



Решение задачи 1. Пробег электронов (10 баллов)

1. Число молекул можно выразить через количество вещества:

$$N = \nu N_A = \frac{pV}{RT} N_A = \frac{132,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль}) \cdot 300 \text{ К}} 6,02 \cdot 10^{23} \approx 3,21 \cdot 10^{14}$$

2. Длина свободного пробега λ обратно пропорциональна концентрации молекул n .
Таким образом:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{p_1}{p_2},$$

поскольку

$$p = nkT\lambda_2 = \lambda_1 \frac{p_1}{p_2} = \frac{10^{-6} \text{ м}}{760} \approx 1,3 \text{ нм.}$$

Решение задачи 2. Ионная имплантация (10 баллов)

Кинетическая энергия подлетающих к пластине электронов, определяется ускоряющим напряжением $eU = \frac{mV_1^2}{2}$. Попадая в пластину, ионы испытывают многократное рассеяние, но можно рассмотреть действие эффективной силы торможения F , работа которой изменяет кинетическую энергию электронов до нуля.

$$0 - \frac{mV_1^2}{2} = -F_{\text{тор}} d_1$$

Поэтому, в случае 1: $d_1 = \frac{mV_1^2}{2F_{\text{тор}}}$, тогда $\frac{d_2}{d_1} = \frac{V_2^2}{V_1^2} = 4d_2 = 200 \text{ нм.}$

В случае 2: сила торможения $F = \alpha V$, где α — коэффициент пропорциональности.

$$d_1 = \frac{mV_1^2}{2\alpha V_1}, \text{ тогда } \frac{d_2}{d_1} = \frac{V_2}{V_1} = 2d_2 = 100 \text{ нм.}$$

Решение задачи 3. Опасные наночастицы (10 баллов)

Найдем массу наночастиц:

$$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} \approx 5,8 \cdot 10^{-19} \text{ кг.}$$

Наночастицы при столкновении с мембраной будут тормозиться, в результате чего будет изменяться их импульс. Максимальное изменение импульса Δp_{max} будет достигаться при полной остановке наночастиц за время Δt . В таком случае изменение импульса наночастиц $\Delta p_{\text{max}} = mv_{\text{max}}$ будет обеспечено за счет силы, действующей со стороны мембраны, равной:

$$F = \frac{\Delta p_{max}}{\Delta t} = \frac{mv_{max}}{\Delta t}$$

Согласно III закону Ньютона, такая же по модулю сила будет действовать и на мембрану, создавая давление (за площадь воздействия примем площадь поперечного сечения наночастицы):

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi d^2/4}$$

В предельном случае это давление следует приравнять к пределу прочности мембраны:

$$\frac{4mv_{max}}{\pi d^2 \Delta t} = \sigma_0$$

Откуда максимальная скорость наночастиц:

$$v_{max} = \frac{\pi d^2 \Delta t \sigma_0}{4m} = \frac{3 \Delta t \sigma_0}{2 \rho d} \approx 13.5 \text{ м/с}$$

Решение задачи 4. Неразрушающий метод (10 баллов)

1. Под действием монохроматического излучения вещество испускает фотоэлектроны, согласно закону фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2},$$

где h – постоянная Планка (Дж·с), c – скорость света (м/с), λ – длина волны (м), A – работа выхода электрона (Дж), m – масса электрона (кг), v – скорость электрона (м/с). Другими словами, ток наблюдается только в том случае, если энергия фотона больше работы выхода.

Запирающим напряжением называется минимальная разность потенциалов, при которой прекращается фототок, поскольку кинетической энергии электронов оказывается недостаточно для преодоления потенциального барьера:

$$\begin{aligned} E_k &= E_p \\ \frac{mv^2}{2} &= eU \end{aligned}$$

где E_k – кинетическая энергия (Дж), E_p – потенциальная энергия (Дж), e – элементарный заряд (Кл), U – запирающее напряжение (В).

Следовательно, запирающее напряжение равно

$$\begin{aligned} \frac{hc}{\lambda} &= A + eU \\ U &= \frac{hc - \lambda A}{\lambda e} \end{aligned}$$

Для образца **A**:

$$U_A = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} - 250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot (4,7 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}) \text{ Дж}}{250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 0,26 \text{ В}$$

Для образца **B**:

$$U_B = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} - 250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot (4,8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}) \text{ Дж}}{250,0 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 0,16 \text{ В}$$

2. Красная граница фотоэффекта – это максимальная длина волны излучения, при которой наблюдается фотоэффект. Следовательно, её можно рассчитать по формуле

$$\frac{hc}{\lambda} = A$$

$$\lambda = \frac{hc}{A}$$

Таким образом, разность значений для образцов **A** и **B** равна

$$\Delta\lambda = \lambda_A - \lambda_B = \frac{hc}{A_A} - \frac{hc}{A_B}$$

$$\Delta\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{4,7 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} - \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{4,8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} =$$

$$= 5,5 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 5,5 \text{ нм.}$$

Решение задачи 5. Механическая активация наночастиц (10 баллов)

1. Количество необходимых столкновений будет наименьшим, если уменьшение кинетической энергии будет связано только с нагревом наночастиц. В таком случае, согласно закону сохранения энергии для одного столкновения имеем

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 + Q,$$

где E_1 – кинетическая энергия первой наночастицы до столкновения, E_2 – кинетическая энергия второй наночастицы до столкновения, E'_1 – кинетическая энергия первой наночастицы после столкновения, E'_2 – кинетическая энергия второй наночастицы после столкновения, Q – тепловая энергия.

Так как наночастицы одинаковые, то

$$E_1 = E_2 = \frac{mv^2}{2}$$

$$E'_1 = E'_2 = \frac{m \cdot ((1 - 0,3)v)^2}{2} = \frac{m \cdot (0,7v)^2}{2} = \frac{0,49mv^2}{2},$$

где m – масса наночастицы, v – её скорость.

Значит, тепловая энергия, выделяющаяся в результате одного удара, равна

$$Q = E_1 + E_2 - E'_1 - E'_2$$

$$Q = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - \frac{0,49mv^2}{2} - \frac{0,49mv^2}{2} = mv^2 - 0,49mv^2 = 0,51mv^2$$

Так как $Q = c \frac{2m}{M} \Delta T$ (масса удвоена, поскольку в результате столкновения нагреваются обе наночастицы), то

$$c \frac{2m}{M} \Delta T = 0,51mv^2,$$

где M – атомная масса никеля, c – теплоёмкость никеля.

Поэтому для N таких столкновений имеем

$$c \frac{2m}{M} \Delta T = 0,51Nmv^2$$

$$N = \frac{2c \cdot \Delta T}{0,51Mv^2}$$

$$N = \frac{2 \cdot 26,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 100\text{К}}{0,51 \cdot 0,0587 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \left(10 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2} \approx 1744$$

- Кроме нагрева наночастиц будут возникать их упругие и пластические деформации, в том числе образование дефектов кристаллической структуры. В определённых условиях возможны также растрескивание и разрушение частиц, а также эмиссия электронов и ионов.