

Ответ:  $\Delta\lambda_m = 0,24$  мкм.

19. При увеличении термодинамической температуры  $T$  абсолютно черного тела в два раза длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\lambda \max}^{\circ}$ , уменьшилась на  $\Delta\lambda_m = 400$  нм. Определить начальную и конечную температуры  $T_1$  и  $T_2$ .

Ответ:  $T_1 = 3625$  К,  $T_2 = 7250$  К.

20. Поверхность тела нагрета до температуры  $T = 1000$  К. Затем одна половина этой поверхности нагревается на  $\Delta T_1 = 100$  К, другая охлаждается на  $\Delta T_2 = 100$  К. Во сколько раз изменится энергетическая светимость  $R_0$  поверхности этого тела?

Ответ: Увеличится в 1,06 раз.

## Занятие № 7

### Тема: Фотоны. Фотоэффект

#### Краткая теория

Свет представляет собой сложное явление, сочетающее в себе свойства электромагнитной волны и потока частиц. Световая частица называется фотоном. Фотон несет квант энергии, определяемый как

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu = \hbar\omega = h \cdot \frac{c}{\lambda},$$

где  $\nu$  – частота света,  $c$  – скорость света в вакууме,  $h$  – постоянная Планка ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с),  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота.

*Фотон* – это частица, которая всегда и в любой среде движется со скоростью света  $c$  и имеет массу покоя, равную нулю. Масса фотона определяется из соотношения  $\varepsilon_0 = m_{\phi} \cdot c^2$ , т.е.

$$m_{\phi} = \frac{\varepsilon_0}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Фотон обладает импульсом, определяемым как

$$p_{\phi} = m_{\phi} \cdot c = \frac{h}{\lambda} = \hbar k = \frac{\varepsilon_0}{c}.$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число.

Фотон летит в направлении распространения электромагнитной волны, поэтому направления вектора  $\vec{p}_\Phi$  и волнового вектора  $\vec{k}$  совпадают, т.е.

$$\vec{p}_\Phi = \hbar\vec{k}.$$

*Внешним фотоэффектом* называется явление испускания электронов твердыми и жидкими телами под действием света. Закономерности фотоэффекта объясняются тем, что свет излучается и поглощается квантами. Часть кванта энергии  $h\nu$ , воспринимаемого электроном вещества, затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Эта часть энергии называется работой выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$ , величина которой зависит от состава вещества.

Остаток энергии образует кинетическую энергию  $E_K$  электрона, покинувшего вещество.

Эти соотношения описывает *уравнение Эйнштейна*

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + E_K,$$

где  $h\nu$  – энергия фотона, падающего на поверхность вещества,  $A_{\text{ВЫХ}}$  – работа выхода электрона фотоэлектрона,  $E_K = \frac{m_e v^2}{2}$  – кинетическая энергия фотоэлектрона.

Из уравнения Эйнштейна следует, что если работа выхода превышает энергию фотона, электроны не смогут покинуть вещество. Следовательно, для возникновения фотоэффекта необходимо выполнение условия  $h\nu \geq A_{\text{ВЫХ}}$  или

$$\nu \geq \nu_0 = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}.$$

Соответственно, для длины волны получается условие:

$$\lambda \geq \lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}}.$$

Частота  $\nu_0$  или длина волны  $\lambda_0$  называется *красной границей фотоэффекта*.

На основе фотоэффекта работают фотодиоды, в которых электрический ток представляет собой поток электронов, выбитых светом из катода и

летающих к аноду. Чтобы фототок стал равным нулю, между катодом и анодом необходимо приложить *задерживающее напряжение*  $U_{\text{зад}}$ , при котором ни один из фотоэлектронов, даже обладая при вылете из катода максимальной скоростью  $v_{\text{max}}$ , не сможет достигнуть анода. Следовательно:

$$\frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2} = eU_{\text{зад}},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона.

### Примеры решения задач

**Задача 7.1.** Определите длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, прошедшего разность потенциалов  $U = 9,8$  В.

#### Решение

$U = 9,8$ В $p_e = p_{\text{ф}}$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\lambda - ?$	Пройдя разность потенциалов $U$ , электрон приобретает энергию $eU$ , т.е.
	$\frac{m_e v^2}{2} = eU \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}.$

Импульс электрона

$$p_e = m_e v = \sqrt{2m_e eU}. \quad (1)$$

Импульс фотона

$$p_{\text{ф}} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Приравнивая (1) и (2), получим:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,8}} = 392 \text{ пм.}$$

Ответ:  $\lambda = 392$  пм.

**Задача 7.2.** Фотоны с энергией  $W_{\text{max}} = 4,9$  эВ вырывают электроны из металла с работой выхода  $A_{\text{вых}} = 4,5$  эВ. Найти максимальный импульс  $p_{\text{max}}$ , передаваемый поверхности металла в результате фотоэффекта.

**Решение**

$W_{\max} = 4,9 \text{ эВ}$ $A_{\text{ВЫХ}} = 4,5 \text{ эВ}$ $p_{\max} - ?$	Импульс, передаваемый поверхности, равен сумме импульсов фотона, поглощаемого поверхностью, и вылетающего электрона, т.е.
--	---

$$p_{\max} = p_{\phi} + p_e. \quad (1)$$

Импульс фотона

$$p_{\phi} = \frac{W_{\max}}{c}. \quad (2)$$

Импульс электрона  $p_e = m_e v_{\max}$ . Из уравнения Эйнштейна

$$h\nu = W_{\max} = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m_e v_{\max}^2}{2}$$

ВЫЧИСЛИМ

$$p_e = m_e \sqrt{\frac{2(W_{\max} - A_{\text{ВЫХ}})}{m_e}} = \sqrt{2m_e(W_{\max} - A_{\text{ВЫХ}})}. \quad (3)$$

Подставим (2) и (3) в (1) и получим

$$p_{\max} = \frac{W_{\max}}{c} + \sqrt{2m_e(W_{\max} - A_{\text{ВЫХ}})}.$$

Учтем, что  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

$$\begin{aligned} p_{\max} &= \frac{4,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} + \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (4,9 - 4,5) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = \\ &= 3,45 \cdot 10^{-25} \left( \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right). \end{aligned}$$

Ответ:  $p_{\max} = 3,45 \cdot 10^{-25} \left( \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ .

**Задача 7.3.** Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта, для некоторого металла  $\lambda_0 = 275 \text{ нм}$ . Найти работу выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$  электрона из металла, максимальную скорость  $v_{\max}$  электронов, вырванных из металла светом с длиной волны  $\lambda = 180 \text{ нм}$ , и максимальную энергию  $W_{\max}$  электронов.

**Решение**

$\lambda_0 = 275 \text{ нм}$	Длина волны $\lambda_0$ красной границы фотоэффекта определяется как
$\lambda = 180 \text{ нм}$	
$A_{\text{ВЫХ}} - ? \quad \nu_{\text{max}} - ?$ $W_{\text{max}} - ?$	

$$\lambda_0 = hc / A_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow A_{\text{ВЫХ}} = hc / \lambda_0 \Rightarrow$$

$$A_{\text{ВЫХ}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{275 \cdot 10^{-9}} = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 4,5 \text{ эВ.}$$

Из уравнения Эйнштейна:

$$\begin{aligned} W_{\text{max}} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}} &= h \cdot \frac{c}{\lambda} - A_{\text{ВЫХ}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{180 \cdot 10^{-9}} - 7,2 \cdot 10^{-19} = \\ &= 3,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,4 \text{ эВ.} \end{aligned}$$

Максимальная скорость электрона будет равна

$$\nu_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2W_{\text{max}}}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Ответ:  $A_{\text{ВЫХ}} = 4,5 \text{ эВ}$ ,  $W_{\text{max}} = 2,4 \text{ эВ}$ ,  $\nu_{\text{max}} = 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ .

**Задача 7.4.** Поток монохроматического излучения ( $\lambda = 0,46 \text{ мкм}$ ) падает на металлическую пластину. Фототок полностью прекращается, когда задерживающая разность потенциалов достигает  $0,7 \text{ В}$ . Найти работу выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$  и красную границу фотоэффекта  $\lambda_0$ .

**Решение**

$\lambda = 0,46 \text{ мкм}$	Значение задерживающей разности потенциалов $U_{\text{зад}}$ позволяет определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:
$U_{\text{зад}} = 0,7 \text{ В}$	
$A_{\text{ВЫХ}} - ? \quad \lambda_0 - ?$	

$$W_{\text{max}} = eU_{\text{зад}} \quad (1)$$

Работу выхода можно найти из уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + W_{\text{max}} \quad (2)$$

Объединив (1) и (2) и учитывая, что  $v = \frac{c}{\lambda}$ , получим

$$A_{\text{ВЫХ}} = h \cdot \frac{c}{\lambda} - eU_{\text{зад}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,46 \cdot 10^{-6}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,7 =$$

$$= 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2 \text{ эВ.}$$

Красная граница фотоэффекта определяется как:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,2 \cdot 10^{-19}} = 0,62 \text{ мкм.}$$

Ответ:  $A_{\text{ВЫХ}} = 2 \text{ эВ}$ ,  $\lambda_0 = 0,62 \text{ мкм}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

1. Найти энергию, массу и импульс фотона, если соответствующая длина волны  $\lambda = 1,6 \text{ пм}$ .

Ответ:  $\varepsilon_{\text{ф}} = 1,24 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ ,  $m_{\text{ф}} = 1,38 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ ,  $p_{\text{ф}} = 4,1 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

2. Найти массу фотона: а) красных лучей света ( $\lambda = 700 \text{ нм}$ ); б) рентгеновских лучей ( $\lambda = 25 \text{ пм}$ ); в) гамма-лучей ( $\lambda = 1,24 \text{ пм}$ ).

Ответ: а)  $m = 3,2 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$ , б)  $m = 8,8 \cdot 10^{-32} \text{ кг}$ , в)  $m = 1,8 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ .

3. С какой скоростью  $v$  должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны  $\lambda = 520 \text{ нм}$ ?

Ответ:  $v = 1,4 \text{ км/с}$ .

4. Какую энергию должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?

Ответ:  $\varepsilon_{\text{ф}} = 0,51 \text{ МэВ}$ .

5. Найти длину волны  $\lambda_0$  света, соответствующую красной границе фотоэффекта, для лития, натрия, калия и цезия.

Ответ:  $\lambda_{01} = 517 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{02} = 540 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{03} = 620 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{04} = 660 \text{ нм}$ .

6. Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта, для некоторого металла  $\lambda_0 = 275 \text{ нм}$ . Найти минимальную энергию  $\varepsilon_{\text{ф}}$  фотона, вызывающего фотоэффект.

Ответ:  $\varepsilon_{\text{ф}} = 4,5 \text{ эВ}$ .

7. Найти задерживающую разность потенциалов  $U_{\text{зад}}$  для электронов, вырывааемых при освещении калия светом с длиной волны  $\lambda = 330 \text{ нм}$ .