

## Глава 14. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

### 14.1. КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА. ФОТОН

Изучение явлений интерференции, дифракции и поляризации света подтвердило волновую теорию света, в соответствии с которой свет представляет собой электромагнитные волны определенной частоты (см. § 12.8—12.11). Казалось, природа света изучена полностью. Но полученные в конце XIX в. экспериментальные факты не подтвердили эту уверенность. Так, с точки зрения электромагнитной теории света нельзя было объяснить закономерности в спектре теплового излучения нагретого *абсолютно черного тела* (т. е. тела, которое поглощает все излучение, падающее на него). Исследования показали, что полная интенсивность излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры. Если исследовать спектр излучения такого тела, то можно определить в нем распределение энергии. Экспериментальные кривые зависимости интенсивности излучения от длины волны в спектре приведены на рис. 14.1. Заметим, что при  $T \approx 6000$  К максимум интенсивности находится в видимой области ( $\lambda_{\max} \approx 500$  нм).

Главная проблема, с которой столкнулись ученые, заключалась в теоретической трактовке спектра излучения черного тела. Согласно электромагнитной теории света, излучение нагретого тела обусловлено колебаниями электрических зарядов в молекулах вещества, из которых состоит тело. Это объясняло причину появления излучения, но не давало возможности предсказать закономерности в его спектре. На основе классических представлений В. Вин (1896) и Дж. Рэлей (1900) построили две теоретические кривые зависимости интенсивности излучения от длины волны. Но по мере накопления экспериментальных данных становилось ясно, что ни одна из них не соответствовала эксперименту. Кривая Вина описывала рас-

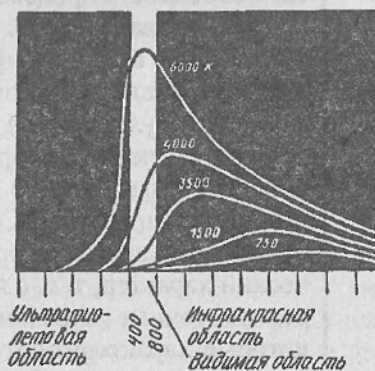


Рис. 14.1

пределение интенсивности в области коротких волн, но не подтверждалась экспериментально в области более длинных. Согласно теории Рэлея, в тепловом излучении должно быть много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, а полная энергия излучения нагретого тела должна быть бесконечно большой, чего на самом деле не наблюдалось. Таким образом, теория противоречила экспериментам. Выход был найден в 1900 г. немецким физиком М. Планком. Он объяснил распределение энергии в спектре излучения, сделав допущение, что атомы излучают свет не непрерывно, а отдельными порциями, получившими название *квантов света*. По гипотезе Планка энергия атомов и молекул излучающего тела может принимать только дискретные значения, равные целому числу элементарных порций (квантов) энергии  $E$ , т. е.  $E = nE_0$ , где  $n$  — любое положительное число. При этом энергия кванта  $E_0$  должна быть пропорциональна частоте колебаний  $\nu$ , т. е.  $E_0 = h\nu$ . Коэффициент пропорциональности  $h$  называют постоянной Планка ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с), а формулу  $E_0 = h\nu$  — формулой Планка.

В современной трактовке гипотезы квантов утверждается, что энергия колебаний атома или молекулы может быть равной  $h\nu$ ,  $2h\nu$ ,  $3h\nu$  и т. д., но не существует колебаний, энергия которых заключена в промежутке между двумя последовательными целыми числами, кратными  $h\nu$ . Это означает, что на атомно-молекулярном уровне колебания происходят не с любыми значениями амплитуд. Допустимые значения амплитуд определяются частотой колебаний.

В 1905 г. Эйнштейн высказал смелое суждение, обобщившее квантовую гипотезу Планка и одновременно явившееся основой новой квантовой теории света. В гипотезе Планка утверждалось, что энергия колебаний атомов излучающего тела квантуется. Согласно Эйнштейну, если энергия колебаний атомов квантуется, то по закону сохранения энергии они должны излучать свет квантами с такой же энергией:  $E = h\nu$ . Это означало, что свет не только излучается, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных порций энергии — квантов электромагнитного излучения. Эти кванты были названы *фотонами*. При монохроматическом излучении с частотой  $\nu$  все фотоны имеют одинаковую энергию, равную  $h\nu$ . Гипотезу Эйнштейна подтверждал опыт немецкого физика В. Боте (рис. 14.2). Тонкая металлическая фольга  $\Phi$  располагалась между двумя газоразрядными счетчиками  $C_1$  и  $C_2$  и освещалась слабым

пучком рентгеновского излучения  $P$ . Под воздействием этого излучения она становилась вторичным источником рентгеновских лучей (это явление называют *рентгеновской флюоресценцией*). Каждый из счетчиков начинал работать при попадании на него рентгеновских лучей и при этом

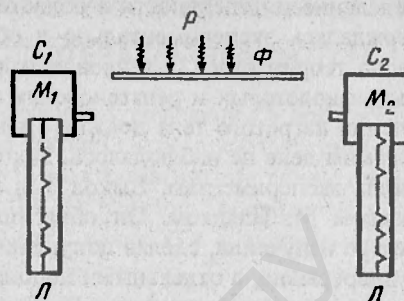


Рис. 14.2

приводил в действие самописцы  $M_1$  и  $M_2$ , которые делали метки на ленте  $L$ , движущейся равномерно. Если бы, в соответствии с электромагнитной теорией света, энергия излучения была распределена по всем направлениям равномерно, то оба счетчика должны были бы срабатывать одновременно и метки на ленте находились бы друг против друга. В действительности же метки были расположены беспорядочно. Это можно объяснить только тем, что при отдельных актах излучения возникают световые частицы, которые летят то в одном, то в другом направлении. Опыт Боте явился доказательством существования фотонов. Подтверждали квантовую теорию света также эксперименты Милликена по изучению явления фотоэффекта (1914). Полученные им результаты целиком соответствовали квантовой теории света.

Отметим основные свойства фотонов.

1. Фотон — частица электромагнитного излучения (квант электромагнитного поля).
2. Фотон, будучи квантом электромагнитного поля, существует только в движении. Скорость фотона в вакууме всегда  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с и не зависит от выбора инерциальной системы отсчета.
3. Фотоны могут сравнительно легко рождаться (излучаться) и исчезать (поглощаться). Они являются неделимыми частицами, т. е. излучаются, отражаются или поглощаются только целиком.
4. Фотон — электронейтральная материальная частица, обладающая энергией  $E = mc^2 = h\nu$ , массой  $m = h\nu/c^2$  и импульсом  $p = mc = h\nu/c = h/\lambda$ . Масса фотона является мерой его энергии и ее необходимо рассматривать как полевую массу. Это обусловлено тем, что электромагнитное поле обладает энергией.

Из приведенных формул следует, что корпускулярные и волновые свойства света взаимосвязаны, причем в проявлении двойственности свойств света наблюдается закономерность. На малых частотах энергия каждого фотона мала, поэтому в большей степени проявляются волновые свойства излучения. На больших частотах легче выявить корпускулярные свойства излучения. В случаях, когда регистрируются результаты воздействия света на объект в течение сравнительно больших промежутков времени, дискретность светового излучения стирается и мы наблюдаем непрерывную волновую картину. Когда наблюдаются индивидуальные акты взаимодействия излучения с микрочастицами, дискретная структура излучения выступает на первый план. Таким образом, в соответствии с современными научными представлениями фотон — это элементарная частица (квант электромагнитного поля) с нулевым электрическим зарядом, которая участвует в электромагнитном и гравитационном взаимодействиях.

#### 14.2. ФОТОЭФФЕКТ И ЕГО ЗАКОНЫ

*Фотоэффектом* называют явления, возникающие при взаимодействии света с веществом и заключающиеся в освобождении электронов, которые находятся в веществе в связанном состоянии (внутренний фотоэффект), или в эмиссии электронов (внешний фотоэффект). При внутреннем фотоэффекте часть электронов переходит из связанных состояний в свободные. Поэтому концентрация носителей тока в веществе увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости, т. е. к повышению электропроводности вещества под воздействием света. Так, например, рост концентрации свободных электронов в полупроводниках под воздействием света вызывает изменение его сопротивления. Под воздействием света может измениться и внутреннее электрическое поле в кристалле, что является причиной возникновения фотоЭДС в зоне контакта двух полупроводников с разными типами проводимости или в зоне контакта полупроводника и металла, при освещении приконтактного слоя. В этом случае возникшие под воздействием света свободные электроны в  $p$ -области и дырки в  $n$ -области проходят через  $p-n$ -переход. В результате в  $p$ -области накапливается избыточный положительный заряд, а в  $n$ -области — избыточный отрицательный заряд. Это приводит к возникновению фотоЭДС.

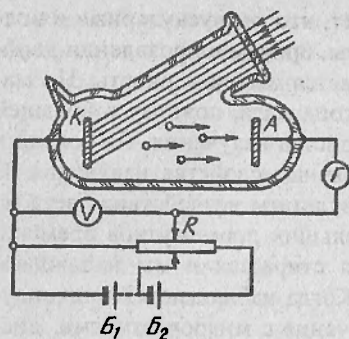


Рис. 14.3

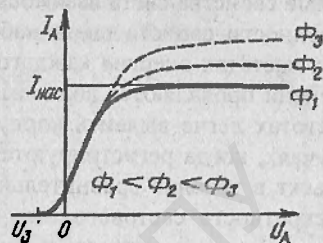


Рис. 14.4

При внешнем фотоэффекте, который наблюдается в любых твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах или молекулах (фотоионизация), происходит эмиссия электронов с поверхности тела в вакуум под воздействием излучения.

В 1887 г. Г. Герц установил, что если освещать отрицательный электрод искрового разрядника ультрафиолетовыми лучами, разряд происходит при меньшем напряжении между электродами, чем если бы такого освещения не было. Как показали опыты В. Гальвакса (1888) и А. Столетова (1888—1890), это явление обусловлено выбиванием отрицательных зарядов с металлического катода разрядника под воздействием света.

Схема установки Столетова для исследования внешнего фотоэффекта приведена на рис. 14.3. В стеклянный баллон, из которого откачан воздух, помещались два металлических электрода, на один из которых — фотокатод  $K$  — падал свет через кварцевое окошко. Напряжение от источника тока подавалось на электроды через потенциометр. Две аккумуляторные батареи  $B_1$  и  $B_2$  давали возможность с помощью потенциометра  $R$  изменять не только абсолютную величину, но и знак напряжения  $U$ . Фототок в промежутке между электродами измерялся гальванометром  $G$ . В первой серии опытов измерялась зависимость силы тока от напряжения между электродами при неизменной интенсивности света, падающего на фотокатод. Было установлено, что при нулевом напряжении между электродами в цепи существует слабый фототок. С ростом напряжения  $U$  сила фототока  $I$  возрастает и при некотором напряжении достигает максимального значения,

которое называют током насыщения  $I_n$ . При дальнейшем увеличении напряжения сила тока остается неизменной. Графики зависимости  $I = I(U)$ , построенные по экспериментальным данным для разных значений интенсивности света  $\Phi$ , падающего на фотокатод, приведены на рис. 14.4. Если по этим данным построить график зависимости силы тока насыщения от интенсивности света, то получим прямую, которая проходит через начало координат (рис. 14.5). Это дает возможность сформулировать первый закон фотоэффекта.

**1. Плотность фототока насыщения (число электронов, вырываемых светом с катода в единицу времени) пропорциональна интенсивности света, падающего на фотокатод.**

Из рис. 14.4 следует, что при  $U = 0$  сила тока  $I \neq 0$ , т. е. электроны, которые вылетают с фотокатода, имеют определенную скорость. Для измерения скорости фотоэлектронов на катод надо подать положительный, а на анод отрицательный потенциал. Сила тока обращается в нуль при некотором отрицательном напряжении, которое называют *задерживающим* ( $U_3$ ). При этом напряжении вся кинетическая энергия фотоэлектронов затрачивается на работу против сил электрического поля. Поэтому если скорость электрона  $v$  мала по сравнению со скоростью света, то  $eU_3 = mv^2/2$ , где  $e$  — заряд;  $m$  — масса электрона. Если  $v \rightarrow c$ , то кинетическая энергия электрона определяется по формуле

$$E = mc^2 \left( \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} - 1 \right) = mc^2(\gamma - 1)$$

(см. §13.5). Поэтому в релятивистском случае  $eU_3 = mc^2(\gamma - 1)$ .

Таким образом, зная  $U_3$ , можно определить максимальную скорость фотоэлектронов.

Во второй серии опытов исследовалась зависимость  $U_3$  от частоты света  $\nu$ , падающего на фотокатод (при постоянной интенсивности света). График зависимости  $U_3 = U(\nu)$ , построенный по экспериментальным данным, приведен на рис. 14.6. В результате анализа этих опытов были сформулированы второй и третий законы фотоэффекта.

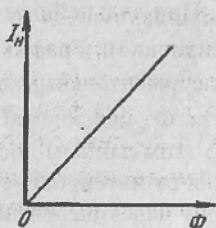


Рис. 14.5

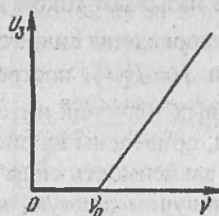


Рис. 14.6

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота света  $\nu_0$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект. Численное значение  $\nu_0$  зависит от химической природы вещества фотокатода и состояния его поверхности.

Кроме того, опыты показали, что фотоэффект практически безынерционен (фотоэлектроны начинают вылетать из металла примерно через  $10^{-9}$  с после начала облучения).

Попытка дать теоретическое толкование законов фотоэффекта в рамках электромагнитной теории света оказалась неудачной. Согласно этой теории, не должно быть красной границы фотоэффекта (третий закон), потому что любая световая волна имеет энергию и может передать ее электрону, который после этого вылетит из катода. Непонятно также, почему максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов зависит от частоты света, а не от амплитуды колебаний вектора напряженности электрического поля и связанной с нею интенсивности световой волны (второй закон). Эти сложности показали невозможность универсального применения волновой теории света для объяснения оптических явлений.

Чтобы теоретически обосновать экспериментальные законы фотоэффекта с точки зрения квантовой теории света, достаточно допустить, что свет поглощается электронами вещества в виде отдельных порций — квантов света, энергия которых определяется по формуле Планка.

Рассмотрим внешний фотоэффект в металлах исходя из квантовой теории света. Как известно, для выхода из металла свободному электрону необходимо сообщить дополнительную энергию, равную работе выхода  $A$ . В результате поглощения фотона электрон приобретает энергию  $h\nu$ . Если будет выполняться условие  $h\nu > A$ , то электрон сможет преодолеть притяжение со стороны положительно заряженных ионов кристаллической решетки и выйти за границы поверхности металла.

Из закона сохранения и превращения энергии следует, что при внешнем фотоэффекте энергия фотона  $h\nu$  расходуется на вырывание электрона из металла, т. е. на выполнение работы выхода  $A$  и сообщение ему кинетической энергии.

Если электрон, который поглощает квант света, находится в глубине металла, то часть полученной им энергии  $E'$  в результате столкновений может быть передана кристаллической решетке металла. Поэтому кинетическая энергия вылетевшего электрона составляет только часть поглощенной энергии. Вот почему кинетическая энергия фотоэлектрона будет максимальной, если  $E' = 0$ .

В этом случае должно выполняться равенство  $h\nu = A + E_{\text{к max}}$ . Следовательно, если  $v \ll c$ , то

$$h\nu = m v_{\text{max}}^2 / 2 + A.$$

В релятивистском случае

$$h\nu = mc^2 \left( \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} - 1 \right) + A = mc^2(\gamma - 1) + A.$$

Эти равенства носят название *уравнений Эйнштейна* для внешнего фотоэффекта на свободных электронах, в классическом и релятивистском случаях.

Поскольку  $E_{\text{к max}} = eU_3$ , то оба уравнения можно записать в виде  $h\nu = A + eU_3$ .

С точки зрения квантовой теории света внешний фотоэффект в металлах является результатом взаимодействия фотонов со свободными электронами металла, которые находятся вблизи поверхности металла. При столкновении с одним из таких электронов фотон полностью передает ему свою энергию. Если эта энер-



гия большая, то ее достаточно для совершения работы выхода электрона из металла. Повышение интенсивности света вызывает увеличение плотности фотонов, а значит, и увеличение числа столкновений электронов с фотонами. Следовательно, зависимость между интенсивностью падающего света и плотностью фототока насыщения является линейной (первый закон). Каждый фотозэлектрон поглощает один фотон, поэтому его скорость определяется только энергией этого фотона, т. е. частотой падающего света (второй закон). Если энергии поглощенного фотона недостаточно для преодоления сил, удерживающих электрон в металле, фотозэффект не наблюдается (третий закон).

Безынерционность фотозэффекта также является доказательством квантовой природы взаимодействия света с веществом. С волновой точки зрения необходимо достаточно большое время для того, чтобы при малой интенсивности света электромагнитная волна передала электрону энергию, необходимую для совершения работы выхода. Заметим, что при фотозэффекте только небольшая часть фотонов передает свою энергию электронам. Энергия остальных фотонов расходуется на нагревание тела, поглощающего свет. Кроме того, возможны случаи, когда электрон одновременно поглощает несколько фотонов (два или три).

Фотозэффект широко используется в науке и технике для регистрации и измерения интенсивности световых потоков, превращения энергии света в энергию электрического тока, преобразования световых сигналов в электрические. Приборы, действие которых основано на явлении фотозэффекта, называют *фотоэлементами*. Простейший вакуумный фотоэлемент (рис. 14.7) представляет собой откачанный до высокого вакуума стеклянный баллон, часть внутренней поверхности которого покрыта слоем металла, играющего роль фотокатода *K*. В качестве анода *A* используются металлическое кольцо или редкая сетка, которые также находятся внутри баллона. Свет в баллон попадает через кварцевое окошко *B*. Фотоэлемент включается в цепь источника тока. При освещении катода из него в результате внешнего фотозэффекта выбиваются электроны, и в цепи возникает фотоэлектрический ток.

Обычно ЭДС источника тока выбирается таким образом, чтобы фототок был

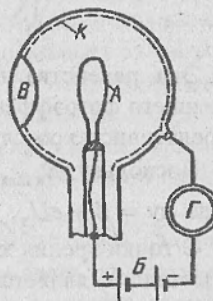


Рис. 14.7

равен току насыщения. Фототок можно значительно увеличить путем заполнения баллона фотоэлемента инертным газом при низком давлении (обычно аргоном). Такие фотоэлементы называются газонаполненными.

В последнее время широко используются полупроводниковые фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и *фотосопротивления*. Они имеют более высокую чувствительность по сравнению с вакуумными и газонаполненными фотоэлементами. Простейшее фотосопротивление представляет собой стеклянную пластинку, на которую нанесен тонкий слой вещества, которое является полупроводником. На поверхности пластинки закреплены токопроводящие электроды. Недостатком фотосопротивлений является зависимость их свойств от температуры. Для создания фотосопротивлений, работающих в области видимого спектра, используют сернистый кадмий, сернистый галлий.

Для автоматического управления различными производственными процессами часто применяют *фотореле*. Оно состоит из фотоэлемента, усилителя фототока и электромагнитного реле. При попадании на фотоэлемент излучения в катушке электромагнитного реле возникает ток, она намагничивается и притягивает якорь, который замыкает контакты цепи. В результате приводятся в действие разные механизмы, приборы и т. д. Фотореле включают и выключают маяки, освещение на улицах и т. д. Если освещенность фотоэлемента ниже нормы, фотореле автоматически включает освещение, а если солнечный свет дает достаточную освещенность, — выключает его. В военном деле фотоэлементы применяются в самонаводящихся снарядах, для сигнализации и локации невидимыми лучами. Фотоэлементы используются в фототелеграфе для передачи неподвижных изображений, в фототелефонах, работающих на инфракрасных лучах, в астрокомпасе — приборе, который служит для ориентации по Солнцу и звездам.

## **Глава 15. АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО**

### **15.1. ЯВЛЕНИЯ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ СЛОЖНОЕ СТРОЕНИЕ АТОМА**

Вплоть до конца XIX в. в науке господствовало мнение, что самые мелкие частицы химически простых тел — атомы — являются неделимыми частицами материй, «кирпичиками», из ко-