

## ГЛАВА 4

### ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Фотоэлектронная эмиссия (ФЭЭ), или внешний фотоэффект, — эмиссия электронов из вещества под действием падающего на его поверхность электромагнитного излучения.

Опытным путем были установлены следующие *законы внешнего фотоэффекта*:

1. Закон Столетова — при неизменном спектральном составе излучения сила тока фотоэмиссии (т.е. количество эмитируемых в единицу времени электронов) пропорциональна интенсивности падающего излучения.

2. Максимальная кинетическая энергия эмитируемых электронов не зависит от интенсивности излучения при неизменном спектральном составе излучения и линейно зависит от его частоты, если частота изменяется.

3. Для каждого вещества, из которого изготовлен фотоэмиттер, существует минимальная граничная частота (или максимальная длина волны) падающего излучения, за которой фотоэффект отсутствует. Это так называемая *красная, или длинноволновая граница фотоэффекта*.

Обобщая законы внешнего фотоэффекта, А. Эйнштейн сформулировал закон сохранения энергии для единичного акта

фотоэмиссии — передачи энергии фотона  $h\nu$  электрону, который эмитируется в вакуум (уравнение Эйнштейна):

$$h\nu = hc / \lambda = m v_{\max}^2 / 2 + \varphi, \quad (4.1)$$

здесь  $\nu$  — частота излучения,  $\lambda$  — длина волны излучения;  $h$  — постоянная Планка,  $\varphi$  — фотоэлектронная работа выхода электронов из фотоэмиттера,  $v_{\max}$  — максимальная скорость эмитируемых электронов.

Формулу (4.1) удобно применять во внесистемных единицах (электронвольтах и микронах).

$$h\nu = hc / \lambda = 1,24 / \lambda, \quad (4.2)$$

$$1,24 / \lambda = 2,84 \cdot 10^{-12} v^2 + \varphi, \quad (4.3)$$

где  $h\nu$  и  $\varphi$  измеряются в электронвольтах,  $\lambda$  — мкм,  $v$  — м/с.

Из выражения (4.1) видно, что при предельном условии  $v_{\max} = 0$ :

$$hc / \lambda_{\text{кр}} = \varphi, \quad (4.4)$$

где  $\lambda_{\text{кр}}$  — длинноволновая граница фотоэффекта;  $\varphi$  — работа выхода фотокатода.

В металлических фотоэмиттерах (рис. 4.1а, б) при передаче электрону фотоном минимальной граничной энергии  $hc / \lambda_{\text{кр}}$  высота преодолеваемого потенциального барьера равна расстоянию по шкале энергии от уровня Ферми до уровня вакуума. Таким образом, для металла фотоэлектронная и термоэлектронная работы выхода совпадают.

Схема прибора для изучения фотоэлектронной эмиссии приведена на рис. 4.2. Малый размер фотоэмиттера и сферически симметричная конструкция коллектора заставляет любой выбитый электрон двигаться вдоль силовых линий электрического поля. Такая конструкция электродов позволяет определить энергию эмитированных электронов методом тормозящего электрического поля.

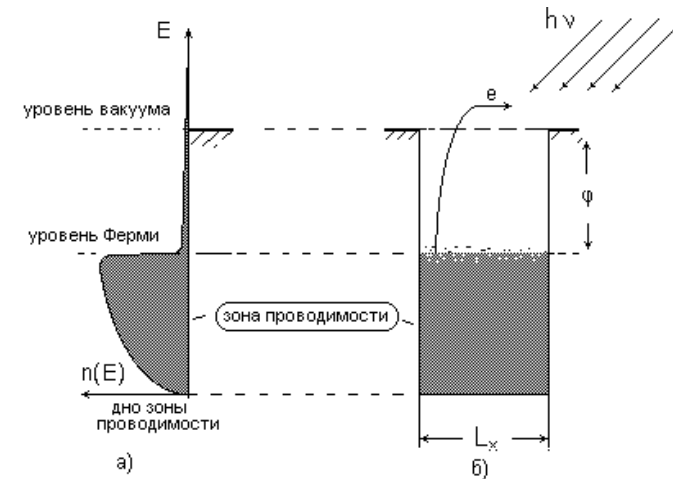


Рис. 4.1. Фотоэмиссия электронов из металла  
 $n(E)$  — плотность распределения количества электронов по энергиям

Увеличивая тормозящее поле (изменением напряжения внешнего источника), фотоэмиссионный ток в цепи можно уменьшить, а при некотором значении напряжения внешнего источника  $V_{\text{зап}}$  (запирающем напряжении) уменьшить фототок до нуля. Определив опытным путем запирающее напряжение, можно вычислить максимальную кинетическую энергию фотоэлектрона, входящую в формулу (4.1).

При этом надо учитывать, что в промежутке анод–катод электрическое поле складывается из электрического поля от внешнего источника (рис. 4.2) и поля контактной разности потенциалов анода и катода (КРП). И даже при ускоряющем внешнем напряжении результирующее электрическое поле внутри вакуумного промежутка может быть как ускоряющим электроны к коллектору, так и тормозящим их.

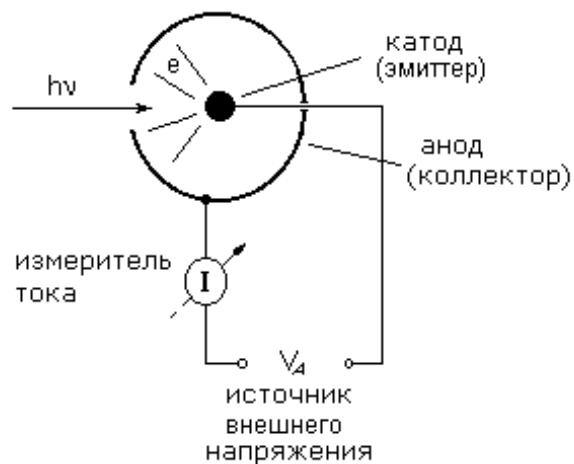


Рис. 4.2. Схема прибора для изучения внешнего фотоэффекта. Напряжение внешнего источника  $V_A$  (алгебраическая величина) считается положительным, когда внешний источник напряжения подключен положительным полюсом к аноду

Для того, чтобы электрон мог достичь коллектора, энергии поглощенного фотона должно хватить и на выход электрона из эмиттера и на преодоление тормозящей разности потенциалов между эмиттером и коллектором ( $\varphi_A - \varphi_K - eV_A$ ), то есть энергия фотона должна быть больше, чем ( $\varphi_A - eV_A$ ).

При запирающем напряжении максимальная кинетическая энергия эмитированного электрона переходит в потенциальную энергию покоящегося электрона, чуть-чуть не долетевшего до коллектора.

Связь между длиной волны, работой выхода анода и запирающим напряжением  $V_{зап}$  получается из уравнения (4.1). С учетом работ выхода анода и катода  $\varphi_A$  и  $\varphi_K$  получаем

$$h \frac{c}{\lambda} - \varphi_K = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \varphi_A - \varphi_K - eV_{зап}. \quad (4.5)$$

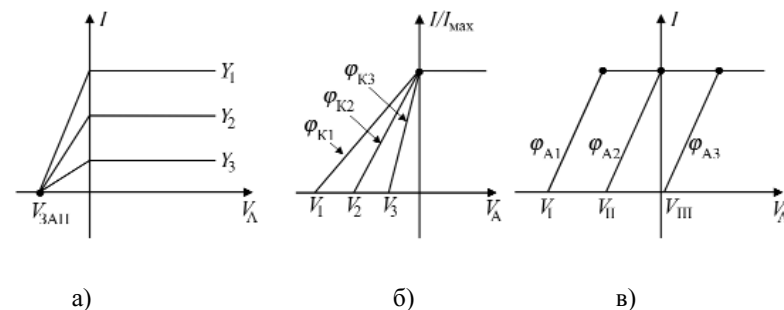


Рис. 4.3. Вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента:

а) семейство ВАХ при различных значениях интенсивности излучения ( $Y_1 > Y_2 > Y_3$ ) одного и того же спектрального состава (иллюстрация закона Столетова); работы выхода катода и анода совпадают  $\varphi_K = \varphi_A$ ;

б) семейство ВАХ при различных значениях работы выхода фотоэмиттера ( $\varphi_{K1} < \varphi_{K2} < \varphi_{K3}$ ) для излучения постоянной интенсивности и постоянного спектрального состава;  $\varphi_K = \varphi_A$ ;

в) семейство ВАХ для различных значений контактной разности потенциалов ( $\varphi_K > \varphi_{A1}$ ,  $\varphi_K = \varphi_{A2}$ ,  $\varphi_K < \varphi_{A3}$ ); работа выхода катода  $\varphi_K$ , а также интенсивность и длина волны излучения постоянны

Из (4.5) следует, что

$$\lambda = \frac{hc}{(\varphi_A - eV_{зап})} \approx \frac{1,24}{(\varphi_A - eV_{зап})} (\text{мкм}). \quad (4.6)$$

В последнем равенстве формулы (4.6) величину  $(\varphi_A - eV_{зап})$  следует брать в эВ. О работе выхода катода  $\varphi_K$  можно лишь сказать, что  $\varphi_K < hc/\lambda = 1,24/\lambda$  эВ.

На рис. 4.3 представлены семейства вольтамперных характеристик (ВАХ) вакуумного фотоэлемента — зависимость величины фототока от приложенного внешнего напряжения  $V_A$ , снятые при различных условиях эксперимента. Следует отметить глубокое сходство ВАХ вакуумного фотоэлемента с ВАХ такого же термоэмиссионного диода (см. гл. 3), а именно, и та, и другая ВАХ содержит участок монотонного увеличения тока и горизонтальный участок (режим тока насыщения).

Ниже, на рис. 4.4, 4.5, представлены энергетические диаграммы для электрона в системе катод–анод для двух различных случаев.

Как было показано в главе 2, непосредственный электрический контакт анода и катода приводит к тому, что их уровни Ферми выравниваются. При этом катод и анод получают различные потенциалы, а в вакуумном промежутке действует поле контактной разности потенциалов.

Если же катод и анод соединены через внешний источник напряжения  $V_A$  и имеют возможность обмениваться электронами, то уровни Ферми катода и анода уже не совпадают. Уровень Ферми электрода, к которому подключен положительный полюс источника внешнего напряжения, расположен ниже по шкале энергии, чем уровень Ферми электрода, подключенного к отрицательному полюсу источника. При этом расстояние между уровнями Ферми равно  $|eV_A|$ , где  $V_A$  — напряжение внешнего источника.

Выше во всех примерах рассматривался единичный акт взаимодействия кванта излучения с электроном в фотоэмиттере. На самом деле в реальных приборах на фотоэмиттер падает поток фотонов и, в свою очередь, фотоэмиттер испускает в вакуум поток электронов. При этом только небольшая часть фотонов передает свою энергию электронам так, чтобы электроны могли выйти из фотоэмиттера. Остальные фотоны поглощаются в фотокатоде без эмиссии электронов в вакуум или отражаются от поверхности фотокатода.

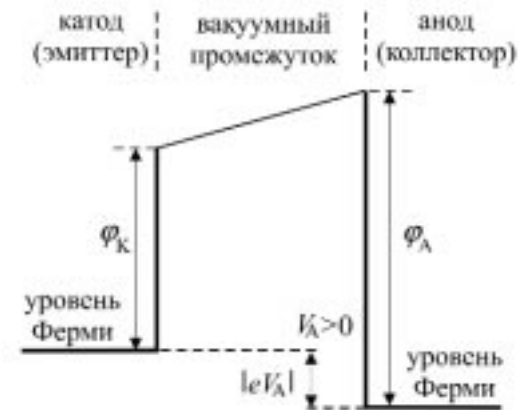


Рис. 4.4. Между анодом и катодом приложено ускоряющее напряжение  $V_A$ . Однако суммарное поле КРП и внешнего напряжения является тормозящим, т.е.  $eV_A < \varphi_A - \varphi_K$

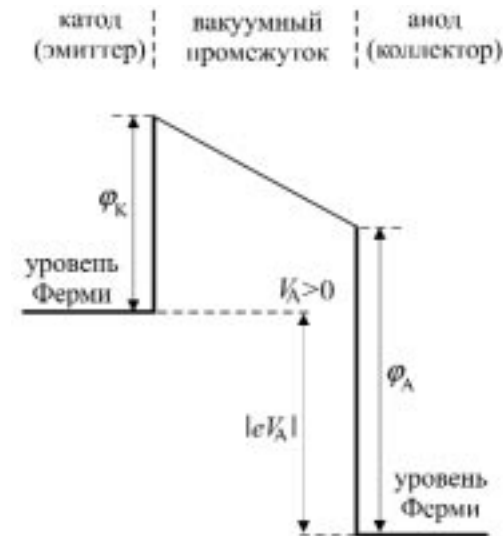


Рис. 4.5. Суммарное поле КРП и приложенного внешнего ускоряющего напряжения является ускоряющим, т.е.  $eV_A > \varphi_A - \varphi_K$

Поэтому важной практической характеристикой вакуумного фотоэлемента является *квантовый выход фотоэмиттера*  $q$ , т.е. отношение числа вылетевших из эмиттера электронов к числу падающих за то же время квантов.

Для монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$  квантовый выход определяется простым соотношением:

$$q = I h c / e P_{\text{изл}} \lambda, \quad (4.7)$$

здесь  $I$  — сила тока фотоэмиссии,  $P_{\text{изл}}$  — мощность монохроматического излучения.

Во внесистемных единицах:

$$q(\text{электронов/квант}) = 1,24 \cdot 10^{-6} I(\text{мкА}) / P_{\text{изл}}(\text{Вт}) \lambda(\text{мкм}). \quad (4.8)$$

Величина  $Q$  (мА/Вт) =  $I / P_{\text{изл}}$  называется *спектральной чувствительностью фотокатода*. Для одного и того же фотокатода чувствительность может принимать различные значения в зависимости от спектрального состава падающего излучения.

## ЗАДАЧИ

### Задача 4.1.

Определить максимальную скорость фотоэлектронов вблизи поверхности эмиттера при облучении цезиевого фотоэмиттера с работой выхода электронов 1,81 эВ монохроматическим светом длиной 0,39 мкм.

*Решение задачи 4.1.*

Применяя формулу (4.1)

$$\frac{1,24}{\lambda}(\text{мкм}) = 2,84 \cdot 10^{-12} v^2(\text{м/с}) + \varphi(\text{эВ}),$$

получим

$$v(\text{м/с}) = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1,24}{\lambda(\text{мкм})} - \varphi(\text{эВ})} = 6,94 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $6,94 \cdot 10^5$  м/с.

### Задача 4.2.

Определите квантовый выход фотокатода, если его чувствительность на длине волны 0,63 мкм составляет  $75 \cdot 10^{-6}$  А/Вт.

*Решение задачи 4.2.*

Применяя формулу (4.8), получим

$$q(\text{эл/кв}) = \frac{1,24 \cdot 10^{-6} I(\text{мкА})}{P_{\text{изл}}(\text{Вт}) \lambda(\text{мкм})}.$$

Ответ:  $q = 1,48 \cdot 10^{-4}$  эл/кв.

### Задача 4.3.

Найти длинноволновую (красную) границу для фотокатода ( $\varphi_k = 1,1$  эВ). На сколько сместится красная граница фотоэффекта при наличии электрического поля напряженностью  $\varepsilon = 5 \cdot 10^3$  В/см?

*Решение задачи 4.3.*

Применяя формулы (4.1) – (4.4), получим

$$\lambda = \frac{1,24}{1,1} = 1,127 \text{ мкм},$$

$$\Delta\lambda = \frac{1,24}{\varphi_K - \Delta\varphi_K} - \lambda,$$

где  $\Delta\varphi_K$  определяется эффектом Шоттки (см. задачи к главе 3):

$$\Delta\varphi_K = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon} = 0,027 \text{ эВ},$$

тогда  $\Delta\lambda = 0,029 \text{ мкм}$ .

Ответ: 1,127 мкм; 0,029 мкм.

**Задача 4.4.**

В диоде с цезиевым фотокатодом ( $\varphi_K = 1,81 \text{ эВ}$ ), облучаемым светом с длиной волны 0,53 мкм, и вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5 \text{ эВ}$ ) найти запирающее внешнее напряжение  $V_{\text{ЗАП}}$ , при котором ток фотоэмиссии равен нулю.

*Решение задачи 4.4.*

Данной задаче соответствует рис. 4.4. При фотоэмиссии электрон получает энергию  $1,24/0,53 = 2,34 \text{ эВ}$ . Для того чтобы электрон мог достичь анода с нулевой скоростью, необходимо, чтобы эта энергия равнялась величине ( $\varphi_A - eV_{\text{ЗАП}}$ ).

Тогда  $V_{\text{ЗАП}} = (4,5 \text{ эВ} - 2,34 \text{ эВ})/e = 2,16 \text{ В}$ .

Ответ:  $V_{\text{ЗАП}} = 2,16 \text{ В}$ .

**Задача 4.5.**

Цезиевый эмиттер фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81 \text{ эВ}$ ) соединен с его вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5 \text{ эВ}$ ) через батарею с ЭДС 1,2 В, подключенную положительным полюсом к коллектору. Определить минимальную длину волны падающего излучения  $\lambda$ , при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента.

*Решение задачи 4.5.*

Данной задаче соответствует рис. 4.5. Необходимая энергия кванта излучения, таким образом, составляет  $4,5 - 1,2 = 3,3 \text{ эВ}$ .

Соответствующая длина волны  $1,24/3,3 = 0,376 \text{ мкм}$ .

Ответ: 0,376 мкм.

**Задача 4.6.**

При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны 0,23 мкм запирающее напряжение  $V_{\text{ЗАП1}}$  оказалось равным  $-2,2 \text{ В}$ , а при длине волны 0,27 мкм —  $V_{\text{ЗАП2}} = -1,4 \text{ В}$ . Как определить численное значение постоянной Планка? Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэмиттера?

*Решение задачи 4.6.*

Применяя формулы (4.1), (4.5), (4.6), запишем систему уравнений:

$$\frac{hc}{\lambda_1} = \varphi_A - eV_{\text{ЗАП1}},$$

$$\frac{hc}{\lambda_2} = \varphi_A - eV_{\text{ЗАП2}},$$

$$0,18711 \cdot 10^{34} \frac{h}{\lambda_1} = \varphi_A - eV_{\text{ЗАП1}},$$

$$0,18711 \cdot 10^{34} \frac{h}{\lambda_2} = \varphi_A - eV_{\text{ЗАП2}},$$

где длина волны выражается в микронах, а работа выхода и  $eV_{\text{ЗАП}}$  — в электронвольтах.

Решая эту систему относительно неизвестных  $h$  и  $\varphi$ , получим:  $h = 6,64 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ;  $\varphi_A = 3,2 \text{ эВ}$ .

Работа выхода  $\varphi_K$  ограничивается большей из двух длин волн — 0,27 мкм.

$$\varphi_K \leq \frac{1,24}{0,27} = 4,59 \text{ эВ.}$$

Ответ:  $6,64 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 3,2$  эВ;  $\varphi_K \leq 4,59$  эВ.

#### Задача 4.7.

Вычислить энергию фотонов:

- а) желтого света с длиной волны  $\lambda = 5893$  Е,  
 б) синего света с длиной волны  $\lambda = 4210$  Е,  
 в) ультрафиолетового излучения с длиной волны  $\lambda = 2557$  Е.

Определите максимальную скорость электронов, выбиваемых каждым из указанных выше фотонов с поверхности цезиевого фотокатода, имеющего работу выхода  $\varphi_K = 1,81$  эВ. Температура фотокатода  $T \rightarrow 0$  К.

Решение задачи 4.7.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda \text{ (мкм)}} \text{ (эВ)},$$

$$h\nu_1 = \frac{1,24}{0,5893} = 2,10 \text{ эВ,}$$

$$h\nu_2 = \frac{1,24}{0,4210} = 2,95 \text{ эВ,}$$

$$h\nu_3 = \frac{1,24}{0,2557} = 4,85 \text{ эВ,}$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(h\nu - \varphi)}{m}} = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{(h\nu - \varphi)} \text{ (м/с)},$$

$$v_1 = 5,93 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{2,10 - 1,81} = 3,19 \cdot 10^5 \text{ м/с,}$$

$$v_2 = 5,93 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{2,95 - 1,81} = 6,33 \cdot 10^5 \text{ м/с,}$$

$$v_3 = 5,93 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{4,85 - 1,81} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Ответ:

1. Энергия квантов составляет:

а) 2,10 эВ, б) 2,95 эВ, в) 4,85 эВ.

2. Максимальная скорость электронов составляет:

а)  $3,19 \cdot 10^5$ ; б)  $6,33 \cdot 10^5$ ; в)  $1,03 \cdot 10^6$  м/с.

#### Задача 4.8.

Вычислить длину монохроматического света, падающего на фотоэмиттер ( $\varphi_K = 1,0$  эВ), если максимальная скорость электронов, выбиваемых с поверхности эмиттера,  $v_{\max} = 500$  км/с.

Решение задачи 4.8.

Применяем формулы (4.1) – (4.4).

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \varphi,$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 2,5 \cdot 10^{14}}{2} = 1,1 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 0,69 \text{ эВ,}$$

$$h\nu = 0,69 + 1,0 = 1,69 \text{ эВ,}$$

$$\lambda = \frac{hc}{1,69} \approx \frac{1,24}{1,69} = 0,73 \text{ мкм.}$$

Ответ:  $\lambda = 0,73$  мкм.

#### Задача 4.9.

Определить максимальную скорость фотоэлектронов вблизи поверхности эмиттера при облучении монохроматическим светом длиной 0,59 мкм эмиттера с работой выхода электронов 1,6 эВ.

Решение задачи 4.9.

Применить формулу (4.1).

Ответ:  $v_{\max} = 4,2 \cdot 10^5$  м/с.

**Задача 4.10.**

Определить максимальную скорость фотоэлектронов вблизи поверхности эмиттера при облучении фотоэмиттера с работой выхода электронов 1,6 эВ монохроматическим светом длиной 0,36 мкм.

*Решение задачи 4.10.*

Применить формулу (4.1).

Ответ:  $v_{\max} = 8,05 \cdot 10^5$  м/с.

**Задача 4.11.**

Вычислить максимальную скорость электронов, выбиваемых с поверхности фотоэмиттера под действием монохроматического пучка света гелий-кадмиевого ОКГ с длиной волны  $\lambda = 0,44$  мкм. Работа выхода сурьмяно-цезиевого фотоэмиттера равна 1,6 эВ.

*Решение задачи 4.11.*

Применить формулу (4.1).

Ответ:  $v_{\max} = 6,55 \cdot 10^5$  м/с.

**Задача 4.12.**

Вычислите работу выхода электронов из фотокатода по величине длины волны  $\lambda_{\text{кр}} = 12\,000$  Э, соответствующей длинноволновой границе фотоэффекта.

*Решение задачи 4.12.*

Применить формулу (4.4).

Ответ:  $\varphi_{\text{к}} = 1,03$  эВ.

**Задача 4.13.**

Найти длинноволновую (красную) границу фотоэффекта для цезиевого фотокатода ( $\varphi_{\text{к}} = 1,81$  эВ). На сколько сместится красная граница фотоэффекта при наличии электрического поля напряженностью  $\varepsilon = 2,5 \cdot 10^3$  В/см?

*Решение задачи 4.13.*

См. пояснение к задаче 4.3.

Ответ: 0,68 мкм; 0,012 мкм.

**Задача 4.14.**

Монохроматическое излучение гелий-неонового лазера с длиной волны  $\lambda = 6328$  Э освещает материалы, данные в таблице.

1) Из какого материала электроны будут выбиваться с максимальной скоростью? Чему равна эта скорость?

2) Какую работу выхода электронов должен иметь материал фотокатода, предназначенного для работы в видимой части спектра электромагнитных волн (0,35 – 0,7 мкм). Приведите примеры таких материалов.

Материал	Работа выхода, эВ	Материал	Работа выхода, эВ
Барий	2,49	Неодим	3,20
Бериллий	3,92	Никель	4,50
Висмут	4,40	Платина	5,32
Вольфрам	4,5	Празеодим	3,20
Гафний	3,53	Рений	5,00
Железо	4,31	Рубидий	2,16
Золото	4,30	Самарий	2,70
Калий	2,22	Серебро	4,30
Кальций	2,80	Стронций	3,30
Кобальт	4,41	Тантал	4,12
Лантан	3,30	Торий	3,30
Литий	2,38	Углерод	4,70
Магний	3,64	Хром	4,58
Медь	4,40	Цезий	1,81
Молибден	4,30	Церий	2,70
Натрий	2,35	Цинк	4,24

*Решение задачи 4.14.*

Применить формулу (4.1).

Ответ: 1) цезий —  $2,29 \cdot 10^5$  м/с; 2) 3,54 эВ – 1,77 эВ.



**Задача 4.15.**

На фотоэлемент падает поток монохроматического излучения мощностью 100 мВт с длиной волны 550 нм. Чему равен квантовый выход фотокатода на данной длине волны, если фототок равен 35 мкА?

*Решение задачи 4.15.*

Применить формулу (4.8).

Ответ:  $7,9 \cdot 10^{-4}$  электронов/квант.

**Задача 4.16.**

Определите квантовый выход фотокатода, если его чувствительность на длине волны 0,69 мкм составляет  $1 \cdot 10^{-6}$  А/Вт.

*Решение задачи 4.16.*

Применить формулу (4.8).

Ответ:  $1,8 \cdot 10^{-6}$  электронов/квант.

**Задача 4.17.**

Определите квантовый выход фотокатода, если его чувствительность на длине волны 0,63 мкм составляет  $2 \cdot 10^{-6}$  А/Вт.

*Решение задачи 4.17.*

Применить формулу (4.8).

Ответ:  $3,94 \cdot 10^{-6}$  электронов/квант.

**Задача 4.18.**

На фотоэлемент падает световой поток с длиной волны 550 нм и мощностью 120 мВт. Чему равен квантовый выход фотокатода на данной волне, если фототок равен 150 мкА?

*Решение задачи 4.18.*

Применить формулу (4.8).

Ответ:  $2,82 \cdot 10^{-3}$  электронов/квант.

**Задача 4.19.**

Изолированный фотокатод, изготовленный из цезия ( $\varphi_K = 1,81$  эВ), облучается светом с длиной волны 0,38 мкм. До какого потенциала зарядится фотокатод?

**Решение задачи 4.19.**

Вблизи поверхности фотокатода электрон будет обладать кинетической энергией  $E_{кин} = 1,24 / 0,38 - 1,81 = 1,45$  эВ. Уход эмитированных электронов на бесконечность прекратится, когда фотокатод зарядится до потенциала  $\Phi$ , при котором вблизи поверхности фотокатода полная энергия эмитированного электрона (сумма кинетической энергии электрона и отрицательной потенциальной энергии  $-e\Phi$ ) станет меньше нуля. Отсюда  $\Phi = E_{кин} / e$ .

Ответ:  $\Phi = 1,45$  В.

**Задача 4.20.**

При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны 0,44 мкм запирающее напряжение  $V_{зАП1}$  оказалось равным 1,555 В, а при длине волны 0,66 мкм —  $V_{зАП2} = 2,503$  В. Как определить численное значение постоянной Планка? Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэмиттера?

*Решение задачи 4.20.*

См. пояснение к задаче 4.6.

Ответ:  $6,69 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 4,4$  эВ;  $\varphi_K \leq 1,88$  эВ.

**Задача 4.21.**

Эмиссия из фотокатода, освещаемого светом с длиной волны 4339 Е, запирается напряжением  $-0,56$  В. Для длины волны 3125 Е запирающее напряжение равно  $-1,680$  В. Найти работу выхода фотокатода и численное значение постоянной Планка. Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэмиттера?

*Решение задачи 4.21.*

См. пояснение к задаче 4.6.

Ответ:  $6,685 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 2,32$  эВ;  $\varphi_K \leq 2,86$  эВ.

**Задача 4.22.**

При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 0,3$  мкм запирающее напряжение  $V_{\text{ЗАП1}}$  оказалось равным 0,00777 В, а при длине волны  $\lambda = 0,56$  мкм —  $V_{\text{ЗАП2}} = 1,8613$  В. Найти работу выхода электронов и численное значение постоянной Планка. Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэммиттера?

*Решение задачи 4.22.*

См. пояснение к задаче 4.6.

Ответ:  $h = 6,4 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 4,0$  эВ;  $\varphi_K \leq 2,21$  эВ.

**Задача 4.23.**

При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 0,3$  мкм запирающее напряжение  $V_{\text{ЗАП1}}$  оказалось равным 0,696 В, а при длине волны  $\lambda = 0,8$  мкм —  $V_{\text{ЗАП2}} = 3,386$  В. Найти работу выхода электронов и численное значение постоянной Планка. Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэммиттера?

*Решение задачи 4.23.*

См. пояснение к задаче 4.6.

Ответ:  $h = 6,90 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 5,0$  эВ;  $\varphi_K \leq 1,55$  эВ.

**Задача 4.24.**

При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 0,4$  мкм запирающее напряжение  $V_{\text{ЗАП1}}$  оказалось равным 1,959 В, а при длине волны  $\lambda = 0,5$  мкм —  $V_{\text{ЗАП2}} = 2,567$  В. Найти работу выхода электронов и численное значение постоянной Планка. Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэммиттера?

*Решение задачи 4.24.*

См. пояснение к задаче 4.6.

Ответ:  $h = 6,5 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 5,0$  эВ;  $\varphi_K \leq 2,48$  эВ.

**Задача 4.25.**

При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм запирающее напряжение  $V_{\text{ЗАП1}}$  оказалось равным 0,9415 В, а при длине волны  $\lambda = 0,7$  мкм —  $V_{\text{ЗАП2}} = 1,236$  В. Найти работу выхода электронов и численное значение постоянной Планка. Чему равна работа выхода анода? Какова должна быть работа выхода фотоэммиттера?

*Решение задачи 4.25.*

См. пояснение к задаче 4.6.

Ответ:  $h = 6,61 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\varphi_A = 3,0$  эВ;  $\varphi_K \leq 1,77$  эВ.

**Задача 4.26.**

Цезиевый эмиттер фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81$  эВ) соединен проводником непосредственно с его вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5$  эВ). Определить минимальную длину волны света, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента. Нарисовать энергетическую диаграмму фотоэлемента.

*Решение задачи 4.26.*

См. пояснение к задаче 4.5.

Ответ:  $\lambda = 0,276$  мкм.

**Задача 4.27.**

В диоде с цезиевым фотокатодом ( $\varphi_K = 1,81$  эВ), облучаемым светом гелий-неонового лазера (длина волны 0,63 мкм), и вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5$  эВ) найти внешнее напряжение  $V_{\text{ЗАП}}$ , при котором ток фотоэмиссии равен нулю.

*Решение задачи 4.27.*

См. пояснение к задаче 4.4.

Ответ:  $V_{\text{ЗАП}} = 2,53$  В.

**Задача 4.28.**

В диоде с цезиевым фотоэмиттером ( $\varphi_K = 1,81$  эВ), облучаемым светом гелий-неонового лазера (длина волны  $0,63$  мкм), и молибденовым коллектором ( $\varphi_A = 4,3$  эВ) найти значение напряжения внешнего источника, при котором фототок равен нулю.

*Решение задачи 4.28.*

См. пояснение к задаче 4.4.

Ответ:  $V_{\text{зап}} = 2,33$  В.

**Задача 4.29.**

Цезиевый эмиттер фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81$  эВ) соединен с его вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,50$  эВ) через батарею с ЭДС  $2$  В, подключенную отрицательным полюсом к коллектору. Определить минимальную длину волны света  $\lambda$ , при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента.

*Решение задачи 4.29.*

См. пояснение к задаче 4.5.

Ответ:  $\lambda = 0,19$  мкм.

**Задача 4.30.**

Цезиевый эмиттер фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81$  эВ) соединен с его вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5$  эВ) через батарею с ЭДС  $2$  В, подключенную положительным полюсом к аноду. Определить минимальную длину волны света  $\lambda$ , при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента. Нарисовать энергетическую диаграмму фотоэлемента.

*Решение задачи 4.30.*

См. пояснение к задаче 4.5.

Ответ:  $\lambda = 0,496$  мкм.

**Задача 4.31.**

Между цезиевым эмиттером фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81$  эВ) и его вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5$  эВ) включена бата-

рея с ЭДС  $1,5$  В, подключенная положительным полюсом к аноду. Какова минимальная длина волны света, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента? Нарисовать энергетическую диаграмму фотоэлемента.

*Решение задачи 4.31.*

См. пояснение к задаче 4.5.

Ответ:  $\lambda = 0,41$  мкм.

**Задача 4.32.**

Между цезиевым эмиттером фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81$  эВ) и его вольфрамовым коллектором ( $\varphi_A = 4,5$  эВ) включена батарея с ЭДС  $3$  В, подключенная положительным полюсом к коллектору. Какова минимальная длина волны света, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента? Нарисовать энергетическую диаграмму фотоэлемента.

*Решение задачи 4.32.*

В данной задаче реализуется случай, изображенный на рис. 4.6. Контактная разность потенциалов  $(4,5 - 1,81)$  В =  $2,69$  В (тормозящая) с избытком компенсируется ускоряющим полем от внешнего источника, поэтому высота барьера, который предстоит преодолеть электрону, получившему энергию фотона, просто равна работе выхода катода. Необходимая энергия кванта излучения, таким образом, составляет  $1,81$  эВ. Соответствующая длина волны —  $0,685$  мкм.

Ответ:  $0,685$  мкм.

**Задача 4.33.**

Между цезиевым эмиттером фотоэлемента ( $\varphi_K = 1,81$  эВ) и его вольфрамовым анодом ( $\varphi_A = 4,5$  эВ) включена батарея с ЭДС  $1$  В, подключенная отрицательным полюсом к коллектору. Какова минимальная длина волны света, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента? Нарисовать энергетическую диаграмму фотоэлемента.

*Решение задачи 4.33.*

См. пояснение к задаче 4.5.

Ответ:  $\lambda = 0,225$  мкм.

**Задача 4.34.**

Найдите коэффициент вторичной эмиссии материалов диодов десятикаскадного ФЭУ, если при попадании на фотокатод светового потока мощностью  $10^{-8}$  Вт, с длиной волны света  $\lambda = 0,4$  мкм выходной ток в ФЭУ составляет 100 мкА. Квантовый выход фотокатода при данной длине волны равен 0,8 электрон/фотон.

*Решение задачи 4.34.*

В соответствие с формулой (4.8) ток фотокатода

$$I_{\Phi} = \frac{0,8 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot 0,4 \text{ мкм}}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 2,58 \text{ нА.}$$

Выходной ток умножителя

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\Phi} \sigma^{10},$$

тогда коэффициент вторичной эмиссии

$$\sigma = \sqrt[10]{I_{\text{ВЫХ}} / I_{\Phi}} = 2,876.$$

Ответ:  $\sigma = 2,876$ .