

# КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

## Фотоэлектрический эффект

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется испускание веществом электронов под действием электромагнитного излучения. Принято выделять три вида фотоэффекта:

- **внешний фотоэффект** - эмиссия (испускание) электронов с поверхности металла под действием электромагнитного излучения;
- **внутренний фотоэффект** - изменение концентрации свободных зарядов в веществе (полупроводниках и диэлектриках);
- **вентильный фотоэффект** - явление, при котором фотоэлектроны, переходя через поверхность раздела двух веществ, создают разность потенциалов (полупроводник - полупроводник, полупроводник – металл).

Г. Герц, проводя опыты с вибратором, приведшие к открытию электромагнитных волн, обнаружил, что при облучении ультрафиолетом воздушного зазора возникновение искры (пробой) происходит гораздо эффективнее. Дальнейшее систематическое изучение фотоэффекта, прежде всего А.Г. Столетовым, позволило опытным путем определить основные закономерности этого явления.

Экспериментальная установка для наблюдения фотоэффекта приведена на рисунке.

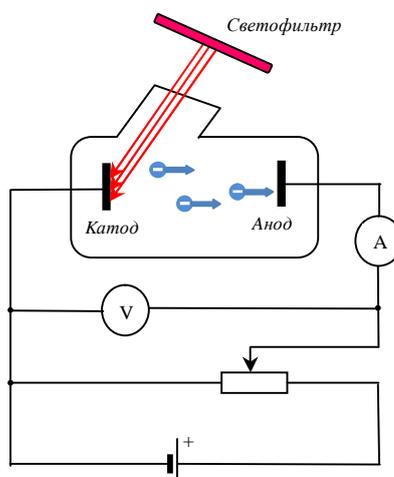


Рисунок 1

Два электрода: анод и катод размещены в вакуумированной стеклянной колбе. Потенциал анода положительный, а катода - отрицательный. Реостат служит для того, чтобы изменять разность потенциалов между электродами. Амперметр и вольтметр позволяют снять вольт-амперную характеристику. Светофильтр обеспечивает монохромность падающего на катод излучения.

Фототок возникает только при освещении отрицательно заряженного катода. Освещение анода такого эффекта не вызывает. Дальнейшие исследования выбиваемых с катода заряженных частиц в магнитных полях позволили установить, что эти частицы – электроны.

Типичные вольт-амперные характеристики фототока приведены на рисунке.

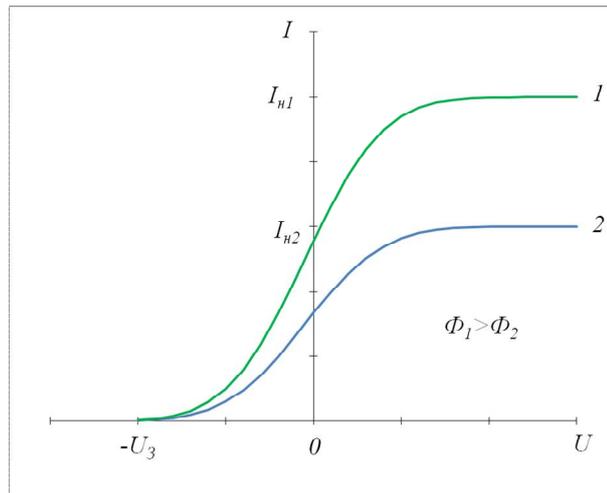


Рисунок 2

Фототок существует при нулевой разности потенциалов между анодом и катодом. С ростом разности потенциалов растет и фототок, достигая предельного значения  $I_n$ , называемого током насыщения. Фототок насыщения пропорционален освещенности катода  $\Phi$ . При изменении полярности фототок прекращается лишь при достижении напряжения  $-U_3$ , которое называется запирающим. Задерживающее напряжение не зависит от освещенности.

Существование фототока при значениях напряжения  $-U_3 < U < 0$  свидетельствует о том, что эмиттированные электроны обладают кинетической энергией. Электроны двигаются по полю до тех пор, пока их кинетическая энергия полностью не перейдет в потенциальную энергию. Тогда максимальная скорость фотоэлектронов определяется запирающим напряжением

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = eU_3.$$

Эксперименты показывают, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой и не зависит от освещенности катода. Для каждого металла фотокатода существует красная граница фотоэффекта -  $\nu_0$ , то есть минимальная частота света, при которой фотоэффект ещё возможен.

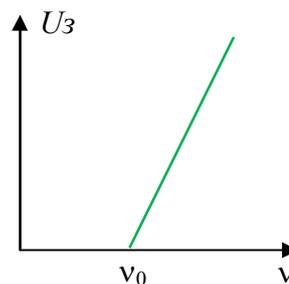


Рисунок 3

Важной особенностью фотоэффекта является его безынерционность. Временной интервал между началом освещения металла и началом эмиссии электронов не превышает наносекунды.

Фотоэлектрический эффект, как физическое явление, на первый взгляд не противоречит классической волновой теории света. Электроны, находящиеся внутри вещества, в поле электромагнитной волны могут получить энергию, достаточную для того, чтобы вырваться из кристаллической решетки.

Однако более глубокий анализ показывает, что наблюдения находятся в противоречии с волновой теорией. Так, безынерционность не находит своего объяснения в рамках волновой теории, энергия электромагнитной волны распределена в пространстве, и для того, чтобы электрон получил достаточную энергию, время облучения должно существенно превышать наблюдаемое. Максимальная скорость фотоэлектронов не может быть ограничена и должна зависеть от освещенности. Чем больше освещенность, тем больше скорость. Красная граница никак не согласуется с волновой теорией. Пусть энергия низкочастотной волны невелика, но увеличивая время освещения, можно передать электрону достаточную для эмиссии энергию.

Объяснение фотоэффекта, данное А. Эйнштейном, базируется на представлении света как потока фотонов. Кристаллическая решетка для свободных электронов служит потенциальной ямой. Покинуть потенциальную яму электрон может только получив соответствующую энергию  $A_g$ , ее называют работой выхода.

При освещении монохроматическим светом на поверхность металла попадают фотоны с энергией  $h\nu$ . Если энергия фотона превышает работу выхода,  $h\nu > A_g$ , начинается эмиссия электронов. Если же частота фотона меньше красной границы,  $\nu < \nu_0 = A_g/h$ , то фотоэффект невозможен: просто не хватает энергии для выхода из потенциальной ямы.

Работа выхода определяется строением кристаллической решетки и чистотой поверхности металла. Поэтому красная граница является константой металла.

Накопить необходимую для эмиссии энергию, поглотив последовательно несколько фотонов, электрон не может. Совершая хаотичное тепловое движение, он рассеивает энергию в столкновениях с узлами кристаллической решетки.

Передача энергии фотона электрону происходит в процессе упругого соударения, кратковременность этого процесса делает фотоэффект безынерционным.

Уравнение Эйнштейна, описывающее фотоэффект, по сути является законом сохранения энергии. Энергия поглощенного фотона расходуется на работу выхода и сообщение электрону кинетической энергии

$$h\nu = A_g + \frac{mV_{\max}^2}{2}.$$

Увеличение освещенности увеличивает количество фотонов, а, следовательно, и фотоэлектронов, приводя тем самым к росту фототока, в том числе и тока насыщения.

## **Фотоны**

Свет излучается и поглощается дискретными порциями – световыми квантами (корпускулами). Согласно предположению А. Эйнштейна распространяется свет также квантами (их называют фотонами). Фотоны движутся со скоростью света.

Поскольку масса релятивистской частицы зависит от скорости  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$ , то для фотона, движущегося со скоростью света, формально масса становится бесконечной. Единственный способ избежать этого - приписать фотону массу покоя  $m_0 = 0$ .

В соответствии с гипотезой Планка, энергия фотона  $E = h\nu$ . С другой стороны, релятивистская частица обладает энергией и массой

$$E = c\sqrt{(m_0c)^2 + p^2}, \quad m = E/c^2.$$

Тогда фотону можно приписать массу  $m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2}$  и импульс  $p_\gamma = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$ .

## Давление света

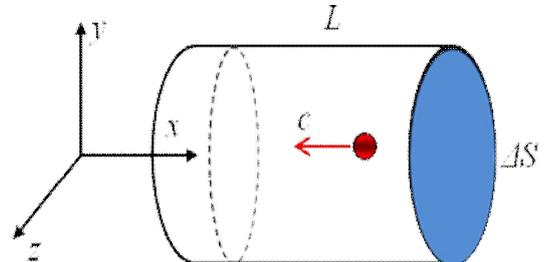
Фотон, как любая другая частица, обладающая импульсом, сталкиваясь с телом, обменивается с ним импульсом. Попадая на поверхность тяжелого неподвижного тела, фотоны передают ему импульс, оказывая, в соответствии со вторым законом Ньютона, силовое воздействие.

Рассмотрим случай нормального падения света. Если фотон поглощается поверхностью, то переданный импульс совпадает с импульсом фотона  $p_\gamma$ , а если отражается, то равен его удвоенному значению  $2p_\gamma$ .

Скорость передачи импульса (импульс, отнесенный к единице времени) определяет силу, действующую на поверхность. Сила же, действующая на единицу поверхности, есть не что иное, как давление. Пусть  $N$  – число фотонов, падающих на площадку  $\Delta S$  за время  $\Delta t$ . Если  $\rho$  – коэффициент отражения, то давление определяется суммой давлений поглощенных и отраженных фотонов

$$P = N \frac{p_\gamma}{\Delta t \Delta S} (1 - \rho) + N \frac{2p_\gamma}{\Delta t \Delta S} \rho = N(1 + \rho) \frac{p_\gamma}{\Delta t \Delta S}.$$

Выделим цилиндр, площадь основания которого  $\Delta S$ , а высота  $c\Delta t$ . Тогда число фотонов, достигших поверхности  $\Delta S$  за время  $\Delta t$ , можно записать как произведение концентрации фотонов  $n$  на объем цилиндра  $\Delta S c \Delta t$ . Тогда  $N/\Delta S \Delta t = nc$ .



Пусть  $E = p_\gamma c$  – энергия фотона, тогда объемная плотность энергии фотонов, находящихся в цилиндре, запишется как

$$w = En = p_\gamma n c, \quad \text{а} \quad \frac{p_\gamma N}{\Delta t \Delta S} = w.$$

Итак, исходя из корпускулярных представлений о природе света, приходим к заключению, что давление, оказываемое светом на поверхность твердого тела, пропорционально объемной плотности энергии

$$P = w(1 + \rho).$$

Аналогичная формула для светового давления получена и в рамках электромагнитной теории Максвелла, описывающей свет как электромагнитные волны. Световое давление было экспериментально обнаружено и измерено П. Н. Лебедевым в 1899 году.

## Эффект Комптона

Эксперименты по рассеянию рентгеновского излучения в веществе показали, что наряду с исходным излучением, с длиной волны  $\lambda_0$ , в рассеянном присутствует излучение с длиной волны  $\lambda > \lambda_0$ . Из опытов следует, что для легких атомов комптоновское смещение  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  зависит от угла рассеяния  $\theta$ , но не зависит от вещества и длины волны.

$$\Delta\lambda = \lambda_K (1 - \cos \theta), \quad \lambda_K = 0.00242 \text{ нм}.$$

В рамках классической физики этот результат выглядит парадоксально, электромагнитная волна, рассеиваясь на атомах вещества, должна сохранять свою частоту (длину волны).

С позиций квантовой физики, наблюдаемое смещение есть результат упругого столкновения фотона со свободным электроном. Таким образом эффект Комптона является прямым доказательством существования фотонов.

Упругое рассеяние фотонов может осуществляться, как на свободных электронах, так и на слабосвязанных электронах вещества. Таковыми можно считать электроны легких атомов в том случае, если энергия фотона превышает энергию связи атома. Именно поэтому в опытах Комптона фигурировали графит и жесткое рентгеновское излучение. В видимом свете эффект Комптона не наблюдается.

Столкновение покоящегося свободного электрона и фотона описывается законом сохранения импульса и энергии. Запишем их в релятивистском приближении.

Пусть  $W_0 = m_e c^2$  - энергия покоя электрона, а  $\varepsilon_{0\gamma} = h\nu_0$  - энергия фотона до столкновения, тогда

$$W_0 + \varepsilon_{0\gamma} = W + \varepsilon_\gamma,$$

где  $W$  и  $\varepsilon_\gamma$  - энергия электрона и фотона после столкновения. Поскольку

$$W = c\sqrt{(m_e c)^2 + p_e^2}, \text{ то}$$

$$m_e c^2 + h\nu_0 = c\sqrt{(m_e c)^2 + p_e^2} + h\nu.$$

Если  $\vec{p}_{0\gamma}$  и  $\vec{p}_\gamma$  - импульс фотона до и после столкновения, а  $\vec{p}_e$  - импульс, приобретенный первоначально покоящимся электроном, то

$$\vec{p}_{0\gamma} = \vec{p}_\gamma + \vec{p}_e.$$

Применяя теорему косинусов к векторной диаграмме

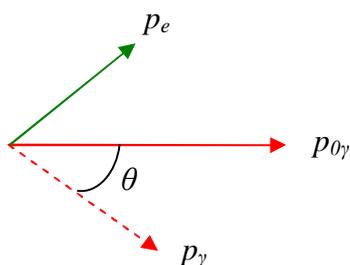


Рисунок 4  
5

получаем, что

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_{0\gamma}^2 - 2p_\gamma p_{0\gamma} \cos \theta.$$

Поскольку  $p_\gamma = h\nu/c$ , то

$$p_e^2 = \left(\frac{h}{c}\right)^2 (\nu^2 + \nu_0^2 - 2\nu\nu_0 \cos \theta).$$

Перепишем закон сохранения в виде

$$m_e c + \frac{h}{c}(\nu_0 - \nu) = \sqrt{(m_e c)^2 + p_e^2}$$

и возведем полученное выражение в квадрат, и, подставив выражение для импульса электрона, получаем

$$m_e c^2(\nu_0 - \nu) = h\nu\nu_0(1 - \cos \theta).$$

Переходя от частоты к длине волны  $\lambda\nu = c$ , получаем выражение, совпадающее с экспериментально наблюдаемой зависимостью

$$\Delta\lambda = \lambda_K (1 - \cos \theta), \quad \lambda_K = \frac{h}{m_e c}.$$

Универсальная постоянная  $\lambda_K$  называется комптоновской длиной волны электрона.

Если фотон рассеивается на связанных электронах, а фактически при этом рассеяние происходит на атомах, обладающих большой массой, то комптоновский сдвиг стремится к нулю, и длины волн рассеянного и падающего излучения совпадают.

## **Корпускулярно - волновой дуализм**

Итак, существуют весьма убедительные экспериментальные доказательства волновой природы света. Прежде всего, опыты по интерференции, дифракции и поляризации света. Вместе с тем, существуют не менее убедительные экспериментальные свидетельства корпускулярного характера света. В их число входят тепловое излучение, фотоэффект, эффект Комптона.

Кажется, что два описания: волновое и квантовое - взаимно исключают друг друга. Однако плодотворной оказалась другая точка зрения. Двойственность, присущая свету, послужила основой концепции корпускулярно - волнового дуализма. Согласно этой концепции волновой и корпускулярный (квантовый) способы описания света не противоречат, а взаимно дополняют друг друга.

Для света существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от условий эксперимента, либо как волна, либо как частица. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств и состоит дуализм волна - частица.