

Тема: Фотоэффект. Фотоны

Фотоэлектрический эффект был открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и в 1888–1890 годах экспериментально исследован А. Г. Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (1897 г., Дж. Томсон), и стало ясно, что фотоэффект (или точнее – внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на рис. 1.

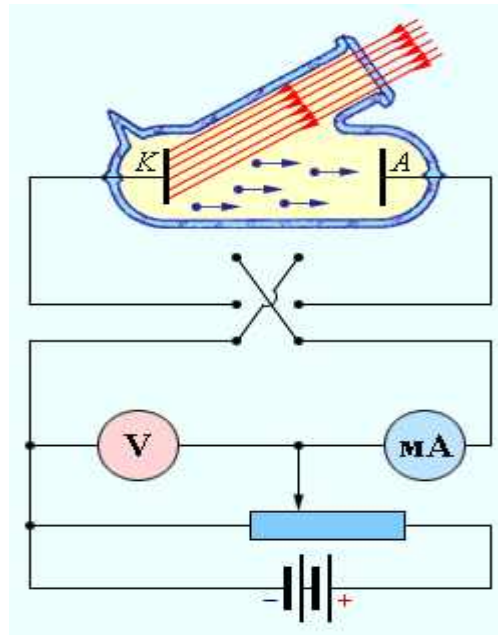
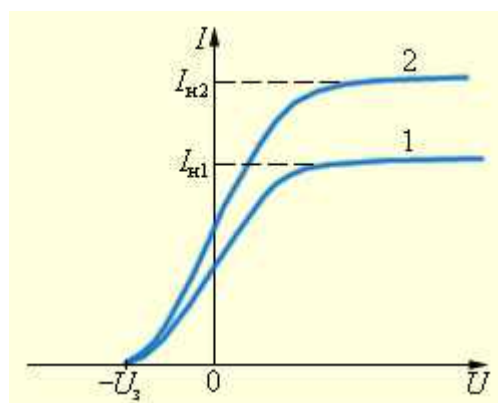


Рисунок 1.

Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта

В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение U , полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод K) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны λ . При неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока I от приложенного напряжения. На рис. 2 изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности светового потока, падающего на катод.



Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде А фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Тщательные измерения показали, что ток насыщения I_n прямо пропорционален интенсивности падающего света. Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает $|eU|$. Если напряжение на аноде меньше, чем $-U_z$, фототок прекращается. Измеряя U_z , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = eU_z$$

К удивлению ученых, величина U_z оказалась независимой от интенсивности падающего светового потока. Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты ν света (рис. 3).

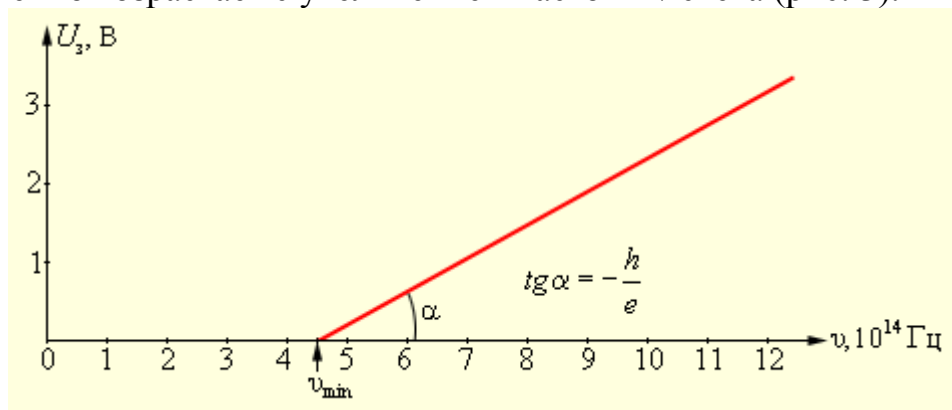


Рисунок 3.

Зависимость запирающего потенциала U_z от частоты ν падающего света

Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света ν и не зависит от его интенсивности.
2. Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота ν_{\min} , при которой еще возможен внешний фотоэффект.
3. Число фотоэлектронов, вырывааемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.
4. Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света $\nu > \nu_{\min}$.

Все эти закономерности фотоэффекта в корне противоречили представлениям классической физики о взаимодействии света с веществом. Согласно волновым представлениям при взаимодействии с электромагнитной световой волной электрон должен был бы постепенно накапливать энергию, и потребовалось бы значительное время, зависящее от интенсивности света, чтобы электрон накопил достаточно энергии для того, чтобы вылететь из катода. Как показывают расчеты, это время должно было бы исчисляться минутами или часами. Однако, опыт показывает, что фотоэлектроны появляются немедленно после начала освещения катода. В этой модели также было невозможно понять существование красной границы фотоэффекта. Волновая теория света не могла объяснить независимость энергии

фотоэлектронов от интенсивности светового потока и пропорциональность максимальной кинетической энергии частоте света.

Таким образом, электромагнитная теория света оказалась неспособной объяснить эти закономерности.

Выход был найден А. Эйнштейном в 1905 г. Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта было дано Эйнштейном на основе гипотезы М. Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой $E = h\nu$, где h – **постоянная Планка**. Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии квантовых представлений. Он пришел к выводу, что **свет имеет прерывистую (дискретную) структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов, впоследствии названных фотонами**. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию $h\nu$ одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе металл–вакуум. Для этого электрон должен совершить работу выхода A , зависящую от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фототэлектрон, определяется законом сохранения энергии:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = eU_3 = h\nu - A.$$

Эту формулу принято называть **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**.

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость от интенсивности света, существование красной границы, безынерционность фотоэффекта. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность. Из этого следует, что ток насыщения должен быть прямо пропорционален интенсивности светового потока.

Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала U_3 от частоты ν (рис. 5.2.3), равен отношению постоянной Планка h к заряду электрона e :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{e}.$$

Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка. Такие измерения были выполнены в 1914 г. Р. Милликеном и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком. Эти измерения позволили также определить работу выхода A :

$$A = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}},$$

где c – скорость света, $\lambda_{\text{кр}}$ – длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта. У большинства металлов работа выхода A составляет несколько электрон-вольт (**$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$**). В квантовой физике электрон-вольт часто используется в качестве энергетической единицы измерения. Значение постоянной Планка, выраженное в электрон–вольтах в секунду, равно $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$.

Среди металлов наименьшей работой выхода обладают щелочные элементы. Например, у натрия $A = 1,9$ эВ, что соответствует красной границе фотоэффекта $\lambda_{кр} \approx 680$ нм. Поэтому соединения щелочных металлов используют для создания катодов в фотоэлементах, предназначенных для регистрации видимого света.

Итак, законы фотоэффекта свидетельствуют, что свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название фотонов или световых квантов.

Энергия фотонов равна

$$E = h\nu.$$

Фотон движется в вакууме со скоростью c . Фотон не имеет массы, $m = 0$. Из общего соотношения специальной теории относительности, *связывающего энергию, импульс и массу любой частицы*,

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2,$$

следует, что фотон обладает импульсом

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах – корpusкулах.

Но это не был механический возврат к корpusкулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом – корpusкулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название **корpusкулярно-волнового дуализма**. Позже двойственная природа была открыта у электронов и других элементарных частиц. Классическая физика не может дать наглядной модели сочетания волновых и корpusкулярных свойств у микрообъектов. Движением микрообъектов управляют не законы классической механики Ньютона, а законы квантовой механики. Теория излучения абсолютно черного тела, развитая М. Планком, и квантовая теория фотоэлектрического эффекта Эйнштейна лежат в основании этой современной науки.