

# Фотоэффект

Гринберг Я. С.

14 декабря 2008 г.

## 1. Явление фотоэффекта

*Фотоэлектрическим эффектом* или кратко *фотоэффектом* называется явление испускания электронов с поверхности металла под действием падающей на эту поверхность световой волны.

По-видимому, это явление впервые наблюдал Генрих Герц в 1887 г. Исследуя свойства электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом, Герц обнаружил, что освещение ультрафиолетовым светом отрицательно заряженного электрода искрового промежутка облегчает проскакивание искры между этими электродами. Дальнейшие исследования этого явления показали, что фотоэффект вызывается не только ультрафиолетовыми лучами. Почти все щелочные металлы - литий, натрий, калий, рубидий, цезий, обнаруживают явление фотоэффекта при их облучении электромагнитными волнами видимого диапазона.

К началу 20-го века накопленный экспериментальный материал позволил установить несколько свойств, характеризующих фотоэффект.

1. Максимальная кинетическая энергия вырванных электронов линейно зависит от частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности. Интенсивность оказывает влияние только на количество вырванных электронов, но совсем не влияет на их максимальную кинетическую энергию.

2. Существует низкочастотная граница (порог) фотоэффекта, то есть, такая частота  $\nu_0$ , ниже которой фотоэффект не наблюдается.

3. Фотоэффект является безинерционным. Фототок появляется мгновенно вместе с началом освещения. Еще в первых экспериментах была получена верхняя граница времени запаздывания, которая определялась погрешностью измерительной аппаратуры. Эта граница составляла несколько наносекунд ( $10^{-9}$  с). Таким образом, в пределах точности эксперимента не наблюдается никакого запаздывания между началом освещения и временем появления фотоэлектрона.

Ни один из этих законов фотоэффекта не может быть объяснен волновой теорией света. Согласно этой теории электрическая составляющая электромагнитной волны  $E(t) = E_0 \cos \omega t$ ,  $\omega$ - частота волны,  $E_0$ - амплитуда ее электрической составляющей. Интенсивность световой волны  $I \approx E_0^2$ . Поскольку электроны в металле не являются свободными, то под действием электромагнитной волны, электроны начнут колебаться вблизи их положения равновесия, причем энергия колебаний будет пропорциональна  $E_0^2$ , то есть,  $I$ . Если интенсивность достаточно велика, то энергия колебаний может превысить энергию связи электрона в металле, и такой электрон

покинет металл. Поэтому, на качественном уровне волновая теория может объяснить сам факт вырывания электрона. Но ни один из упомянутых трех законов волновая теория объяснить не может. Более того, эти три закона полностью противоречат волновой теории. В самом деле, при уменьшении интенсивности кинетическая энергия вырванных электронов должна уменьшаться, порог должен быть, но не по частоте а по интенсивности, и, наконец, с точки зрения волновой теории фотоэффект должен протекать с существенным запаздыванием. Рассмотрим последний аргумент на следующем примере.

**Пример.** Пластика калия находится на расстоянии  $r = 0.5$  м от источника света мощностью  $P_0 = 1.0$  Вт. Сколько времени понадобится, чтобы пластинка накопила достаточно энергии (в данном случае это 1.8 эВ) для того, чтобы электрон мог покинуть металл?

**Решение.** Предположим, что электрон поглощает энергию с площади окружности, радиус которой равен радиусу атома калия ( $1.3 \times 10^{-10}$ ) м. Если источник света излучает равномерно по всем направлениям, то интенсивность света  $I$  на расстоянии  $r$  будет:

$$I = \frac{P_0}{4\pi r^2} = \frac{1.0 \text{ Вт}}{4\pi(0.5 \text{ м})^2} = 0.32 \text{ Вт/м}^2.$$

Площадь поглощения  $S = \pi(1.3 \times 10^{-10} \text{ м})^2 = 5.3 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ , так что скорость поглощения энергии есть:

$$P = IS = (0.32 \text{ Вт/м}^2) \times (5.3 \times 10^{-20} \text{ м}^2) = 1.7 \times 10^{-20} \text{ Дж/с}.$$

Считая, что вся эта энергия поглощается электроном, получим время необходимое, чтобы электрон накопил энергию 1.8 эВ:

$$\tau = \left( \frac{1.8 \text{ эВ}}{1.7 \times 10^{-20} \text{ Дж/с}} \right) \left( \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}}{1 \text{ эВ}} \right) = 17 \text{ с}.$$

Хотя наш выбор поглощающей площади достаточно произвольный, тем не менее, при любом разумном выборе величины этой площади мы бы все равно получили время запаздывания порядка секунд, что легко можно зафиксировать на эксперименте.

## 2. Фотонная теория Эйнштейна

Работа Эйнштейна, в которой было дано объяснение фотоэффекта появилась в 1905 г. Эйнштейн выдвинул гипотезу, что свет состоит из отдельных частиц, которые впоследствии были названы *фотонами*. Энергия этих частиц связана с частотой электромагнитной волны  $\nu$  посредством постоянной Планка  $h$ :

$$E = h\nu$$

В рамках этой гипотезы все законы фотоэффекта получают свое естественное объяснение. Если применить к процессу столкновения двух частиц- электрона и фотона, закон сохранения энергии, то мы получим

$$h\nu = A + K_{max}$$

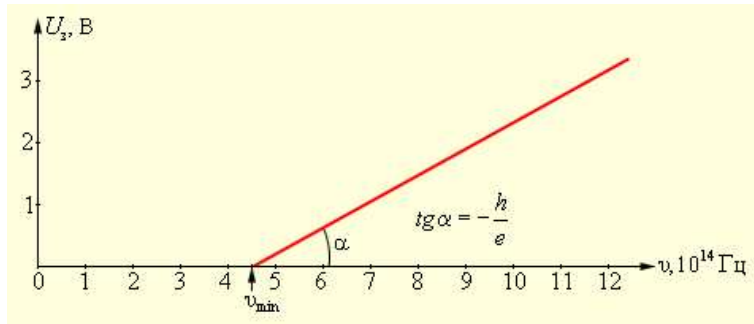


Рис. 1: Зависимость энергии от частоты

где  $A$  - работа выхода или энергия связи электрона в металле,  $K_{max}$  - максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона. Работа выхода - это та минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул металл. Для подавляющего большинства металлов работа выхода не превышает нескольких электрон-вольт.

Скорость фотоэлектронов можно определить, если известна кинетическая энергия вылетевших электронов. Если энергия падающего излучения много меньше энергии покоя электрона  $h\nu \ll m_0c^2 = 0.5\text{МэВ}$ , то это означает, что скорость вылетевшего электрона будет много меньше скорости света и, следовательно, его скорость можно определять по нерелятивистской формуле:  $K_{max} = mv_{max}^2/2$ . Если же  $h\nu$  сравнима или больше  $m_0c^2$ , то для вычисления скорости электрона следует пользоваться релятивистской формулой

$$K_{max} = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

где  $\beta = v/c$ .

В рамках фотонной гипотезы интенсивность света при монохроматическом излучении есть:

$$I = nh\nu$$

где  $n$  - число фотонов.

Это объясняет почему число фотоэлектронов, то есть, фототок, пропорционален интенсивности. Здесь считается, что вся энергия фотона передается электрону, который на пути из металла не теряет своей энергии. В реальном эксперименте электроны вылетают с разными скоростями. Их энергетический спектр простирается от нуля до  $K_{max}$ . Корректное вычисление энергетического спектра фотоэлектронов можно провести только в рамках квантовой механики, учитывающей квантовые свойства электронов в металле. на качественном уровне объяснение состоит

в следующем. Во-первых, не все электроны в металле имеют одинаковую энергию связи (работу выхода). Те значения работы выхода, которые приводятся в справочниках относятся только к валентным электронам, то есть, электронам наименее связанным с атомами. Если же энергия налетающего фотона значительно превышает работу выхода валентных электронов, то такой фотон может выбить и другой (не валентный) электрон, который сильнее связан с атомом. Кинетическая энергия такого фотоэлектрона будет, конечно, меньше, чем кинетическая энергия валентного электрона. Во-вторых, вылетая из металла, электрон может передать часть своей энергии другим электронам, примесям или на возбуждение колебаний кристаллической решетки.

Существование пороговой частоты  $\nu_0$  непосредственно следует из уравнения Эйнштейна:

$$h\nu_0 = A$$

И, наконец, следует отметить, что безинерционность фотоэффекта, то есть, мгновенная передача энергии от фотона к электрону, следует из закона сохранения энергии-уравнения Эйнштейна. В самом деле, если предположить, что электрон накапливает энергию за время  $\tau$ , то количество энергии, падающей на поверхность фотоэлемента, определялось бы выражением  $IS\tau$  (см. приведенный выше пример). Если предположить далее, что невозможность экспериментального определения времени задержки связана с его малостью, то для достаточно коротких времен, энергия, аккумулированная электроном, вероятно не будет превышать работы выхода. Поскольку электрон все же вылетает, то, очевидно, в этом случае закон сохранения энергии не выполняется.

### 3. Контактная разность потенциалов

В вакуумном фотоэлементе обычно между катодом и анодом имеется контактная разность потенциалов  $V_K = A_2 - A_1$ , где  $A_2, A_1$ - работы выхода фотоэлектродов. Электрод с большей работой выхода заряжается отрицательно, с меньшей- положительно. Если к тому же между катодом и анодом приложено внешнее напряжение  $V_0$ , то формула Эйнштейна принимает вид  $h\nu = A + eV_K - eV_0 + K$ . При некотором отрицательном потенциале  $V_0 = -V_g$  (который называют запорным) поток фотоэлектронов прекращается:  $h\nu = A + eV_K + eV_g$ .

Красная граница фотоэффекта определяется как максимальная длина волны  $\lambda_0$  (или минимальная частота падающего фотона  $\nu_0$ ), при которых еще возможен фотоэффект:  $h\nu_0 = A$  или  $\lambda_0 = hc/A$ .

Фототок вакуумного фотоэлемента  $I$  определяется как произведение заряда электрона на число фотоэлектронов  $N_e$ , падающих на анод в единицу времени:  $I = eN_e$ . В свою очередь величина  $N_e$  пропорциональна числу фотонов  $N_{ph}$ , падающих на фотокатод в единицу времени  $N_e = \gamma N_{ph} = \gamma \frac{P}{h\nu}$ , где  $P$  мощность падающего излучения. Таким образом фототок вакуумного фотоэлемента есть:

$$I = \gamma e \frac{P}{h\nu}$$

**Пример.** Электроды вакуумного фотоэлемента (один цезиевый, другой медный) замкнуты снаружи накоротко. Цезиевый электрод освещают монохроматическим

электромагнитным излучением. Найти: а) длину волны излучения, при которой появится фототок; б) максимальную скорость электронов, подлетающих к медному электроду, если длина волны излучения равна 220 нм.

## 4. Немного истории

В наше время, когда явление фотоэффекта изучают в школе, трудно себе представить, что гипотеза Эйнштейна о том, что свет состоит из отдельных частиц-фотонов, не вызвала у современников никакого энтузиазма. Более того, многие выдающиеся физики, как, например, Макс Планк, считали гипотезу Эйнштейна ошибочной. В 1912 г. группа известных физиков, среди которых был и Планк, направила в министерство просвещения Германии ходатайство об избрании Эйнштейна в Прусскую Академию наук. Отдавая дань выдающемуся вкладу Эйнштейна в развитие физики, о его гипотезе световых квантов в этом документе говорилось буквально следующее: "То, что он в своих рассуждениях иногда выходит за пределы цели, как, например, в своей гипотезе световых квантов, не следует слишком ставить ему в упрек". Очевидно, что эти физики считали гипотезу световых квантов Эйнштейна, мягко говоря, заблуждением.

Причина этого состояла, прежде всего, в том, что фотонная теория в то время никак не могла объяснить такие хорошо изученные явления, как интерференция и дифракция световых волн. Интерферировать могут только волны, но не частицы!. Этот парадокс удалось окончательно разрешить только два десятка лет спустя, когда была создана квантовая механика. Кроме того, надо также иметь в виду, что первые два закона фотоэффекта можно объяснить, не прибегая к фотонной теории, на основе квантовой гипотезы Планка, в основе которой лежит представление о том, что электроны поглощают энергию дискретными порциями. Действительно, если предположить, что электрон в соответствии с гипотезой Планка поглощает энергию только порциями  $h\nu$ , то это позволяет легко объяснить первые два свойства фотоэффекта. И только третье свойство фотоэффекта, его безинерционность, гипотеза Планка объяснить не может.

Теория Эйнштейна позволяет независимо определить постоянную Планка из зависимости задерживающего потенциала от частоты. Однако, в то время (1905 г.) величина заряда электрона не была известна с достаточной точностью. Это оказалось возможным только после того как Милликен в 1910 г. измерил заряд электрона с необходимой точностью. Остается добавить, что в 1921 г. Эйнштейн получил Нобелевскую премию именно за объяснение законов фотоэффекта на основе фотонной гипотезы.

В этой связи интересно отметить, что экспериментально фотон как частица был выделен только в 1986 г., когда научились регистрировать однофотонное излучение (P. Grangier, G. Roger and A. Aspect, Europhysics Letters vol. 1, pp. 173-179 (1986)).