

## 21 Квантовая физика.

### 21.1 Предпосылки создания квантовой физики.

В 1893 году немецкий физик Вильгельм Вин (1864-1928) теоретически получил формулу зависимости спектральной плотности энергетической светимости, в соответствии с которой

$$r(\lambda, T) = \frac{(2\pi c)^4}{\lambda^5} f\left(\frac{2\pi c}{\lambda T}\right)$$

где  $f$  - некоторая функция, конкретный вид которой термодинамическими методами установить нельзя.

Из этой формулы вытекает закон смещения Вина, а также данная формула позволяет объяснить излучение абсолютно черного тела только на коротких длинах волн. В длинноволновой же части, она дает неверный результат.

Для объяснения излучения абсолютно черного тела в длинноволновой части, английский физик Джон Уильям Рэлей (Стретт) (1842 – 1919) рассмотрел равновесное излучение в замкнутой полости с зеркальными стенками, как набор стоячих электромагнитных волн. Рэлей применил один из основных законов статистической физики – закон о равномерном распределении энергии между степенями свободы системы, находящейся в равновесии. Каждой стоячей волне со своей собственной частотой соответствует своя колебательная степень свободы, т.е. каждый осциллятор в среднем имеет энергию, равную  $kT$ .

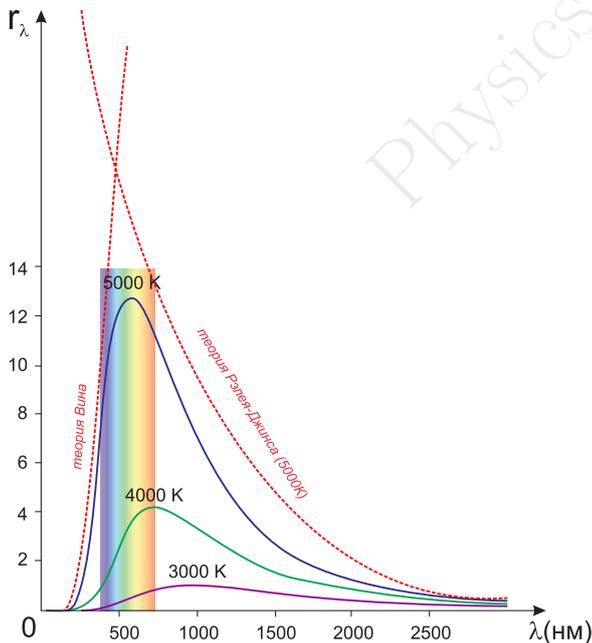
В 1905 году английский физик Джеймс Хопвуд Джинс (1877 – 1946) вывел формулу плотности энергии, которая позже была названа законом Рэлей-Джинса:

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi}{\lambda^2} kT$$

Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны в соответствии с законом Рэлей-Джинса давала хорошее совпадение с экспериментом, но только на больших длинах волн. При этом попытка получить из формулы Рэлей-Джинса закон Стефана-Больцмана, давал странный результат, не соответствующий эксперименту:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda = 2\pi kT \int_0^{\infty} \frac{d\lambda}{\lambda^2} = \infty$$

В результате в физике сложилась ситуация, которую принято называть **ультрафиолетовая катастрофа**. Законы классической физики не позволяли объяснить излучение абсолютно черного тела во всем диапазоне длин волн. Причем закон Стефана-Больцмана не вытекал ни из закона Вина, ни из закона Рэлей-Джинса. Вместо конечно значения испускательной способности, получалась бесконечность.



## 21.2 Квантовая гипотеза Планка.

Для устранения противоречия теории и эксперимента в 1900 году немецкий физик Макс Планк (1858 – 1947) отказался от считавшегося верным положения классической физики, согласно которому энергия любой системы может изменяться непрерывно, т.е. может принимать любые сколь угодно близкие значения. Планк выдвинул гипотезу о том, что атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями – квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебания.



$$E = h\nu$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $\nu$  - частота.

С учетом этого предположения формула спектральной плотности энергетической светимости приняла следующий вид

$$r(\lambda, T) = \frac{4\pi^2 c^2 \hbar}{\lambda^5} \frac{1}{e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 1}$$

Формула Вина, закон Рэлея-Джинса и закон Стефана-Больцмана являются следствиями полученной формулы. При этом формула блестяще согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектрах излучения абсолютного черного тела во всем интервале длин волн и температур.

Теоретически вывод этой формулы М. Планк изложил **14 декабря 1900 г.** на заседании Немецкого физического общества. Этот день стал **датой рождения квантовой физики**.

Из формулы Планка, зная универсальные постоянные  $h$ ,  $k$  и  $c$ , можно вычислить постоянную Стефана-Больцмана  $\sigma$  и Вина  $b$ . С другой стороны, зная экспериментальные значения  $\sigma$  и  $b$ , можно вычислить  $h$  и  $k$  (именно так и было впервые найдено числовое значение постоянной Планка).

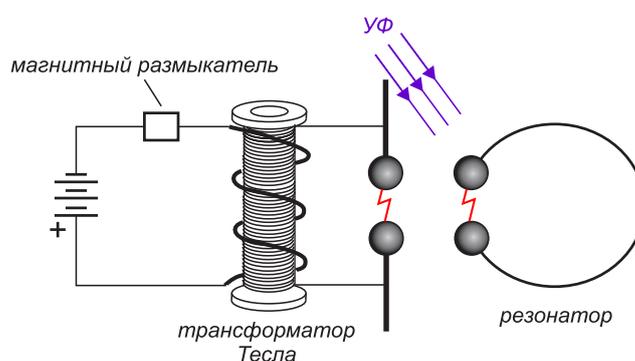
$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

В формулах часто встречается вариант записи энергии через циклическую частоту, где коэффициентом пропорциональности является приведенная постоянная Планка  $\hbar$ .

$$E = \hbar\omega = \hbar 2\pi\nu = h\nu \quad \Rightarrow \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

## 21.3 Фотоэффект.

Начало исследования фотоэффекта было положено **Генрихом Герцем** в 1887 году, когда он в своих опытах по обнаружению электромагнитных волн установил, что искровой разряд в трансформаторе Тесла случается при меньших напряжениях, если электроды резонатора облучать ультрафиолетом.



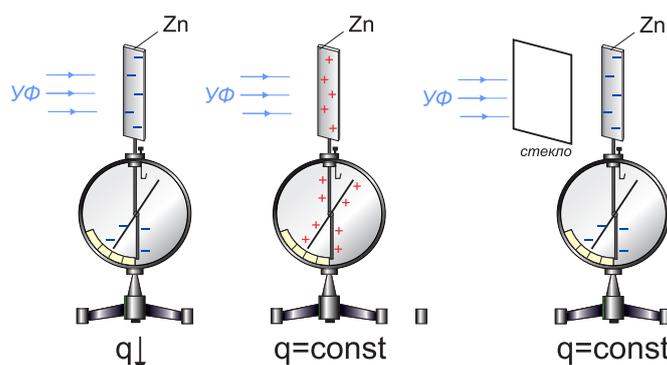
Детально явление фотоэффекта было впервые изучено русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым (1893-1896). В 1889 году опубликовал фундаментальную работу «Актино-электрические исследования, в которой дал описание закономерностей фотоэффекта (законы Столетова), ещё не зная о существовании электронов. Эта работа принесла ему мировую известность.

В своей работе Столетов наблюдал явление, при котором из металлической пластины помещенной в сосуд с откаченным воздухом, под действием света вылетали электроны.



**Def.** Фотоэффект это явление вырывания из металлов электронов под действием света.

Как можно было бы продемонстрировать явление фотоэффекта (Видеоэксперимент  ). Закрепим на электрометре цинковую пластину, предварительно убрав с нее оксидную пленку механическим способом. Сообщим пластинке и электрометру отрицательный заряд, при помощи контактной электризации и фторопластовой палочки. Далее будем облучать пластину кварцевой лампой, в излучении которой будет присутствовать ультрафиолетовая часть спектра.



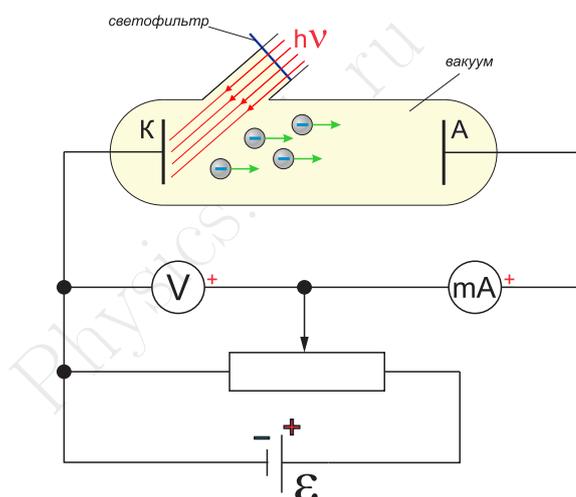
Опыт покажет, что если пластинка заряжена отрицательно, то при облучении ее заряд будет уменьшаться. Если пластинка будет заряжена положительно, то ее заряд практически не изменится. И если перед отрицательно заряженной пластинкой расположить кусок оконного стекла (которое задерживает ультрафиолетовое излучение), то заряд пластины и электромметра так же будет неизменным.

*Такой опыт говорит о том, что из цинковой пластины выбивать электроны может только ультрафиолетовое излучение.*

*В опытах Столетова был исследован так называемый внешний фотоэффект, при котором электроны вырывались с поверхности металла. Позже был открыт и исследован внутренний фотоэффект при котором свет влияет на проводимость внутри полупроводников.*



Рассмотрим теперь установку, которая позволит нам установить функциональные зависимости при явлении фотоэффекта.



В стеклянной колбе с откаченным воздухом находятся два электрода. Один через потенциометр подключен к минусу источника - "катод" второй через миллиамперметр и потенциометр к плюсу источника - "анод". Между катодом и анодом подключен вольтметр, для измерения напряжения. Потенциометр позволяет плавно изменять разность потенциалов между катодом и анодом. В крайне левом положении, разность потенциалов будет равна нулю, в крайне правом - совпадать с ЭДС источника.

К колбе находится световое окно, через которое можно освещать катод. При установке светофильтра мы можем менять длину волны света, падающего на катод.

Будем освещать катод белым светом от кварцевой лампы. При положении ползунок реостата в крайне левом положении, миллиамперметр будет фиксировать некоторый ток, причем ток будет начинать течь сразу, как только катод осветили. Что говорит о том, что часть электронов, которые будут выбиты светом из катода, смогут долететь до анода и через цепь пойдет маленький ток. Большая часть при этом будет образовывать электронное облако над катодом.

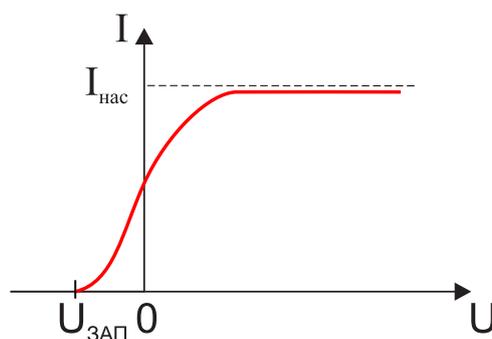
Далее будем увеличивать напряжение катод-анод перемещая ползунок реостата вправо. Электрическое поле внутри колбы, будет действовать на электроны в направлении от катода к аноду и с ростом напряжения все большее количество электронов будет достигать анода.

Ток будет расти до насыщения. Насыщение будет соответствовать тому, что все выбитые из катода электроны, будут долетать до анода.

Чтобы прекратить ток в цепи, придется изменить полярность включения источника.

*Обратное напряжение, при котором ток прекратится, принято называть запирающим.*

В результате получится следующая вольт-амперная характеристика.



Если увеличить световой поток падающий на катод, то опыт покажет, что запирающее напряжение остается тем же, а ток насыщения пропорционально возрастает.

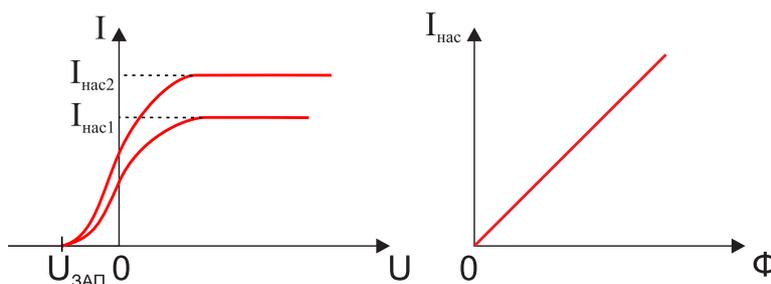
Меняя светофильтры можно будет увидеть, что при синем фильтре ток в цепи течет, а если фильтр поставить красный, то ток прекращается.

Обобщая наблюдения, можно сформулировать следующие законы фотоэффекта.

### I закон фотоэффекта

**Law** →

*Сила тока насыщения прямо пропорциональна световому потоку падающего света.*



Ток насыщения определяется количеством выбиваемых электронов с поверхности катода и их скоростью. Первый закон фотоэффекта условно можно объяснить законами классической электродинамики. Большой световой поток, соответствует большей энергии переносимой электромагнитной волны. Поэтому выбиваемые электроны будут обладать большей энергией и ток будет больше.

### II закон фотоэффекта

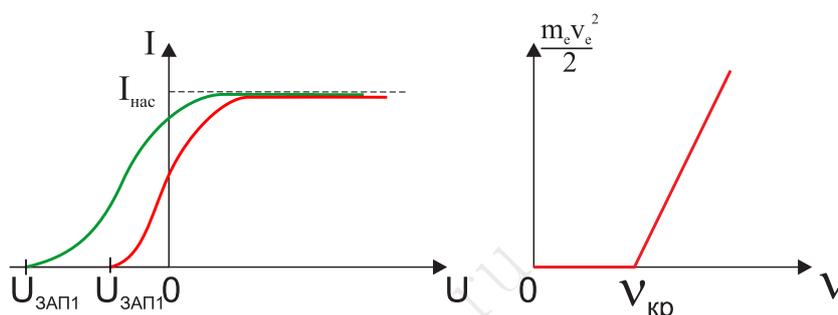
**Law** →

*Кинетическая энергия выбиваемых электронов не зависит от светового потока и линейно возрастает с частотой падающего света.*

$$\frac{m_e v_e^2}{2} \neq f(\Phi)$$

Второй закон фотоэффекта классическая теория объяснить не может, т.к. большой световой поток должен приводить к большей кинетической энергии, а в опыте запирающее напряжение остается тем же, следовательно максимальная кинетическая энергия выбиваемых электронов не меняется.

Если для выбиваемого электрона при запирающем напряжении записать закон сохранения энергии, то получится



$$q_e U_{\text{зап}} = \frac{m_e v_e^2}{2}$$

Зависимость от частоты, можно проверить при помощи светофильтров, измеряя запирающее напряжение. С ростом частоты падающего света, запирающее напряжение тоже будет расти, а следовательно и кинетическая энергия. Это классическая электродинамика объяснить никак не может, т.к. при малых частотах, но с большим потоком энергии электроны должны были бы вылетать с большой кинетической энергией.

### III закон фотоэффекта (красная граница)

**Law** →

**Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты, то фотоэффект не происходит.**

Наличие определенной частоты для данного материала начиная с которой начинается явление фотоэффекта, так же необъяснимо с точки зрения классической электродинамики.

*Безинерционность фотоэффекта*, т.е. то что он начинается сразу при облучении светом определенной частоты, также не объясним.

Объяснение фотоэффекта было дано Альбертом Эйнштейном в 1905 году. Он нашёл простое уравнение, описывающее фотоэффект. Эйнштейн предположил, что свет не только излучается порциями, но и поглощается порциями (фотонами). Энергия поглощенного фотона идет на совершение работы по выходу электрона из вещества, т.е. работы против сил притяжения электрона к заряженным ионами вещества и на сообщение электрону кинетической энергии.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v_e^2}{2}$$

*Энергия фотона идет на работу по выходу электрона из вещества и на приобретение электроном кинетической энергии.*

Ключевой идеей было то, что свет не только излучается порциями (квантами), но и поглощается тоже порциями. Причем энергия такой порции при поглощении, такая же как и при излучении. (Позже, в 1926 году, американский химик Гильберт Льюис, дал название этой порции энергии и света - фотон.)

*Работа выхода — это характеристика вещества, которая показывает чему равна наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы удалить его из вещества в вакуум.*

Поскольку работа выхода это характеристика вещества, то она является табличной величиной, измеренной в ходе экспериментов.

Металл	$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	$A_{\text{вых}} \cdot 10^{-19}, \text{Дж}$
Литий	2,3	3,5
Платина	6,3	10,1
Серебро	4,7	7,5
Цинк	4,0	6,4

Взаимодействуя с электроном вещества, фотон может обмениваться с ним энергией и импульсом. Фотоэффект возникает при неупругом столкновении фотона с электроном. При таком столкновении фотон поглощается, а его энергия передается электрону. Таким образом, электрон приобретает кинетическую энергию не постепенно, а сразу — в результате единичного акта столкновения. Этим и объясняется безинерционность фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна, позволило объяснить все три закона фотоэффекта.

Объяснение первого закона фотоэффекта: При увеличении светового потока, увеличивается количество фотонов. Соответственно, каждый фотон выбивает электрон. Поэтому количество выбитых электронов растет и ток насыщения так же растет.

Объяснение второго закона фотоэффекта: С ростом светового потока энергия фотонов не меняется, т.к. она зависит только от частоты падающего света. Поэтому максимальная кинетическая энергия электронов не меняется и будет зависеть только от частоты падающего света.

*Мощность падающего излучения с точки зрения квантовой физики определяется суммарной энергией прилетевших фотонов в единицу времени.*



$$P = \frac{N h \nu}{\Delta t}$$

*С увеличением мощности светового потока, растет количество фотонов, а не их частота.*

Объяснение третьего закона фотоэффекта: Если частота фотона такова, что его энергии недостаточно для совершения работы по выходу электрона, фотоэффект не начнется.

$$\nu = \nu_{\text{кр}} \Rightarrow A_{\text{вых}} = h \nu_{\text{кр}}$$

*В 1921 году Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике - за заслуги в области теоретической физики и особенно за открытие законов фотоэффекта.*

## 21.4 Фотон.

В современной физике фотон рассматривается как одна из элементарных частиц. При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией  $E = h\nu$ , зависящей от частоты.

Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при излучении и поглощении, называют корпускулярными. Сама же световая частица получила название фотона или светового кванта.

Энергию фотона часто выражают не через частоту  $\nu$ , а через циклическую частоту. При этом используют величину  $\hbar$  ("аш с чертой"):

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0545887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

Согласно теории относительности энергия всегда связана с массой соотношением  $E = mc^2$ , следовательно

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad m_0 = 0$$

Фотон не имеет массы покоя, т.е. он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу приобретает скорость света.

Импульс фотона

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

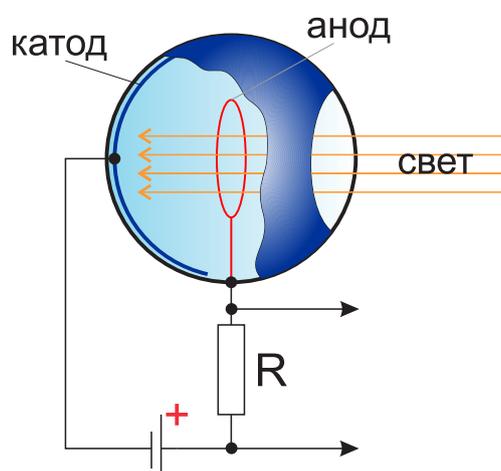
Направлен импульс фотона по световому лучу.

Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее выражены корпускулярные свойства света.

## 21.5 Применение фотоэффекта.

Основное применение фотоэффекта отразилось в создании таких устройств как фотоэлементы, в которых свет позволяет управлять электрическим током. Первым таким элементом, использующим явление внешнего фотоэффекта стал вакуумный фотоэлемент.

В стеклянной колбе откачен воздух, внутренняя поверхность колбы покрыта тонким слоем металла с маленькой работой выхода, это катод. Один из контактов фотоэлемента, подключенный к минусу источника, соединен с этим тонким слоем металла. В металле оставлено окошко, через которое можно освещать металл. В



центре колбы расположено кольцо, соединенное со вторым внешним контактом, который соединен с плюсом источника.

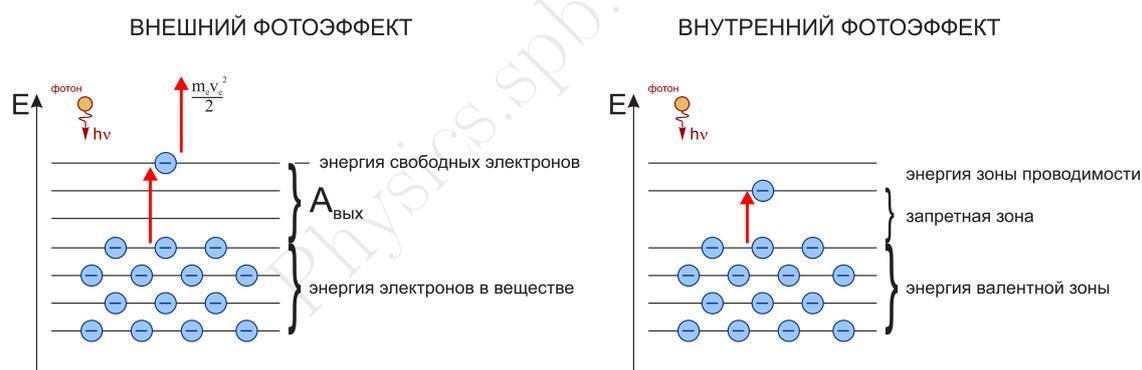
При освещении светом, с поверхности металла выбивают фотоэлектроны, которые под действием электрического поля движутся от катода к аноду и замыкают электрическую цепь. Т.е. цепь будет замкнута всякий раз, как свет нужной частоты будет падать через окошко на поверхность металла.

Вакуумные фотоэлементы активно применялись в XX веке. Они позволили создать звуковое кино, когда на ленту рядом с изображением шла запись звука посредством чередования темных и светлых полос. При воспроизведении отдельный пучок света направлялся на такую дорожку и далее на вакуумный фотоэлемент.

Основным минусом вакуумного фотоэлемента были большие размеры, хрупкость и небольшой ресурс, т.к. постепенно внутрь колбы попадал воздух.

В качестве альтернативы был создан полупроводниковый фотоэлемент, в котором используется внутренний фотоэффект.

*Фотопроводимостью полупроводников(или диэлектриков) называют способность этих материалов уменьшать своё электрическое сопротивление под воздействием электромагнитного излучения. Приборы, в которых используется явление фотопроводимости, называют фоторезисторами.*



При воздействии света на объём полупроводника в нём образуются дополнительные неравновесные носители тока (фотоэлектроны и фотодырки). В результате электрическое сопротивление полупроводника уменьшается.

Энергетические уровни валентных электронов в полупроводнике образуют валентную зону, которая полностью заполнена электронами. Зона проводимости отделена от валентной зоны энергетическим промежутком  $\Delta E$  (запрещенной зоной). Ширина запрещенной зоны равна энергии валентной связи и является одним из основных параметров полупроводников. Разрыв валентной связи и образование свободного электрона и дырки означает переход электрона из валентной зоны в зону проводимости. Минимальная энергия, необходимая для этого, равна ширине запрещенной зоны.



*Фоторезистор – это полупроводниковый резистор, действие которого основано на фоторезистивном эффекте.*

Конструктивно фоторезистор представляет собой тонкий слой полупроводника (фоточувствительный слой), нанесенный на диэлектрическую

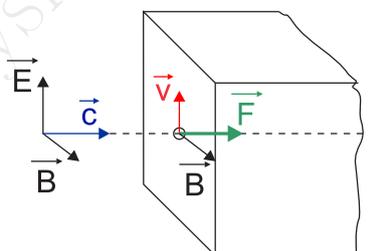
подложку. На поверхность фоточувствительного слоя или на диэлектрическую подложку наносят металлические электроды. Наиболее распространенные фоторезисторы изготовлены из сульфида свинца, сульфида кадмия, селенида кадмия. Форма фоточувствительного слоя между электродами может быть различной (прямоугольной, в виде меандра, в виде кольца). Фоторезистор обычно помещают в защитный корпус с прозрачным окошком.

## 21.6 Давление света.

Максвелл на основе созданной им теории электромагнитного поля предсказал, что падающая на поверхность какого-либо тела электромагнитная волна должна оказывать на него давление, величина которого пропорциональна потоку энергии волны. Эта величина очень мала и для ее измерения необходимы очень точные приборы.

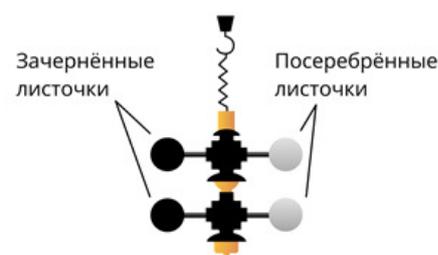
В 1899 г. русский физик-экспериментатор Петр Николаевич Лебедев (1866 - 1912) осуществил опыты по измерению давления света.

Световая волна падает на специальную конструкцию, основными элементами которой являются легкие "крылышки" 1 - 4. Одна сторона каждого крылышка зачернена, а другая представляет собой маленькое зеркало. Конструкция подвешена на нити 5 и помещена в стеклянный сосуд, из которого откачивается воздух. Свет оказывает различное давление на зачерненную и зеркальную поверхности крылышек.



В результате момент сил, действующих на конструкцию, не равен нулю. При этом она поворачивается. Нить закручивается и в ней возникают упругие силы, которые противодействуют силам светового давления. Когда конструкция, отклонившись от начального положения, придет в состояние покоя, момент упругих сил будет равен моменту сил светового давления.

Так как момент упругих сил прямо пропорционален углу поворота конструкции, по углу поворота можно определить значение светового давления. Энергия падающего света измерялась при помощи термоэлемента. Как показали измерения, световое давление прямо пропорционально энергии света, падающего за единицу времени на единицу площади освещаемой поверхности. Измеренное Лебедевым значение светового давления в пределах ошибок измерений совпало со значением, вычисленным Максвеллом. Таким образом, Лебедев экспериментально доказал существование предсказанного Максвеллом давления света.



Рассмотрим электромагнитное излучение как поток фотонов. При столкновении с поверхностью тела фотон передает ему импульс. Следствием многочисленных столкновений фотонов с поверхностью является давление, оказываемое электромагнитным излучением на эту поверхность.

Physics.spb.ru

### 21.6.1 Опыт Крукса



Четыре лепестка, расположены на игле, которая накрыта стеклянным колпаком. Если осветить эти лепестки светом, то они начинают вращаться. Если посмотреть на этот пропеллер в открытом воздухе, когда на него дует ветер, его вращение никого бы не удивило, но в данном случае стеклянный колпак не позволяет потокам воздуха действовать на пропеллер. Поэтому причиной его движения является свет. Эту вертушку случайно создал английский физик Уильям Крукс.

В 1873 году Крукс решил определить атомный вес элемента Таллия и взвесить его на очень точных весах. Чтобы случайные воздушные потоки не исказили картины взвешивания, Крукс подвесил коромысло в вакууме. Оказалось, что его тончайшие весы были чувствительны к теплу. Если источник тепла находился под предметом, он уменьшал его вес, если над – увеличивал. Усовершенствовав этот свой нечаянный опыт, Крукс придумал игрушку – радиометр. [Радиометр Крукса](#) – это четырехлопастная крыльчатка, уравновешенная на игле внутри стеклянной колбы с небольшим разрежением. При попадании на лопасть светового луча, крыльчатка начинает вращаться, что иногда неправильно объясняют давлением света. На самом деле причиной кручения служит радиометрический эффект. Возникновение силы отталкивания за счет разницы кинетических энергий молекул газа, налетающих на освещенную (нагретую) сторону лопасти и на противоположную неосвещенную (более холодную).

## 21.7 Химическое действие света.

Любое превращение молекул это химический процесс.

*Химические процессы, протекающие под действием видимого света и ультрафиолетовых лучей, называются фотохимическими реакциями.*

Световой энергии достаточно для расщепления многих молекул. В этом проявляется химическое действие света.

## 21.8 Эффект Комптона

**Def.** Эффект изменения частоты рентгеновского излучения при рассеянии на электронах называется эффектом Комптона.

С точки зрения электродинамики Максвелла электромагнитная волна должна заставлять электроны вещества совершать колебания со своей частотой, следовательно и излучать должны вторичные волны той-же частоты. На практике Комптон увидел другое. Появляется свет другой частоты, отличной от падающей. Объяснение этому можно было дать только с позиции квантовой физики.

.....