

ФОТОЭФФЕКТ

1. Основные законы фотоэффекта

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу теплового излучения черного тела, получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта – явления, открытие и исследование которого сыграло важную роль в становлении квантовой теории. В 1887 году Г. Герц обнаружил, что при освещении отрицательного электрода ультрафиолетовыми лучами разряд между электродами происходит при меньшем напряжении. Это явление, как показали опыты Гальваса (1888 г.) и Столетова (1888–1890 гг.), обусловлено выбиванием под действием света отрицательных зарядов из электрода. Электрон еще не был открыт. Лишь в 1898 году Томпсон и Леонард, измерив удельный заряд испускаемых телом частиц, установили, что это электроны.

Различают фотоэффект внешний, внутренний и вентильный. **Внешним фотоэффектом** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. *Внешний фотоэффект* наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению электродвижущей силы (ЭДС).

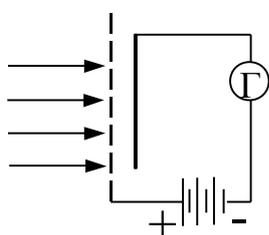
Вентильный фотоэффект, является разновидностью внутреннего фотоэффекта, – это возникновение ЭДС (фото-ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект открывает, таким образом, пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым А.Г. Столетовым. Принципиальная схема для исследования фотоэффекта приведена на рис. 2.1.

Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Это явление было открыто немецким физиком Г. Герцем (1857-1894) в 1887г. Он, экспериментально доказав существование электромагнитных волн в свободном пространстве в 1888г., предсказанных теорией Максвелла, заметил, что про-

скакивание искры между шариками разрядника значительно облегчатся, если один из шариков осветить ультрафиолетовыми лучами.

Русский физик А.Г. Столетов (1839-1896) в 1888-1889гг. подробно исследовал фотоэффект с помощью установки, схема которой показана на рисунке.



Конденсатор, образованный проволоочной сеткой и сплошной пластиной, был включен последовательно с гальванометром Γ в цепь батареи. Свет, проходя через сетку, падал на сплошную пластину. В результате в цепи возникал ток, регистрировавшийся гальванометром. На основании своих опытов Столетов пришел к следующим выводам:

- 1) наибольшее действие оказывает ультрафиолетовое излучение;
- 2) сила тока возрастает с увеличением освещенности пластины;
- 3) испускаемые под действием света заряды имеют отрицательный знак.

В 1898г. немецкий физик Ф. Леонард (1862-1947) и английский физик Дж. Томсон (1856-1940), измерив удельный заряд, испускаемых под действием света, частиц установили, что эти частицы являются электронами.

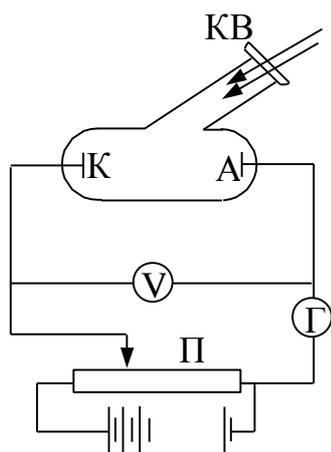
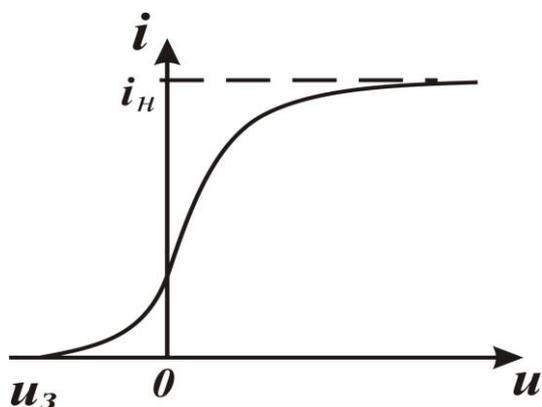


Схема современной установки для исследования фотоэффекта показана на рисунке. Свет проникает через кварцевое окошко KB в evacuated баллон и освещает катод K , изготовленный из исследуемого материала. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду A . В результате в цепи прибора течет фототок измеряемый гальванометром Γ . Напряжение между анодом и катодом можно изменять с помощью потенциометра Π .

Фотоэффект сильно зависит от состояния освещаемой поверхности (окислы, адсорбированные вещества).

На рисунке изображена вольт - амперная характеристика фотоэффекта, т.е. кривая, показывающая зависимость фототока i от напряжения между электродами U при неизменном потоке света Φ . На этой кривой видно, что при некотором, не очень большом напряжении фототок достигает насыщения - все электроны, испущенные катодом, попадают на анод. Следовательно, сила тока насыщения i_n определяется количеством электронов, испускае-



между электродами U при неизменном потоке света Φ . На этой кривой видно, что при некотором, не очень большом напряжении фототок достигает насыщения - все электроны, испущенные катодом, попадают на анод. Следовательно, сила тока насыщения i_n определяется количеством электронов, испускае-

мых катодом в единицу времени под действием света.

При $U=0$ фототок не исчезает. Это говорит о том, что электроны покидают катод со скоростью, отличной от нуля. Для того, чтобы фототок стал равным нулю нужно приложить задерживающее напряжение U_3 (задерживающий потенциал). При таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему при вылете из катода наибольшим значением скорости v_m , не удастся преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода. Поэтому можно написать, что:

$$\frac{mv_m^2}{2} = eU_3$$

где m - масса электрона.

Таким образом, измерив задерживающее напряжение U_3 , можно определить максимальное значение скорости фотоэлектрона.

При неизменном спектральном составе падающего на катод света сила тока насыщения (т.е. количество испускаемых электронов) строго пропорциональна световому потоку Φ :

$$i_n \sim \Phi$$

Это утверждение носит название закона Столетова.

Экспериментальные исследования, выполненные А.Г. Столетовым, а также другими учеными (немецкий физик В. Боте (1891-1957), американский физик Р. Милликен (1863-1953), советские физики П.И. Лукирский (1894-1954) и С.С. Прилежаев и др.) привели к установлению следующих основных законов внешнего фотоэффекта:

1. фототок насыщения I (т.е., максимальное число электронов, освобожденных светом в 1с) прямо пропорционально световому потоку Φ :

$$I = k\Phi$$

где коэффициент пропорциональности k называется фоточувствительностью освещаемой поверхности (измеряется в микроамперметрах на люмен, сокращенно $\frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$).

2. скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

3. независимо от интенсивности света, фотоэффект начинается только при определенной (для данного металла) минимальной частоте, называемой «красной границей» фотоэффекта.

Второй и третий законы фотоэффекта нельзя объяснить на основе волновой теории света. По этой теории интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды электромагнитной волны «раскачивающей» электрон в металле. Поэтому свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности, должен был бы вырывать электроны из металла, иначе, не должно было бы существовать «красной границы» фотоэффекта. Этот

вывод противоречит третьему закону фотоэффекта. С точки зрения волновой теории, чем больше интенсивность света, тем большую кинетическую энергию должен был бы получить от него электрон. Поэтому скорость фотоэлектрона должна была бы возрастать с увеличением интенсивности света. Этот вывод противоречит и второму закону фотоэффекта. Законы фотоэффекта получают простое истолкование на основе квантовой теории света. По этой теории величина светового потока определяется числом световых квантов (фотонов), падающих в единицу времени на поверхность металла. Каждый фотон может взаимодействовать только с одним электроном. Поэтому максимальное число фотоэлектронов должно быть пропорционально световому потоку (первый закон фотоэффекта).

Энергия фотона $h\nu$, поглощенная электроном, расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла; оставшаяся часть этой энергии представляет собой кинетическую энергию фотоэлектрона $\frac{m\nu^2}{2}$ (где m – масса электрона, ν – скорость электрона). Тогда, согласно закону сохранения энергии, можно записать:

$$h\nu = \frac{m\nu^2}{2} + A$$

Эта формула, предложенная в 1905г. А. Эйнштейном (1879-1955) и подтвержденная многочисленными экспериментами, называется уравнением Эйнштейна. Из уравнения Эйнштейна видно, что скорость фотоэлектрона возрастает с увеличением частоты света и не зависит от интенсивности света (поскольку ни A , ни ν не зависят от интенсивности света). Это вывод соответствует второму закону фотоэффекта. С уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (так как A постоянна для данного освещаемого вещества). При некоторой достаточно малой частоте $\nu = \nu_0$ (или $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$) кинетическая энергия фото-

электрона станет равной нулю ($\frac{m\nu^2}{2} = 0$) и фотоэффект прекратится (третий закон фотоэффекта). Это имеет место при $h\nu_0 = A$, т.е. в случае, когда вся энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона. Тогда $\nu_0 = \frac{A}{h}$, или $\lambda_0 = \frac{hc}{A}$. Последние формулы определяют «красную границу» фотоэффекта. Из этих формул следует, что она зависит от величины выхода (от материала фотокатода).

Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 света, при которой еще возмо-

жен внешний фотоэффект. Величина ν_0 зависит от химической природы вещества и от состояния его поверхности.

Зависимость скорости фотоэлектронов от частоты падающего света наиболее отчетливо вскрывает природу фотоэффекта. Кинетическая энергия линейно зависит от частоты света (рис.6). При некоторой частоте ν_0 скорость фотоэлектронов оказывается равной нулю. Эта частота разграничивает излучение на две области: область излучения ($\nu > \nu_0$), способного возбудить фотоэффект, и область излучения ($\nu < \nu_0$) не создающего фотоэффекта.

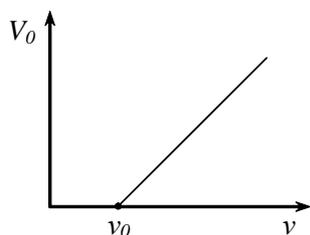


Рис.6

Уравнение Эйнштейна позволяет определить наименьшую частоту ν_0 , или красную границу фотоэффекта. Энергия кванта расходуется только на работу выхода:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}.$$

Термин «красная граница» подчеркивает, что фотоэффект ограничен со стороны длинноволновой части спектра. Наличие красной границы совершенно не совместимо с представлением о свете как об электромагнитных волнах.

Число фотоэлектронов n , вырывааемых с катода за единицу времени (фототок насыщения) пропорционально интенсивности света.

$$I = en .$$

Квантовый характер взаимодействия света с веществом проявляется в безинерционности фотоэффекта. С волновой точки зрения электромагнитная волна за определенное конечное время передает свою энергию электрону.

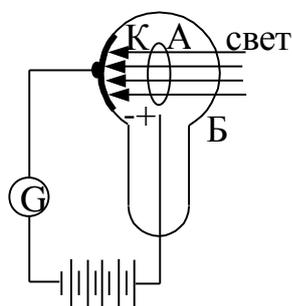
Применение фотоэффекта

На явлении фотоэффекта основано действие фотоэлектронных приборов, получивших разнообразное применение в различных областях науки и техники. В настоящее время практически невозможно указать отрасли производства, где бы не использовались фотоэлементы – приемники излучения, работающие на основе фотоэффекта и преобразующие энергию излучения в электрическую. Простейшим фотоэлементом с внешним фотоэффектом является вакуумный фотоэлемент. Он представляет собой откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого (за исключением окошка для доступа излучения) покрыта фоточувствительным слоем, служащим



фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещаемая в центре баллона. Фотоэлемент включается в цепь батареи, э.д.с. которой выбирается такой, чтобы обеспечить фототок насыщения. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурмяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны, и для них наблюдается строгая пропорциональность фототока интенсивности излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических приборов, например фотоэлектрический экспонометр, люксметр (измеритель освещенности) и так далее.

Вакуумный фотоэлемент.



Катодом *K* вакуумного фотоэлемента служит слой металла, нанесенный на внутреннюю поверхность эвакуированного стеклянного баллона *Б*. Анод *A* выполнен в виде металлического кольца, помещенного в центральной части баллона. При освещении катода в цепи фотоэлемента возникает электрический ток, сила которого пропорциональна величине светового потока. Ток измеряется гальванометром *G*.

Большинство современных фотоэлементов имеют сурмяно-цезиевые (*SbCs*) или кислородно-серебряно-цезиевые (*CsOAg*) катоды, обладающие высокой фоточувствительностью.

Кислородно-серебряно-цезиевые фотоэлементы чувствительны к инфракрасному и видимому свету (чувствительность $20-80 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$), сурмяно-цезиевые фотоэлементы чувствительны к видимому и ультрафиолетовому свету (чувствительность $50-150 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$). В некоторых случаях для увеличения чувствительности фотоэлемента его наполняют аргоном при давлении порядка 1 Па . Фотоны в таком элементе усиливаются вследствие ионизации аргона, вызванной столкновением фотоэлектронов с атомами аргона. Фоточувствительность газонаполненных фотоэлементов составляет около $1000 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$. В 60° годы XX века разработаны фотоэлементы нового типа, например *GaAs* (галлий-мышьяк), чувствительные к видимому свету ($k=400 \text{ мкА}$), *InAsP* (индий, мышьяк, фосфор) и *InGaAs* (индий, галлий, мышьяк) к видимому и инфракрасному свету с длиной волны до $1,5 \text{ мкм}$, $k=1500 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$.

В рассмотренном выше явлении фотоэффекта электрон получает энергию от одного фотона. Такие процессы называются однофотонными.

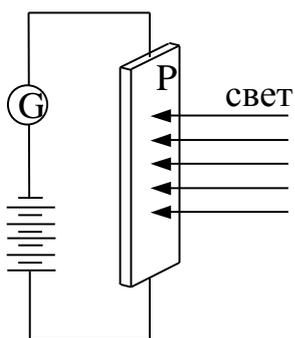
С изобретением лазеров были получены мощные световые пучки. Это дало возможность осуществить многофотонные процессы при которых электрон, вылетающий из металла, получает энергию не от одного, а от N фотонов ($N=2,3,4,5$). Формула Эйнштейна в случае многофотонного фотоэффекта выглядит следующим образом:

$$Nh\nu = \frac{m v_m^2}{2} + A$$

Соответственно красная граница фотоэффекта смещается в сторону более длинных волн (λ_0 увеличивается в N раз). В случае N -фотонного эффекта фототок насыщения $I_N \sim \Phi^N$.

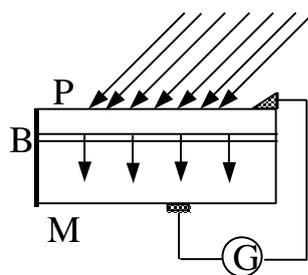
Кроме рассмотренного выше внешнего фотоэффекта (когда электроны под действием фотонов вылетают из вещества), существует также внутренний фотоэффект, который обусловлен тем, что электроны, вырванные светом из атомов вещества, остаются внутри вещества, увеличивая его электропроводимость.

Внутренний фотоэффект наблюдается у полупроводников и в меньшей мере у диэлектриков. Схема наблюдения внутреннего фотоэффекта показана на рисунке. Полупроводниковая пластинка P присоединена последовательно с гальванометром G к полюсам батареи.



Ток в этой цепи незначителен, поскольку полупроводник обладает большим сопротивлением. Однако, при освещении пластинки ток в цепи резко возрастает. Это обусловлено тем, что свет вырывает из атомов полупроводника электроны, которые, оставаясь внутри полупроводника, увеличивают его электропроводность (уменьшают сопротивление). Полупроводниками являются кристаллические вещества, которые по величине электропроводности занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Они характеризуются тем, что их проводимость растет с повышением температуры (у металлов она уменьшается).

Фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, называются полупроводниковыми фотоэлементами или фотосопротивлениями. Для их изготовления используются селен, сернистый свинец, сернистый кадмий, кремний, германий и другие полупроводники. Фоточувствительность полупроводниковых фотоэлементов в сотни раз превышает фоточувствительность вакуумных фотоэлементов.



Недостатком полупроводниковых фотоэлементов является их заметная инерционность, т.е. изменение фототока запаздывает относительно изменения освещенности фотоэлемента.

Недостатком полупроводниковых фотоэлементов является их заметная инерционность, т.е. изменение фототока запаздывает относительно изменения освещенности фотоэлемента.

тоэлемента. Поэтому полупроводниковые фотоэлементы непригодны для регистрации быстропеременных световых потоков.

На внутреннем фотоэффекте основана еще одна разновидность фотоэлемента – полупроводниковый фотоэлемент с запирающим слоем или вентильный фотоэлемент. Металлическая пластинка M и нанесенный на нее тонкий слой полупроводника P соединены внешней электрической цепью, содержащей гальванометр G . В зоне контакта полупроводника с металлом образуется запирающий слой B , обладающий вентильной проводимостью. Он пропускает электроны только в направлении от полупроводника к металлу. При освещении полупроводникового слоя P в нем, благодаря внутреннему фотоэффекту, появляются свободные электроны. Проходя через запирающий слой в металл, и не имея возможности перемещаться обратно, эти электроны образуют в металле избыточный отрицательный заряд. Полупроводник, лишенный части своих электронов, приобретает положительный заряд. Разность потенциалов (порядка $0,1 В$), возникающая между полупроводником и металлом, создает ток в цепи фотоэлемента. Таким образом, вентильный фотоэлемент представляет собой генератор тока, непосредственно преобразующий световую энергию в электрическую.

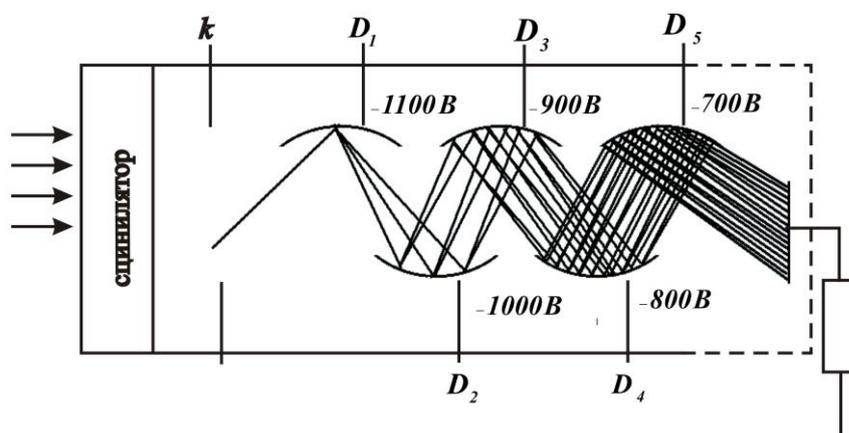
В качестве полупроводников в вентильном фотоэлементе используют селен, закись меди, сернистый таллий, германий, кремний. Фоточувствительность вентильных фотоэлементов составляет $2000-3000 \frac{\mu A}{лм}$. КПД современных кремниевых фотоэлементов (освещаемых солнечным светом) достигает 12-15%. По теоретическим расчетам его можно повысить до 22%.

Так как фототок пропорционален световому потоку, фотоэлементы используются в качестве фотометрических приборов. К таким приборам относятся люксметр (измеритель освещенности) и фотоэлектрический экспонометр.

Фотоэлемент позволяет преобразовать колебания светового потока в соответствующие колебания фототока, что находит широкое применение

в технике звукового кино, телевидения и т.п.

Велико значение фотоэлементов для телемеханизации и автоматизации производственных процессов. В сочетании



с электронным усилителем и реле фотоэлемент является неотъемлемой частью автоматических устройств, которые, реагируя на световые сигналы, управляют работой различных промышленных и сельскохозяйственных установок и транспортных механизмов.

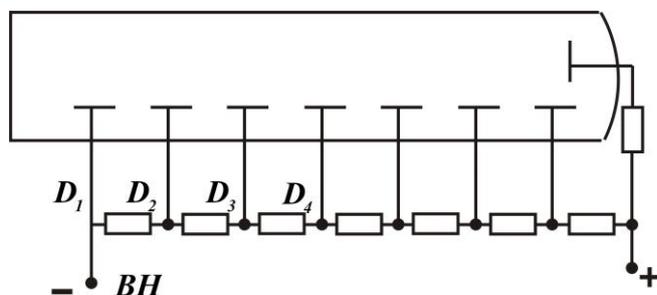
Батареи из кремневых фотоэлементов, получившие название солнечных батарей, усиленно применялись на советских космических спутниках и кораблях для питания радиоаппаратуры. Общая площадь поверхности солнечных батарей составляла 14 м^2 на космическом корабле «Союз».

Широкое применение получил прибор, изобретенный советским физиком Л.А. Кубецким (1906-1959) в 1930г., получивший название фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Для усиления фототока применяются фотоэлектронные умножители, в которых наряду с фотоэффектом используется явление вторичной электронной эмиссии.

Действие ФЭУ схематически показано на рисунке. При установке ФЭУ под излучение образующиеся фотоэлектроны с катода K , ускоряются в электрическом поле и попадают на эмиттер (диод) D_1 , выбивая из него в 5-6 раз большее число электронов, благодаря вторичной электронной эмиссии. Эти электроны ускоряются в свою очередь, попадая на следующий эмиттер (D_2), выбивая из него еще большее число электронов и т.д. Напряжение на каждом из последующих диодов на 50-100В выше, чем у предыдущего в соответствии с электрической схемой их соединения.

В результате КПД усиление электронного тока достигает 10^9 - 10^{11} , чув-



ствительность составляет 10 А/лм . Благодаря их большой чувствительности с помощью ФЭУ можно подсчитать число падающих элементарных частиц или γ -квантов при установке перед катодом ФЭУ сцинтиллятора (вещества в котором воз-

никают фотоэлектроны).

Такие устройства называются сцинтилляционными счетчиками. В фотоэлектронных умножителях устанавливается 15-20 диодов для повышения КПД усиления электронного тока.

Различные виды фотоэффекта используются также в производстве для контроля, управления и автоматизации различных процессов, в военной технике для сигнализации и локации невидимым излучением, в технике звукового кино, в различных системах связи и так далее.

Итак, законы фотоэффекта свидетельствуют, что свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название фотонов или световых квантов.

Энергия фотонов равна $\varepsilon = h\nu$.

Фотон движется в вакууме со скоростью c . Фотон имеет массу $m = \frac{h\nu}{c^2}$, при этом фотон не имеет массы покоя $m_0 = 0$, т. е. покоящихся фотонов не существует. Если распространяющийся световой луч остановить, то свет прекратит свое существование. Это означает, что фотоны будут поглощены атомами и молекулами вещества.

Из общего соотношения специальной теории относительности, связывающего энергию, импульс и массу любой частицы,

$$\varepsilon = c\sqrt{p^2 - m_0^2 c^2} \quad \text{или следует, что фотон обладает импульсом}$$
$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = mc.$$

Таким образом, учение о свете, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах – корпускулах. Но это не был механический возврат к корпускулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом – корпускулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название корпускулярно-волнового дуализма. Позже двойственная природа была открыта у электронов и других элементарных частиц. Классическая физика не может дать наглядной модели сочетания волновых и корпускулярных свойств у микрообъектов. Движением микрообъектов управляют не законы классической механики Ньютона, а законы квантовой механики. Теория излучения абсолютно черного тела, развитая М. Планком, и квантовая теория фотоэлектрического эффекта Эйнштейна лежат в основании этой современной науки.

2. Фотоны. Масса, энергия, импульс фотона

Фотонная теория света утверждает следующее:

1) Свет состоит из «порций» электромагнитных волн, называемых фотонами.

2) Во время испускания или поглощения света фотоны рождаются или поглощаются как нечто неделимое. Такие процессы аналогичны процессу столкновения фотона и электрона атома, испускающего или поглощающего свет. Точно так же и рассеяние света представляет собой процесс столкновения между фотоном и рассеивателем (например, электроном).

3) Каждый фотон обладает энергией $h\nu$, где ν – частота света, равная c/λ , а h – универсальная постоянная, называемая *постоянной Планка*.

4) Наличие у фотона массы m вытекает из взаимосвязи между энергией и массой в теории относительности $\varepsilon=mc^2$, для фотона $\varepsilon=h\nu$, следовательно

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

Масса фотона существенно отличается от массы макроскопических тел и масс других элементарных частиц. Это отличие состоит в том, что фотон не имеет массы покоя m_0 . Действительно для фотона $v = c$, и если считать, что $m_0 \neq 0$, то релятивистская формула зависимости массы от скорости

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

дает бессмысленный результат $m = \frac{m_0}{0} = \infty$ и $\varepsilon = \infty$, в то время, как $\varepsilon = h\nu$. Таким образом, для фотона $m_0 = 0$, т. е. покоящихся фотонов не существует. Если распространяющийся световой луч остановить, то свет прекратит свое существование. Это означает, что фотоны будут поглощены атомами и молекулами вещества.

5) Помимо энергии и массы фотон обладает импульсом p . Из теории относительности связь энергии и импульса определена

Для фотона $m_0 = 0$ и

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = mc.$$

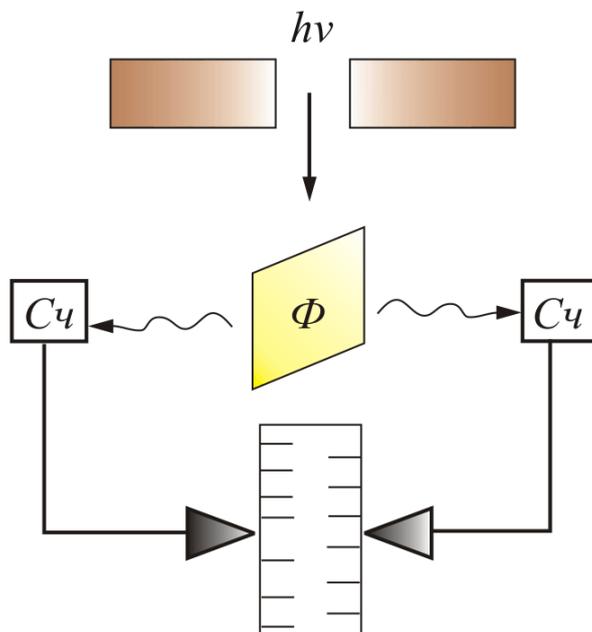
6) Для фотона всегда должно выполняться условие $v = c$, таким образом **в любой среде** фотоны движутся со скоростью c . На первый взгляд это противоречит известному факту: фазовая скорость света в среде меньше, чем в вакууме в n (показатель преломления) раз, $V_\phi = \frac{c}{n}$. В действительности, никакого противоречия нет. Процесс распространения света в веществе состоит в поглощении фотона атомом, а затем «переизлучении» фотона атомом. Переизлучение фотонов атомами происходит с запаздыванием по фазе по отношению к поглощению света частицами среды.

3. Экспериментальное подтверждение квантовой природы света.

Для объяснения теплового излучения Планк предположил, что свет испускается квантами. Эйнштейн при объяснении фотоэффекта предпо-

ложил, что свет поглощается квантами. Также Эйнштейн предположил, что свет и распространяется квантами, т.е. порциями. Квант световой энергии получил название *фотон*. Т.е. опять пришли к понятию корпскула (частица).

Наиболее непосредственное подтверждение гипотезы Эйнштейна дал опыт Боте, в котором использовался метод совпадения.



Тонкая металлическая фольга Φ помещалась между двумя газоразрядными счетчиками $Cч$. Фольга освещалась слабым пучком рентгеновских лучей, под действием которых она сама становилась источником рентгеновских лучей (это явление называется рентгеновской флуоресценцией). Вследствие малой интенсивности первичного пучка, количество квантов, испускаемых фольгой, было невелико. При попадании квантов на счетчик механизм срабатывал и на движущейся бумажной ленте делалась отметка. Если бы излучаемая энергия распространялась равномерно во все стороны, как это следует из волновых представлений, оба счетчика должны были срабатывать одновременно и отметки на ленте приходились бы одна против другой. В действительности же наблюдалось совершенно беспорядочное расположение отметок. Это можно объяснить лишь тем, что в отдельных актах испускания возникают световые частицы, летящие то в одном, то в другом направлении. Так было экспериментально доказано существование особых световых частиц – фотонов.

Фотон обладает энергией $E = h\nu = h(c/\lambda)$. Для видимого света длина волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ и энергия $E = 2,2 \text{ эВ}$, для рентгеновских лучей $\lambda = 10^{-4} - 10^{-2} \text{ \AA}$ и $E = 05 - 06 \text{ эВ}$. Фотон обладает инертной массой, которую можно найти из соотношения $E = mc^2$:

$$m_{\phi} = E/c^2 = hc/\lambda c^2 = h/c\lambda;$$

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Фотон движется со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Подставим это значение скорости в выражение для релятивистской массы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \frac{m_0}{0} \rightarrow \infty.$$

Но масса фотона m_0 – конечна, т.е. получено абсурдное заключение.

Фотон – частица, не обладающая массой покоя. Она может существовать, только двигаясь со скоростью света c .

Найдем выражение для энергии и импульса фотона.

Мы знаем релятивистское выражение для импульса:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

И для энергии:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Найдем v^2 :

$$p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m_0 v; \quad p^2 - \frac{p^2 v^2}{c^2} = m_0^2 v^2;$$

$$p^2 = v^2 \left(\frac{p^2}{c^2} + m_0^2 \right) = v^2 \left(\frac{p^2 + m_0^2 c^2}{c^2} \right);$$

$$v^2 = \frac{p^2 c^2}{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

Подставив выражение $v^2 = \frac{p^2 c^2}{p^2 + m_0^2 c^2}$ в выражение для энергии, получим связь между энергией и импульсом:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{p^2 c^2}{(p^2 + m_0^2 c^2) c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{\frac{p^2 + m_0^2 c^2 - p^2}{p^2 + m_0^2 c^2}}};$$

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4 (p^2 + m_0^2 c^2)}{m_0^2 c^2} = c^2 (p^2 + m_0^2 c^2);$$

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

Или

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2 + m_0^2 c^2.$$

Но т. к. для покоящегося фотона $m_0 = 0$, поэтому $m_0^2 c^2 = 0$. Окончательно получим:

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2, \text{ или } p = \frac{E}{c}.$$

Т.к. $E = h\nu$, то можно записать:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c}.$$

Обозначим $k = \frac{\omega}{c}$, где k – волновое число. Теперь выразим импульс через волновой вектор:

$$\vec{p} = \hbar \vec{k},$$

где \vec{k} – волновой вектор фотона.

4. Эффект Комптона (1923г.)

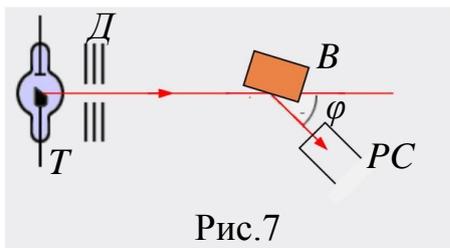


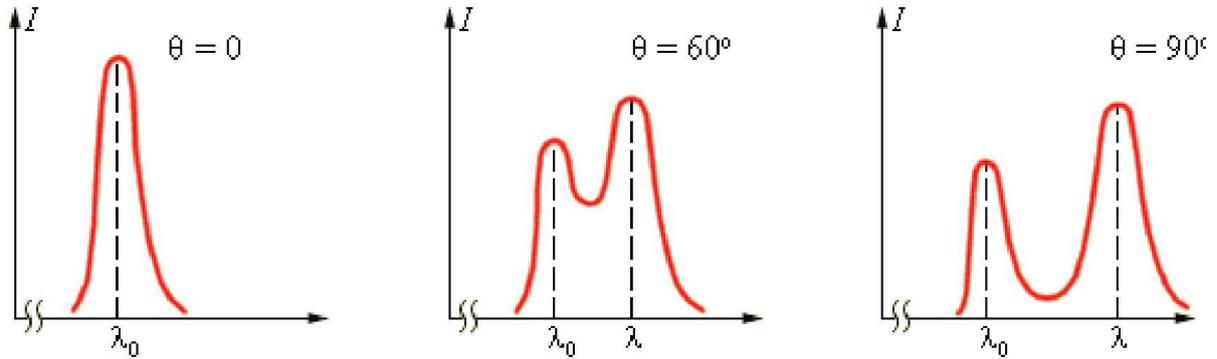
Рис.7

Квантовые свойства света проявляются в явлении, обнаруженном А.Комптоном. Эксперимент демонстрирует, во – первых, то, что фотон обладает импульсом, и, во – вторых, то, что взаимодействие между электромагнитным излучением и электронами может рассматриваться как столкновение

между фотонами и электронами.

Схема опытов Комптона изображена на рисунке 7. Монохроматические рентгеновские лучи, возникающие в рентгеновской трубке T , проходят через диафрагму D и узким пучком направляются на легкое рассеивающее вещество B . Это может быть графит, парафин и др. После рассеяния на угол φ попадают в приемник – рентгеновский спектрограф PC , где измеряется длина волны рассеянного излучения. Рентгеновская трубка смонтирована на вращающейся платформе, так что рентгеновские лучи могут падать на рассеивающее вещество под любым заданным углом. Ис-

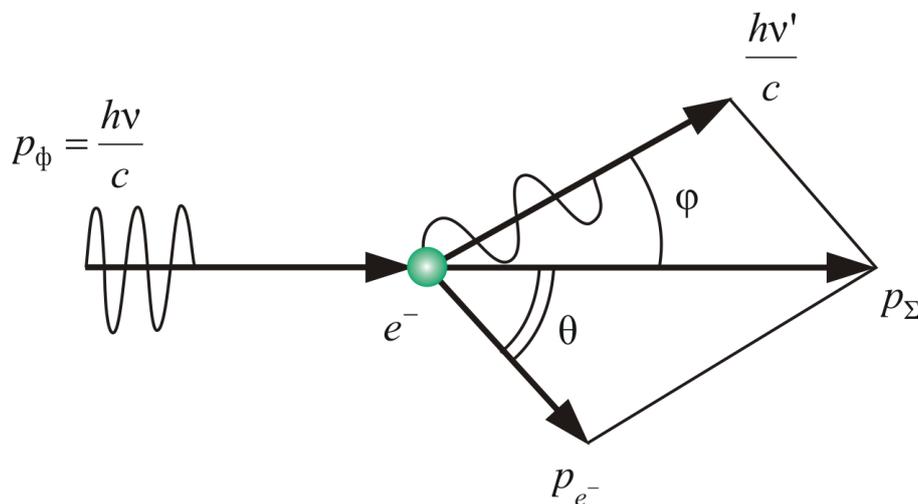
следует одна из характеристических рентгеновских линий λ . Кристалл B медленно вращается, подбирается такое его положение, при котором на фотопленке экспонируется спектральная линия рассеянных рентгеновских лучей.



Спектры рассеянного излучения

Новый и интересный результат – появление в спектре рассеянного рентгеновского излучения **добавочной линии λ'** , которая не испускалась рентгеновской трубкой. Рассеяние $\lambda' - \lambda$ зависит от угла φ , но не зависит от длины волны λ и от материала рассеивателя:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \text{const} \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$



Фотонная теория допускает, что рентгеновский фотон сталкивается со сравнительно слабо связанным электроном и передает ему некоторую часть своего импульса и энергии. При этом процессе энергия и импульс сохраняются. Энергия рассеянного фотона $h\nu'$ меньше энергии падающего фотона $h\nu$, в спектре появляется добавочная линия λ' .

Геометрия столкновения показана на рисунке. Квант света с импульсом $P_0 = \frac{h\nu}{c}$ сталкивается с неподвижным электроном атома в точке O . Сам квант при этом летит в направлении, определенным углом φ , его импульс $P = \frac{h\nu'}{c}$. Электрон приобретет у кванта кинетическую энергию E и некоторое количество движения p_e .

Из закона сохранения энергии следует

$$h\nu = h\nu' + E$$

Из закона сохранения импульса следует

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} + \bar{p}_e,$$

или, в скалярной форме

$$\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h\nu}{c}\frac{h\nu'}{c}\cos\varphi = p_e^2$$

Решая совместно систему уравнений (1) и (2) и учитывая релятивистский характер движения электрона, получим соотношение

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\frac{h}{m_0c}\sin^2\frac{\varphi}{2} = 2\lambda_k\sin^2\frac{\varphi}{2},$$

где величина $\frac{h}{m_0c} = \lambda_k$ названа комптоновской длиной волны, $\lambda_k = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м.

Полученное теоретически уравнение и экспериментальное полностью совпали.

Присутствие в рассеянном излучении также и длины волны λ означает, что рентгеновские фотоны рассеиваются на сильно связанных электронах без потери энергии и импульса. Очевидно, здесь имеет место другой тип столкновений, при котором нельзя пренебречь связью электрона в атоме.

Все изложенное в предыдущих параграфах служит доказательством того, что свет ***одновременно*** обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов. Он представляет собой единство этих противоположных свойств. Однако в проявлении этих свойств имеется определенная закономерность. С уменьшением длины волны (увеличением частоты) все более отчетливо проявляются квантовые свойства. Поэтому, в дальнейшем, предстоит ответить на вопрос о сочетании и взаимозависимости волновых и корпускулярных свойств света.

5. Давление света

Основной постулат корпускулярной теории электромагнитного излучения, звучит так: электромагнитное излучение (и в частности свет) – это поток частиц, называемых **фотонами**. Фотоны распространяются в вакууме со скоростью, равной предельной скорости распространения взаимодействия, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, масса и энергия покоя любого фотона равны нулю, энергия фотона E связана с частотой электромагнитного излучения ν и длиной волны λ формулой

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Обратите внимание: формула (2.7.1) связывает *корпускулярную* характеристику электромагнитного излучения – энергию фотона с *волновыми* характеристиками – частотой и длиной волны. Она представляет собой мостик между корпускулярной и волновой теориями. Существование этого мостика неизбежно, так как и фотон, и электромагнитная волна, это всего-навсего *две модели одного и того же реально существующего объекта – электромагнитного излучения*.

Всякая движущаяся частица (*корпускула*) обладает импульсом, причём согласно теории относительности энергия частицы E и ее импульс p связаны формулой:

$$E = \sqrt{E_0^2 + (cp)^2},$$

где E_0 – энергия покоя частицы. Так как энергия покоя фотона равна нулю, то из (2.7.2) и (2.7.1) следуют две очень важные формулы:

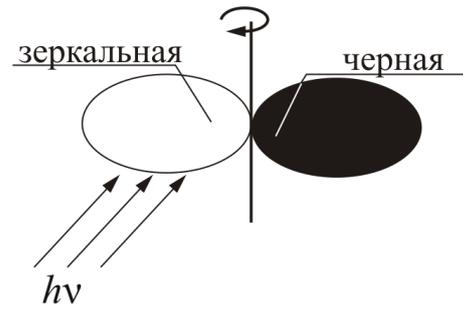
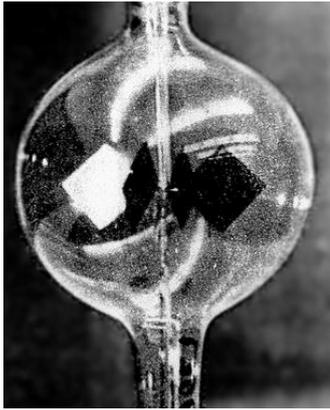
$$E = cp,$$

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Обратимся теперь к явлению светового давления.

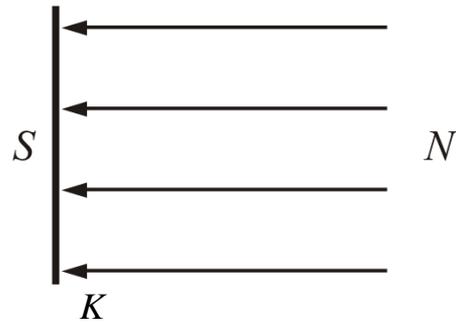
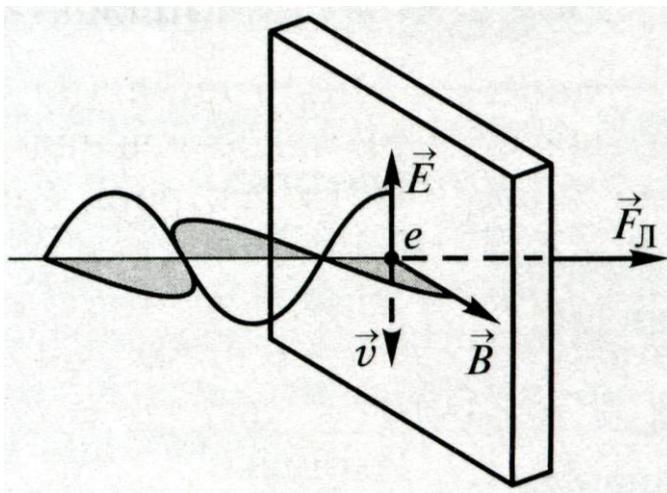
Давление света открыто русским ученым Лебедевым в 1901 году.

В своих опытах он установил, что давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела. В опытах была использована вертушка имеющая черные и зеркальные лепестки, помещенная в вакуумированную колбу (рис. 2.10).



Вычислим величину светового давления.

На тело площадью S падает световой поток с энергией $E = N h \nu$, где N – число квантов.



KN квантов отразится от поверхности; $(1 - K)N$ – поглотится.

Здесь K – коэффициент отражения. Каждый поглощенный фотон передаст телу импульс

$$p_n = \frac{h\nu}{c}.$$

Каждый отраженный фотон, передаст телу импульс:

$$p_{\text{отр}} = \frac{2h\nu}{c},$$

т.к. $\frac{h\nu}{c} - \left(-\frac{h\nu}{c}\right) = \frac{2h\nu}{c}.$

В единицу времени все N квантов сообщают телу импульс p :

$$p_{\text{отр}} = (1 - K)N \frac{h\nu}{c} + \frac{2h\nu}{c} NK.$$

Т.к. фотон обладает импульсом, то импульс переданный телу за одну секунду, есть сила давления – это сила, отнесенная к единице поверхности.

Тогда давление

$$P = \frac{\frac{2h\nu}{c}KN + \frac{h\nu}{c}N(1-K)}{S} = \frac{h\nu N}{cS}(1+K) = I \frac{(1+K)}{c},$$

где I – интенсивность излучения.

$$P = I \frac{1+K}{c},$$

если тело зеркально отражает, то $K = 1$ и $P = \frac{2I}{c}$,

если полностью поглощает (абсолютно черное тело) $K = 0$ и $P = \frac{I}{c}$, т.е.

световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.

Итак, следующее из корпускулярной теории заключение, что *световое излучение оказывает давление на материальные предметы, причем величина давления пропорциональна интенсивности излучения*, прекрасно подтверждается в экспериментах.

Одним из следствий давления солнечного света, является то, что кометы, пролетающие вблизи Солнца, имеют «хвосты».



Итак, подчеркнем единство корпускулярных и волновых свойств света.

Явления, подтверждающие квантовые свойства света	<i>Излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона</i>
Явления, подтверждающие волновые свойства света	<i>Интерференция, дифракция, поляризация света</i>
Явления, объясняемые как волновой, так и квантовой теориями	<i>Давление, преломление света, дисперсия света</i>

Уравнения, связывающие корпускулярные свойства электромагнитного излучения (энергия, и импульс фотона) с волновыми свойствами (частота, длина волны)	$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$
--	--

Таким образом электромагнитное излучение обнаруживает единство корпускулярных и волновых свойств.