激光产生等离子体 (LPP) 路线: 稳定喷射的锡微滴先被预脉冲激光整形或扩展, 再被主脉冲高功率激光加热为等离子体, 释放 EUV 辐射; 收集镜把可用方向上的 13.5 nm 光子送入照明系统[4].

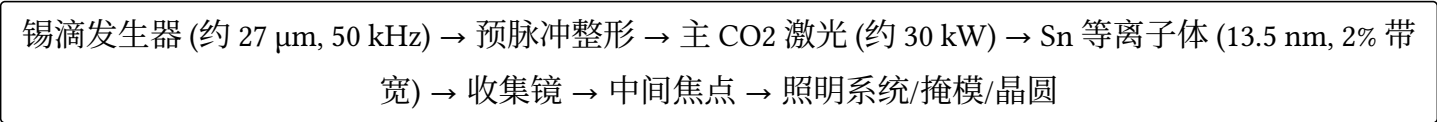


图 2 锡 LPP EUV 源的能量链路示意. 数值取代表性工业量级, 用于说明源端尺度[10].

NIST EUV Lithography Working Group 报告给出了一组很有用的代表性源端数字: 商业锡 LPP 系统使用约 27 μm 锡滴, 速度约 80 m/s, 频率约 50 kHz, 驱动 CO2 激光功率约 30 kW, 商业系统中间焦点 EUV 功率约 250 W, 实验系统已经展示约 600 W EUV 输出[10]. 这些参数可以做两个数量级估算. 第一, 锡滴间距约为 $\frac{80}{50000} = 1.6 \text{ mm}$, 因而激光和锡滴同步必须达到微米和纳秒量级的稳定性. 第二, 27 μm 锡滴质量约 75 ng, 50 kHz 对应锡流量约 3.8 mg/s. 光源不是偶尔打中一个靶, 而是在高重复频率下连续维持靶供应, 激光耦合, 碎屑抑制和收集镜保护.

参数	代表性数值	物理含义	主要工程风险
锡滴直径	约 27 μm	决定靶质量, 光学厚度和可用等离子体体积.	过小会降低吸收和辐射, 过大增加自吸收与碎屑.
锡滴速度/频率	约 80 m/s, 50 kHz	决定相邻锡滴间距约 1.6 mm 和可用脉冲节拍.	激光命中稳定性, 锡滴破碎, 长时间喷嘴可靠性.
驱动激光	约 30 kW CO2 激光	把锡加热到合适电子温度和电离态分布.	墙插效率, 热管理, 激光光束质量和脉冲整形.
带内 EUV 输出	商业约 250 W, 实验约 600 W	中间焦点可用 13.5 nm 功率, 直接影响吞吐量和可用剂量.	收集镜寿命, 污染控制, 剂量稳定性和系统可用率.

表 2 锡 LPP EUV 源的典型参数和工程含义[10].

这个过程的核心物理问题是能量耦合和辐射输运. 主激光能量需要被锡等离子体高效吸收, 使电子温度和电离态分布落在有利于 13.5 nm 发射的范围. 如果等离子体过冷, 带内辐射不足; 若过热或密度过高, 能量可能进入非目标谱段, 或者被等离子体自身重新吸收. 因而 EUV 转换效率不是单调随激光强度增加, 而是由靶尺寸, 脉冲宽度, 驱动波长, 等离子体密度和光学厚度共同决定.

用一个简化功率链路表示, 中间焦点功率可以写成

$$P_{\text{IF}} \approx P_{\text{laser}} \cdot \eta_{\text{CE}} \cdot \eta_{\text{collect}} \cdot \eta_{\text{transport}} \tag{3}$$

其中 η_{CE} 是驱动激光到 13.5 nm 带内辐射的转换效率, η_{collect} 是收集镜立体角和反射效率, $\eta_{\text{transport}}$ 包含源后光路和中间焦点前的损耗. 如果取 $P_{\text{laser}} = 30 \text{ kW}$, $\eta_{\text{CE}} \approx 5\%$, 后续收集和传输合计约 15%-20%, 就得

到 225-300 W 的中间焦点功率量级. 这说明商业 EUV 源的瓶颈不是某一个效率, 而是激光吸收, 带内发射, 光学收集和污染寿命连乘后的系统效率.

近年的 arXiv 研究显示, 改变驱动激光波长是提高 EUV 源效率的重要方向. Schupp 等比较 1 微米和 2 微米激光驱动锡微滴等离子体, 发现保持合适强度比例时, 两者可产生相近的电荷态和光谱特征, 且 2 微米驱动在相关参数下显示出更好的光谱性能, 支持发展高功率近红外驱动激光[11]. Tanaka 等使用经实验验证的辐射流体程序在大范围参数空间中优化锡 LPP 源, 预测 5.5 微米附近存在更高转换效率点, 并给出 2 微米固体激光驱动的可行工作区间 [12]. 这些工作说明, EUV 光源研发并未停止在 CO₂ 激光驱动锡微滴的既有方案上, 而是在寻找更高墙插效率和更小系统体积的替代路线.

等离子体诊断同样关键. Musikhin 等在锡等离子体实验平台中结合 Thomson 散射, 激光干涉和 EUV 光谱测量, 发现有用 EUV 发射主要来自靶附近约 150 微米范围内, 且局部等离子体条件仍可能偏离最优[13]. 这类结果表明, EUV 光源优化不能只测最终带内功率, 还需要知道电子温度, 电子密度, 速度场和空间辐射分布, 否则很难判断效率损失来自激光吸收, 发射电荷态, 自吸收还是收集几何.

6. EUV 光源的工程约束

EUV LPP 源的最大难点之一是它同时制造有用光子和有害副产物. 锡等离子体会产生快离子, 中性锡粒子和碎屑. 这些物质会沉积或溅射收集镜, 降低反射率, 缩短光学寿命. 早期研究已经指出, 锡燃料源会向收集镜释放从热化粒子到 keV 量级快离子的宽能谱碎屑, 镜面材料与锡粒子的相互作用会直接影响 EUV 工具生产率和维护周期[14].

为了降低污染, EUV 扫描仪内部通常工作在近真空氢背景中. 氢有两个作用: 一是吸收较低, 允许 EUV 传播; 二是可通过自由基和离子参与碳污染去除, 并与锡污染控制策略耦合. 但 EUV 光子本身会电离氢气, 在光路和掩模附近形成低密度等离子体. van de Kerkhof 等指出, EUV 扫描仪中的脉冲 EUV 辐射会在氢背景中产生受限等离子体和自由基环境, 其参数会影响镜面寿命, 分子污染和颗粒污染控制[15]. 另一个相关研究显示, EUV 诱导等离子体还可能导致浮置表面和颗粒充电, 甚至在低于经典 Paschen 极限的条件下触发放电[16].

这意味着 EUV 光源并不是一个可以与扫描仪其他部分完全隔离的模块. 源区的锡污染会影响收集镜, 中间焦点后的 EUV 脉冲会影响氢等离子体, 而氢等离子体又会影响掩模背面, 传感器, 颗粒运动和光学表面清洁. 从整机角度看, 光源功率提高通常还会带来更高热负荷, 更强污染通量和更严苛的计量需求.

另一个关键约束是随机性. EUV 光子能量高, 但在给定剂量下光子数明显少于 DUV. 单位面积入射光子数可由

$$\frac{N_\gamma}{A} = \frac{D}{h \frac{c}{\lambda}} \quad (4)$$

估算. 这里 D 是曝光剂量. 若取 30 mJ/cm², 193 nm ArF 的入射光子数约为 290 nm⁻², 13.5 nm EUV 只有约 20 nm⁻². 也就是说, 同一剂量下 EUV 光子数只有 ArF 的约 7%. 如果看一个 10 nm x 10 nm 的局部区域, 30 mJ/cm² EUV 剂量也只有约 2000 个入射光子, 之后还要乘以光刻胶吸收率. 这还没有考虑光刻胶吸收率, 二次电子扩散和局部反应体积, 因此实际图形边缘处的统计涨落会更复杂.

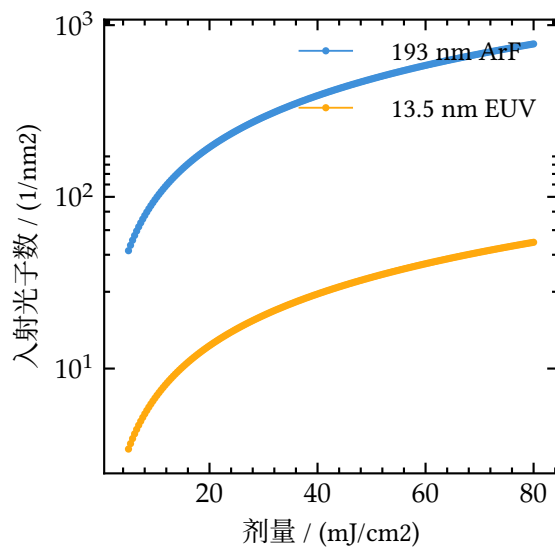


图 3 相同曝光剂量下, EUV 的入射光子数显著少于 DUV. 这是 EUV 随机缺陷和剂量压力的基本数量级来源.

当图形尺寸缩小到十几纳米及以下时, 光子 shot noise, 光刻胶吸收离散性, 酸扩散和二次电子过程会共同造成随机缺陷, 例如孔缺失, 桥连和线边粗糙度. 提高光源功率可以允许更高剂量而不牺牲吞吐量, 但这又会加重能耗, 热负荷和源/光学寿命压力. 因此, EUV 源功率的意义不只是“曝光更快”, 还包括给光刻胶和随机缺陷控制提供剂量空间.

7. High-NA EUV 与先进节点

High-NA EUV 并不改变曝光波长, 仍使用 13.5 nm EUV, 而是把投影光学系统的数值孔径从现有 EUV 平台的 0.33 提高到 0.55. ASML 的 EXE:5000 平台即面向 High-NA EUV, 用于支持更小特征尺寸和更高图形密度 [8]. 按 Rayleigh 关系, 在 λ 不变时提高 NA 可以直接改善分辨率, 但焦深近似随 $\frac{\lambda}{NA^2}$ 缩小, 因此 High-NA 同时提高了晶圆平坦度, 光刻胶厚度, 掩模 3D 效应, 照明优化和计量控制的难度.

High-NA 还引入了版图场尺寸和光学结构的取舍. Low-NA EUV 通常对应 26 x 33 mm 全场曝光; High-NA 为了控制反射光学尺寸和入射角, 采用各向异性缩小的反射光学设计, 曝光场在一个方向上缩小为半场量级. 对小芯片或小曝光场层次, 这主要体现为扫描策略变化; 对接近全场尺寸的大芯片, 则可能引入拼接, 版图分割和吞吐量折中. 因而 High-NA 的技术问题不只是分辨率, 还包括半场曝光下的生产节拍和大面积芯片版图组织.

项目	Low-NA EUV	High-NA EUV	影响
波长	13.5 nm	13.5 nm	光源谱段不变, 仍依赖锡 LPP 或未来等效 EUV 源.
数值孔径	0.33	0.55	Rayleigh 分辨率约改善 40%, 但焦深约缩小到 36%.
标称分辨率	约 13 nm	约 8 nm	先进关键层可减少多重图形化, 但剂量和随机性更敏感.
曝光场	全场 26 x 33 mm 量级	半场量级	大芯片可能需要拼接或版图分割, 影响吞吐量和 overlay.
主要光源压力	功率, 污染, 随机缺陷	更高剂量空间和更稳剂量	源功率必须服务于随机缺陷控制, 不只是服务于 WPH.

表 3 Low-NA EUV 与 High-NA EUV 的关键工程差异[7,8].

从射线源角度看, High-NA 的压力主要体现在三方面. 第一, 更高分辨率会把随机缺陷容忍度推得更低, 因而需要更稳定的剂量和更高可用源功率. 第二, High-NA 光学系统的成像接受角和掩模 3D 效应改变了照明优化问题, 源角分布, pupil fill 和源掩模优化的重要性进一步上升. 第三, 若先进节点为了抑制随机缺陷而提高曝光剂量, 光源必须在不显著降低吞吐量的情况下提供更多可用 EUV 光子.

因此, High-NA EUV 的真正挑战不是单独制造更大的 NA, 而是在更小工艺窗口下维持量产经济性. 对光源而言, 这意味着源功率, 稳定性, 清洁周期, 光学传输效率和整机可用率都必须协同提高. 对工艺而言, 它要求光刻胶吸收和扩散机制, 掩模缺陷控制, OPC/计算光刻和刻蚀转移共同改善. High-NA 是 EUV 的延伸, 也是对 EUV 光源系统工程能力的再次放大.

8. 加速器和 FEL 候选源

除 LPP 外, 学术界长期讨论同步辐射, 储存环相干辐射和自由电子激光 (FEL) 作为光刻 EUV 源的可能性. 这些方案的吸引力在于可提供高平均功率, 较好方向性和可调波长, 并有潜力绕开锡碎屑和收集镜污染问题. 但它们的主要障碍是装置规模, 成本, 稳定性, 多台光刻机供光的分配方式, 以及半导体产线对可用率和维护性的严苛要求.

He 等提出了一种由超导能量回收直线加速器驱动的再生放大 FEL EUV 光源方案, 利用谐波振荡降低所需电子束能量, 估计在约 0.33 GeV 电子束和 16 mm 短周期波荡器条件下可提供约 2 kW 平均 EUV 功率[17]. 这个量级对未来高剂量 EUV 或多机供光有吸引力, 但它仍属于方案和模拟层面的候选技术, 还需要证明束流稳定性, 光束传输, 工业维护, 与扫描仪耦合和总体成本.

储存环相干 EUV 也是近期候选方向之一. 例如基于低发射度储存环和微聚束机制的设计, 目标是在 EUV 波段产生数百瓦量级相干辐射[18]. 这类方案说明加速器光源有可能进入光刻源讨论, 但现阶段仍应与量产 LPP EUV 严格区分. 对半导体制造来说, 可用的光源不仅要能产生高功率 EUV, 还要能在工厂空间, 维护节拍, 成本结构和多台设备协同中成立.

因此, 下一代光刻源的判断标准不只是“哪种物理机制亮度最高”. 如果单台 FEL 能向多台扫描仪分光, 它可能改变光源与光刻机一体化的设备形态; 如果 LPP 通过 2 微米或中红外驱动继续提高转换效率和可用功率, 它可能以较低系统风险延续现有路线. 两者的竞争核心是总拥有成本, 而不是单点实验指标.

候选源	功率目标	装置尺度	优势	产业化难点
锡 LPP 改进型	250 W 商业, 600 W 实验量级	光刻机集成源	沿用现有扫描仪架构, 工程风险相对连续.	锡污染, 收集镜寿命, 激光效率和热管理继续受限.
ERL/FEL	论文方案约 2 kW	加速器设施或集中供光	高平均功率, 窄带, 方向性好, 无锡靶碎屑.	束流稳定性, 多机分光, 工厂占地, 可维护性和成本未验证.
储存环相干 EUV	数百瓦目标	储存环和旁路线	可利用加速器光源经验, 可做高相干辐射.	微聚束保持, 产线集成, 与扫描仪同步和长期运行复杂.

表 4 下一代 EUV 光源候选路线对比[10,17,18].

9. 主要路线比较

路线	典型波长	成熟度	优势	主要限制
汞灯 g/i-line	436 nm / 365 nm	成熟, 主要用于较大尺寸和传统工艺	设备简单, 成本低, 工艺历史长	波长长, 分辨率不足, 不适合先进逻辑关键层
KrF DUV 准分子激光	248 nm	大规模成熟量产	稳定, 成本相对可控, 光学和胶体系成熟	先进节点分辨率不足, 关键层受限
ArF/ArFi DUV 准分子激光	193 nm	大规模成熟量产	高 NA, 浸没式工艺, 可配合多重图形化	多重图形化成本和叠加误差高, 工艺窗口变窄
锡 LPP EUV	13.5 nm	先进节点量产主流	短波长, 减少多重图形化, 支持先进逻辑关键层	源功率, 锡污染, 氢等离子体, 随机缺陷和能耗压力
High-NA EUV	13.5 nm	导入和早期应用阶段	NA 提高到 0.55, 提升单次曝光图形能力	焦深缩小, 掩模 3D 效应, 剂量和随机性要求更高
加速器 EUV	可调, 面向 13.5 nm	研究和候选方案	潜在高平均功率, 方向性好, 无锡碎屑	装置规模, 成本, 产线集成和长期稳定性未验证

从这张比较可以看出, DUV 仍然是产线主力, EUV 是最先进关键层的核心工具, High-NA EUV 是继续缩小特征尺寸的重要延伸, 而加速器光源则是面向未来高功率需求的研究储备。

10. 小结

射线源在高端芯片光刻中的作用可以概括为三个层次. 第一, 它通过波长进入 Rayleigh 分辨率关系, 决定了光刻系统可达到的基本图形尺度. 第二, 它通过功率, 谱宽, 稳定性和角分布进入曝光剂量与成像质量, 决定了一个物理分辨率能否成为稳定量产工艺. 第三, 它通过污染, 热负荷, 能耗和维护周期进入整机经济性, 决定了技术路线能否在半导体工厂中长期运行.

DUV 准分子激光的成功来自成熟激光工程与透射光学系统的结合. EUV 的成功则来自锡 LPP 源, 多层膜反射光学, 真空系统, 氢污染控制和计算光刻的共同成熟. 目前 EUV 光源研究的前沿集中在提高转换效率, 提高可用平均功率, 降低碎屑和污染, 理解 EUV 诱导等离子体, 以及为 High-NA 和更小节点提供更大的剂量空间 [11–13,17].

Bibliography

[1] Asml, *Rayleigh Criterion*, <https://www.asml.com/en/technology/lithography-principles/rayleigh-criterion>.

[2] Asml, *Light and Lasers*, <https://www.asml.com/en/technology/lithography-principles/light-and-lasers>.

[3] Asml, *DUV Lithography Systems*, <https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems>.

- [4] Asml, *EUV Lithography Systems*, <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>.
- [5] C. A. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication* (Wiley, Chichester, 2007).
- [6] Asml, *TWINSCAN Nxt:2000i*, <https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems/twinscan-nxt-2000i>.
- [7] Asml, *Twinscan Nxe:3800e*, <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twinscan-nxe-3800e>.
- [8] Asml, *Twinscan Exe:5000*, <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twinscan-exe-5000>.
- [9] V. Bakshi, editor, *EUV Lithography*, 2nd ed. (SPIE Press, Bellingham, WA, 2018).
- [10] E. G. Rasmussen, B. Wilthan, and B. Simonds, Report from the Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography Working Group Meeting: Current State, Needs, And Path Forward, NIST Special Publication No. 1500–208, 2023, <https://doi.org/10.6028/nist.sp.1500-208>.
- [11] R. Schupp, L. Behnke, J. Sheil, Z. Bouza, M. Bayraktar, and others, *Characterization of 1- and 2-Micrometer-Wavelength Laser-Produced Microdroplet-Tin Plasma for Generating Extreme-Ultraviolet Light*, <https://arxiv.org/abs/2012.14243>.
- [12] N. Tanaka, Y. Yamamoto, A. Sasaki, K. Nishihara, A. Sunahara, and others, *Optimization of EUV Output by Experimentally Validated Radiation-Hydrodynamic Simulations across a Broad Laser Parameter Space*, <https://arxiv.org/abs/2606.05948>.
- [13] S. Musikhin, A. Morozov, A. Griffith, S. Yatom, and A. Diallo, *Multi-Diagnostic Characterization of Laser-Produced Tin Plasmas for EUV Lithography*, <https://arxiv.org/abs/2602.03583>.
- [14] V. Rigato, *Grazing Incidence Interaction of Sn Particles with EUV Lithography Ruthenium Mirrors*, <https://arxiv.org/abs/1003.3763>.
- [15] M. van de Kerkhof, A. M. Yakunin, D. Astakhov, M. van Kampen, R. van der Horst, and others, *EUV-Induced Hydrogen Plasma: Pulsed Mode Operation and Confinement in Scanner*, <https://arxiv.org/abs/2105.10029>.
- [16] M. van de Kerkhof, A. M. Yakunin, V. Kvon, S. Cats, L. Heijmans, and others, *Plasma-Assisted Discharges and Charging in EUV-Induced Plasma*, <https://arxiv.org/abs/2012.03027>.
- [17] C. He, H. Yang, N. Huang, B. Liu, and H. Deng, *Cavity-Based Compact Light Source for Extreme Ultraviolet Lithography*, <https://arxiv.org/abs/2501.14541>.
- [18] Y. Lu, A. Liu, C. Li, K. Wang, Q. Zhang, and others, *Lattice Design of a Storage-Ring-Based Light Source for Generating High-Power Fully Coherent EUV Radiation*, <https://arxiv.org/abs/2511.04382>.