

- 1. 试定量分析 接近式光学曝光、投影式光学曝光 和 电子束曝光 各自 线宽 的物理极限。说明在工艺上趋向 极限线宽 时所受到的 技术限制。

接近式光学曝光。投影式光学曝光：设采用的 光波长 为 125 nm，可得到的 镜头数值孔径 N 为 0.5，工艺参数 k 为 0.6，掩膜 与 基片 的 最近距离 g 可达 1 um

电子束曝光：采用 25 keV 的电子束

- 1. 解：对于 接近式光学曝光，衍射效应 不可 忽略，考虑 近场 菲涅尔衍射
 - 最小 可分辨 线宽 为 $W_{min}=15\sqrt{\frac{\lambda\cdot g}{200}}=15\sqrt{\frac{125\text{ nm}\cdot 1\text{ }\mu\text{m}}{200}}=375\text{ nm}$
 - 限制因素
 - 短波长 对 光路系统、镀膜 的要求 很高
 - 高分子阻挡层 在 X-ray 照射 下的 主要过程 是 光电子发射，这些 光电子 就会 像电子束 那样 对阻挡层 进行曝光
 - 光电子的能量 可以超过 X射线 的能量，对于 短波长X光，光电子的行程 可以大于 100nm
 - 因此，在 曝光分辨率 上，光 (X-ray) 的衍射 和 光电子的行程 是一对竞争的因素
 - 因为 所有材料 都吸收 X 光，故在透明区域，掩模层 必须非常薄 甚至不存在
 - 因此 难以形成 深紫外波段 具有 高对比度 的 耐久而稳定 的 掩模
- 2. 对于 投影式光学曝光，考虑 远场 夫朗禾费衍射
 - 最小 可分辨 线宽 为 艾里斑 半径 $W_{min}=\frac{k\cdot\lambda}{N}=\frac{0.6\cdot 125\text{ nm}}{0.5}=150\text{ nm}$
 - 限制因素
 - 焦深 会 随着 照射光 波长变短，镜头 数值孔径 变大 而 明显减小
 - 所以 要求基片 的不平度 小于 焦深
 - 短波长 对 光路系统、镀膜 的要求 很高
 - 掩模 要求 高对比度、耐久而稳定、透明区域 低吸收
- 3. 对于 电子束曝光，不考虑 衍射效应
 - 考虑 相对论效应，电子 波长 $\lambda=\frac{12.25}{\sqrt{V_0}\cdot\sqrt{1+0.978\times 10^{-6}V_0}}\overset{\circ}{A}=\frac{12.25}{\sqrt{25\times 10^3}\cdot\sqrt{1+0.978\times 10^{-6}\cdot 25\times 10^3}}\overset{\circ}{A}=0.077\overset{\circ}{A}$
 - 设 电磁透镜 的 球差系数 $C_s=1\text{ mm}$ ，挪用 透射电子显微镜 TEM 的 分辨率 公式 $(\Delta r_0)_{min}=0.43\lambda^{\frac{3}{4}}C_s^{\frac{1}{4}}$
 - 最小 可分辨 线宽 为 $W_{min}=0.43\lambda^{\frac{3}{4}}C_s^{\frac{1}{4}}=0.43\cdot(0.077\times 10^{-10})^{\frac{3}{4}}\cdot(1\times 10^{-3})^{\frac{1}{4}}=0.35\text{ nm}$
 - 限制因素
 - 电子抗蚀剂 的限制
 - 灵敏度、反差、分辨率、抗蚀性
 - 电子在 抗蚀剂 中的 散射效应，导致 近邻效应
 - 散射后 的电子 会 超出原有的 束斑尺寸 范围，导致对 邻近束斑 的非曝光区域 的 曝光
 - 曝光图形 尺寸 出现 一定放大、抗蚀剂层 轮廓 侧壁 垂直度 下降，导致 分辨率 下降
 - 不同场间 图形拼接误差，图形边缘 出现错位
 - 图形按场划分，同一场内通过偏转电子束进行写图形，场与场间由工件台移动实现
 - 扫描效率
 - 扫描时间 与 扫描像素 的大小 成反比
 - 电子束 尺寸越小，强度就越弱，曝光时间 就需要越长
 - 高分辨 的 阻挡层 也需要 长的 曝光时间。
 - 2. 设 $\varphi=4\text{ eV}$ ，若 隧道电流 在 设定值 附近 2 % 范围 内变化，问 STM 探针 与 表面 之间的 距离 的变化？在 何种 探针 - 表面 距离 时 具有 更高的 灵敏度？
 - 解：金属探针尖端 与 金属样品表面 间的 隧道电流密度 $j_t=j_0(V)\cdot e^{-k\Delta z}$
 - 其中 $k=\frac{4\pi\sqrt{2m\varphi}}{h}=\frac{4\pi\sqrt{2\cdot 9.11\times 10^{-31}\cdot 4}\cdot 1.6\times 10^{-19}}{6.63\times 10^{-34}}=2.047\times 10^{10}m^{-1}\approx 2/\overset{\circ}{A}$
 - 因此 当 $j_t=j_0(V)\cdot e^{-2/\overset{\circ}{A}\cdot\Delta z}$ 减小 2 % 即 $j_t'=j_0(V)\cdot 98\%\cdot e^{-2/\overset{\circ}{A}\cdot\Delta z}=j_0(V)\cdot e^{-2/\overset{\circ}{A}\cdot\delta(\Delta z)'}$ 时，即有 $98\%=e^{-2/\overset{\circ}{A}\cdot\delta(\Delta z)'}$
 - 则有 $\delta(\Delta z)=-\frac{\ln(98\%)}{2}\overset{\circ}{A}\approx 0.01\overset{\circ}{A}$
 - 即当 隧道电流 减小 2 % 时，STM 探针 远离 表面 约 $0.01\overset{\circ}{A}$
 - 同样，当 j_t 增大 2 % 时， $\delta(\Delta z)\approx -0.01\overset{\circ}{A}$
 - 即当 隧道电流 增大 2 % 时，STM 探针 靠近 表面 约 $0.01\overset{\circ}{A}$
 - 当 探针 - 表面 距离 在 1nm 以下，越小 灵敏度 越高
 - 但不能 太过 接近 表面，避免 损坏探针，或 隧穿电流 过大 损坏 探测器
 - 3. AFM 有 接触模式 和 轻敲模式 (apping mode) 两种 工作模式，试比较 两种模式 的工作原理，并说明：两种 工作模式 各适用于 何种样品？

在 轻敲模式，可同时 获得 “形貌像” (topography) 和 “相衬像” (phase contrast)，两者分别 对应于 悬臂 何种 运动量 的变化？“形貌像” 和 “相衬像” 分别能够 反映 表面 的 何种 性质？

- 解：比较 两种模式 的工作原理
 - 接触模式：针尖始终与样品接触，以恒力或恒高模式进行扫描，针尖在样品表面滑动
 - 适用于 研究
 - 高弹性模量、硬的 样品
 - 不易移动、不易变形的 样品
 - 缺点
 - 针尖与样品间作用力要小于样品原子间的团聚力
 - 微悬臂硬度不能太大，弹性常数：1~10N/m范围或更小
 - 优点
 - 还可以 测量 样品与针尖 之间的 摩擦力
 - 轻敲模式：在共振频率附近，激发悬臂 发生振幅为 10-100nm 的 受迫振动，悬臂 在向下振动 的 半个周期中 趋近样品表面 并与样品表面接触
 - 悬臂振动的 振幅和位相的变化 与 探针-表面 相互作用 有关。在扫描中，保持 驱动振幅 为 常数
 - “形貌像” 由 反馈回路 输出到 扫描器 Z电极 的 电压 给出
 - 反映 的是 表面 的高度 变化 信息
 - “相衬像” 由 压电陶瓷 驱动 悬臂振荡 的 输入信号 与 相对更滞后的 输出信号 之间的 振荡 相位差 给出
 - 相位差的 改变 反映 的是 表面 的 机械性能 的 变化 信息，如 摩擦、材料的粘弹性、粘附性质的 变化
 - 适用于 研究
 - 生物大分子 样品
 - 低弹性模量、软的 样品
 - 易移动和变形 样品