



Физика для школьников 7 – 11 класса (заочный тур)
Решение задачи 10. Просвечивающий электронный микроскоп

1. Определим число атомов золота в единице объёма:

$$a = \frac{N_A}{V_A} = \frac{N_A \cdot \rho}{M},$$

где a – число атомов золота в единице объёма ($1/\text{см}^3$), N_A – число Авогадро, ρ – плотность золота ($\text{г}/\text{см}^3$), M – атомная масса золота ($\text{г}/\text{моль}$).

Так как один атом золота содержит $Z = 79$ электронов, то их число в единице объёма равно

$$b = Z \cdot a = \frac{Z \cdot N_A \cdot \rho}{M}.$$

Тогда модуль объёмной плотности заряда электронов равен

$$n = \frac{Z \cdot N_A \cdot \rho}{M} \cdot e,$$

где e – элементарный заряд ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Теперь можно оценить минимальную энергию электронов, которые смогли бы насквозь пройти золотую плёнку толщиной h :

$$h = \frac{M \cdot E^{1,67}}{2 \cdot Z \cdot e \cdot N_A \cdot \rho}$$

$$E = \sqrt[1,67]{\frac{2 \cdot Z \cdot e \cdot N_A \cdot \rho \cdot h}{M}}$$

Для золотой плёнки толщиной 50 мкм (то есть $5 \cdot 10^{-3}$ см) эта энергия равна

$$E = \sqrt[1,67]{\frac{2 \cdot 79 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 19,3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{197}} = 208 \text{ кэВ}$$

Используя определение электронвольта, получим ускоряющее напряжение 208 кВ.

2. С одной стороны, импульс электрона задаётся формулой

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

где h – постоянная Планка, λ – длина волны. С другой, его можно рассчитать через энергию с учётом релятивистской поправки, так как 208 кэВ – довольно большая энергия:

$$p = \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 + 2mE},$$

где E – энергия электрона, m – его масса, c – скорость света. Кроме того, кинетическая энергия электрона, ускоряемого разностью потенциалов, равна $E = eU$, где e – элементарный заряд, U – ускоряющее напряжение. Объединяя данные выражения, получим формулу для вычисления длины волны:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{eU}{c}\right)^2 + 2meU}}$$

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{\sqrt{\left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 208000 \text{ В}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}\right)^2 + 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 208000 \text{ В}}} = 2,45 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 0,00245 \text{ нм}$$

3. Так как длина волны электронов много меньше параметра решётки, при взаимодействии таких электронов с исследуемым образцом будет происходить дифракция. Поэтому с помощью просвечивающего электронного микроскопа возможно получение информации о расположении атомов, кристаллографической ориентации плёнки, наличии протяжённых дефектов в структуре.