

Величайшая революция в физике совпала с началом XX в. Попытки объяснить наблюдаемые на опытах закономерности распределения энергии в спектрах теплового излучения (электромагнитного излучения нагретого тела) оказались несостоятельными. Многократно проверенные законы электромагнетизма Максвелла неожиданно «забастовали», когда их попытались применить к проблеме излучения веществом коротких электромагнитных волн. И это тем более удивительно, что эти законы превосходно описывают излучение радиоволн антенной и что в свое время само существование электромагнитных волн было предсказано на основе этих законов.

Глава 5

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

Квантовым законам подчиняется поведение всех микрочастиц. Но впервые квантовые свойства материи были обнаружены при исследовании излучения и поглощения света.

§ 5.1. ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Равновесное тепловое излучение

Среди различных типов излучений, рассмотренных в предыдущей главе, тепловое излучение занимает особое поло-

жение. Дело в том, что тепловое излучение может быть равновесным. Это означает, что возможно *тепловое (термодинамическое) равновесие между телом и созданным им излучением*.

Равновесное излучение можно получить внутри полости тела, имеющего постоянную температуру. При равновесии электромагнитная энергия, излучаемая телом в единицу времени внутрь полости, равна энергии, поглощаемой из полости за это же время. Температура тела при этом остается неизменной. Равновесному излучению приписывается определенная температура, именно та, которую имеет тело: если температура тела, например, 300 К, то говорят, что излучение, находящееся в полости, также имеет температуру 300 К.

Из-за равновесного характера теплового излучения к нему можно применять законы термодинамики. Это позволяет установить несколько общих закономерностей. Так, можно быть уверенным, что плотность энергии излучения и распределение этой энергии по частотам не зависят от свойств вещества стенок полости. Если бы это было не так, то, соединив трубкой две полости со стенками из разных веществ, мы обнаружили бы перетекание энергии из одной полости в другую, даже при одинаковых температурах (рис. 5.1). В результате одно тело начало бы остывать, а другое нагреваться, т. е. состояние теплового равновесия нарушилось бы само собой. Но согласно законам термодинамики это невозможно*.

Если энергия теплового излучения не зависит от рода вещества, из которого сделаны стенки, то, следовательно, можно выбрать любую простую модель строения вещества и с ее помощью попытаться найти зависимость плотности энергии теплового излучения от температуры и частоты. (Важно лишь, чтобы модель обеспечивала излучение и поглощение волн всех частот.) Благодаря этому обстоятельству оказалось возможным начать теоретическое исследование теплового излучения, когда еще не было известно строение атомов.

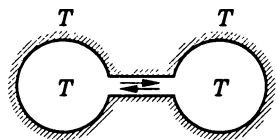


Рис. 5.1

* В трубку можно вставить фильтр, пропускающий электромагнитные волны в узком интервале частот $\Delta\nu$. Так доказывается равенство плотностей энергии для всех частот.

Самую простую модель вещества, способного излучать и поглощать электромагнитные волны, предложил выдающийся немецкий физик Макс Планк (1858—1947). В то время (конец XIX в.) уже было известно об излучении электромагнитных волн определенной частоты вибратором Герца. В этом вибраторе электрические заряды совершают колебания, близкие к гармоническим. Поэтому вибратор Герца называют также электромагнитным осциллятором*.

Линейный гармонический осциллятор — это просто система, способная совершать свободные гармонические колебания вдоль прямой около положения равновесия. Так, груз на пружине — это тоже гармонический осциллятор. Если тело, колеблющееся с некоторой частотой, электрически заряжено, то оно способно излучать и поглощать заметным образом электромагнитные волны той же частоты. Поэтому если стенка полости состоит из осцилляторов со всевозможными частотами колебаний, то она способна поглощать и испускать излучение любой длины волны.

Из молекулярно-кинетической теории вытекает, что в состоянии теплового равновесия средняя энергия любого осциллятора не зависит от частоты и равна kT , где k — постоянная Больцмана, а T — абсолютная температура. Полезно вспомнить, что средняя энергия молекулы одноатомного газа равна почти такой же величине, а именно $\frac{3}{2} kT$.

Излучаемая осциллятором в единицу времени электромагнитная энергия пропорциональна средней энергии осциллятора kT . И так как число осцилляторов со всевозможными значениями частот колебаний должно быть бесконечно велико, то излучаемая ими энергия должна быть бесконечно большой.

Но этот вывод совершенно бессмыслен, так как он отрицает возможность теплового равновесия между веществом и излучением. Тело при любой температуре должно излучать и терять энергию до тех пор, пока его температура не снизится до абсолютного нуля. Однако повседневный опыт показывает, что ничего подобного в действительности нет: вещество не расходует всю свою энергию на излучение электромагнитных волн.

* От латинского слова *oscillo* — качаюсь.

Так как общая энергия излучения получается бесконечно большой из-за того, что излучаются все частоты вплоть до сколь угодно высоких, то сложившаяся противоречивая ситуация получила название «ультрафиолетовой катастрофы». Обнаружилась эта катастрофа в самом конце XIX в.

Гипотеза Планка

Планк первым понял, что объяснить существование теплового равновесного излучения, основываясь на известных и хорошо проверенных законах электродинамики Максвелла и механики Ньютона, нельзя.

Выход из трудностей возможен при одном достаточно простом, но противоречащем известным законам природы предположении. Энергия простейшей микроскопической системы — гармонического осциллятора — не может принимать любые значения. При собственной частоте колебаний ν_0 она принимает лишь дискретные (прерывные) значения:

$$E_n = h\nu_0 n, \quad (5.1.1)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ — целые числа, а h — коэффициент пропорциональности, названный впоследствии постоянной Планка.

Гипотеза Планка позволяет понять, почему при больших частотах энергия излучения оказывается не только не бесконечной, а, напротив, практически равной нулю. На рисунке 5.2 изображены возможные значения энергии осциллятора в соответствии с предположением Планка. Чтобы возбудить колебания осциллятора, ему нужно сообщить энергию, не меньшую $h\nu_0$. Чем больше частота, тем выше эта энергия. Энергию осциллятор получает за счет теплового движения. Энергия же этого движения (на одну частицу) имеет значение порядка kT . Если $h\nu_0 \gg kT$, то осцилляторы не возбуждаются и, следовательно, не излучают. Поэтому средняя энергия $\bar{E}$ осцилляторов Планка равна не kT , а зависит от частоты, и при $\nu_0 \rightarrow \infty$ она приближается к нулю.

Если энергия излучающей системы принимает лишь дискретные значения, то отсюда можно сделать вывод, что электромагнитная энергия излучается осциллятором не непрерывно,

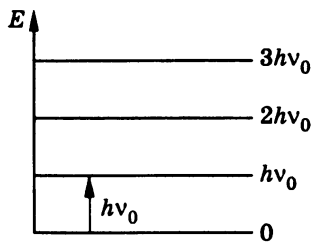


Рис. 5.2

а отдельными порциями — квантами^{*}. Ведь энергия осциллятора может меняться только скачками на величину $h\nu_0$. Поэтому энергия порции электромагнитного излучения равна соответственно:

$$E = h\nu_0. \quad (5.1.2)$$

Планк построил теорию равновесного теплового излучения, полностью согласующуюся с экспериментом. По известному из опыта распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{**}. \quad (5.1.3)$$

Мы впоследствии подробно рассмотрим другой метод определения постоянной Планка.

Итак, Планк указал выход из трудностей, с которыми столкнулась теория. Но это оказалось возможным сделать лишь ценой отказа от применимости законов классической физики к микроскопическим системам — осцилляторам.

Оставалось неясным, почему колеблющееся тело не может иметь любые значения энергии и каким образом непрерывные электромагнитные волны могут излучаться отдельными порциями.

Однако все дальнейшее развитие физики полностью подтвердило справедливость предположений Планка. Введение понятия кванта действия послужило началом развития совершенно новой физической теории — *квантовой теории*, — которое не завершено и по сей день.

§ 5.2. ФОТОЭФФЕКТ

В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839—1896). Явление это получило название фотоэффекта.

Фотоэффектом называют вырывание электронов из вещества под действием света.

^{*} Сам Планк, впрочем, не смог решиться на этот вывод, противоречащий классической электродинамике Максвелла.

^{**} Коэффициент h имеет смысл произведения энергии на время. В механике такая величина называется действием. Поэтому постоянную Планка называют также квантом (порцией) действия.

Наблюдение фотоэффекта

Для обнаружения фотоэффекта можно использовать электроскоп с присоединенной к нему цинковой пластиной (рис. 5.3). Если зарядить пластину положительно, то освещение пластины, например, электрической дугой не влияет на быстроту разрядки электроскопа. Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает его очень быстро.

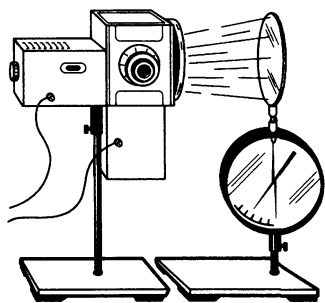


Рис. 5.3

Объяснить это можно единственным образом. Свет вырывает электроны с поверхности пластины; если она заряжена отрицательно, электроны отталкиваются от нее и электроскоп разряжается. При положительном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электроскопа не изменяется.

Однако, когда на пути светового потока поставлено обыкновенное стекло, отрицательно заряженная пластинка уже не теряет электроны, какова бы ни была интенсивность излучения. Поскольку известно, что стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, то из этого опыта можно заключить, что именно ультрафиолетовый участок спектра вызывает фотоэффект. Этот сам по себе несложный факт нельзя объяснить на основе волновой теории света. Непонятно, почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если даже амплитуда волны велика и, следовательно, велика сила, действующая на электроны.

Законы фотоэффекта

Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия. С этой целью были проведены экспериментальные исследования, которые состояли в следующем. В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещаются два электрода (рис. 5.4). Внутри баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое «окошко», прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На электроды подается

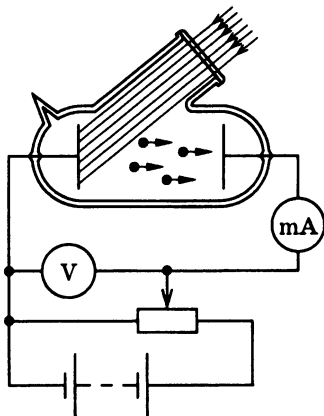


Рис. 5.4

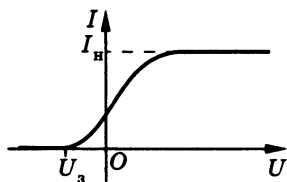


Рис. 5.5

напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром. К освещаемому электроду присоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода. Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока нарастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестает увеличиваться (рис. 5.5). Максимальное значение силы тока I_n называется **током насыщения**. Ток насыщения определяется числом электронов, испущенных за 1 с освещаемым электродом.

Изменяя в этом опыте интенсивность излучения, удалось установить, что количество электронов, вырывааемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны. В этом ничего неожиданного нет: чем больше энергия светового пучка, тем эффективнее его действие.

Теперь остановимся на измерении кинетической энергии (или скорости) электронов. Из графика, приведенного на рисунке 5.5, видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого (см. рис. 5.4) электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить полярность батареи, то сила тока уменьшится и при некотором напряжении U_3 обратной полярности она станет равной нулю. Это значит, что

электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.

Задерживающее напряжение U_3 зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют вырванные светом электроны. Измеряя задерживающее напряжение и применяя теорему о кинетической энергии, можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

При изменении интенсивности света (плотности потока излучения) задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Это означает, что не меняется кинетическая энергия электронов. С точки зрения волновой теории света этот факт непонятен. Ведь чем больше интенсивность света, тем большие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля световой волны и тем большая энергия, казалось бы, должна передаваться электронам.

На опытах было обнаружено, что кинетическая энергия вырываемых светом электронов зависит только от частоты света. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности света. Если частота света меньше определенной для данного вещества минимальной частоты $\nu_{\min}$, то фотоэффект не происходит.

§ 5.3. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Все попытки объяснить явление фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которым свет — это электромагнитная волна, непрерывно распределенная в пространстве, оказались безрезультатными. Нельзя было понять, почему энергия фотоэлектронов определяется только частотой света и почему лишь при малой длине волны свет вырывает электроны.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идеи Планка о прерывистом испускании света. В экспериментальных законах фотоэффекта Эйнштейн увидел убедительное доказательство того, что свет имеет прерывистую структуру и поглощается отдельными порциями. Энергия E каждой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте:

$$E = h\nu, \tag{5.3.1}$$

где h — постоянная Планка.

Из того факта, что свет излучается порциями, еще не вытекает прерывистая структура самого света. «Если пиво всегда продается в бутылках, содержащих пинту, — говорил Эйнштейн, — отсюда не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте».

Лишь явление фотоэффекта показало, что свет имеет прерывистую структуру: *излученная порция световой энергии $E = h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем. Поглотиться может только вся порция целиком.*

Максимальную кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света $h\nu$ идет на совершение работы выхода A , т. е. работы, которую нужно совершить для извлечения электрона из металла, и на сообщение электрону кинетической энергии. Следовательно,

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (5.3.2)$$

Это уравнение объясняет основные факты, касающиеся фотоэффекта. Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла. Скорость же электронов, согласно (5.3.2), определяется только частотой света и работой выхода, зависящей от рода металла и состояния его поверхности. От интенсивности света она не зависит.

Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота ν света больше минимального значения $\nu_{\min}$. Ведь чтобы вырвать электрон из металла даже без сообщения ему кинетической энергии, нужно совершить работу выхода A . Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы:

$$h\nu > A.$$

Предельную частоту $\nu_{\min}$ называют красной границей фотоэффекта. Она выражается так:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (5.3.3)$$

Работа выхода A зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота $\nu_{\min}$ фотоэффекта (красная граница) для разных веществ различна.

Для цинка красной границе соответствует длина волны $\lambda_{\max} = 3,7 \cdot 10^{-7}$ м (ультрафиолетовое излучение). Именно этим объясняется опыт по прекращению фотоэффекта с помощью стеклянной пластинки, задерживающей ультрафиолетовые лучи.

Работа выхода у алюминия или железа больше, чем у цинка. Поэтому в опыте, описанном в § 5.2, использовалась цинковая пластина. У щелочных металлов работа выхода, напротив, меньше, а длина волны $\lambda_{\max}$, соответствующая красной границе, больше. Так, для натрия $\lambda_{\max} = 6,8 \cdot 10^{-7}$ м.

Пользуясь уравнением Эйнштейна (5.3.2), можно найти постоянную Планка h . Для этого нужно экспериментально определить частоту света ν , работу выхода A и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов. Такого рода измерения и расчеты дают: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Точно такое же значение было найдено Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления — теплового излучения. Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами, подтверждает правильность предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

§ 5.4. ФОТОНЫ

В современной физике фотон рассматривается как одна из элементарных частиц. Таблица элементарных частиц уже многие десятки лет начинается с фотона.

Энергия и импульс фотона

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.

Фотон, подобно частицам, обладает определенной порцией энергии $h\nu$. Энергию фотона часто выражают не через частоту ν , а через циклическую частоту $\omega = 2\pi\nu$. При этом в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины h ис-

пользуют величину $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (читается: аш с чертой), равную, по современным данным,

$$\hbar = 1,0545887 (57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \quad (5.4.1)$$

Согласно теории относительности энергия всегда связана с массой соотношением $E = mc^2$. Так как энергия фотона равна $h\nu$, то, следовательно, его масса m получается равной

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (5.4.2)$$

Фотон не имеет массы покоя m_0 , т. е. он не существует в состоянии покоя, и при рождении сразу приобретает скорость c . Масса, определяемая формулой (5.4.2), — это масса движущегося фотона. По известной массе и скорости фотона можно найти его импульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.4.3)$$

Направлен импульс фотона по световому лучу.

Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее выражены корпускулярные свойства света. Из-за того что постоянная Планка мала, энергия фотонов видимого света крайне незначительна. Фотоны, соответствующие зеленому свету, имеют энергию $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тем не менее в замечательных опытах С. И. Вавилова было установлено, что человеческий глаз, этот тончайший из «приборов», способен реагировать на различие освещенностей, определяемое единичными квантами.

Эффект Комптона

Наиболее отчетливо квантовые свойства электромагнитного излучения проявляются при рассеянии рентгеновских и гамма-лучей на свободных электронах. При этом наблюдается увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с

длиной волны падающего. Это явление было открыто в 1922 г. американским физиком А. Комптоном (1892—1962).

Согласно классической теории электромагнитного поля рассеяние излучения на свободных электронах не должно сопровождаться изменением длины волны. Падающая волна частотой ν вызывает вынужденные колебания электронов той же частоты. Колеблющиеся электроны излучают вторичные электромагнитные волны с частотой ν . Это и есть рассеянное излучение. Его длина волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$ должна равняться длине волны падающего излучения.

Объяснить изменение длины волны при рассеянии (эффект Комптона) оказалось возможным только на основании представления о фотонах как частицах света, обладающих энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$. Изменение длины волны можно найти, используя законы сохранения энергии и импульса при столкновении фотона с электроном. Сталкиваясь с электроном, фотон передает ему часть своей энергии. В результате энергия электрона увеличивается, а фотона уменьшается. Уменьшение энергии означает уменьшение частоты фотона, а значит, увеличение длины волны излучения.

Комптон наблюдал рассеяние рентгеновских лучей на парафине, графите и других веществах. Энергия фотонов рентгеновских лучей велика по сравнению с энергией ионизации этих веществ. Фотоны вырывают электроны из атомов, сообщая им большую энергию. Поэтому электроны можно считать свободными и покоящимися до столкновения. Из-за того, что приобретаемая электронами энергия велика, при вычислении изменения длины волны рассеянного излучения надо пользоваться релятивистскими выражениями для энергии и импульса электрона.

Согласно закону сохранения энергии

$$\hbar\omega + m_0c^2 = \hbar\omega' + mc^2, \quad (5.4.4)$$

где ω и ω' — частота излучения до и после рассеяния, m_0c^2 — энергия покоя электрона, а

$$mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5.4.5)$$

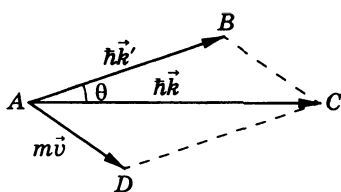


Рис. 5.6

— релятивистская энергия электрона после столкновения с фотоном.

При столкновении фотона с электроном меняется не только энергия, но и импульс фотона. Часть импульса фотона передается электрону. Импульс фотона (5.4.3) по модулю равен:

$$p = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}. \quad (5.4.6)$$

Введем теперь для удобства новую физическую величину, называемую **волновым вектором**:

$$\vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}. \quad (5.4.7)$$

Волновой вектор направлен по импульсу фотона (световому лучу), а его модуль равен:

$$k = \frac{p}{\hbar} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}. \quad (5.4.8)$$

Таким образом, волновой вектор — это величина, обратная длине волны. При записи закона сохранения импульса мы вместо импульса фотона будем использовать волновой вектор, учитывая, что $\vec{p} = \hbar\vec{k}$. Согласно закону сохранения импульса

$$\hbar\vec{k} = \hbar\vec{k}' + m\vec{v}. \quad (5.4.9)$$

На рисунке 5.6 изображены векторы импульса фотона до столкновения $\vec{p}_\phi = \hbar\vec{k}$ и после столкновения $\vec{p}'_\phi = \hbar\vec{k}'$. Электрон до столкновения считался покоящимся. После столкновения он приобретает релятивистский импульс

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

Используя теорему косинусов для треугольника ABC, вместо векторного уравнения (5.4.9) получим уравнение для модулей импульсов:

$$\hbar^2 k^2 + \hbar^2 k'^2 - 2\hbar^2 k k' \cos \theta = m^2 v^2. \quad (5.4.10)$$

Здесь θ — угол рассеяния фотона. Учитывая (5.4.8), из уравнения (5.4.10) получим соотношение для частот:

$$\omega^2 + \omega'^2 - 2\omega\omega' \cos \theta = \frac{m^2 v^2 c^2}{\hbar^2}. \quad (5.4.11)$$

Возводя в квадрат уравнение (5.4.4), выражающее закон сохранения энергии, найдем второе уравнение, необходимое для вычисления изменения частоты (или длины волны) фотона при рассеянии на угол θ :

$$\omega^2 + \omega'^2 - 2\omega\omega' = \frac{c^4}{\hbar^2} (m - m_0)^2. \quad (5.4.12)$$

Вычитая почленно из уравнения (5.4.11) уравнение (5.4.12), после несложных вычислений получим:

$$\omega\omega'(1 - \cos \theta) = \frac{m_0 c^2}{\hbar} (\omega - \omega'), \quad (5.4.13)$$

или

$$\frac{2\pi c}{\omega'} - \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi\hbar}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (5.4.14)$$

Так как $\frac{2\pi c}{\omega'} = \lambda'$ и $\frac{2\pi c}{\omega} = \lambda$, то изменение длины волны фотона при рассеянии

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_{\kappa} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

(5.4.15)

Здесь $\lambda_{\kappa} = \frac{2\pi\hbar}{m_0 c} = 2,4 \cdot 10^{-10}$ м — постоянная величина, называемая комптоновской длиной волны электрона. Она равна изменению длины волны фотона при его рассеянии на угол $\theta = \frac{\pi}{2}$.

Из формулы (5.4.15) видно, что относительное изменение длины волны фотона

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda}. \quad (5.4.16)$$

Так как комптоновская длина волны очень мала (в 100 раз меньше размеров атома), то обнаружить изменение длины волны при рассеянии фотонов на электронах можно только для очень коротковолновых фотонов.

На рисунке 5.7 показана схема опытов Комптона. Рентгеновская трубка 2 вместе с экраном со щелью 3 и графитовой

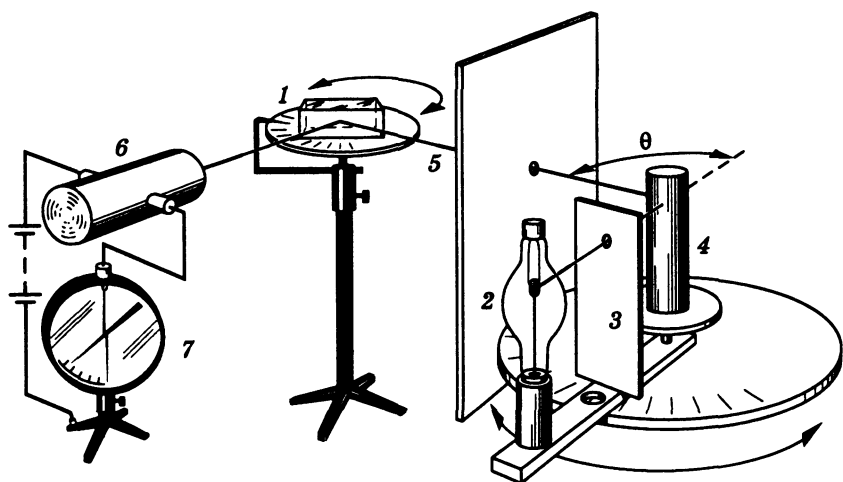


Рис. 5.7

мишенью 4 жестко укреплена на общем основании. Излучение 5 рассеивается под различными углами θ . Часть излучения падает на кристалл 1 и после отражения попадает в камеру 6, где производит ионизацию воздуха (ионизационная камера). В зависимости от степени ионизации меняются показания электрометра 7. Электрометр, таким образом, определяет интенсивность рассеянного излучения.

Отражение от кристалла 1 происходит под углом, определяемым условием Брэгга—Вульфа (5.6.1). Зная ориентацию кристалла, при которой ионизационная камера регистрирует излучение, можно определить длину рассеянной волны. Длина волны рассеянного излучения изменяется в зависимости от угла рассеяния θ в точном соответствии с формулой (5.4.15).

Если явление фотоэффекта доказало, что фотон обладает энергией $E = \hbar\omega$, то эффект Комптона послужил экспериментальным доказательством того, что фотон обладает импульсом $p = \frac{\hbar\omega}{c}$. В этом отношении фотон подобен всем другим элементарным частицам.

Корпускулярные и волновые свойства света

Итак, ученые были вынуждены ввести представление о свете как о потоке частиц. Может показаться, что это возврат к корпускулярной теории Ньютона. Однако нельзя забывать,

что интерференция и дифракция света вполне определенно говорят о наличии у света волновых свойств. Свет обладает своеобразным *дуализмом* (двойственностью) свойств. При распространении света проявляются его волновые свойства, а при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении) — корпускулярные. Все это, конечно, странно и непривычно. Мы не в состоянии представить себе наглядно, как же это может быть. Но тем не менее это факт. Мы лишены возможности представлять себе наглядно в полной мере процессы в микромире, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые люди наблюдали на протяжении миллионов лет и основные законы которых были сформулированы к концу XIX в.

С течением времени двойственность свойств была открыта у электронов и других элементарных частиц. Электрон, в частности, наряду с корпускулярными свойствами обладает также и волновыми. Наблюдается дифракция электронов.

Эти необычные свойства микрообъектов описываются с помощью квантовой механики — современной теории движения микрочастиц. Механика Ньютона оказывается здесь неприменимой. О волновых свойствах электронов и других частиц будет рассказано в дальнейшем.

§ 5.5. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

Открытие фотоэффекта имело очень большое значение для более глубокого понимания природы света. Но ценность науки состоит не только в том, что она выясняет сложное и многообразное строение окружающего нас мира, но и в том, что она дает нам в руки средства, используя которые можно совершенствовать производство, улучшать условия материальной и культурной жизни общества.

С помощью фотоэффекта «заговорило» кино и стала возможной передача движущихся изображений (телевидение). Применение фотоэлектронных приборов позволило создать станки, которые без всякого участия человека изготавливают детали по заданным чертежам. Основанные на фотоэффекте приборы контролируют размеры изделий лучше любого человека, вовремя включают и выключают маяки и уличное освещение и т. д.

Все это оказалось возможным благодаря изобретению особых устройств — *фотоэлементов*, в которых энергия света управляет энергией электрического тока или преобразуется в нее.

Вакуумный фотоэлемент

Современный вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта тонким слоем металла с малой работой выхода (рис. 5.8). Это катод *1*. Через прозрачное «окошко» свет проникает внутрь колбы. В ее центре расположена проволочная петля или диск — анод *2*, который служит для улавливания фотоэлектронов. Анод присоединяют к положительному полюсу батареи. Фотоэлементы реагируют на видимый свет и даже на инфракрасные лучи.

При попадании света на катод фотоэлемента в цепи возникает электрический ток, который включает или выключает то или иное реле. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество различных «видящих» автоматов. Одним из них является автомат в метро. Он срабатывает (выдвигает перегородки) при пересечении светового пучка, если предварительно не опущен жетон.

Подобного рода автоматы могут предотвращать аварии. На заводе фотоэлемент почти мгновенно останавливает мощный пресс, если рука человека оказывается в опасной зоне.

Фотореле

Схема фотореле показана на рисунке 5.9. При попадании света на фотоэлемент в цепи батареи *G1* через резистор *R* идет слабый ток. К концам резистора присоединены база и эмиттер

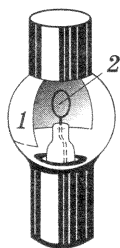


Рис. 5.8

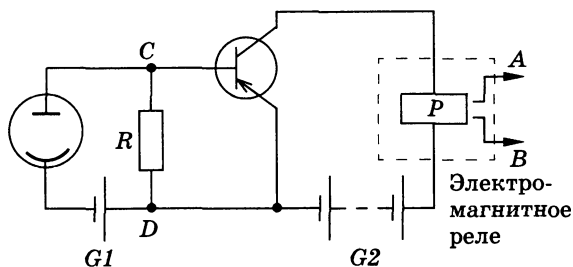


Рис. 5.9

транзистора. Потенциал базы выше потенциала эмиттера, и ток в коллекторной цепи транзистора отсутствует. Когда рука человека попадает в опасную зону, она перекрывает световой поток, падающий на фотоэлемент. Переход эмиттер — база открывается для основных носителей, и через обмотку реле, включенного в цепь коллектора, пойдет ток. Реле сработает, и контакты реле замкнут цепь питания механизма, который остановит пресс.

Полупроводниковые фотоэлементы

Кроме рассмотренного в этой главе фотоэффекта, называемого **внешним фотоэффектом**, разнообразные применения находит **внутренний фотоэффект** в полупроводниках. Это явление используется в *фоторезисторах* — приборах, сопротивление которых зависит от освещенности. Кроме того, сконструированы полупроводниковые фотоэлементы, создающие ЭДС и непосредственно преобразующие световую энергию в энергию электрического тока. ЭДС, называемая в данном случае **фото-ЭДС**, возникает в области p — n -перехода двух полупроводников при облучении этой области светом. Под действием света образуются пары электрон — дырка. Электрическое поле в контакте заставляет неосновные носители полупроводников перемещаться через контакт. Дырки из полупроводника n -типа перемещаются в полупроводник p -типа, а электроны из полупроводника p -типа — в область n -типа. Это приводит к накоплению основных носителей в полупроводниках n - и p -типов. В результате потенциал полупроводника p -типа увеличивается, а n -типа уменьшается. Это происходит до тех пор, пока ток неосновных носителей через p — n -переход сравняется с током основных носителей через этот же переход. Между полупроводниками устанавливается разность потенциалов, которая и представляет собой фото-ЭДС.

Если замкнуть цепь через внешнюю нагрузку, то в цепи пойдет ток, определяемый разностью токов неосновных и основных носителей через p — n -переход (рис. 5.10). Этот ток зависит от интенсивности падающего света и сопротивления резистора R .

Фотоэлементы с p — n -переходом (иначе называемые *вентильными*) создают ЭДС порядка 1—2 В. Их выходная мощность достигает сотен ватт при коэффициенте полезного

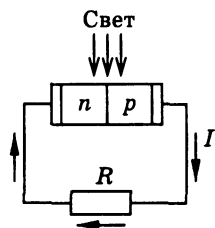


Рис. 5.10

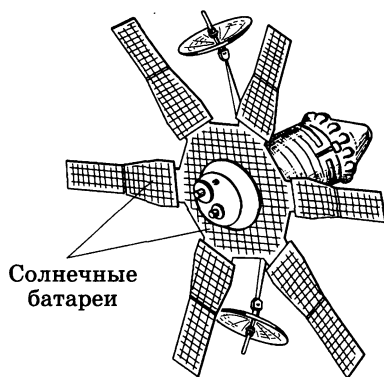


Рис. 5.11

действия до 20%. Такие фотоэлементы можно использовать, например, в фотозкснометрах. Особенно широкое применение полупроводниковые элементы получили при изготовлении солнечных батарей, устанавливаемых на всех космических кораблях (рис. 5.11). К сожалению, пока такие батареи довольно дороги.

§ 5.6. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствия.

Под действием электрического поля волны электроны в телах совершают колебания. Образуется электрический ток. Этот ток направлен вдоль напряженности электрического поля (рис. 5.12). На упорядоченно движущиеся электроны действует сила Лоренца $\vec{F}$ со стороны магнитного поля. Сила Лоренца направлена в сторону распространения волны. Это и есть сила светового давления.

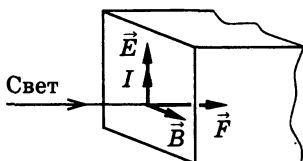


Рис. 5.12

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Многие ученые пытались это сделать, но безуспешно, так как световое давление очень мало. В яркий солнечный день на поверхность площадью 1 м^2 действует сила, равная всего лишь $4 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$. Впервые

давление света измерил в 1900 г. знаменитый русский физик П. Н. Лебедев (1866—1912).

Прибор Лебедева состоял из очень легкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были приклеены легкие крылышки (рис. 5.13). Весь прибор помещался в сосуд, из которого был выкачан воздух. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька. О значении давления можно было судить по углу закручивания нити. Трудности точного измерения давления света были связаны с невозможностью выкачать из сосуда весь воздух (движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда, приводит к возникновению дополнительных вращающих моментов). Кроме того, на закручивание нити влияет неодинаковый нагрев сторон крылышек (сторона, обращенная к источнику света, нагревается больше, чем противоположная сторона). Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны.

Лебедев сумел преодолеть все эти трудности, несмотря на низкий уровень тогдашней экспериментальной техники, взяв очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. В конце концов существование светового давления на твердые тела было измерено. Полученное значение совпало с предсказанным Максвеллом. Впоследствии после трех лет работы Лебедеву удалось осуществить еще более тонкий эксперимент: измерить давление света на газы.

Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину светового давления. Фотоны, подобно частицам вещества, имеющим массу покоя, обладают импульсом. При поглощении их телом они передают ему свой импульс. Согласно закону сохранения импульса импульс тела равен импульсу поглощенных фотонов. Поэтому покоящееся тело приходит в движение. Изменение импульса тела означает, согласно второму закону Ньютона, что на тело действует сила.

Опыты Лебедева наряду с опытами Комптона можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом.

Хотя световое давление очень мало в обычных условиях, его действие тем не менее может

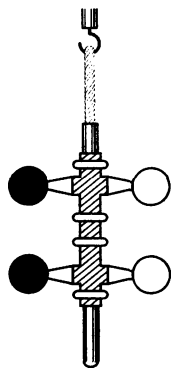


Рис. 5.13

оказаться существенным. Интересный случай произошел с американским спутником «Эхо». После выхода спутника на орбиту сжатым газом была наполнена большая полиэтиленовая оболочка. Образовался легкий шар диаметром около 30 м. Неожиданно выяснилось, что за один оборот этот шар давлением солнечных лучей смещается с орбиты на 5 м. В результате вместо 20 лет, как было запланировано, спутник удержался на орбите меньше года. Внутри звезд при температуре в несколько десятков миллионов кельвин давление электромагнитного излучения должно достигать громадного значения. Силы светового давления наряду с гравитационными силами играют существенную роль во внутризвездных процессах.

§ 5.7. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЕТА. ФОТОГРАФИЯ

Отдельные молекулы поглощают световую энергию порциями — квантами $h\nu$. В случае видимого и ультрафиолетового излучений эта энергия достаточна для расщепления многих молекул. В этом проявляется химическое действие света.

Любое превращение молекул есть химический процесс. Часто после расщепления молекул светом начинается целая цепочка химических превращений. Выцветание тканей на солнце и образование загара — это примеры химического воздействия света.

Важнейшие химические реакции под действием света происходят в зеленых листьях деревьев и траве, в иглах хвои и во многих микроорганизмах. В зеленом листе под действием солнца происходят необходимые для всей жизни на Земле процессы. Они дают нам пищу, они же дают нам кислород для дыхания.

Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Происходит это, как установил русский биолог К. А. Тимирязев, в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Пристраивая к углеродной цепочке атомы других элементов, извлекаемых корнями из земли, растения строят молекулы белков, жиров и углеводов — пищу для нас и животных.

Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. При чем здесь особенно важна не только сама энергия, а та форма, в которой она поступает. *Фотосинтез* (так называют этот процесс) может протекать только под действием света определенного спектрального состава.

Механизм фотосинтеза еще не выяснен до конца. Когда это случится, для человечества, возможно, наступит новая эра. Белки и другие сложные органические вещества можно будет изготавливать на фабриках под голубым небосводом.

Химическое действие света лежит в основе *фотографии*.

Фотография

Чувствительный слой фотопластинки состоит из маленьких кристалликов бромида серебра (AgBr), вкрапленных в желатин. Попадание световых квантов в кристаллик приводит к отрыву электронов от отдельных ионов брома. Эти электроны захватываются ионами серебра, и в кристаллике образуется небольшое количество нейтральных атомов серебра. Однако количество металлического серебра, выделившегося за счет этого процесса, мало.

Действительно, можно заметить, что фотопластинка (или фотопленка) с течением времени на свету чернеет, но довольно незначительно. Это почернение вызвано образованием металлического серебра. Полученное на фотопластинке под действием света изображение объекта называют *скрытым*.

При обработке пластинки первая операция состоит в проявлении. Пластинка погружается в раствор гидрохинона, метола или других веществ, под действием которых во всем кристаллике бромида серебра, подвергшегося воздействию света, происходит выделение металлического серебра. На пластинке получается негативное изображение объекта, в котором место светлых участков занимают темные и наоборот.

Следующая операция — *закрепление* — состоит в том, что оставшиеся кристаллики бромида серебра растворяются и вымываются. Благодаря этому пластинка становится нечувствительной к свету. Для закрепления погружают пластинку в раствор гипосульфита. После промывания в воде негатив готов.

Накладывая его на фотобумагу, т. е. на обычную бумагу с нанесенным на нее светочувствительным слоем, получают после освещения и аналогичной химической обработки позитивное изображение. На позитиве уже правильно (без обращения) передается распределение светлых и темных тонов.

Фотография весьма точно и на долгое время способна зафиксировать события, неотвратимо уходящие все далее и далее в прошлое. Большое значение имеет фотография для науки. Такие быстрые процессы, как, например, молния, можно запечатлеть на фотографии и в дальнейшем детально изучить.

Объекты, посылающие столь слабый свет, что они не различимы глазом, могут быть зафиксированы на фотопластинке при достаточно большой выдержке, т. е. большом времени освещения пластинки. Именно поэтому такие очень удаленные от нас объекты, как галактики, изучаются по фотографиям.

Современная техника позволяет фотографировать не только при видимом свете, но и в темноте при инфракрасных лучах.

§ 5.8. ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА В КИНО

Всего лишь 70 лет назад кино было немым: на экране люди двигались, шевелили губами, но вместо живой человеческой речи зрителям приходилось довольствоваться чтением пояснительного текста. Кино много выиграло, когда одновременно с показом фильма стал слышен разговор героев, свист ветра, грохот битвы и т. д. Все это оказалось возможным благодаря записи звука оптическим методом и воспроизведению его с помощью фотоэлементов.

Если вы посмотрите на кусок киноленты, то с одного ее края увидите так называемую *звуковую дорожку*. Звук записан в виде темной полосы переменной ширины. Это «фотография звука».

Модуляция светового потока при звукозаписи осуществляется различными способами. Схема одного из способов представлена на рисунке 5.14. Луч света от источника 1 проходит через конденсор 2 и попадает на отверстие клиновидной формы — маску 3. Отразившись от зеркала 5, свет проходит сквозь узкую щель 6. Линза 4 проецирует изображение маски на экран со щелью, а линза 7 проецирует изображение щели на киноленту 8.

Зеркало 5 укреплено на горизонтальной оси. На той же оси укреплена рамка с обмоткой, находящейся в магнитном поле постоянного магнита (как в гальванометре).

Переменный ток звуковой частоты после усиления попадает на обмотку рамки и вызывает колебания зеркала вокруг го-

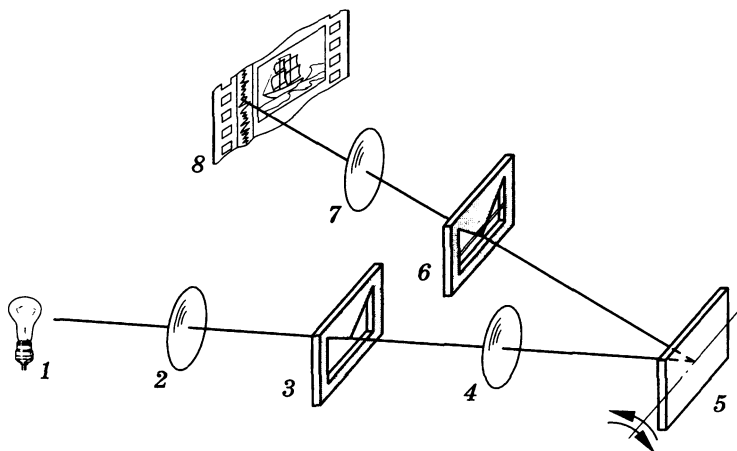


Рис. 5.14

ризонгальной оси. В результате изображение маски перемещается и ширина освещенного участка щели 6 меняется в такт с изменением силы тока. Соответственно меняется и ширина светлой полоски на пленке. После проявления получается негативное «изображение» звука. Позитивное «изображение» имеет вид темной полоски переменной ширины.

Фотоэлемент совершает обратное преобразование «фотографии звука» в сам звук. Происходит это так. В кинопроекторе звуковая дорожка освещается узким пучком света. Пройдя сквозь нее, луч падает на фотоэлемент (рис. 5.15). При этом световой поток, попадающий на фотоэлемент, непрерывно изменяется. Поэтому в цепи фотоэлемента сила тока также меняется. Колебания силы тока сначала усиливаются до необходимой мощности, а затем уже поступают в динамики. Здесь колебания электрического тока снова превращаются в звук.

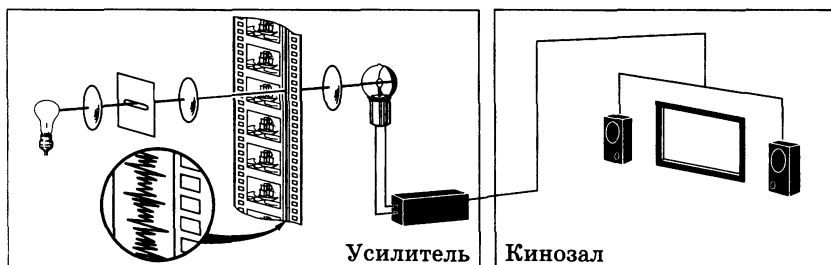


Рис. 5.15

1. Может ли быть равновесным излучение, возникающее за счет химических реакций?
2. Солнечные лучи, падающие на поверхность Земли, должны вызывать фотоэффект. Означает ли это, что заряд земного шара положителен?
3. Почему изменение длины волны электромагнитного излучения при рассеянии на свободных электронах (эффект Комптона) заметно лишь при больших частотах волн?
4. В каком случае давление света больше: при падении его на зеркальную поверхность или на черную?

§ 5.9. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

В задачах этой главы используется представление о световых квантах — фотонах. Энергия фотона $E = \hbar\omega$, а импульс $p = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = \hbar k$. Далее применяются законы сохранения энергии и импульса. В задачах на фотоэффект применяется уравнение Эйнштейна $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A$. Изменение длины волны при рассеянии фотонов большой энергии на свободных электронах дается формулой Комптона: $\Delta\lambda = 2\lambda_k \sin^2 \frac{\theta}{2}$, где θ — угол рассеяния, а $\lambda_k = \frac{2\pi\hbar}{m_0c}$ — комптоновская длина волны электрона.

Обратите внимание на задачу 5, в которой выводится формула для давления света на основе представления о фотонах: $p = w = \frac{I}{c}$, где w — плотность энергии, а I — интенсивность излучения.

Задача 1

Какова минимальная длина волны непрерывного спектра рентгеновского излучения, если рентгеновская трубка работает под напряжением $U = 20$ кВ?

Решение. Искомую длину волны найдем из формулы

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (5.9.1)$$

Согласно формуле Планка энергия фотона рентгеновского излучения

$$E = h\nu, \quad (5.9.2)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка.

Согласно (5.9.1) и (5.9.2) длина волны

$$\lambda = \frac{ch}{E}.$$

Максимальная энергия кванта рентгеновского излучения равна кинетической энергии, приобретенной электроном в рентгеновской трубке:

$$E = eU.$$

Следовательно, минимальная длина волны рентгеновских лучей

$$\lambda = \frac{ch}{eU} = 6,2 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Задача 2

Определение зависимости запирающего напряжения фототока (напряжения, при котором фототок прекращается) от длины волны света, падающего на цезиевую пластину, выполняется по схеме, изображенной на рисунке 5.16. При освещении светом с длиной волны $\lambda_1 = 0,40$ мкм запирающее напряжение составляло $U_1 = 1,19$ В, при $\lambda_2 = 0,50$ мкм $U_2 = 0,57$ В. Определите по результатам этого опыта красную границу фотоэффекта для цезия и постоянную Планка.

Решение. Согласно уравнению Эйнштейна

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (5.9.3)$$

Уравнению (5.9.3) можно придать другой вид, выразив частоту ν через длину волны λ ($\nu = \frac{c}{\lambda}$), работу выхода A — через красную границу фотоэффекта ($A = h\nu_{\min}$) и кинетическую энергию фотоэлектрона —

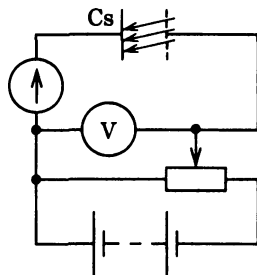


Рис. 5.16

через запирающее напряжение $U \left(\frac{mv^2}{2} = eU \right)$. Тогда для двух условий опыта получим уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{hc}{\lambda_1} &= h\nu_{\min} + eU_1, \\ \frac{hc}{\lambda_2} &= h\nu_{\min} + eU_2.\end{aligned}\tag{5.9.4}$$

Решая полученную систему уравнений, найдем

$$h = \frac{e}{c} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (U_1 - U_2) \approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 U_1 - \lambda_2 U_2} (U_1 - U_2) \approx 0,65 \text{ мкм}.$$

Задача 3

Красная граница фотоэффекта для вольфрама равна $\lambda_{\max} = 2,75 \cdot 10^{-7}$ м. Найдите: а) работу выхода электрона из вольфрама; б) наибольшую скорость электронов, вырывааемых из вольфрама светом с длиной волны $\lambda = 0,18$ мкм; в) наибольшую энергию этих электронов.

Решение. а) Работа выхода вычисляется по формуле

$$A = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

б) Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта с учетом соотношения $v = \frac{c}{\lambda}$, имеем:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right)} \approx 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

в) Максимальная энергия фотоэлектрона равна:

$$E = \frac{mv^2}{2} = 3,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Задача 4

Определите энергию, которую рентгеновский фотон передает неподвижному электрону при их столкновении, если начальная энергия фотона $E = 10$ кэВ, угол рассеяния фотона $\theta = 60^\circ$.

Решение. Изменение длины волны при эффекте Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda = 2\lambda_k \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (5.9.5)$$

где $\lambda_k = \frac{h}{m_0 c}$ — комптоновская длина волны (здесь m_0 — масса покоя электрона).

Длина волны фотона до столкновения $\lambda = \frac{hc}{E}$, после столкновения $\lambda_1 = \frac{hc}{E_1}$, где E_1 — энергия фотона после столкновения с электроном.

Подставляя значения λ , λ_1 и λ_k в уравнение (5.9.5), получим:

$$\frac{hc}{E_1} - \frac{hc}{E} = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

или

$$\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E} = \frac{2}{E_0} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (5.9.6)$$

Из уравнения (5.9.6) найдем изменение энергии фотона:

$$\Delta E = E_1 - E = \frac{2E^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}{E_0 + 2E \sin^2 \frac{\theta}{2}}.$$

Учитывая, что энергия покоя электрона $E_0 = 511$ кэВ, получим

$$\Delta E \approx 0,1 \text{ кэВ}.$$

Задача 5

Используя представления о фотонах, докажите, что давление света на абсолютно черную поверхность $p = w = \frac{I}{c}$, где w — плотность энергии излучения, а I — интенсивность излучения. Поверхность перпендикулярна к падающим лучам.

Решение. При поглощении фотонов они передают свой импульс телу. Изменение импульса тела за время Δt при падении светового пучка на поверхность площадью S равно:

$$\Delta P = N \frac{\hbar \omega}{c} S c \Delta t = N \hbar \omega S \Delta t,$$

где N — число фотонов в единице объема, а $\frac{\hbar \omega}{c}$ — импульс одного фотона.

Согласно второму закону Ньютона импульс силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела:

$$F \Delta t = \Delta P = N \hbar \omega S \Delta t.$$

Отсюда давление

$$p = \frac{F}{S} = N \hbar \omega = w,$$

так как $N \hbar \omega$ — энергия фотонов, находящихся в единице объема.

Интенсивность излучения $I = w c$. Поэтому давление света

$$p = w = \frac{I}{c}. \quad (5.9.7)$$

Упражнение 7

1. Определите скорость электронов, образующихся при фотоионизации атомов водорода электромагнитным излучением с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-8}$ м. Энергия ионизации атома водорода 13,5 эВ. Кинетической энергией протона можно пренебречь.
2. Какое количество фотонов с длиной волны $\lambda = 600$ нм имеет световой пучок с суммарным импульсом, равным среднему импульсу теплового движения атомов гелия при температуре $T = 300$ К?
3. Определите абсолютный показатель преломления среды n , в которой свет с энергией фотонов $E = 4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж имеет длину волны $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м.
4. Рентгеновская трубка, работающая при напряжении $U = 50$ кВ и силе тока $I = 2$ мА, излучает $N = 5 \cdot 10^{13}$ фотонов в секунду. Считая среднюю длину волны излучения $\lambda = 0,1$ нм, найдите КПД трубки, т. е. отношение мощности рентгеновского излучения к мощности, потребляемой трубкой.

5. Докажите, что свободный электрон не может поглотить фотон.
6. Тренированный глаз, длительно находящийся в темноте, воспринимает свет с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м при мощности не менее $2,1 \cdot 10^{-17}$ Вт. Сколько фотонов в секунду попадает на сетчатку?
7. Найдите красную границу фотоэффекта для фотоэлемента, катод которого изготовлен из сплава платины и цезия. Работа выхода $A = 2,24 \cdot 10^{-19}$ Дж.
8. Определите наибольшую скорость электрона, вылетевшего из металла цезия при освещении его светом с длиной волны $\lambda = 400$ нм, если работа выхода электрона из цезия $A = 1,9$ эВ.
9. Как найти заряд электрона, если известны частота излучения ν , вызывающего фотоэффект, красная граница фотоэффекта $\nu_{\min}$ и запирающее напряжение U ?
10. На металлическую пластинку падает свет с длиной волны $\lambda = 0,4$ мкм. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов $U = 0,95$ В. Определите красную границу фотоэффекта для данного металла.
11. На рисунке 5.17 приведен график зависимости кинетической энергии E_k электронов, вылетающих с поверхности бария при фотоэффекте, от частоты ν облучающего света. Используя график, вычислите постоянную Планка и работу выхода электронов из бария.
12. Рентгеновский фотон обладает энергией E . После столкновения с электроном энергия фотона уменьшилась до E_1 . Определите угол θ рассеяния фотона.

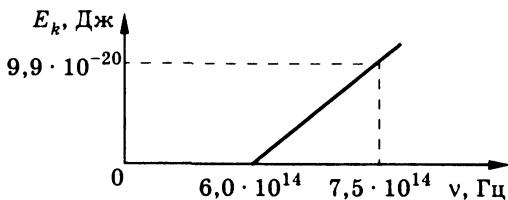


Рис. 5.17