

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Доцент Пустовалов Г.Е.

Москва 2011 г.

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ.

Действие света на вещество.

Действие света на вещество состоит в сообщении светом веществу энергии, приносимой световой электромагнитной волной. Эта энергия частично превращается в тепло, повышая температуру поглощающего свет тела, частично же переходит в другие виды энергии, вызывая тем самым целый ряд разнообразных явлений. Действие света на вещество может быть *механическим* – давление света на тело, *химическим* – возбуждение различных химических реакций (примером может служить фотосинтез в листьях растений). Оно может приводить к *рассеянию света* и *люминесценции* – свечению тела, продолжающемуся спустя некоторое время после облучения тела светом. Наконец, под действием света в веществе могут возникать *фотоэлектрические явления*, суть которых состоит в том, что входящие в состав вещества электроны, получив энергию от электромагнитной волны, каким-либо образом изменяют своё местоположение.

Из фотоэлектрических явлений мы здесь подробно остановимся на фотоэлектрическом эффекте (фотоэффекте). Различают внешний и внутренний фотоэффекты. *Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия)* представляет собой испускание с поверхности твёрдых или жидких тел электронов под действием световой волны. Обнаруживается и измеряется внешний фотоэффект по фототоку – току электронов, выходящих из облучаемого светом вещества в другую среду (обычно в вакуум). *Внутренним фотоэффектом* называют перераспределение электронов между энергетическими уровнями твёрдого тела, происходящее под действием проникшего внутрь тела света. Наблюдается внутренний фотоэффект только в диэлектриках и полупроводниках. В случае внутреннего фотоэффекта в отличие от внешнего электроны остаются внутри тела. При этом в веществе изменяются концентрация носителей заряда (электронов и дырок) и их подвижность, что приводит к изменению электрических свойств вещества. Внутренний фотоэффект обнаруживается по изменению проводимости тел (*фотопроводимость*), либо по возникновению электродвижущей силы (*фотоэдс*) в тех местах, где имеются какие-либо неоднородности свойств вещества, например, на границе между двумя разнородными телами (*вентильный фотоэффект*).

Внешний фотоэффект.

Изучение внешнего фотоэффекта производится обычно при помощи схемы, изображённой на рис. 1. В запаянном стеклянном сосуде, в котором создан высокий вакуум, находятся два электрода: катод (в этом случае называемый также фотокатодом) и анод. Между катодом и анодом создаётся напряжение, величину которого можно изменять с помощью потенциометра

и измерять вольтметром. Меняя местами полюса источника ЭДС, можно изменять знак напряжения между анодом и катодом. Свет падает на катод через кварцевое окно в сосуде. Вылетающие из катода электроны, попадая на анод, создают в цепи ток (этот ток часто называют фототоком. Сила тока i измеряется гальванометром. Типичная зависимость силы тока i от напряжения U при неизменной интенсивности падающего на катод света с

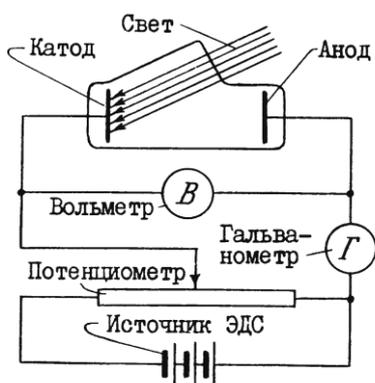


Рис. 1

данной длины волны – вольтамперная характеристика - изображена на рис. 2. Если анод имеет положительный знак, а катод отрицательный, то сила фототока растёт от значения i_0 (при $U=0$) до некоторой постоянной величины i_H - тока насыщения. Наличие тока насыщения объясняется тем, что под действием света электроны вылетают с катода по различным направлениям и при малых напряжениях между анодом и катодом все на анод не попадают. При достаточно большом положительном напряжении на анод попадают все электроны, вылетающие из катода, поэтому дальнейшее увеличение

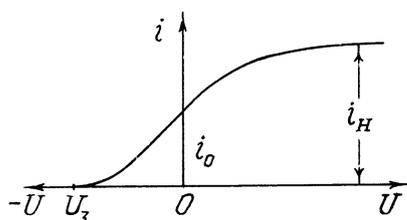


Рис. 2

напряжения U к росту тока не приводит. При создании между катодом и анодом тормозящего поля (анод отрицательный, а катод положительный) сила фототока спадает до нуля, когда величина напряжения между катодом и анодом достигает некоторого значения U_3 , при котором задерживаются все электроны, вылетающие из катода. Величина U_3 определяется максимальной скоростью $v_{\text{макс}}$, которую могут иметь электроны, покидая катод. Согласно закону сохранения энергии

$$eU_3 = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (1)$$

Здесь e - заряд электрона, m - его масса.

При исследовании фотоэффекта в зависимости от свойств света, падающего на катод, были установлены следующие закономерности (законы фотоэффекта).

1. Фотоэффект практически безынерционен: промежуток времени от начала освещения до момента возникновения тока определяется временем пролёта электронов от катода к аноду (меньше $10^{-9} c$).

2. Ток насыщения i_H и, следовательно, число электронов, вылетающих из катода в единицу времени, пропорциональны интенсивности падающего на катод света (закон Столетова).

3. Величина задерживающего напряжения U_3 и, следовательно, максимальная кинетическая энергия покидающих катод электронов растут линейно при возрастании частоты ω падающего на катод света, но не зависят от интенсивности света I .

4. Для каждого вещества существует так называемая *красная граница фотоэффекта* – частота ω_{\min} (или длина волны λ_{\max}) такая, что свет меньшей частоты (или большей длины волны) вызвать фотоэффект не может.

Волновая теория света не в состоянии объяснить законы фотоэффекта. С точки зрения волновой теории энергия, приобретаемая электроном при фотоэффекте, должна определяться интенсивностью света. Интенсивность же пропорциональна квадрату амплитуды световой волны и никак не связана с её частотой. Поэтому волновая теория не может объяснить зависимость задерживающего напряжения от частоты и независимость его от интенсивности света. Чтобы покинуть поверхность какого-либо тела, электрон должен получить некоторое количество энергии, превышающее так называемую работу выхода $A_{\text{вых}}$. Можно подсчитать поток энергии, который приходится на один электрон поверхностного слоя тела, когда на это тело падает световая волна с минимальной интенсивностью, при которой фотоэффект наблюдается на опыте. Оказывается, что в этом случае волна может сообщить электрону энергию, равную $A_{\text{вых}}$, лишь за время порядка десятков минут. Следовательно, ток при фотоэффекте должен бы, вопреки опытным данным, достигать предельной величины не сразу после начала освещения, а с большим запаздыванием, зависящим от интенсивности света. Не находит объяснения также и наличие красной границы фотоэффекта.

Объяснение всех законов фотоэффекта оказалось возможным лишь в рамках квантовой теории. Эйнштейн дополнил гипотезу Планка о том, что свет испускается квантами, предположив, что испущенный источником света квант распространяется со скоростью света как нечто целое и поглощается также целиком. Квант света получил название *фотон*. Его энергия

$$E = \hbar\omega, \quad (2)$$

где $\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ω - круговая частота электромагнитного излучения. При поглощении кванта электрон может получить порцию энергии, равную $\hbar\omega$, - ни больше, ни меньше. Из закона сохранения энергии следует, что поглощённая электроном энергия расходуется на совершение работы выхода и на приобретение электроном кинетической энергии:

$$\hbar\omega = \frac{mv_{\max}^2}{2} + A_{\text{вых}}. \quad (3)$$

Сюда входит максимальная кинетическая энергия вылетевших из поверхности катода электронов, поскольку свет может высвободить электроны не только с самой поверхности, но и из более глубоких слоёв катода. Последние могут растратить часть своей энергии на столкновение с частицами вещества при своём движении к поверхности. Уравнение (3) называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта.

С точки зрения квантовой теории легко объяснить все законы фотоэффекта. С помощью формулы (1) уравнению (3) можно придать вид

$$\frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} = eU_3 = \hbar\omega - A_{\text{вых}}, \quad (4)$$

т.е. величина задерживающего напряжения U_3 действительно является линейной функцией частоты света. Ясно также, что при $\hbar\omega < A_{\text{вых}}$ энергии кванта недостаточно для совершения работы выхода (кинетическая энергия не может быть отрицательной). Поэтому, если частота падающего света меньше величины $\omega_{\text{мин}} = \frac{A_{\text{вых}}}{\hbar}$, а длина волны его больше $\lambda_{\text{макс}} = \frac{2\pi c}{\omega_{\text{мин}}}$, то

фотоэффекта не возникает. Опыт хорошо подтверждает связь между работой выхода и красной границей фотоэффекта. Закон Столетова объясняется следующим образом. Согласно представлению о квантах, интенсивность света равна $I = n_0\hbar\omega$, где n_0 - число квантов, проходящих в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения света. Число же вылетевших с поверхности катода электронов, определяющее силу тока насыщения, пропорционально числу падающих на катод квантов. Объясняется и безынерционность: как только появляются кванты с необходимой энергией, сразу же появляются и выбитые ими электроны.