

Глава 39. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

Задачи в данной теме в основном сводятся к определению энергии, импульса и массы фотонов, а также к применению законов фотоэффекта для определения длинноволновой границы фотоэффекта и скорости фотоэлектронов. По явлению люминесценции, световому давлению и химическому действию света возможны только качественные задачи.

731. Определите энергию, массу и импульс фотонов, соответствующих наиболее длинным и наиболее коротким волнам видимой части спектра.

Решение. Из таблиц находим граничные значения длин волн для света: $\lambda_1 = 7,6 \cdot 10^{-7}$ м; $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-7}$ м.

Энергия фотонов $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, т. е.

$$E_1 = \frac{hc}{\lambda_1} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \approx 2,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$E_2 = \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \approx 5,0 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Масса фотонов $m = \frac{E}{c^2}$, т. е.

$$m_1 = \frac{E_1}{c^2} \approx \frac{2,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2} \approx 0,29 \cdot 10^{-35} \text{ кг};$$

$$m_2 = \frac{E_2}{c^2} \approx \frac{5,0 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{9 \cdot 10^{17} \text{ м}^2/\text{с}^2} \approx 0,55 \cdot 10^{-35} \text{ кг}.$$

Импульс фотонов $p = mc$, т. е.

$$p_1 = m_1 c = 0,29 \cdot 10^{-35} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 0,87 \cdot 10^{-27} \text{ Н} \cdot \text{с};$$

$$p_2 = m_2 c = 0,55 \cdot 10^{-35} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 1,65 \cdot 10^{-27} \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

732. Какую энергию должен иметь фотон, чтобы обладать массой, равной массе покоя электрона?

Решение. Масса фотона $m = \frac{E}{c^2}$, масса покоя электрона $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, энергия фотона при $m = m_0$ должна быть:

$$E = m_0 c^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} (3 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{с}^2 \approx 82 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}.$$

При решении задач на законы внешнего фотоэффекта используют уравнение Эйнштейна

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

согласно которому энергия кванта $h\nu$ расходуется на совершение

работы выхода электрона с поверхности металла A и сообщение фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$.

Уравнение Эйнштейна позволяет вычислить скорость фотоэлектронов. С помощью этого уравнения определяют также и наибольшую длину волны λ_{\max} , при которой еще наблюдается явление фотоэффекта для данного вещества (длинноволновая граница фотоэффекта).

733. Для света с длиной волны $\lambda = 500$ нм порог зрительного восприятия равен $W = 2,1 \cdot 10^{-13}$ Дж ($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Рассчитайте число фотонов, воспринимаемых глазом на пороге зрительного восприятия.

Решение. Вычислим энергию одного фотона:

$$E = h\nu; E = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{500 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Очевидно, что число фотонов равно:

$$n = \frac{W}{E}; n = \frac{2,1 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})}{3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/фотон}} = 53 \cdot 10^4 \text{ фотон}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 53 \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

734. Найдите порог (длинноволновую границу) фотоэффекта для калия, если работа выхода $A = 1,92$ эВ [35, № 1222].

Решение. В уравнении Эйнштейна $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ для порога фотоэффекта $\frac{mv^2}{2} = 0$. Тогда

$$h\nu_{\text{порог}} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} = A.$$

Искомая длина волны

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{A};$$

$$\lambda_{\max} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,92 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} \approx 6,47 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

735. Цезий освещают желтым монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,589 \cdot 10^{-6}$ м. Работа выхода электрона $A = 1,7 \cdot 10^{-19}$ Дж. Определите кинетическую энергию вылетающих из цезия фотоэлектронов.

Решение. По уравнению Эйнштейна

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - A.$$

Подставляя числовые данные, получим значение кинетической энергии:

$$W_k = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{0,589 \cdot 10^{-6} \text{ м}} - 1,76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

работы выхода электрона с поверхности металла A и сообщение фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$.

Уравнение Эйнштейна позволяет вычислить скорость фотоэлектронов. С помощью этого уравнения определяют также и наибольшую длину волны λ_{max} , при которой еще наблюдается явление фотоэффекта для данного вещества (длинноволновая граница фотоэффекта).

733. Для света с длиной волны $\lambda = 500$ нм порог зрительного восприятия равен $W = 2,1 \cdot 10^{-13}$ Дж ($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Рассчитайте число фотонов, воспринимаемых глазом на пороге зрительного восприятия.

Решение. Вычислим энергию одного фотона:

$$E = h\nu; E = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{500 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Очевидно, что число фотонов равно:

$$n = \frac{W}{E}; n = \frac{2,1 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})}{3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/фотон}} = 53 \cdot 10^4 \text{ фотон}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 53 \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

734. Найдите порог (длинноволновую границу) фотоэффекта для калия, если работа выхода $A = 1,92$ эВ [35, № 1222].

Решение. В уравнении Эйнштейна $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ для порога фотоэффекта $\frac{mv^2}{2} = 0$. Тогда

$$h\nu_{\text{порог}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = A.$$

Искомая длина волны

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A};$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,92 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} \approx 6,47 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

735. Цезий освещают желтым монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,589 \cdot 10^{-6}$ м. Работа выхода электрона $A = 1,7 \cdot 10^{-19}$ Дж. Определите кинетическую энергию вылетающих из цезия фотоэлектронов.

Решение. По уравнению Эйнштейна

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - A.$$

Подставляя числовые данные, получим значение кинетической энергии:

$$W_k = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{0,589 \cdot 10^{-6} \text{ м}} - 1,76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

736. Определите скорость фотоэлектронов при освещении калия фиолетовым светом с длиной волны $4,2 \cdot 10^{-7}$ м, если работа выхода электронов с поверхности калия $A = 1,92$ эВ.

Решение. По уравнению Эйнштейна

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - A$$

находим скорость фотоэлектронов

$$v = \sqrt{\frac{2\left(\frac{hc}{\lambda} - A\right)}{m}}$$

Подставив значения $\lambda = 4,2 \cdot 10^{-7}$ м, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с и $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, получим $v \approx 6 \cdot 10^5$ м/с.

737. В одном из опытов по фотоэффекту металлическая пластина освещалась светом длиной волны 420 нм. Работа выхода электрона с поверхности пластины равна 2 эВ. При какой задерживающей разности потенциалов прекратятся фототок?

Решение. По закону Эйнштейна для фотоэффекта кинетическая энергия вылетевших фотоэлектронов $\frac{mv^2}{2}$ равна разности энергии фотона и работы выхода:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A. \quad (1)$$

Вылет электронов прекратится, когда потенциальная энергия eU_3 электрона в задерживающем поле станет равной его кинетической энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, U_3 — задерживающий потенциал. Из уравнений (1) и (2) получим:

$$eU_3 = h\nu - A, \quad (3)$$

где $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Отсюда задерживающая разность потенциалов равна:

$$U_3 = \frac{h\nu}{e}; \quad (4)$$

$$U_3 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{420 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} - \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 0,95 \text{ В.}$$

По вопросу о давлении света достаточно решить простейшие задачи.