

**Министерство обороны Российской Федерации**  
**Заочная кадетская физико-математическая школа (КФМШ)**

**ФИЗИКА**

**11 класс**

2019–2020 учебный год

Задание № 5

**Фотоэффект**

Москва, 2020

ББК 22.3 Ч584

УДК 53(075)

**ФИЗИКА. 11 класс. Задание № 5: Фотоэффект.** — М.: Заочная кадетская физико-математическая школа, 2020. — 16 с. Методическое пособие состоит из теоретической части, содержащей методику решения задач, а также заданий, предлагаемых для решения в классе, и задач для самостоятельного решения. Для учащихся и педагогов соответствующих кружков КФМШ.

**Рекомендуемый срок выполнения задания — 25 марта 2020 г.**

Автор-составитель задания:  
методист КФМШ Алтухов Д.А.

Рецензенты: к.ф.-м.н. Чивилёв В.И., Щавлев В.В.

## Введение

Свет, как было показано в предыдущем пособии, обладает волновыми свойствами. Об этом говорит множество физических экспериментов. Однако обнаружены явления, которые не удастся объяснить и с этой точки зрения. Одним из таких явлений, которому посвящено настоящее пособие, является фотоэффект. Для его объяснения пришлось вернуться к ньютоновскому представлению о свете как о частице, но теперь совершенно по-новому. В 1905 году Альберт Эйнштейн представил миру блестящую научную теорию, объясняющую это явление, за что в 1921 году получил Нобелевскую премию.

### §1. Явление фотоэффекта

*Фотоэффектом*<sup>1</sup> называется испускание электронов из вещества при облучении его электромагнитными волнами. Данное явление было открыто в 1887 году Генрихом Герцем. Он обнаружил, что при облучении ультрафиолетовыми лучами пластины конденсатора с отрицательным зарядом напряжение между пластинами падает.

Далее в 1888-1890 годах более детально и систематически фотоэффект исследовал наш соотечественник Александр Григорьевич Столетов. Его экспериментальная установка выглядела примерно так, как показано на рисунке 1. Через кварцевое стекло<sup>2</sup> светом облучалась металлическая пластина – холодный<sup>3</sup> катод. Напротив катода располагалась другая металлическая пластина – анод. Обе пластины находились в вакуумной лампе (при откачанном воздухе электроны не сталкиваются с его молекулами) и были включены в электрическую схему, согласно рисунку 1. В результате освещения катода светом амперметр регистрировал ток, называемый *фототоком*. Данное явление объяснили следующим образом:

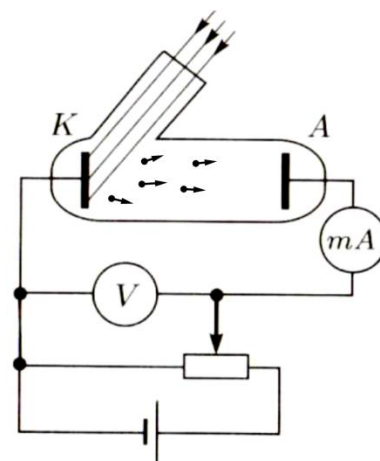


Рис. 1.

<sup>1</sup> Если точнее, описанное явление называется внешним фотоэффектом. Существует также *внутренний фотоэффект*, отличие которого от внешнего состоит в том, что электроны не покидают поверхность облучаемого образца, но переходят в иное энергетическое состояние внутри него.

<sup>2</sup> В отличие от обычного стекла, кварцевое пропускает ультрафиолет, что было существенно для данных экспериментов.

<sup>3</sup> При охлаждении уменьшалась термоэлектронная эмиссия – испускание электронов при высокой температуре.

свет, попадая на катод, вырывает из него электроны (их называют *фотоэлектронами*); затем они попадают на анод. Накапливаясь на аноде, электроны создают избыточный отрицательный заряд. При этом на катоде вследствие ухода электронов формируется избыточный положительный заряд. В результате по проводу через амперметр электроны переходят с анода на катод, при этом регистрируется электрический ток.

Волновая теория света вполне могла объяснить, почему электроны вылетают из металла: при распространении электромагнитной волны в каждой точке, до которой она дошла, происходит колебание электрического и магнитного поля. Это будет вызывать ускорение электронов металла, в результате чего они могут быть разогнаны до скоростей, достаточных для вырывания. Однако волновая трактовка количественных исследований наткнулась на множество противоречий и необъяснимых феноменов.

В ходе экспериментов менялись следующие параметры: *интенсивность света* ( $I$ ) - энергия, переносимая световой волной через единичную площадку за единицу времени, его частота ( $\nu$ ), приложенное напряжение ( $U$ ), материал катода.

## §2. Законы внешнего фотоэффекта

Если к аноду подключен положительный полюс батареи, а к катоду – отрицательный (как на рисунке 1), то возникающее напряжение будет разгонять вылетающие с катода электроны. Однако оказалось, что при увеличении данного напряжения фототок ( $i$ ) сначала тоже возрастает, но затем достигает некоторого максимального значения (рис. 2), называемого *током насыщения* ( $i_{нас}$ ). Такая зависимость объясняется тем, что при малых напряжениях не все фотоэлектроны достигают анода, так как вылетают с катода в различных направлениях, и при увеличении напряжения всё большее количество электронов долетает до анода. Но при достаточно большом разгоняющем напряжении все вырванные электроны достигнут анода и фототок достигнет своего максимального значения. Таким образом, ток насыщения определяется числом электронов ( $N$ ), испускаемых за  $\tau = 1$  с катодом:

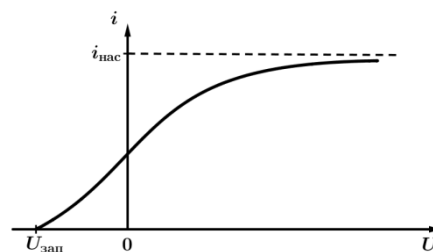


Рис. 2.

$$i_{нас} = \frac{Ne}{\tau}, \text{ где } e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} - \text{модуль заряда электрона.}$$

Из графика (рис. 2) видно, что и при отсутствии приложенного напряжения фототок существует. Если же поменять полярность батареи, то напряжение будет тормозить электроны. И существует предельное значение тормозящего напряжения, называемое *запирающим напряжением* ( $U_{\text{зап}}$ ), при котором фототок прекращается полностью. График зависимости фототока от приложенного напряжения между катодом и анодом показан на рисунке 2. Положительные значения напряжения соответствуют разгоняющему, отрицательные – тормозящему напряжению.

Наличие запирающего напряжения объясняется тем, что существует максимальная кинетическая энергия ( $E_{\text{кин}}^{\text{max}} = \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}$ ,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона), которой могут обладать фотоэлектроны. Тогда, применяя теорему о кинетической энергии для вылетевших электронов, получаем<sup>4</sup>:  $E_{\text{кин}}^{\text{max}} = e|U_{\text{зап}}|$ . Однако пока не ясно, почему эта энергия ограничена при неизменной частоте.

### 1-й закон фотоэффекта (закон Столетова):

Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности падающего света (рис. 3а). Также выяснилось, что запирающее напряжение при постоянной частоте не зависит от интенсивности (рис. 3б).

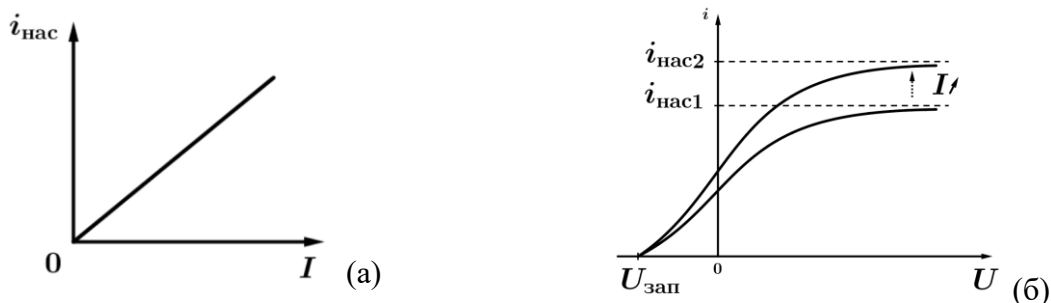


Рис. 3

2-й закон фотоэффекта: Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности (рис. 5а). Так как  $E_{\text{кин}}^{\text{max}} = e|U_{\text{зап}}|$ , то зависимость запирающего напряжения от частоты света имеет такой же вид<sup>5</sup> (рис. 5б,в).

<sup>4</sup> Под  $U_{\text{зап}}$  иногда понимают модуль запирающего напряжения, а иногда подразумевают, что эта величина отрицательна. Во избежание этой путаницы мы будем писать  $|U_{\text{зап}}|$ .

<sup>5</sup> Связь тока насыщения с частотой имеет довольно сложный характер, но при небольших изменениях частоты он практически не меняется, что отражено на рис. 5в.

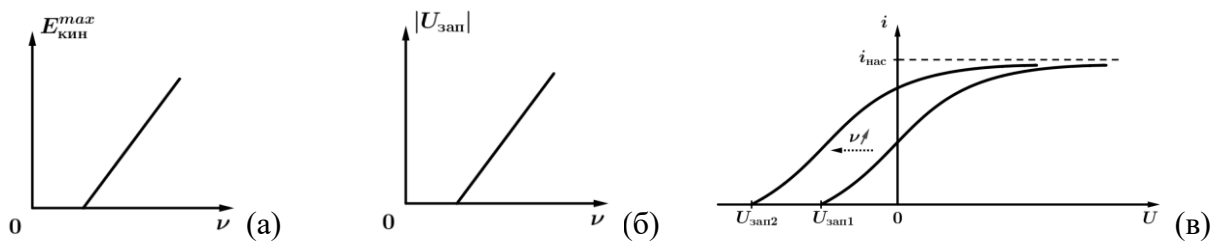


Рис. 5.

3-й закон фотоэффекта: Существует минимальная частота падающего света (называемая *красной границей*), зависящая от вещества и состояния его поверхности, ниже которой фотоэффект не происходит. Этой частоте соответствует максимальная длина волны, также называемая *красной границей*.

### §3. Теория фотоэффекта

Как мы видим, с явлением фотоэффекта связано множество фактов, которые не удастся объяснить, представляя свет как непрерывную электромагнитную волну. Для этого потребовалось иначе взглянуть на природу света.

В 1905 году Альберт Эйнштейн дал объяснение фотоэффекта<sup>6</sup>. Для этого пришлось вернуться к корпускулярному представлению о свете и переосмыслить его. Эйнштейн взял идею Планка, согласно которой электромагнитная энергия может излучаться конечными порциями (*квантами*), равными<sup>7</sup>  $h \cdot \nu$ . При этом Планк ничего не утверждал о самой структуре света. Эйнштейн же добавил, что выпущенный квант может поглотиться только целиком. Таким образом, свет стал представлялся как поток "частиц", именуемых *фотонами*, энергия каждой из которых равна  $E_{\phi} = h\nu$ .

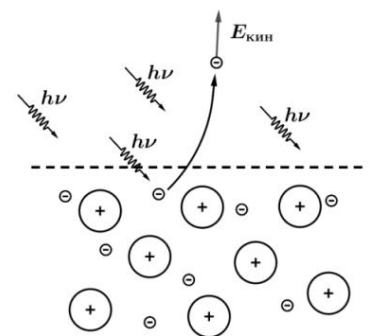


Рис. 6.

Как известно, в металле электроны есть свободные<sup>8</sup> и связанные. Когда фотон попадает в свободный электрон, его энергия полностью передается этому электрону (рис. 6). Но по пути наружу из металла часть этой энергии

<sup>6</sup> В 1925 году Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике с формулировкой "за заслуги перед теоретической физикой и, особенно, за открытие закона фотоэлектрического эффекта".

<sup>7</sup>  $h = 6,63 \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка

<sup>8</sup> Правильнее называть их электронами проводимости, а на свободных электронах фотоэффект невозможен.

уходит на работу  $A$  против сил притяжения ионов металла. Оставшаяся энергия переходит в кинетическую энергию вылетевшего электрона. Запишем закон сохранения энергии:  $h\nu = A + E_{кин}$ .

Электроны находятся на различных расстояниях до поверхности, поэтому и величина  $A$  будет разной. Однако существует минимальная работа, которую нужно совершить, чтобы электрон оказался вырван из металла. Эта величина называется *работой выхода* ( $A_{вых}$ ). То есть если электрон находится достаточно близко к поверхности и после поглощения энергии фотона движется по "оптимальной" траектории наружу, то он теряет минимально возможную часть энергии, равную  $A_{вых}$ . Кинетическая энергия вылетевшего электрона окажется при этом максимально возможной ( $E_{кин}^{max}$ ). Тогда закон сохранения энергии запишется так:

$$h\nu = A_{вых} + E_{кин}^{max}$$

Данное уравнение называется *уравнением Эйнштейна* для фотоэффекта.

Теперь можно объяснить не согласующиеся с волновой теорией экспериментальные факты.

Как уже было сказано, ток насыщения связан с количеством падающих фотонов, поэтому разгоняющее напряжение не способно увеличивать ток до бесконечности, а лишь может притянуть все вылетевшие электроны к аноду.

Существование максимальной кинетической энергии вылетевших электронов, объясняющее запирающее напряжение, следует из закона сохранения энергии и того, что необходима минимальная работа для выхода электрона из металла  $E_{кин}^{max} = h\nu - A_{вых}$ . Поэтому достаточно тормозящего потенциала  $|U_{зан}| = \frac{E_{кин}^{max}}{e} = \frac{h\nu - A_{вых}}{e}$ , чтобы ни один электрон не долетел до анода. Если посмотреть на эти функции математически – как на линейные функции частоты, то станет ясно, в какой ординате графики пересекают соответствующую ось (см. рис. 7а,б)

Запирающее напряжение определяется не интенсивностью света, а его частотой, потому что вырывание каждого электрона обусловлено индивидуальным взаимодействием фотона с электроном, при этом

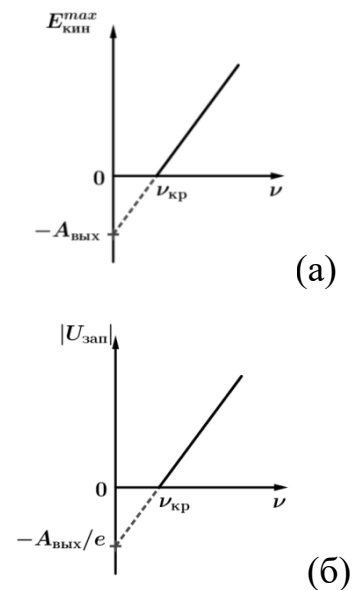


Рис. 7.

количество падающих фотонов (отвечающее за интенсивность света) не влияет на энергию, передаваемую отдельному электрону.

Минимальная частота, называемая *красной границей*, находится из уравнения  $h\nu - A_{\text{вых}} = 0$  – электрон выходит из металла с нулевой кинетической энергией. Эта частота равна  $\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$ , а соответствующая длина волны равна  $\lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{\nu_{\text{кр}}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}$ , где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме.

### Примеры решения задач

В атомной и ядерной физике часто используется внесистемная единица энергии – *электрон-вольт* (эВ). Один электрон-вольт – это энергия, которую приобретет электрон, пройдя разность потенциалов 1 вольт. Для перевода в джоули нужно умножить электрон-вольты на величину элементарного заряда:  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ эВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ .

**Пример 1.** Поток фотонов выбивает фотоэлектроны из металла с работой выхода 5 эВ. Энергия фотонов в 1,5 раза больше максимальной кинетической энергии фотоэлектронов. Какова энергия фотонов? Ответ приведите в эВ.

**Решение:**

Энергию фотона не обязательно расписывать через частоту или длину волны, можно просто записать  $E_{\text{ф}}$ . Тогда, согласно условию,  $E_{\text{кин}}^{\text{max}} = \frac{E_{\text{ф}}}{1,5}$ .

Теперь напишем уравнение Эйнштейна:  $E_{\text{ф}} = A_{\text{вых}} + \frac{E_{\text{ф}}}{1,5} \Rightarrow E_{\text{ф}} = 3A_{\text{вых}} = 15 \text{ эВ}$ .

**Ответ:** 15 эВ.

**Пример 2.** Медный катод с работой выхода  $A = 4,36$  эВ освещается светом частотой  $\nu = 1060$  ТГц. Определите максимальную скорость вылетевших электронов. Ответ выразить в км/с.



**Решение:**

Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:  $h\nu = A + \frac{m_e v_{\max}^2}{2}$ .

Отсюда

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1060 \cdot 10^{12} - 4,36 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 107 \text{ км/с.}$$

**Ответ:** 107 км/с.

**Пример 3.** Катод с работой выхода  $A$  освещается светом с длиной волны  $\lambda = 560$  нм. Красная граница фотоэффекта равна  $\nu_{кр} = 950$  ТГц. Найдите  $A$ . Ответ выразить в эВ.

**Решение:**

$$\nu_{кр} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \Rightarrow A_{\text{вых}} = h\nu_{кр} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 950 \cdot 10^{12} \approx 6,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} =$$
$$= \frac{6,3 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 3,9 \text{ эВ.}$$

Для перевода из Дж в эВ мы разделили джоули на

величину элементарного заряда. Обратите внимание, что длина волны падающего света никак не повлияла на ответ, так как работа выхода – характеристика, связанная с материалом катода.

**Ответ:** 3,9 эВ

**Пример 4.** Если поочерёдно освещать поверхность металла излучением с длинами волн  $\lambda_1 = 240$  нм и  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ), то запирающие напряжения между анодом и катодом будут отличаться в 3 раза. Работа выхода из этого металла равна  $A = 4,36$  эВ. Найдите  $\lambda_2$ . Ответ выразить в мкм.

**Решение:**

Запишем уравнения Эйнштейна для первого и второго случая, учитывая соотношения  $E_{\text{кин}}^{\max} = e|U_{\text{зан}}|$  и  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ :

$$\frac{hc}{\lambda_1} = A + e|U_{\text{зан1}}|, \quad \frac{hc}{\lambda_2} = A + e|U_{\text{зан2}}|.$$

Так как  $\lambda_1 > \lambda_2$ , то  $|U_{\text{зан2}}| > |U_{\text{зан1}}|$ . Тогда, согласно условию,  $|U_{\text{зан2}}| = 3|U_{\text{зан1}}|$ .

Умножим первое уравнение на 3 и вычтем из него второе:

$$3 \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} = 2A \Rightarrow \lambda_2 = \frac{hc}{3 \frac{hc}{\lambda_1} - 2A} = \frac{1}{\frac{3}{\lambda_1} - \frac{2A}{hc}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{3}{240 \cdot 10^{-9}} - \frac{2 \cdot 4,36 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}} \approx 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,18 \text{ мкм.}$$

**Ответ:** 0,18 мкм.

**Пример 5.** Катод К вакуумного фотоэлемента освещают монохроматическим светом длиной волны  $\lambda = 200$  нм и измеряют скорость фотоэлектронов. Затем увеличивают длину волны в  $n$  раз. При этом максимальная скорость фотоэлектронов изменяется также в  $n$  раз. Красная граница фотоэффекта равна  $\lambda_{кр} = 600$  нм. Найдите  $n$ . Ответ округлить до целых.

**Решение:**

Запишем уравнения Эйнштейна для первого случая в следующем виде:

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}. \text{ Очевидно, что при увеличении длины волны}$$

скорость фотоэлектронов уменьшится. Тогда для второго случая уравнение

примет вид: 
$$\frac{hc}{n\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{m_e \left( \frac{v_{\text{max}}}{n} \right)^2}{2}$$
 Из первого уравнения получим

$$\frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}, \text{ подставим это выражение во второе:}$$

$$\frac{hc}{n\lambda} = A_{\text{вых}} + \left( \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right) \cdot \frac{1}{n^2}.$$

Подставим сюда выражение для работы выхода  $A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda_{кр}}$ :

$$\frac{hc}{n\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{кр}} + \left( \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_{кр}} \right) \cdot \frac{1}{n^2}. \text{ После умножения на } \frac{\lambda_{кр} \cdot \lambda}{hc} \text{ последнее}$$

уравнение приводится к виду:

$$\lambda n^2 - \lambda_{кр} n + (\lambda_{кр} - \lambda) = 0.$$

Мы получили квадратное уравнение относительно  $n$ . Вычислим дискриминант:

$$D = \lambda_{кр}^2 - 4\lambda(\lambda_{кр} - \lambda) = (600\text{нм})^2 - 4 \cdot 200\text{ нм} \cdot (600\text{нм} - 200\text{нм}) = 40000\text{нм}^2.$$

$$\text{Тогда } n = \frac{\lambda_{кр} \pm \sqrt{D}}{2\lambda} = \frac{600\text{нм} \pm 200\text{нм}}{2 \cdot 200\text{нм}} = \begin{cases} 2 \\ 1 \end{cases}.$$

Тривиальное решение  $n = 1$  отбрасываем, к тому же, по условию сказано, что длина волны увеличивается.

**Ответ:** 2.

**Пример 6.** При облучении металлической пластины светом с частотой  $\nu = 7 \cdot 10^{14}$  Гц из нее выбиваются электроны, которые проходят ускоряющую разность потенциалов  $\Delta U = 10$  В. Какова работа выхода  $A_{вых}$ , если максимальная энергия ускоренных электронов  $E_e$  равна утроенной энергии фотонов, выбивающих их из металла?

**Решение:**

Запишем уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = A_{вых} + E_{кин}^{max} \Rightarrow E_{кин}^{max} = h\nu - A_{вых}.$$

Максимальная энергия фотоэлектронов после прохождения разгоняющей разности потенциалов равна

$$E_{кин}^{max'} = E_{кин}^{max} + e \cdot \Delta U = h\nu - A_{вых} + e \cdot \Delta U. \text{ Согласно условию, } E_{кин}^{max'} = 3h\nu. \text{ Тогда получаем: } h\nu - A_{вых} + e \cdot \Delta U = 3h\nu \Rightarrow A_{вых} = e \cdot \Delta U - 2h\nu =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 - 2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 7 \cdot 10^{14} \approx 6,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 4,2 \text{ эВ}.$$

**Ответ:** 4,2 эВ.

**Пример 7.** Небольшой уединенный металлический шар долго облучали в вакууме светом с длиной волны  $\lambda = 240$  нм. В результате шар зарядился и приобрел потенциал  $\varphi_0 = 2,7$  В. Чему равна работа выхода  $A_{вых}$  из этого металла?

**Решение:**

На поверхности шара происходит фотоэффект, в результате которого шар теряет электроны и приобретает положительный заряд и потенциал. Возникающее при этом электрическое поле будет тормозить фотоэлектроны.

Запишем теорему о кинетической энергии для самых быстрых фотоэлектронов, имеющих скорость  $v_{max}$  сразу после выбивания и скорость  $v_{\infty}$  на бесконечном удалении от шара:

$$\frac{m_e v_\infty^2}{2} - \frac{m_e v_{\max}^2}{2} = -e\varphi.$$

Граничному значению потенциала, при котором электроны не смогут удалиться на бесконечное расстояние, соответствует равенство  $v_\infty = 0$ . Именно до этого значения и будет возрастать потенциал шара, поэтому  $\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = e\varphi_0$ . Подставим это выражение в уравнение фотоэффекта:

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + e\varphi_0 \Rightarrow A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda} - e\varphi_0 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{240 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} - 2,7 \approx 2,5 \text{ эВ}.$$

В знаменателе выражения  $\frac{hc}{\lambda}$  при вычислениях возник множитель  $1,6 \cdot 10^{-19}$ , так как работа выхода здесь считается в эВ.

**Ответ:** 2,5 эВ.

### Пример 8 (ЕГЭ-2017).

На рис. 8 представлен график зависимости фототока из металлической пластины от величины приложенного напряжения. Длина волны фотонов составляет  $\lambda = 500$  нм. Чему равна мощность падающего излучения, если известно, что каждые  $n = 50$  фотонов, падающих на металлическую пластинку, приводят к выбиванию одного электрона?

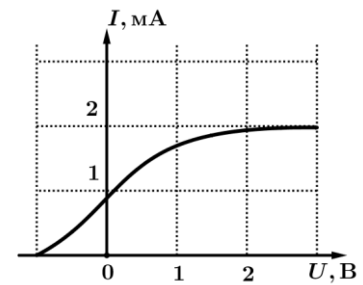


Рис. 8

**Решение:**

Из рисунка видно, что сила тока насыщения равна  $I_{\text{нас}} = 2$  мА. В случае тока насыщения все выбитые фотонами электроны ( $N_e$ ) достигают анода. А так как сила тока равна заряду, прошедшему за единицу времени, то

$$I_{\text{нас}} = \frac{N_e \cdot e}{t} \Rightarrow N_e = \frac{I_{\text{нас}} \cdot t}{e}.$$

Мощность падающего излучения равна энергии, которую переносят фотоны за единицу времени. Если число фотонов равно  $N_\phi$ , энергия каждого

$$\frac{hc}{\lambda}, \text{ то мощность излучения равна } P = \frac{N_\phi \cdot \frac{hc}{\lambda}}{t}.$$

По условию, один электрон выбивается  $n$  фотонами, поэтому  $N_\phi = n \cdot N_e$ . Тогда получим окончательное выражение для мощности:

$$P = \frac{n \cdot N_e \cdot \frac{hc}{\lambda}}{t} = \frac{n \cdot \frac{I_{нас} \cdot \lambda}{e} \cdot \frac{hc}{\lambda}}{\lambda} = \frac{n I_{нас} hc}{e \lambda} = \frac{50 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 500 \cdot 10^{-9}} \approx 0,25 \text{ Вт.}$$

**Ответ:**  $P = \frac{n I_{нас} hc}{e \lambda} \approx 0,25 \text{ Вт.}$

Обратите внимание, что при решении примера 6 нам не пришлось применять уравнение фотоэффекта, – не все задачи на эту тему требуют этого.

### Пример 9 (ЕГЭ, задача 28).

В установке по наблюдению фотоэффекта свет от точечного источника  $S$ , пройдя через собирающую линзу, падает на фотокатод параллельным пучком (рис. 9). В схему внесли изменение: на место первоначальной линзы поставили

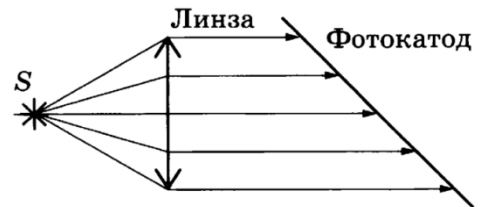


Рис. 9.

другую того же диаметра, но с большим фокусным расстоянием. Источник света переместили вдоль главной оптической оси линзы так, что на фотокатод свет снова стал падать параллельным пучком. Как изменился при этом (уменьшился или увеличился) фототок насыщения? Объясните, почему изменяется фототок насыщения, и укажите, какие физические закономерности Вы использовали для объяснения.

### Решение:

После прохождения линзы свет выходит параллельным пучком. Следовательно, источник расположен в фокусе линзы.

Фокусное расстояние второй линзы больше, чем у первой. Поэтому источник, помещенный в фокус, будет дальше от линзы, чем в первом случае. Свет от точечного источника распределяется равномерно по всем направлениям, поэтому на линзу того же диаметра, расположенную дальше, попадет меньше лучей, то есть меньше фотонов (рис. 10).

Все лучи, падающие на линзу из фокуса, выйдут параллельно главной оптической оси и попадут на фотокатод. Так как фототок насыщения пропорционален интенсивности падающего света, то во втором случае он уменьшится.

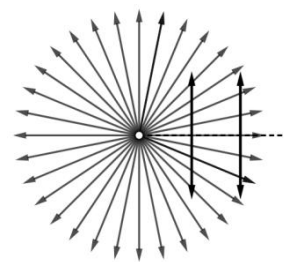


Рис. 10.

**Ответ:** фототок насыщения уменьшится.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Поток фотонов с энергией  $E_{\phi} = 10$  эВ выбивает из металла фотоэлектроны, максимальная кинетическая энергия которых в 4 раза больше работы выхода из данного металла. Какова максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов? Ответ приведите в эВ.
2. Работа выхода электронов из некоторого металла равна 3,6 эВ. Какова максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, выбиваемых светом, длина волны которого составляет  $\frac{3}{4}$  длины волны, соответствующей красной границе?
3. Катод с работой выхода  $A_{\text{вых}} = 2,8$  эВ освещается светом с длиной волны  $\lambda = 300$  нм. Определите запирающее напряжение.
4. Катод освещается светом с частотой  $\nu = 2 \cdot 10^{15}$  Гц. Максимальная кинетическая энергия вылетевших электронов равна  $E_{\text{кин}}^{\text{max}} = 8 \cdot 10^{-19}$  Дж. Найдите длину волны  $\lambda_{\text{кр}}$ , соответствующую красной границе.
5. В опыте по изучению фотоэффекта фотоэлектроны тормозятся электрическим полем. При этом измеряется запирающее напряжение.

В таблице представлены результаты одного из первых таких опытов при освещении одной и той же пластины.

Запирающее напряжение, В	0,4	0,6
Частота света, $10^{14}$ Гц	5,5	6,1

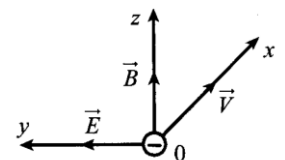
Чему равна постоянная Планка по результатам этого эксперимента?

6. Если поочередно освещать поверхность металла излучением с частотами  $\nu_1 = 2500$  ТГц нм и  $\nu_2 = 5500$  ТГц, то запирающие

напряжение между анодом и катодом меняется в  $n$  раз. Работа выхода из этого металла равна  $A_{\text{вых}} = 4,2$  эВ. Найдите  $n$ . Ответ округлить до десятых.

7. Катод К вакуумного фотоэлемента освещают монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda$  и измеряют скорость фотоэлектронов. Затем уменьшают длину волны в 6 раз. При этом максимальная скорость фотоэлектронов изменяется в 4 раза. Красная граница фотоэффекта равна  $\lambda_{\text{кр}} = 261$  нм. Найдите  $\lambda$ .
8. Катод вакуумного фотоэлемента облучается световым пучком с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм и мощностью  $W = 1$  Вт. При больших ускоряющих напряжениях между катодом и анодом фототок достигает насыщения (все электроны, выбитые с поверхности катода в единицу времени, достигают анода)  $I_{\text{н}} = 4$  мА. Какое количество фотонов приходится на один электрон, выбиваемый из катода?
9. Металлическая пластина облучается светом. Работа выхода электронов из данного металла равна  $A_{\text{вых}} = 3,7$  эВ. Вылетающие из пластины фотоэлектроны попадают в однородное электрическое поле напряженностью  $E = 130$  В/м. Вектор напряженности  $\vec{E}$  поля направлен к пластине перпендикулярно ее поверхности. Измерения показали, что на расстоянии  $S = 10$  см от пластины максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна 15,9 эВ. Определите частоту  $\nu$  падающего на пластину света.
10. Фотокатод с работой выхода  $A_{\text{вых}} = 4,4$  эВ освещается светом с частотой  $\nu = 2 \cdot 10^{15}$  Гц. Фотоэлектроны попадают в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и движутся по окружностям, максимальный радиус которых равен  $R = 5$  мм. Найдите индукцию магнитного поля  $B$ .

11. Электроны, вылетевшие в положительном направлении оси  $Ox$  с катода фотоэлемента под действием света, попадают в электрическое и магнитное поля. Какой должна быть величина  $E$  напряженности электрического поля, чтобы самые быстрые электроны отклонялись в положительном направлении оси  $Oy$ ? Работа выхода для вещества катода 2,39 эВ, частота света  $\nu = 6,4 \cdot 10^{14}$  Гц, индукция магнитного поля  $B = 1 \cdot 10^{-3}$  Тл.



12. В опыте по изучению фотоэффекта свет частотой  $\nu = 6,1 \cdot 10^{14}$  Гц падает на поверхность катода, в результате чего в цепи возникает ток. График зависимости силы тока  $I$  от напряжения  $U$  между анодом и катодом приведен на рисунке 12. Какова мощность падающего света  $P$ , если в среднем один из 20 фотонов, падающих на катод, выбивает электрон?

