

Квантовые свойства света

Тема 10 лекция 21

Фотоэффект. Законы фотоэффекта и их обоснование. Уравнение Эйнштейна. Красная граница фотоэффекта. Фотоэлектрические приемники света (фотоэлементы, фотоумножители, фотодиоды и электронно-оптические преобразователи).

Квантовая природа света. Эффект Комптона. Давление света. Открытие давления света. Объяснение давления света точки зрения корпускулярной и волновой теорий.

Поглощение оптического излучения в веществе (твердом, жидком или газообразном) часто сопровождается электрическими явлениями, которые получили название **фотоэлектрического эффекта**.

внешний фотоэффект

при котором поглощение света приводит к выходу электронов за пределы облучаемого тела

внутренний фотоэффект

при котором происходит лишь увеличение числа свободных электронов внутри вещества, но не происходит выхода их наружу. Это приводит к резкому уменьшению электрического сопротивления тела

фотогальванический эффект

при котором на границе раздела полупроводника и металла или на границе двух полупроводников под влиянием облучения возникает электродвижущая сила

фотоэффект в газообразной

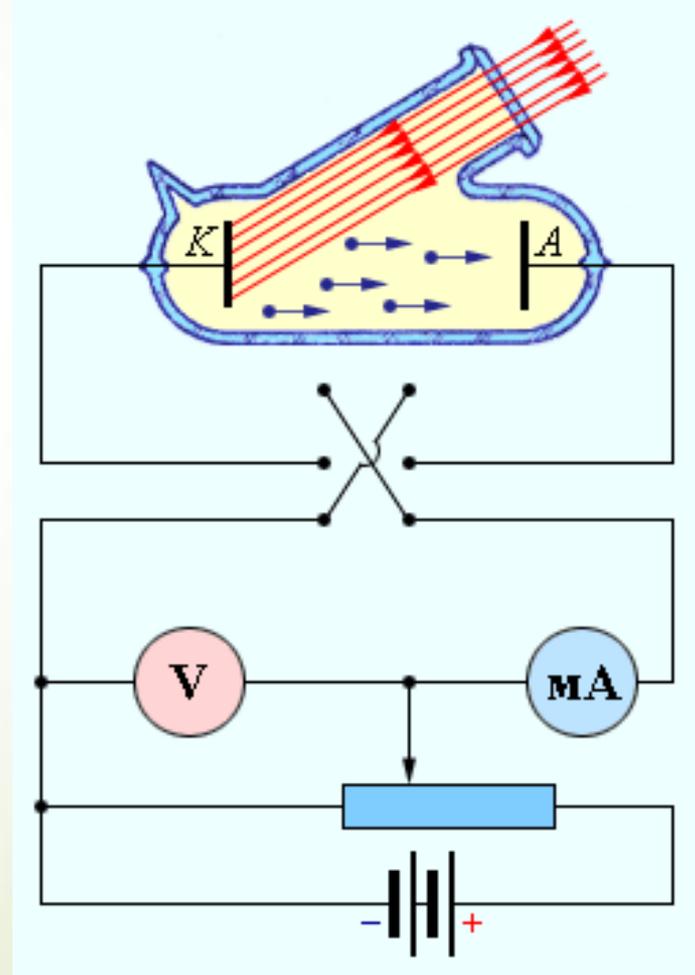
среде, представляющий собой фотоионизацию отдельных молекул или атомов.

Внешний фотоэффект

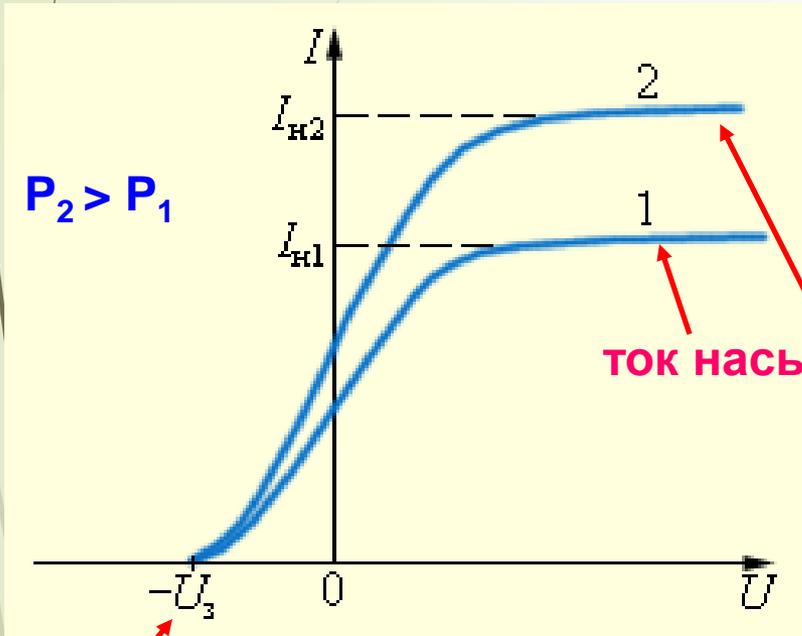
Фотоэлектрический эффект был открыт в 1887 году немецким физиком **Г.Герцем** и в 1888–1890 годах экспериментально исследован **А. Г. Столетовым**. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (**Д. Томсон 1897г.**), и стало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

При освещении пластинки К, в цепи возникает постоянный ток, который измеряется гальванометром; этот ток иногда называют **фототоком**, а электроны, вырванные из катода светом, - **фотоэлектронами**.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта



На графиках зависимости силы фототока I от разности потенциалов U между электродами видно, что при некотором значении $U > 0$ сила фототока достигает максимального значения и далее не меняется. Этот ток, называемый «**током насыщения**», соответствует состоянию, когда все электроны, вырванные светом из фотокатода, достигают анода.



типичные вольт-амперные характеристики, полученные при двух значениях интенсивности светового потока P , падающего на катод.

А. Г. Столетовым был установлен закон, носящий его имя:

тормозящее (запирающее) напряжение

Закон Столетова

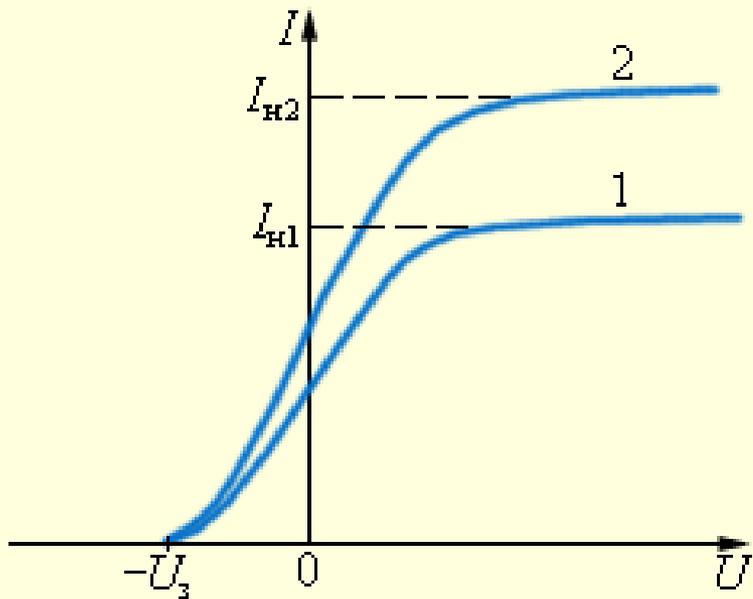
фототок насыщения (т.е. число электронов, освобождаемых светом в 1с) прямо пропорционален лучистому потоку:

$$i_s = \gamma \cdot P$$

$$i_s = \gamma \cdot P$$

При этом спектральный состав лучистого потока должен быть неизменным. Если падающий лучистый поток представляет собой немонахроматическое излучение, то γ измеряют в А/лм или в А/Вт и называют интегральной чувствительностью фотокатода. Для монохроматического света γ называется спектральной чувствительностью фотокатода.

А.Г. Столетовым была установлена практическая **безынерционность** внешнего фотоэффекта. Промежуток времени между началом освещения и началом фототока не превышает 10^{-9} с.



Из вольт - амперной характеристики видно, что при отсутствии напряжения ($U=0$) между электродами сила фототока не равна нулю. Т.е., электроны, вырванные светом из катода, имеют некоторую начальную скорость V , а значит, и кинетическую энергию $W_{кин}$ и могут достигать анода без содействия внешнего поля, образуя начальный ток.

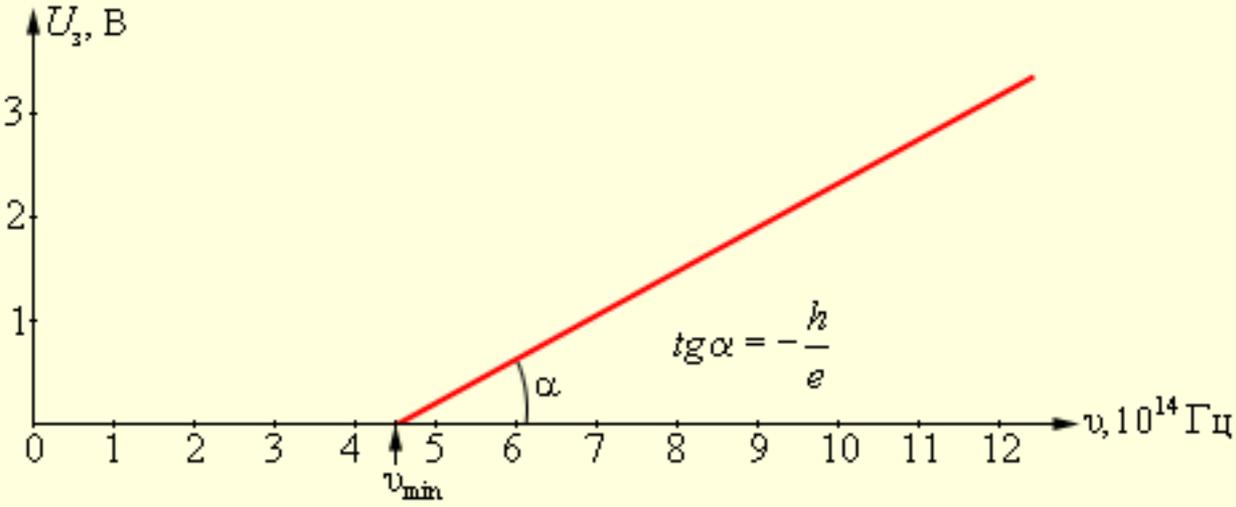
Чтобы ослабить или совсем прекратить этот ток, необходимо наложить на электроды тормозящее поле ($U<0$).

тормозящее (запирающее) напряжение

$$\left(\frac{mV^2}{2}\right)_{\max} = e \cdot U_3$$

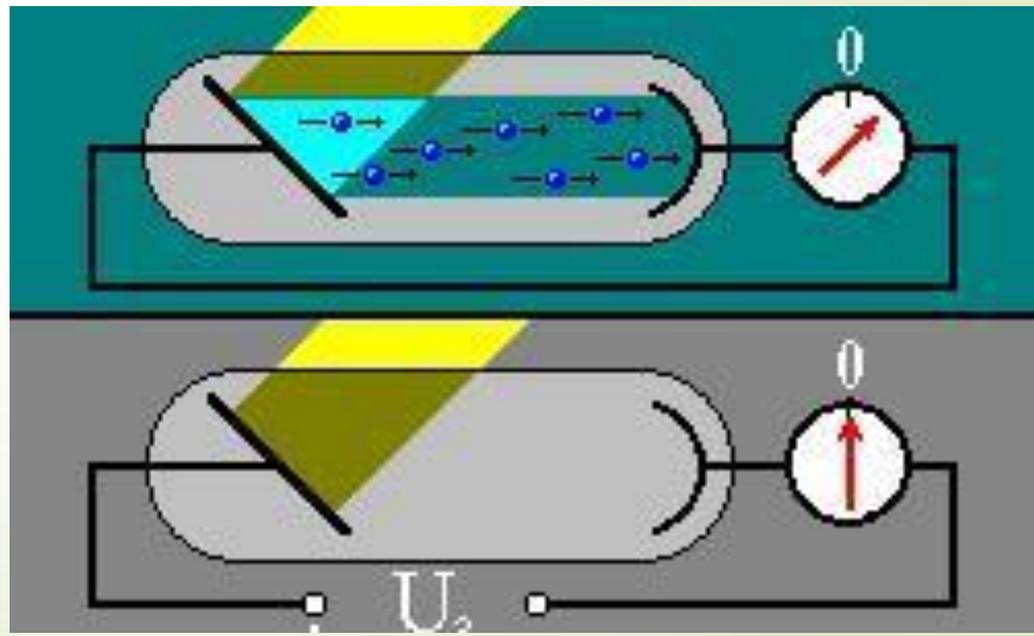
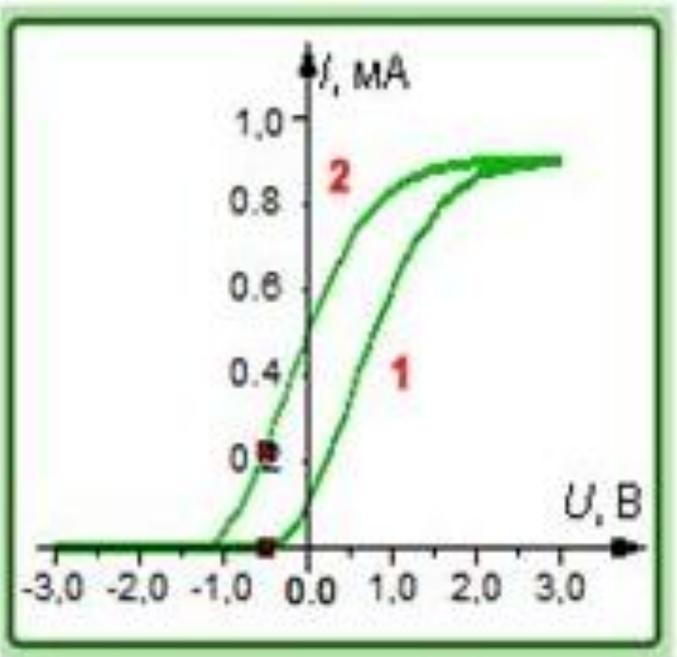
Если подобрать такую разность потенциалов U_3 , при которой фототок обратится в нуль, то можно утверждать, что все электроны, даже самые быстрые, задерживаются тормозящим полем.

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 $-U_3$, фототок прекращается. Измеряя U_3 , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

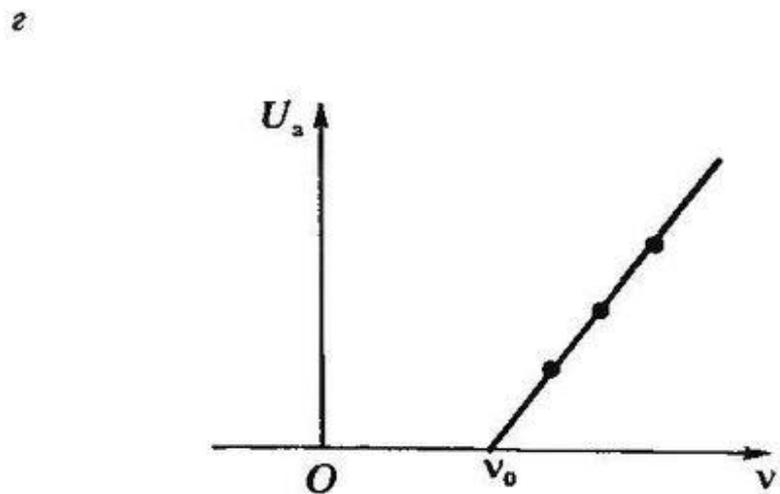
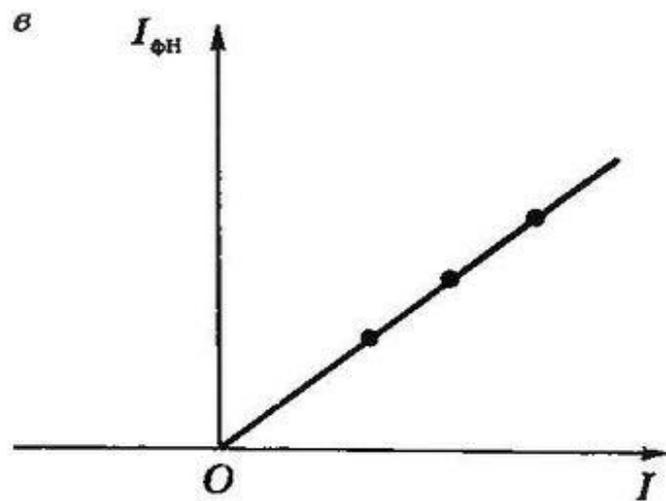
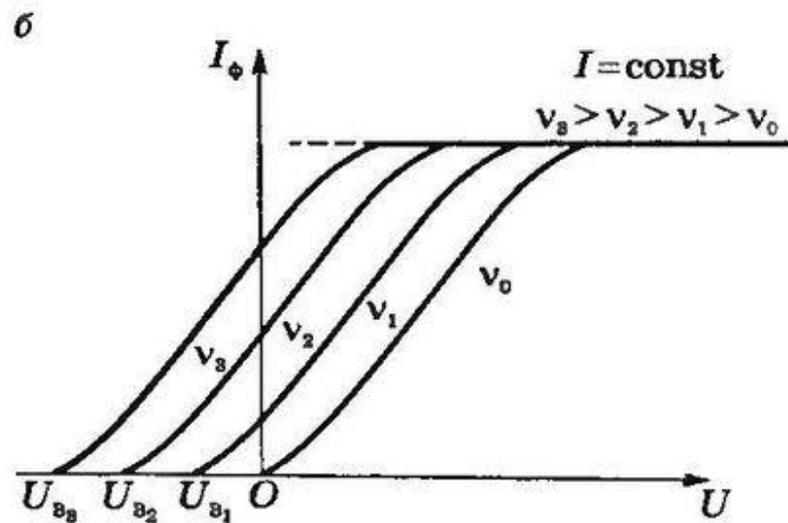
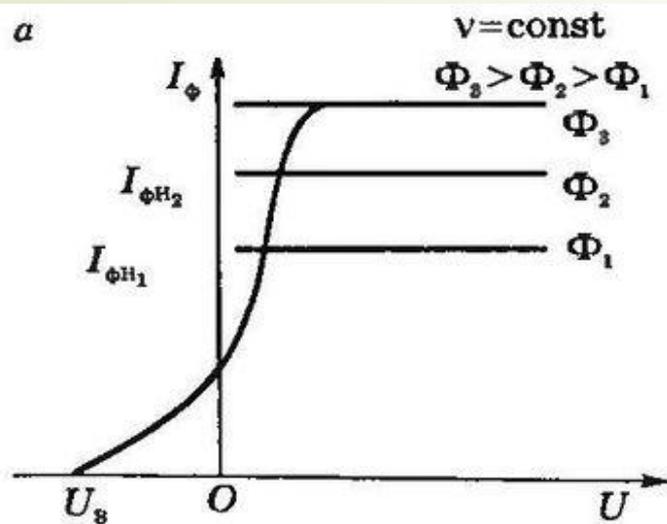


К удивлению ученых, величина U_3 оказалась не зависящей от интенсивности падающего светового потока. Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты света.

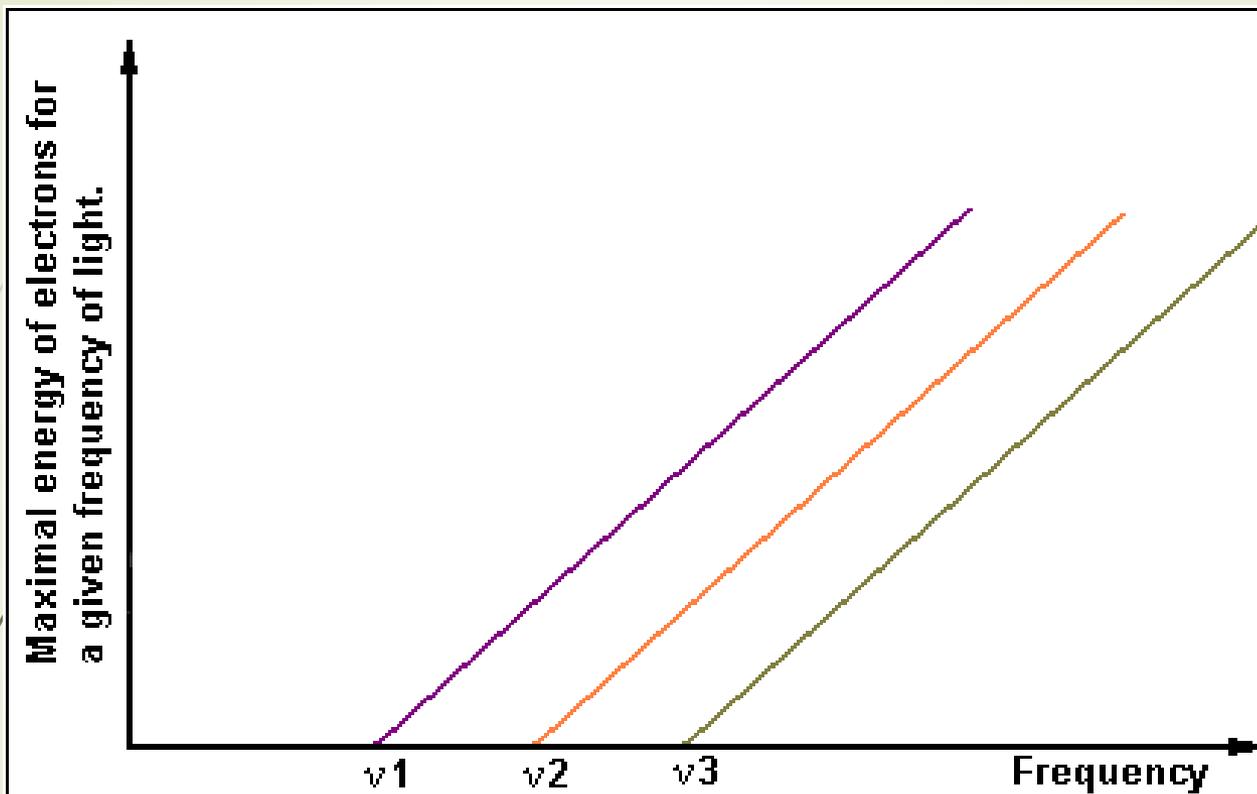
Зависимость запирающего потенциала U_3 от частоты падающего света.



Зависимость вольт-амперных характеристик внешнего фотоэффекта от интенсивности и частоты света



Тормозящее (запирающее) напряжение и красная граница фотоэффекта зависят от материала из которого изготовлен фотокатод



The diagram shows the interdependence between light frequency and the maximal energy of electrons emitted from metal. It shows the interdependence for three different metals. See that it clearly shows the limiting frequencies - different for different metals

Зависимость запирающего потенциала U_3 от частоты падающего света для фотокатодов из трех различных металлов

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, вырываемых 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 $\nu > \nu_{\min}$

Основываясь на волновой теории света **не удается** объяснить ряд экспериментальных закономерностей фотоэффекта

наличие **красной границы** (при любой длине волны, если свет обладает достаточной интенсивностью, можно ожидать высвобождения электронов из металлов и красной границы фотоэффекта не должно быть)

независимость скорости электрона от величины светового потока

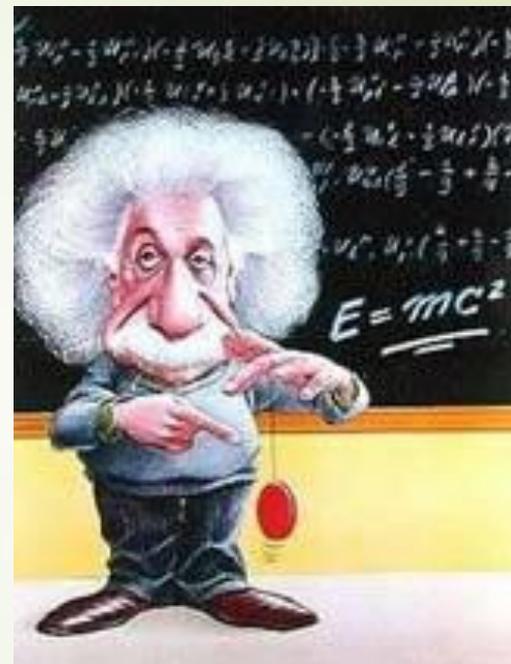
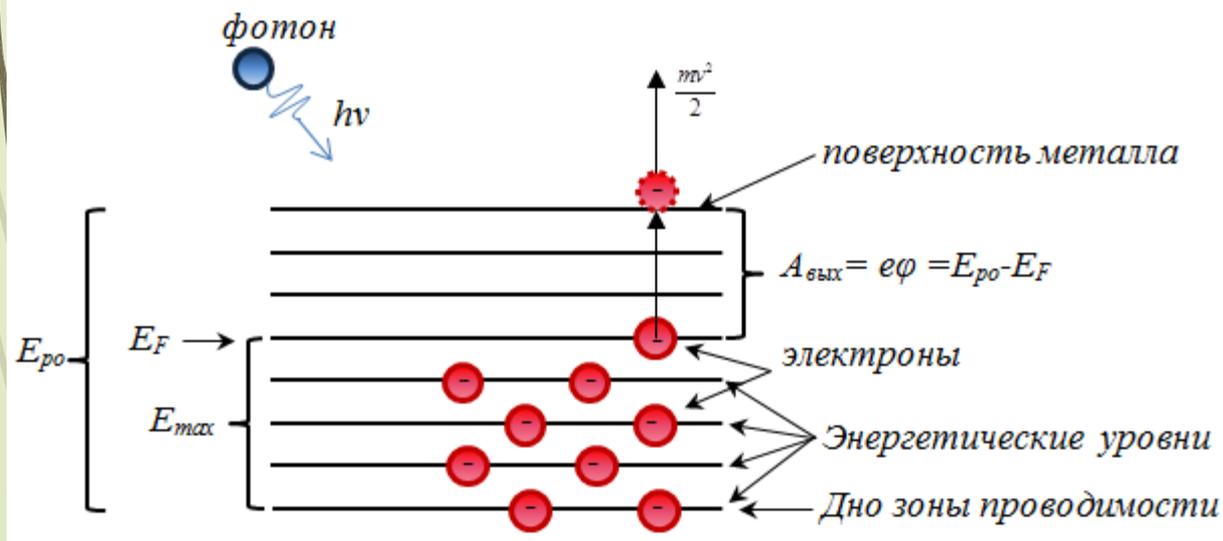
(с волновой точки зрения кинетическая энергия фотоэлектрона должна была бы зависеть от интенсивности света, с увеличением которой электрону передавалась бы большая энергия)

безынерционность фотоэффекта (электронам необходимо время, пока они накопят энергию, превышающую работу выхода. Следовательно, фотоэффект не может быть безынерционен)

Таким образом, электромагнитная теория света оказалась неспособной полностью объяснить закономерности фотоэффекта

А. Эйнштейн в 1905 г., опираясь на гипотезу М. Планка о квантах (свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой $E = h\nu$), предложил новое объяснение фотоэлектрических явлений, получившее название квантовой теории фотоэффекта.

Он предположил, что свет не только излучается, но и распространяется и поглощается отдельными фотонами, каждый из которых имеет энергию, равную $h\nu$. Интенсивность облучения катода определяется числом фотонов, падающих в единицу времени на единицу поверхности катода; энергия же каждого фотона определяется частотой падающего излучения.



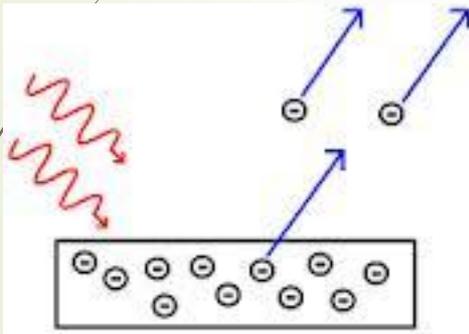
Именно за квантовую теорию фотоэффекта Эйнштейн получил в 1921 г. Нобелевскую премию

При падении пучка фотонов на поверхность металла предполагается, что происходит соударение фотона с электроном и что фотон отдает электрону всю свою энергию $h\nu$. Такой возбужденный электрон, двигаясь к поверхности металла, может израсходовать часть A_1 своей энергии на неупругие столкновения внутри металла; при выходе же из металла он израсходует еще энергию A на работу выхода.



Памятник Эйнштейну в Вашингтоне, (Albert Einstein Memorial located on the public grounds of the U.S. National Academy of Sciences, Washington, D.C.)

$$E = h\nu$$



$$h\nu = \frac{mV^2}{2} + (A + A_1)$$

закон Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Работа выхода электрона из металла- энергия, которую необходимо сообщить электрону в металле, чтобы переместить его в точку с потенциалом, равным нулю, например, на бесконечность.

Из закон Эйнштейна следует, что при частоте света $\nu = \nu_0$, при которой энергия фотона равна работе выхода A , кинетическая энергия электрона станет равной нулю, и фотоэффект наблюдаться не будет.

$$h\nu = \frac{mV^2}{2} + (A + A_1)$$

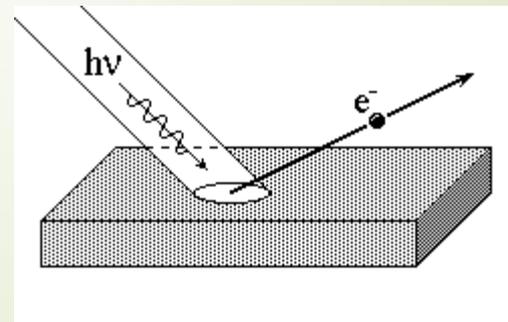
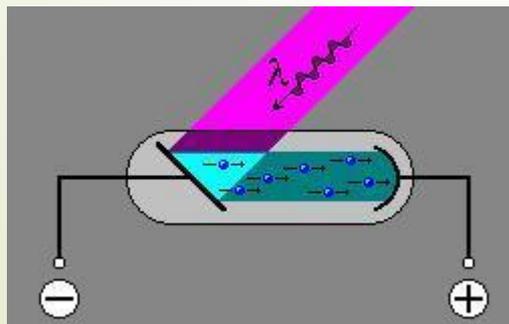
Частота ν_0 или соответствующая ей длина волны

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$$

есть **красная граница фотоэффекта** для данного вещества. Для вычисления ее надо в законе Эйнштейна положить $mV^2/2 = 0$. Тогда:

$$h\nu_0 = 0 + A \longrightarrow \nu_0 = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{h \cdot c}{A}$$

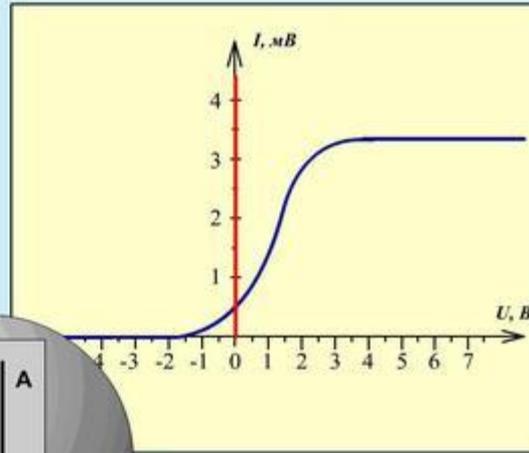
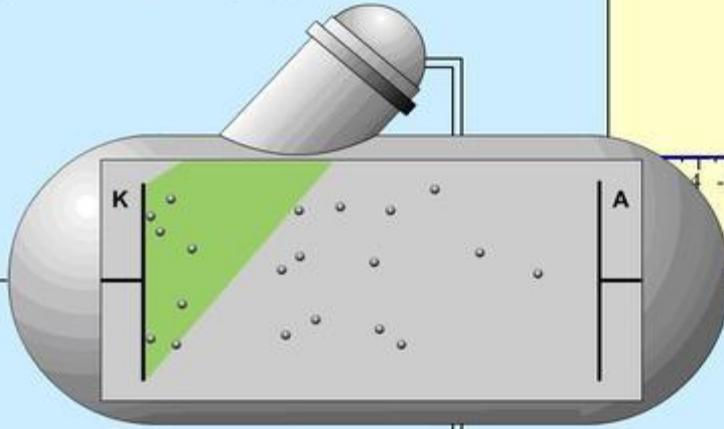
Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота ν_0 , при которой еще возможен внешний фотоэффект.



Фотоэффект

Материал анода и катода: Цезий (Cs)

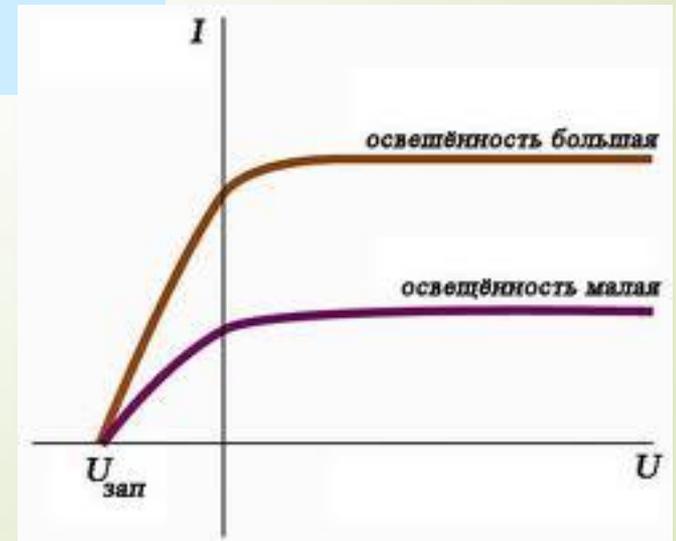
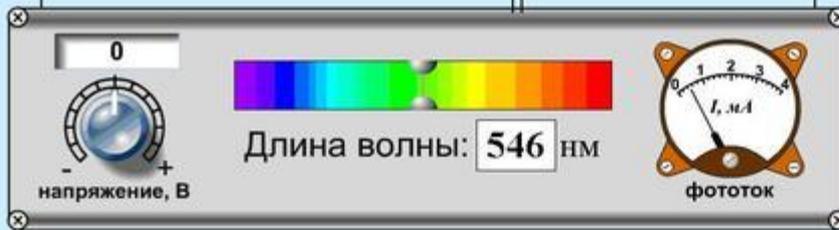
$$A(\text{Cs}) = 3,024 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$



Формула Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж)}$$



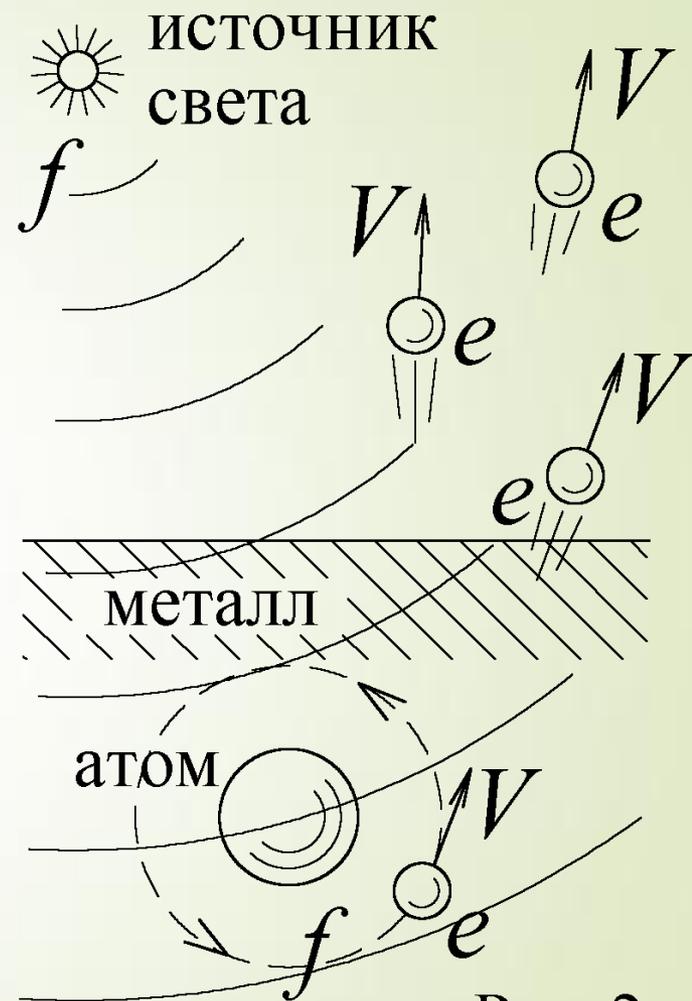
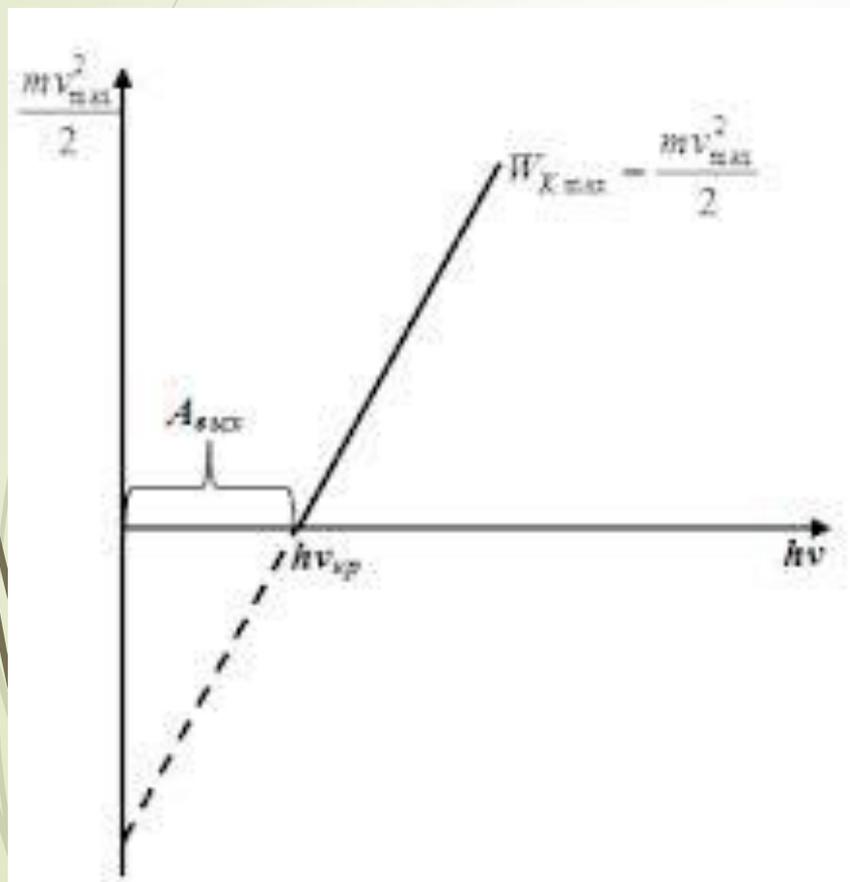
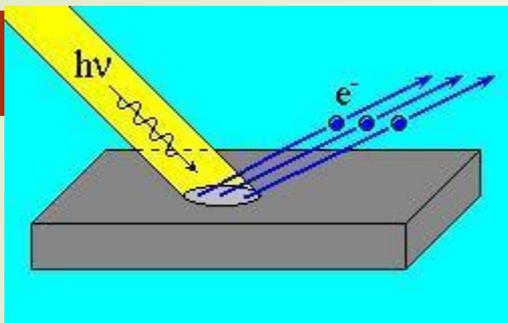
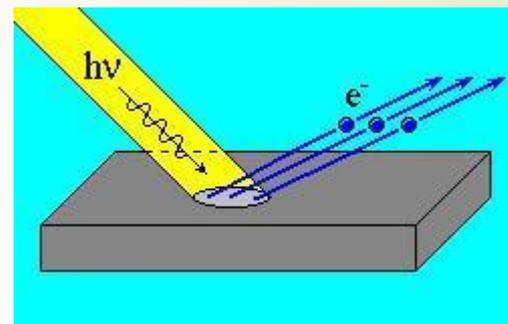
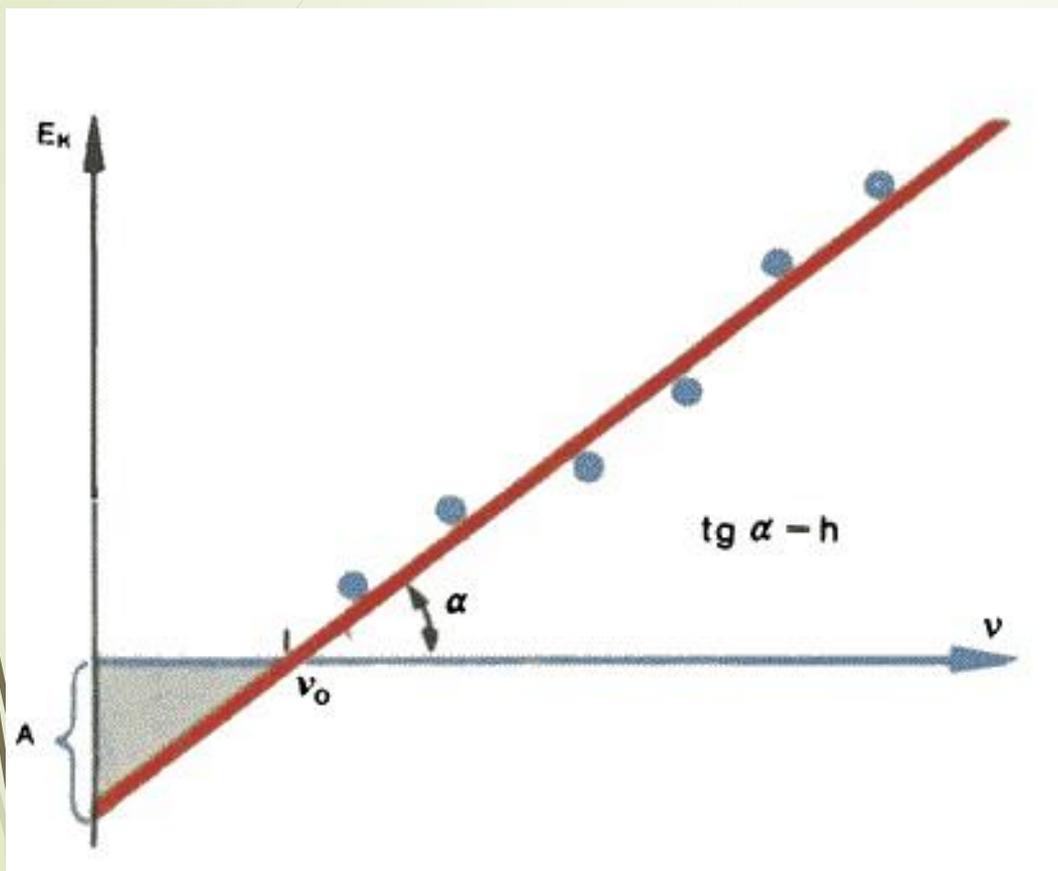


Рис. 2.
Природа фотоэффекта.

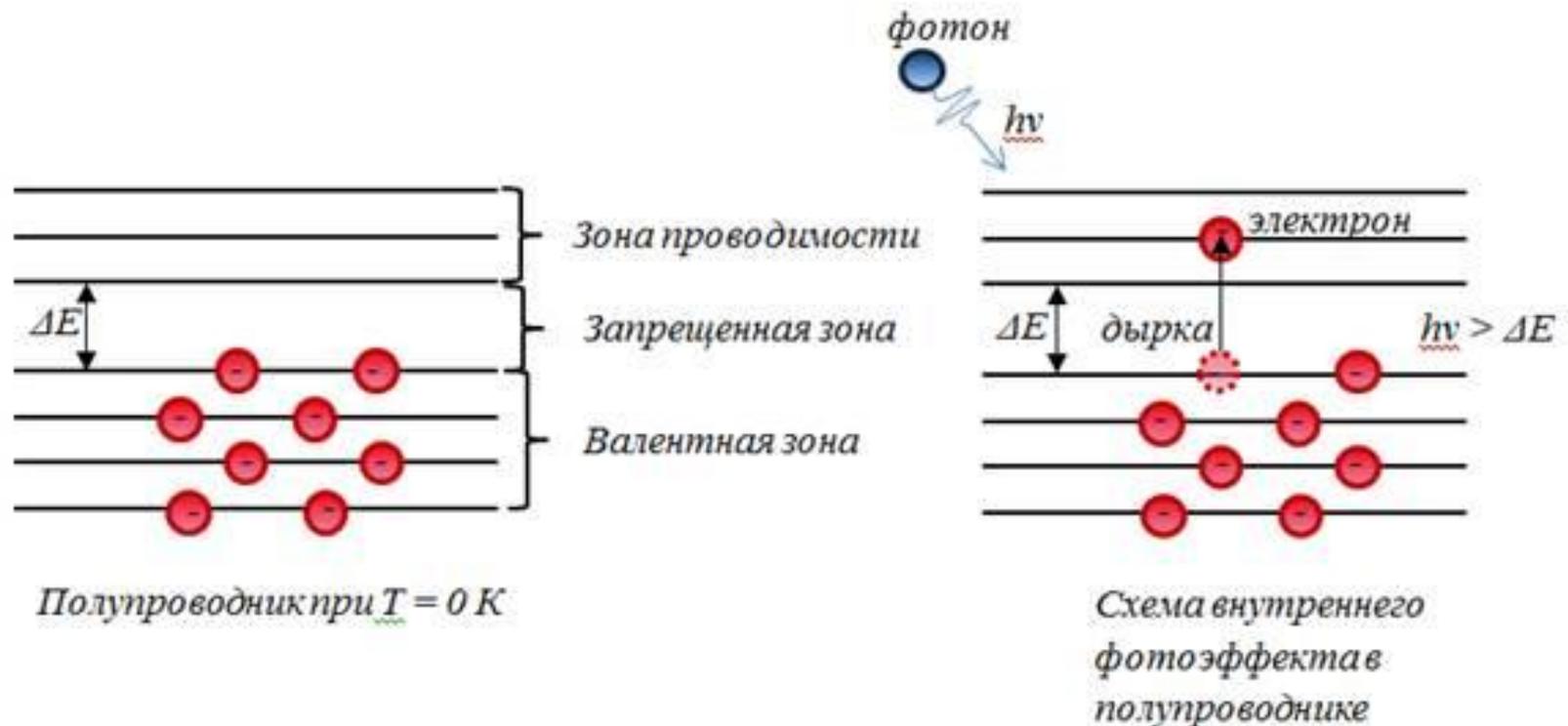
Зависимость кинетической энергии электрона от частоты падающего на поверхность металла света. ν_0 -частота, при которой электроны начинают выходить из металла («красная граница»)



Внутренний фотоэффект

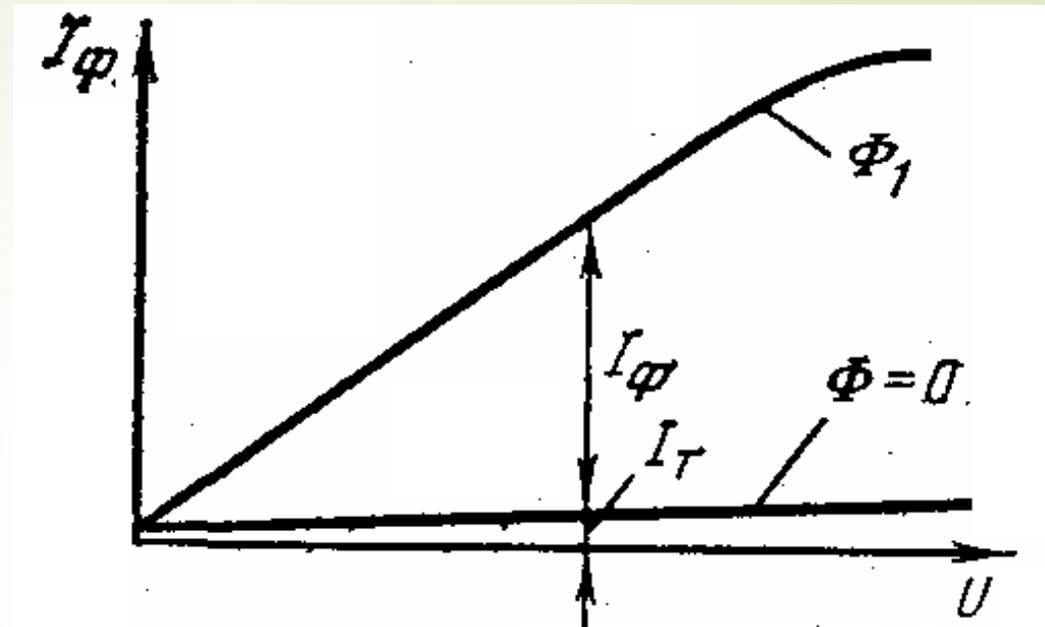
При облучении некоторых полупроводников или диэлектриков освобождаемые электроны не выходят наружу, а, оставаясь внутри этих тел, увеличивают их **электропроводность**.

В металлах - внутренний фотоэффект не обнаруживается в силу того, что концентрация свободных электронов в них очень велика; добавление небольшого числа электронов за счет внутреннего фотоэффекта не практически изменяет этой концентрации.



Фотосопротивление, в котором используется внутренний фотоэффект, не обладает током насыщения.

фототок в фотосопротивлении зависит не только от лучистого потока, но и от приложенного напряжения



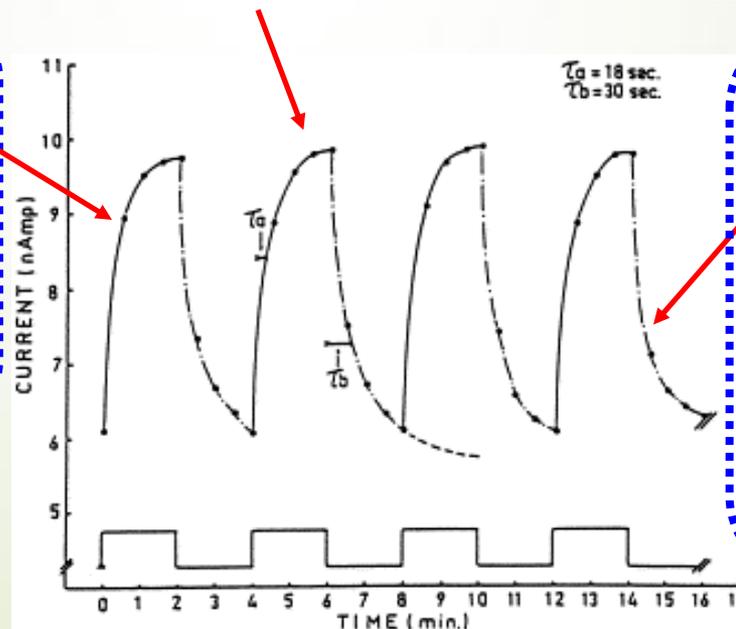
У фотосопротивлений зависимость фототока от величины лучистого потока имеет нелинейный характер при сильном освещении (при слабом освещении фототок почти пропорционален световому потоку),

Фотоэлектрические процессы в фотосопротивлениях обладают инерционностью, т.е. фототок не сразу достигает своего максимального значения.

Инерционность фотосопротивлений объясняется тем, что электроны, освобожденные светом, находятся в свободном состоянии в течение конечного отрезка времени τ (от 10^{-3} до 10^{-7} с), называемого **временем жизни фотоэлектронов**, по истечении которого каждый фотоэлектрон рекомбинирует с дыркой и возвращается в связанное состояние

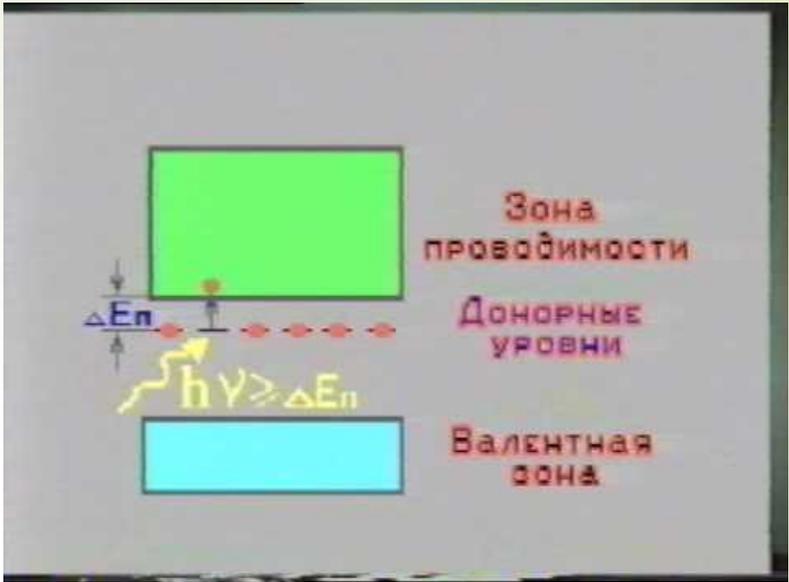
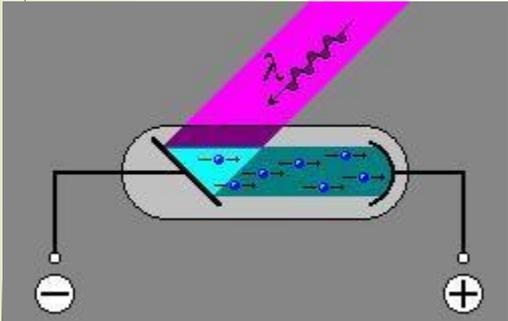
По истечении времени τ устанавливается динамическое равновесие между числом возникающих и числом рекомбинирующих фотоэлектронов - максимум фототока при данном световом потоке

После начала облучения, количество образующихся фотоэлектронов превосходит число рекомбинирующих - происходит нарастание фототока



После выключения света все фотоэлектроны рекомбинируют в среднем за время τ - происходит спадание фототока.

Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота ν_0 , при которой еще возможен внешний фотоэффект.



У собственного беспримесного полупроводника фотон с энергией, равной или большей ширины запрещённой зоны переводит электрон из валентной зоны в зону проводимости.

Красная граница для внутреннего фотоэффекта будет определяться **шириной запрещенной зоны** (величиной ее энергии E_3)

