

# КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

## Лекция 2.

### Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна.

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу излучения абсолютно черного тела, получила дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта. Это явление было открыто в 1887 году Г. Герцем, который, облучая ультрафиолетовыми лучами находящиеся под напряжением электроды, наблюдал ускорение процесса разряда. Позднее было установлено, что причиной данного явления служит появление при облучении свободных электронов.

Явление испускания электронов веществом под действием света было названо *фотоэффектом*.

В 1888-1890 годах А.Г. Столетов провел систематическое исследование фотоэффекта.

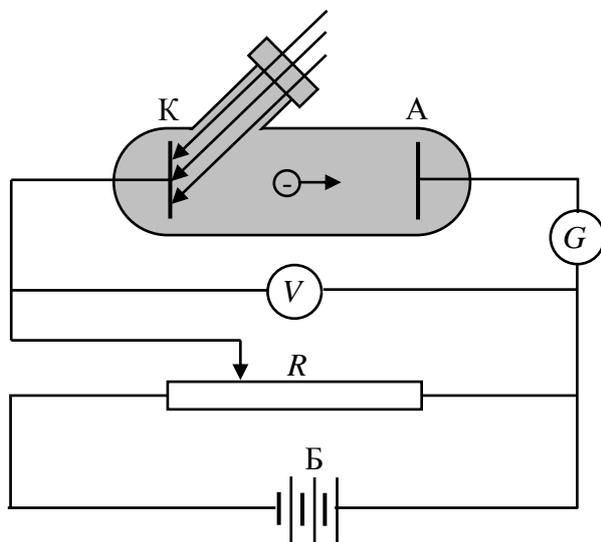


Рис. 1.

Схема исследования фотоэффекта

Принципиальная схема для исследования фотоэффекта приведена на рис. 4.3. Два электрода в вакуумной трубке подключены к батарее Б так, что с помощью потенциометра  $R$  можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на электроды напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окошечко), измеряется включенным в цепь гальванометром  $G$ .

Облучая катод светом различных длин волн, Столетов установил следующие свойства фотоэффекта:

- 1) под действием света вещество теряет только отрицательные заряды;
- 2) наиболее эффективное действие оказывают ультрафиолетовые лучи;
- 3) фотоэффект практически безынерционен, т.е. промежуток времени между моментом освещения и началом разрядки ничтожно мал.

Приведенная на рис.1 экспериментальная установка позволяет получить вольт-амперные характеристики фотоэффекта – зависимости фототока  $I$  (поток электронов, испускаемых катодом под действием света) от напряжения  $U$  между электродами при различных световых потоках ( $\Phi_1 \neq \Phi_2$ ) и постоянной частоте света  $\nu$  (рис. 2).

При изучении вольт-амперных характеристик было установлено следующее.

1. Фототок возникает не только при  $U = 0$ , но и при  $U < 0$ , причем фототок отличен от нуля до строго определенного для данного катода отрицательного значения  $U = U_3$  – так называемого задерживающего потенциала. Величина  $U_3$  не зависит от светового потока (совпадение начальных точек обеих кривых).

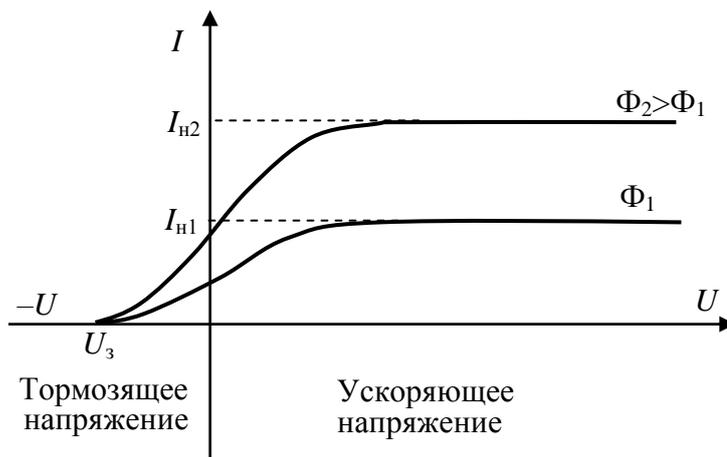


Рис.2.  
Вольт-амперная характеристика фотоэффекта

2. Пологий ход кривых указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. При напряжении  $U = U_3$  сила фототока равна нулю, т.е. ни одному из электронов, даже обладающему при вылете из катода наибольшим значением скорости  $v_{\max}$  не удастся преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода. Поэтому можно записать, что

$$\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = eU_3 . \quad (1)$$

Таким образом, измерив  $U_3$ , можно определить максимальную скорость электронов  $v_{\max}$ .

При некотором напряжении фототок достигает определенного значения  $I_n$ , которое при дальнейшем увеличении  $U$  не изменяется – фототок достигает насыщения. Сила фототока насыщения  $I_n$  определяется количеством электронов, испускаемых катодом в единицу времени, следовательно, пропорциональна световому потоку  $\Phi$ .

Другая серия опытов, проведенная П.И. Лукирским и С.С.Прилежаевым, состояла в снятии вольт-амперных характеристик при различных частотах  $\nu$ , но при постоянном значении светового потока  $\Phi = \text{const}$  (рис.3). Анализ кривых рис. 5 показывает, что:

1) величина задерживающего потенциала  $U_3$  пропорциональна частоте падающего света, следовательно, максимальная скорость вылетевших из катода фотоэлектронов зависит только от частоты света и не зависит от величины светового потока;

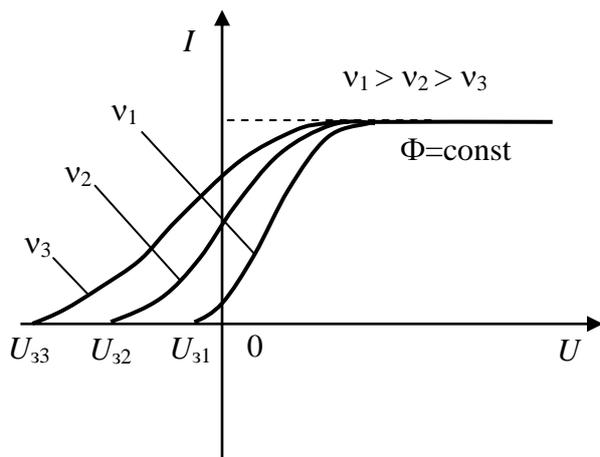


Рис.3.

Вольт - амперная характеристика фотоэффекта при различных частотах

2) существует такая частота света  $\nu_{кр}$ , при которой скорость электронов равна нулю, так как  $U_3 = 0$ . При всех  $\nu < \nu_{кр}$  фототока не будет.

На основании обобщения полученных экспериментальных данных были сформулированы три закона фотоэффекта:

1. При фиксированной частоте падающего света ( $\nu = const$ ) сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна падающему на катод световому потоку  $\Phi$ .

2. Максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов (максимальная скорость электрона  $\nu_{max}$ ) растет с ростом частоты падающего света и не зависит от светового потока.

3. Фотоэффект не возникает, если частота света меньше некоторой характерной для каждого металла величины  $\nu_{кр}$ , называемой "красной границей" фотоэффекта. Частота  $\nu_{кр}$  зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

С точки зрения волновой теории света объяснить законы фотоэффекта невозможно. Действительно, согласно этой теории электроны должны постепенно накапливать энергию, "раскачиваясь" в электрическом поле световой волны, и этот процесс должен зависеть от амплитуды световой волны (светового потока). Соответствующие расчеты дают время "раскачки" порядка нескольких минут. Этот вывод противоречит безынерционности фотоэффекта и независимости энергии вырванных электронов от светового потока (второй закон фотоэффекта). Кроме того, совершенно непонятно существование минимальной частоты света, необходимой для возникновения фотоэффекта, так как согласно волновой теории свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности (пропорциональной световому потоку  $\Phi$ ) должен был бы вырывать электроны из металла.

В 1905 году А.Эйнштейн, опираясь на работы М.Планка по излучению нагретых тел, предложил квантовую теорию фотоэффекта.

В основу этой теории положено две идеи.

1. Свет не только излучается, но также распространяется в пространстве и поглощается веществами в виде отдельных порций энергии – квантов. Следовательно, распространение электромагнитного излучения нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных квантов, движущихся со скоростью распространения света

в вакууме  $c$ . Эти кванты электромагнитного излучения были названы световыми частицами *фотонами*.

2. Процесс поглощения света веществом сводится к тому, что фотоны передают всю свою энергию электронам вещества, причем каждый квант поглощается только одним электроном.

Таким образом, процесс поглощения света происходит прерывно как в пространстве, так и во времени.

Эти идеи Эйнштейна легли в основу квантовой теории света, которая позволила успешно объяснить законы фотоэффекта и многие другие оптические явления, не укладывающиеся в рамки классической электромагнитной теории.

Основываясь на вышеизложенных идеях и применив к фотоэффекту закон сохранения энергии, Эйнштейн предложил уравнение, которое устанавливает связь между энергией кванта  $h\nu$ , возбуждающего фотоэффект, работой  $A$  (работа выхода), которая затрачивается на выход электрона из металла, и максимальной кинетической энергией вылетающего электрона  $m_e v^2 / 2$ .

Уравнение Эйнштейна имеет следующий вид:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2)$$

где  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода (наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум, зависит от природы и состояния поверхности металла).

Уравнение (15) объясняет все свойства и законы фотоэффекта. Действительно:

1) безинерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно;

2) по Эйнштейну каждый квант поглощается только одним электроном, поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т.е. световому потоку (первый закон фотоэффекта);

3) из уравнения (15) непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от величины светового потока (числа фотонов), так как ни работа выхода  $A$ , ни частота излучения  $\nu$  от светового потока не зависят;

4) формула (2) показывает, что существует некоторая минимальная частота света  $\nu_{\text{кр}}$ , необходимая для возникновения фотоэффекта (кинетическая энергия фотоэлектронов равна нулю ( $m_e v_{\text{max}}^2 / 2 = 0$ )).

В этих условиях

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}}, \quad (3)$$

т.е. фотоэффект имеет "красную границу" (этот термин подчеркивает невозможность возбуждения эффекта при частоте, меньшей  $\nu_{\text{кр}}$ ). Так как "красная граница" определяется работой выхода электрона из металла, она зависит лишь от химической природы вещества и состояния его поверхности.

"Красная граница" фотоэффекта  $\nu_{\text{кр}} = A_{\text{ВЫХ}}/h$  соответствует фотонам, энергии которых „хватает“ только на работу выхода. Если энергия фотона больше, чем работа выхода:  $h\nu > A_{\text{ВЫХ}}$ , то электроны получают кинетическую энергию  $m_e v_{\text{max}}^2/2$ . При подаче на анод отрицательного (запирающего) потенциала электроны будут тормозиться и при некотором значении  $U = U_3$  электроны не достигнут анода (фототок прекратится).

Величина запирающего потенциала определяется из условия (2). Подставив (2) в (3) и поделив полученное равенство на заряд электрона  $e$ , получим

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{e}. \quad (4)$$

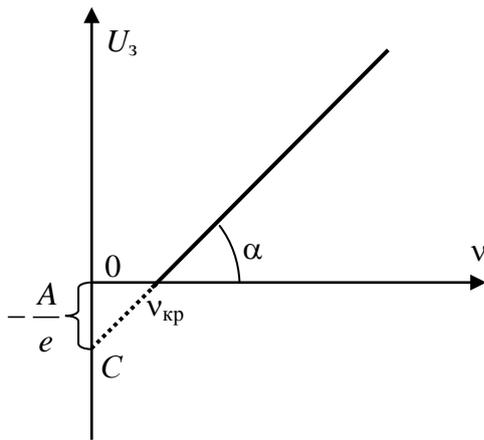


Рис.4

Таким образом, величина запирающего потенциала не зависит от светового потока, а зависит только от частоты падающего света.

Работу выхода электрона из данного металла  $A$  и постоянную Планка  $h$  можно определить, построив график зависимости  $U_3$  от частоты падающего света  $\nu$  (рис.4).

Как видно из рис.4 и формулы (4),  $\text{tg}\alpha = h/e$  и отрезок  $OC$ , отсекаемый на оси потенциала, дает  $-A/e$ .