

ФОТОНЫ

**Внешний фотоэффект и его
законы.**

Эффект Комптона

Эйнштейн предположил, что не только излучение света, но и его распространение происходит в виде потока *световых квантов – фотонов*, энергия которых

$$\mathcal{E} = h\nu = mc^2 \Rightarrow m_{\text{фотона}} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

Импульс фотона: $p = mc = \frac{h}{c\lambda} c = \frac{h}{\lambda}.$

*Экспериментальные доказательства
квантовой природы излучения и
корпускулярных свойств фотонов:*

- фотоэлектрический эффект,
- эффект Комптона.

*Корпускулярные характеристики фотона:
масса, импульс, энергия.*

Волновые характеристики света: частота.

*Следовательно, свет обладает
корпускулярно-волновым дуализмом.*

Релятивистское соотношение между полной энергией и импульсом частицы:

$$\mathcal{E}_0^2 = \underbrace{m_0^2}_{\substack{\text{масса} \\ \text{покоя}=0}} \cdot c^4 + p^2 c^2 \Rightarrow p = \frac{\mathcal{E}_0}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Фотон обладает импульсом, при соударении с поверхностью фотон отдаёт ей свой импульс. Следовательно, свет, падающий на тело, оказывает на него давление.

Давление света на поверхность равно импульсу, который передаёт N фотонов в одну секунду:

$$P = p_{\text{погл}} N_{\text{погл}} + p_{\text{отр}} N_{\text{отр}}$$

N – число фотонов, падающих на единичную площадку в единицу времени.

ρ – коэффициент отражения.

ρN – число отразившихся фотонов.

$(1 - \rho)N$ – число поглощённых фотонов.

$p = \frac{h\nu}{c}$ – импульс поглощённых фотонов.

$2p = \frac{2h\nu}{c}$ – импульс отражённых фотонов (т.к. при отражении импульс фотона меняется на $-\rho$).

$$\begin{aligned} P &= p_{\text{погл}}(1 - \rho)N + p_{\text{отр}}\rho N = \frac{h\nu}{c}(1 - \rho)N + \frac{2h\nu}{c}\rho N = \\ &= (1 + \rho)\frac{1}{c}\underbrace{h\nu N}_{E_N} = (1 + \rho)\underbrace{\frac{E_N}{c}}_{\omega} = \omega(1 + \rho), \end{aligned}$$

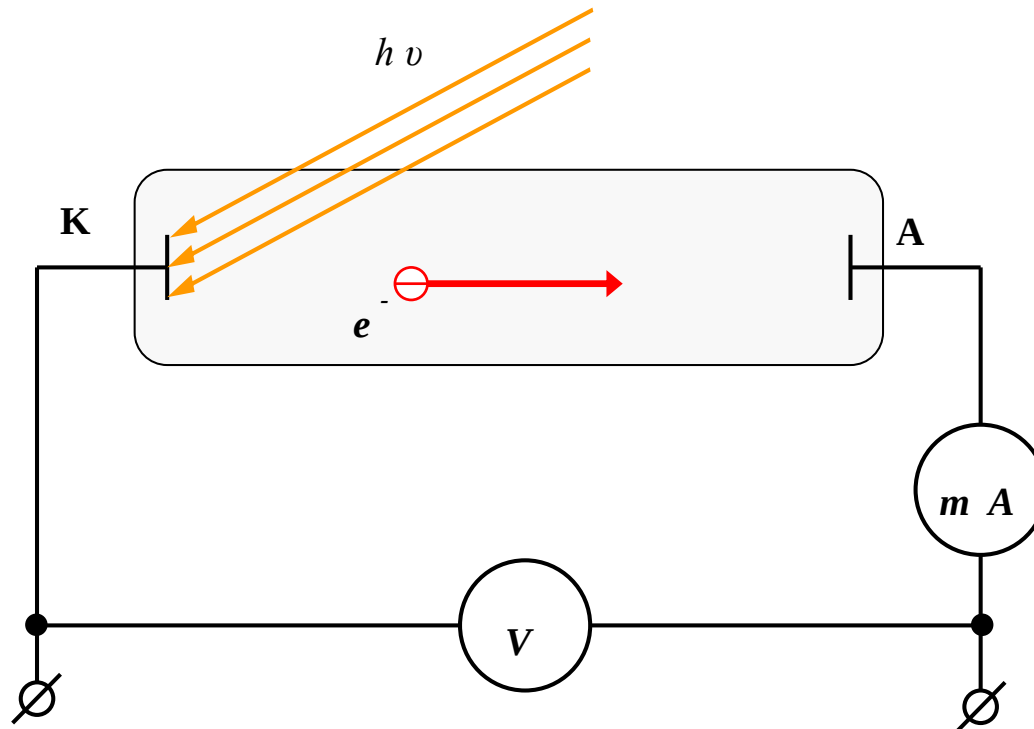
E_N – энергия всех падающих фотонов в единицу времени (dt) на единичную площадку (dS),

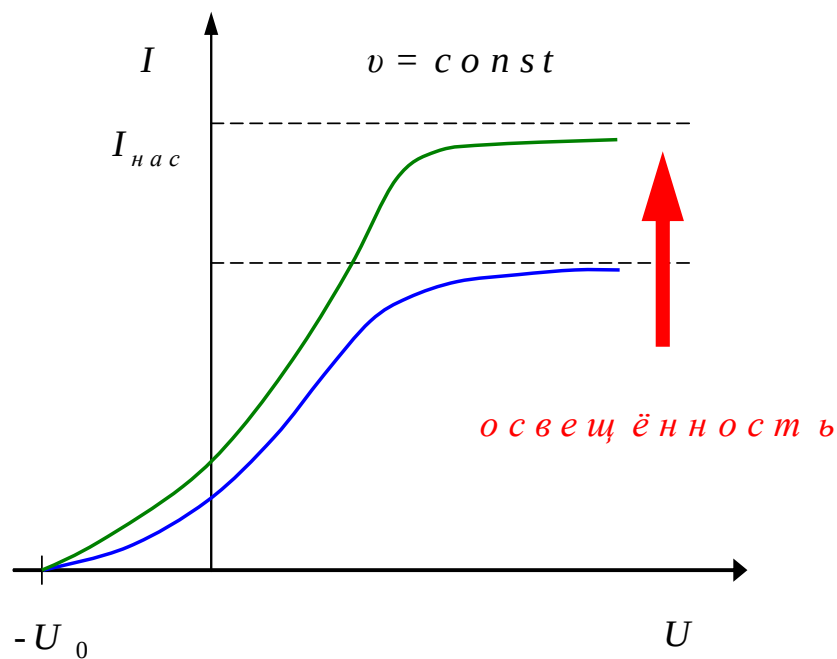
$$\omega = \frac{E_N}{c} = \frac{E}{dS \cdot \underbrace{dt \cdot c}_{dl}} = \frac{E}{dV} \text{ – объёмная плотность энергии излучения.}$$

Фотоэффект

- **Внешний фотоэффект** – испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.
(Металлы, полупроводники, диэлектрики, в газах – на отдельных атомах и молекулах фотоионизация.)

Свойства (3 закона внешнего фотоэффекта Столетова):





1. При $v = const$ число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени пропорционально интенсивности света I .

$I_{насыщ}$ пропорционален освещённости катода.

2. Максимальная начальная скорость ($max E_{кин}$) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только частотой.

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_0,$$

U_0 – задерживающий потенциал.

Свойства внешнего фотоэффекта

3. Для каждого вещества существует *красная граница* фотоэффекта, т.е. минимальная частота (ν_{min}), ниже которой фотоэффект не возможен.

ν_{min} зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Волновая теория света не объясняет:

- 2 и 3 свойства фотоэффекта,
- безинерционность фотоэффекта.

Безинерционность фотоэффекта объясняется *квантовой теорией фотоэффекта Эйнштейна*, в соответствии с которой передача энергии от фотона электрону при столкновении происходит почти мгновенно.

Основные положения квантовой теории фотоэффекта:

- каждый квант поглощается только одним электроном (следствие – 1 закон фотоэффекта),
- энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода (A) из вещества и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии (следствие – 2 и 3 законы фотоэффекта).

По закону сохранения энергии:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E} = h\nu &= A + \underbrace{\frac{mv_{\max}^2}{2}}_{eU_0}, \\ h\nu_{кр} &= A; \quad \nu_{кр} = \frac{A}{h}. \end{aligned} \right\}$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} = h\nu_{кр} + eU_0 \Rightarrow eU_0 = h(\nu - \nu_{кр}).$$

● Многофотонный (нелинейный)

фотоэффект

при больших интенсивностях света (лазерные пучки) электрон, испускаемый катодом, может одновременно получить энергию не от одного, а от N фотонов:

$$N h \nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Электрон может приобрести энергию, необходимую для выхода из вещества, даже под действием света с частотой меньшей $\nu_{кр}$ однофотонного эффекта. Красная граница смещается в область меньших частот (больших λ).

- **Внутренний фотоэффект**

- вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводников и диэлектриков из связанных состояний в свободные без вылета наружу. Следствием является появление *фототока*.

● Вентильный фотоэффект

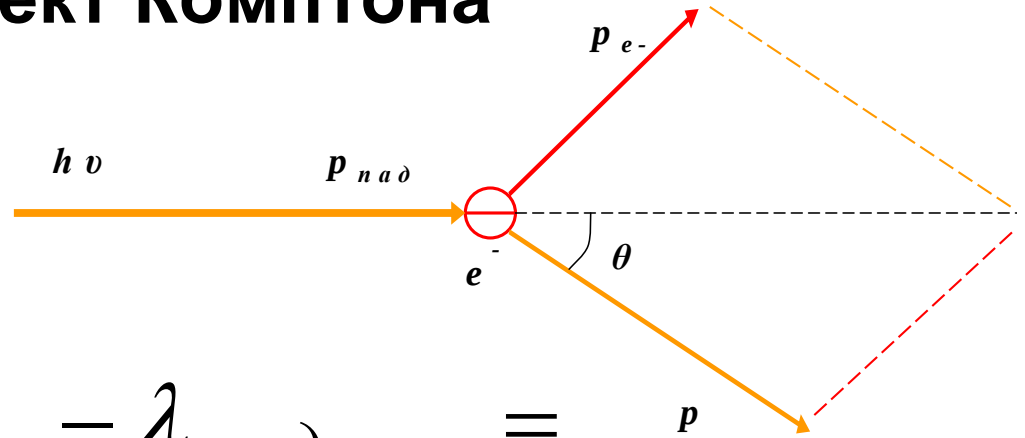
(разновидность внутреннего)

- возникновение э.д.с. (фото-э.д.с.) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла при отсутствии внешнего электрического поля. Применение – солнечные батареи.

Эффект Комптона

Упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентген и γ -излучение) на свободных или слабосвязанных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

Эффект Комптона



$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{рассеян.изл.}} - \lambda_{\text{над.изл.}} =$$

$$= \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

θ – угол рассеяния,

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,426 \text{ нм} - \text{Комптоновская}$$

длина волны,

m_0 – масса покоя электрона.

В процессе упругого рассеяния фотона $h\nu$ со свободным электроном фотон передаёт электрону часть своей энергии и импульса.

В соответствии с законами их сохранения фотон теряет часть своей энергии ($\mathcal{E}_{\text{фотона}} = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$), энергия фотона уменьшается, уменьшается частота ν , длина волны λ увеличивается.

Корпускулярно-волновой дуализм

Доказательства квантовых
(корпускулярных) свойств
электромагнитного излучения:

- излучение чёрного тела,
- фотоэффект,
- эффект Комптона.

Корпускулярно-волновой дуализм

Доказательства волновой
(электромагнитной) природы света:

- интерференция,
- дифракция,
- поляризация.

Волновая и квантовая теории объясняют
одновременно:

- давление света,
- преломление света.

Уравнения, связывающие
корпускулярные свойства
электромагнитного излучения (энергия
 $\mathcal{E}$, импульс p) с волновыми свойствами
(ν , λ):

$$\mathcal{E} = h\nu; p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Волновые свойства света проявляются в
закономерностях его

- распространения,
- интерференции,
- дифракции,
- поляризации.

- А корпускулярные – в процессах взаимодействия света с веществом.

Чем λ больше, тем $\mathcal{E}$, p меньше, и тем труднее обнаружить квантовые свойства света (например, $\nu_{\text{красн}}$).

Чем λ меньше, тем $\mathcal{E}$, p больше, и тем труднее обнаружить волновые свойства света (например, дифракция рентгеновских лучей обнаруживается только на кристаллах).