

作业 2

廖汶锋

2024 年 4 月 1 日

- 2.3. 根据物质波公式，假设电子动能完全由电场加速获得，电子静止质量 $m_0 = 0.91 \times 10^{-30} \text{kg}$ ，写出电子物质波波长和加速电压 U 之间的直接关系，并分别计算 $U = 100\text{V}$ 、 10kV 、 300kV 时的电子的波长值。

解. 根据相对论能量、动能 E_k 及动量 p 的关系，可以推导出：

$$p = \sqrt{2m_0 E_k \cdot \left(1 + \frac{E_k}{2m_0 c^2}\right)} \quad (2.3-1)$$

结合题目已知条件 $E_k = qU$ 以及德布罗意波公式可得：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 qU \cdot \left(1 + \frac{qU}{2m_0 c^2}\right)}} \quad (2.3-2)$$

取普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 、光速 $c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ 、元电荷量 $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ，并且分别取 $U = 100\text{V}$ 、 10kV 、 300kV 代入 (2.3-2) 可得：

$$\begin{cases} \lambda_{100\text{V}} = 1.2271 \text{\AA} \\ \lambda_{10\text{kV}} = 0.1221 \text{\AA} \\ \lambda_{300\text{kV}} = 0.0197 \text{\AA} \end{cases} \quad (2.3-3)$$

- 2.4. 为什么 TEM 一般要求样品很薄？（从电子透射率、透镜色差来说明）

解. 第一，电子透射率 τ 与样品原子数密度 N 、散射截面 σ_α 、厚度 t 具有以下表达式：

$$\tau = \exp(-N\sigma_\alpha t) \quad (2.4-1)$$

由 (2.4-1) 可知，当厚度 t 下降时，透射率提升，有助提升成像衬度。

第二，TEM 的透镜色差 d_c 与电子能量损失 ΔE 成一次方正比关系。当样品厚度越厚时， ΔE 随之增大，色差散焦斑直径 d_c 越大。

综上所述，样品越薄越有利于 TEM 的成像。

- 2.5. 为什么在 SEM 中，形貌像一般用二次电子，成分像一般用背散射电子？而不能反过来。

解. SE 模式中, 入射电子束与材料表面的夹角 τ 与二次电子产额 δ 满足正割关系, 即 $\delta \propto \sec \theta$, 所以在尖、棱、角处, η 明显增大; 在沟、槽、孔、穴处, 二次电子容易被阻挡, η 明显减少; 在平面垂直入射, η 不变。

虽然 SE 模式在不同样品中的 δ 也有差异, 但是二次电子的成分衬度和样品的成分、分子键合情况、导电率、表面污染等因素都有关, 难以用简单规律描述。所以一般不用 SE 来表现成分像。

BSE 模式中, 背散射电子产额 η 与原子序数 Z 有明显的关系。考虑垂直入射、 $E_s = 20\text{keV}$ 时, 两者的关系可用多项式近似:

$$\eta = -0.0254 + 0.016Z - 1.86 \times 10^{-4}Z^2 + 8.3 \times 10^{-7}Z^3 \quad (2.5-1)$$

由多项式的连续性可知, 当样品的原子序数差异较小时, 衬度很小; 当样品的原子序数差异很大时, 衬度很大, 所以 BSE 适合用于表示成分像。

虽然 BSE 模式亦能成形貌像, 但是 η 不仅考虑倾角因素, 还要考虑因素。如果样品表面法线与入射光线的夹角较大时, 背散射电子大多数集中于, 法线和入射光线的平面内, 所以 E-T 检测器在检测期间, 有可能会出现“阴影效应”。

2.6. 在电子显微镜, 能否同时显示极限分辨率和最大景深, 为什么?

解. 两者显然不能同时满足最优解。原因如下: 记正确成像的物距为 U , 透镜半径为 R , 物方分辨率为 δR , 景深为 ΔU , 由简单的几何关系可以推导得:

$$\frac{\Delta U}{\delta R} = \frac{U/Rw}{\sqrt{1 - \left(\frac{\delta R/2}{R}\right)^2}} \quad (2.6-1)$$

由 (2.6-1) 可知, 当分辨率 δR 下降时, $\Delta U/\delta R$ 的值也随之而下降, 所以景深 ΔU 也会下降。因此, 极限分辨率和最大景深无法同时取得。