

## Лекция 13

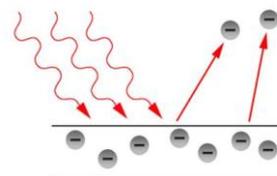
**Фотоэффект. Эффект Комптона.** (Литература- ссылка 2, §30,31,32).

### Вопросы

1. В чём заключается явление внешнего фотоэффекта? Какие различают виды фотоэффекта?
2. Кто впервые наблюдал фотоэффект? Кто установил основные закономерности фотоэффекта? Приведите схему установки для экспериментального изучения закономерности фотоэффекта.
3. Как называется зависимость фототока от напряжения между катодом и анодом фотоэлемента? Нарисуйте схематически вид этой кривой и проанализируйте ее ( $I_{нас}$ ,  $U_з$ ).
4. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
5. Нарисуйте и объясните вольт-амперные характеристики, соответствующие двум различным освещенностям катода при заданной частоте и двум различным частотам при заданной освещенности.
6. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Как на основе уравнения Эйнштейна объяснить законы фотоэффекта?
7. Что называется работой выхода электрона? От чего она зависит?
8. Что называется задерживающим напряжением? Как его рассчитать?
9. Что называется красной границей фотоэффекта? Запишите формулы для граничной частоты и граничной длины волны.
10. В чем заключается эффект Комптона?
11. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона со свободным электроном?
12. От чего зависит изменение длины волны фотона при рассеянии его на электроном? Запишите формулу.
13. Что такое комptonовская длина волны частицы?
14. Что такое фотон? Запишите формулы, определяющие энергию, импульс и массу фотона.

### Фотоэффект

**Фотоэффектом** называется испускание электронов с поверхности металла под действием света.



# Виды фотоэффекта

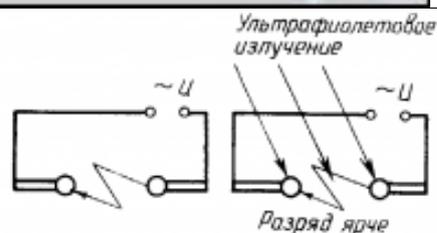
**Внешний фотоэффект** – испускание электронов с поверхности металлов под действием света.

**Внутренний фотоэффект** – изменение концентрации носителей тока в веществе и как следствие изменение электропроводности данного вещества под действием света.

**Вентильный фотоэффект** – возникновение ЭДС под действием света в системе, содержащей контакт двух различных полупроводников.

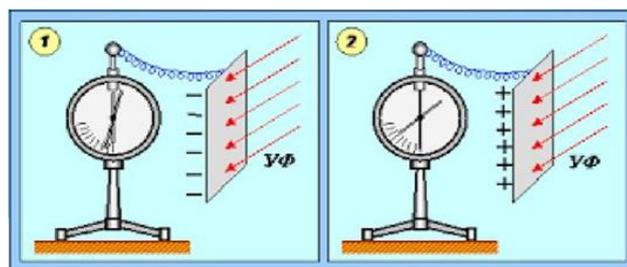
**Многофотонный фотоэффект** возможен, если интенсивность света очень большая (при использовании лазерных пучков). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.

В 1887 г. [Г. Герц](#) обнаружил, что при облучении ультрафиолетовыми лучами электродов, находящихся под высоким напряжением, разряд возникает при большем расстоянии между электродами, чем без облучения.

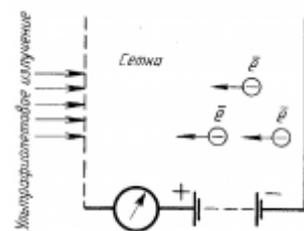


Фотоэффект можно наблюдать также в следующих случаях:

1. Цинковую пластину, соединенную с электрометром, заряжают отрицательно и облучают ультрафиолетовым светом. Она быстро разряжается. Если же ее зарядить положительно, то заряд пластины не изменится.



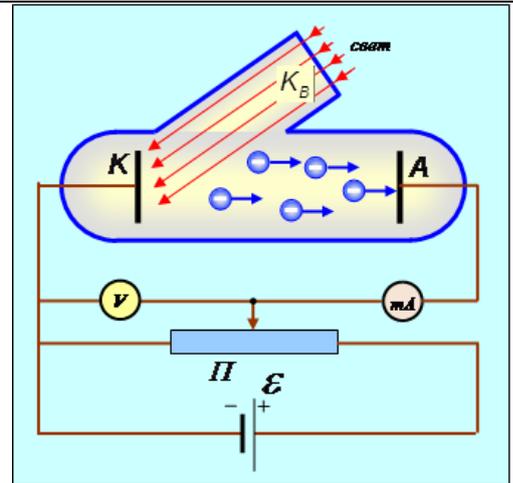
2. Ультрафиолетовые лучи, проходящие через сетчатый положительный электрод, попадают на отрицательно заряженную цинковую пластину и выбивают из нее электроны, которые устремляются к сетке, создавая фототок, регистрируемый чувствительным гальванометром.



## Законы фотоэффекта

Количественные закономерности фотоэффекта (1888—1889) были установлены [А. Г. Столетовым](#).

Он использовал вакуумный стеклянный баллон с двумя электродами. Через кварцевое стекло на катод попадает свет (в том числе ультрафиолетовое излучение). С помощью потенциометра можно регулировать напряжение между электродами. Ток в цепи измерялся миллиамперметром.

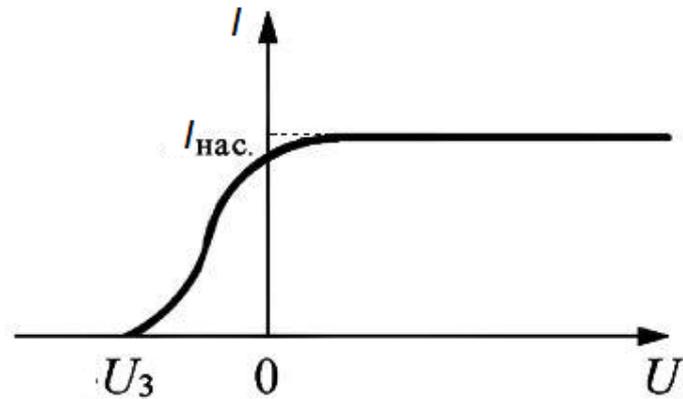


В результате облучения электроны, выбитые из катода, могут достигать анода и создавать некоторый начальный ток.

При увеличении напряжения, поле разгоняет электроны, и ток увеличивается, достигая насыщения, при котором все выбитые электроны достигают анода.

Если приложить обратное напряжение, то электроны тормозятся и ток уменьшается. При напряжении, которое называют запирающим, фототок прекращается. Согласно закону сохранения

энергии 
$$eU_3 = \frac{m\mathbf{v}_{\max}^2}{2}$$
, где  $m$  - масса электрона, а  $\mathbf{v}_{\max}$  - максимальная скорость фотоэлектрона.



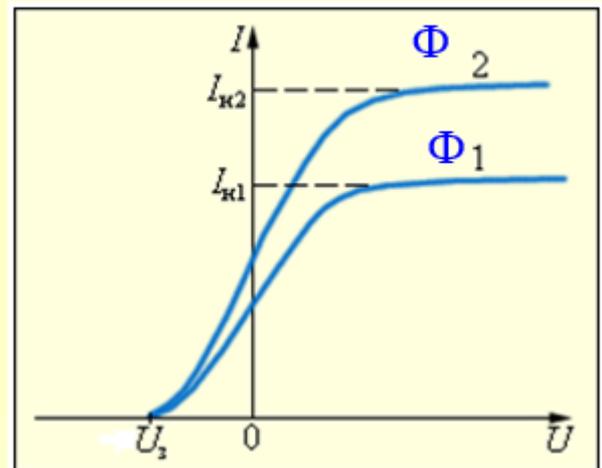
### Первый закон

Исследуя зависимость силы тока в баллоне от напряжения между электродами при постоянном световом потоке на один из них, он установил первый закон фотоэффекта.

**Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл.**

Т.к. сила тока определяется величиной заряда, а световой поток - энергией светового пучка, то можно сказать, что число электронов, выбиваемых за одну секунду из вещества, пропорционально интенсивности света, падающего на это вещество.

$$v = \text{const} (\Phi_1 < \Phi_2)$$

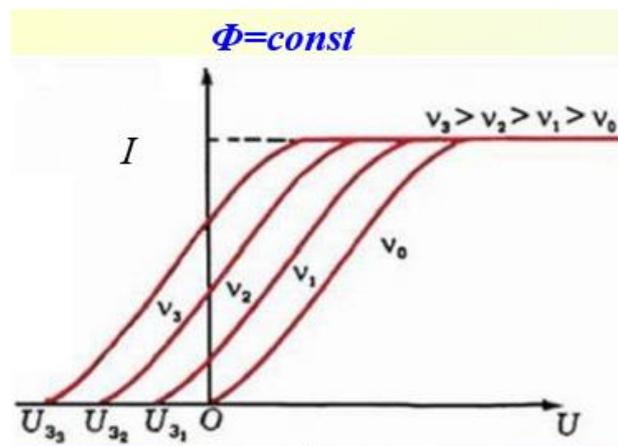


## Второй закон

Изменяя условия освещения на этой же установке, [А. Г. Столетов](#) открыл второй закон фотоэффекта:

**Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте света и не зависит от интенсивности света.**

Из опыта следовало, что если частоту света увеличить, то при неизменном световом потоке запирающее напряжение увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кинетическая энергия фотоэлектронов. Таким образом, *кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света.*



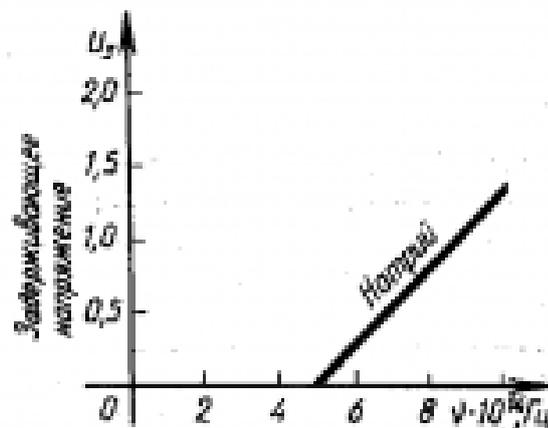
## Третий закон

Заменяя в приборе материал фотокатода, Столетов установил третий закон фотоэффекта:

**Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта – минимальная частота, ниже которой фотоэффект невозможен.**

При  $\nu < \nu_{\text{min}}$  ни при какой интенсивности волны падающего на фотокатод света фотоэффект не произойдет. Т.к.  $\lambda = c/\nu$ , то минимальной частоте света соответствует максимальная длина волны.

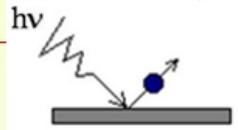
4. **Фотоэффект безынерционен** (фототок возникает практически одновременно с освещением фотокатода).



## Квантовая теория фотоэффекта

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе квантовой теории:

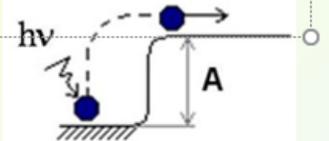
Свет (излучение) не только испускается отдельными порциями - квантами (Планк), но и (Эйнштейн) распространяется в пространстве, и поглощается веществом отдельными порциями - квантами, энергия которых  $\varepsilon = h\nu$



Эйнштейн: каждый квант поглощается только одним электроном.

Если энергия кванта больше чем работа выхода электрона из металла, т.е.  $h\nu \geq A_{\text{вых}}$ , то электрон может покинуть поверхность металла. Остаток энергии кванта составляет кинетическую энергию электрона, покинувшего вещество.

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}} \quad (1)$$



$A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона- минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы удалить его из металла. (Зависит от природы вещества и состояния поверхности).

Работа выхода обычно измеряется в электронвольтах (эВ):  $1\text{эВ} = 1,6 \times 10^{-19}\text{Дж}$ .

УРАВНЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА (выражает закон сохранения энергии):

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

$h\nu$  - энергия кванта,  $\nu$ -частота света,  $h$ - постоянная Планка,

$A_{\text{вых}}$ - работы выхода электрона

$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$  -максимальная кинетическая энергия электрона.

Квантовая теория дает следующие объяснения законам фотоэффекта.

При увеличении интенсивности монохроматического излучения растет число **поглощенных металлом квантов энергии**, а следовательно, и **число вылетающих** из него электронов, поэтому **фототок прямо пропорционален интенсивности излучения**, (**первый закон**).

Из уравнения (2) видно, что **кинетическая энергия вылетающих электронов зависит** только от рода металла ( $A_{\text{вых}}$ ) и **от частоты**  $\nu$  (или длины волны излучения  $\lambda$ ), т. е. от энергии фотонов, а от интенсивности излучения не зависит (**второй закон**).

Если  $h\nu < A_{\text{вых}}$ , то при любой интенсивности излучения электроны вылетать из металла не будут (**третий закон**)

$$h\nu_0 = A_{\text{вых}}$$

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

**- красная граница фотозффекта**

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}$$

**- красная граница фотозффекта**

**Фотозффект наблюдается, если**

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

или

$$\lambda \leq \lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}$$

**Применение фотозффекта**

## Вакуумные фотоэлементы



широко применяют в различных схемах автоматики для управления электрическими цепями с помощью световых пучков.



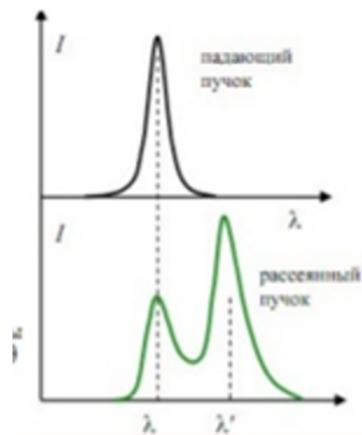
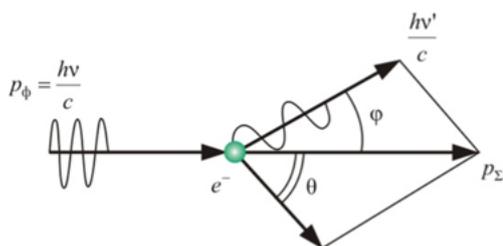
## Полупроводниковые фотоэлементы



## ЭФФЕКТ КОМПТОНА

А. Комптон изучал рассеяние рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил в 1922г., что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.

Уменьшение частоты указывало на потерю энергии. Комптон показал, что обнаруженный им эффект можно объяснить на основе фотонной теории света, т.е. соударением налетающих фотонов со свободными электронами вещества.



Применяя к столкновениям фотонов и электронов законы сохранения энергии и импульса, получают:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi) \quad - \text{изменение длины волны при рассеянии фотонов на электронах}$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,4 \times 10^{-12} \text{ м} \quad - \text{комптоновская длина волны электрона}$$

$\lambda_0$  - длины волны падающего излучения                       $m_e$  - масса электрона

$\lambda$  - длины волны рассеянного излучения                       $h$  - постоянная Планка

$\varphi$  - угол рассеяния фотона     $c$  - скорость света

Эффект Комптона является одним из доказательств корпускулярных свойств излучения и подтверждает существование фотонов.

