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

Фотоэффект — это явление вырывания электронов из вещества под действием падающего на него света.

Наблюдение фотоэффекта. Для обнаружения фотоэффекта на опыте можно использовать электроскоп с присоединённой к нему цинковой пластиной (рис. 10.1). Если зарядить пластину положительно, то её освещение, например электрической дугой, не влияет на быстроту разрядки электроскопа. Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает электроскоп очень быстро.

Объяснить это можно так. Свет вырывает электроны с поверхности пластины. Если пластина заряжена отрицательно, вылетевшие с поверхности электроны отталкиваются от неё, и электроскоп разряжается. При положительном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электроскопа в этом случае не изменяется.

Однако когда на пути света поставлено обыкновенное стекло, отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, какова бы ни была интенсивность излучения. Так как известно, что стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, то из этого опыта можно заключить: именно ультрафиолетовый участок спектра, т. е. волна с большой частотой, вызывает фотоэффект. Этот простой факт нельзя объяснить на основе волновой теории света. Ведь непонятно, почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если амплитуда этих волн велика и, следовательно, велика энергия, передаваемая электроном.

Законы фотоэффекта. Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно было выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия. С этой целью были продолжены экспериментальные исследования.

В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещают два электрода (рис. 10.2). Внутрь баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое окошко, прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На электроды подают напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром.

К освещаемому электроду присоединяется 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 возрастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестаёт увеличиваться (рис. 10.3).

Максимальное значение силы тока 1Я называется током насыщения. Сила тока насыщения определяется числом электронов, испускаемых за 1 с освещаемым электродом.

Изменяя в этом опыте интенсивность излучения (средний по времени световой поток через поверхность единичной площади, перпендикулярную скорости распространения световой волны), удалось установить, что число электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с при токе насыщения, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

На основании результатов этого опыта был сформулирован первый закон фотоэффекта.

Фототок насыщения прямо пропорционален падающему световому потоку Ф.

Теперь остановимся на измерении кинетической энергии (или скорости) электронов. Из вольт-амперной характеристики фотоэффекта, приведённой на рисунке 10.3, видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого (см. рис. 10.2) электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить подключение к цепи батареи на обратное, т. е. катод присоединить к положительному полюсу батареи, а анод к отрицательному, то сила тока уменьшится, и при некотором задерживающем напряжении U3 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 U3 зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют вырванные светом электроны.

Измеряя задерживающее напряжение и применяя теорему об изменении кинетической энергии (см. учебник физики для 10 класса), можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

При изменении интенсивности света (падающего светового потока) задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Значит, 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 прямо пропорциональна частоте падающего на катод излучения и не зависит от интенсивности этого излучения.

Если частота света меньше определённой для данного вещества минимальной частоты, то фотоэффекта не происходит.

Все попытки объяснить экспериментально наблюдаемые зависимости при изучении фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которым свет — это электромагнитная волна, непрерывно распределённая в пространстве, оказались безрезультатными. Было абсолютно не ясно, почему энергия фотоэлектронов определяется только частотой света и почему лишь при достаточно малой длине волны свет вырывает электроны.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идеи Планка о прерывистом испускании света.

Для объяснения законов теплового излучения, как мы знаем, М. Планк предположил, что свет испускается порциями (квантами). Энергия Е каждой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте: где h — постоянная Планка.

В законах фотоэффекта, сформулированных на основании экспериментов, Эйнштейн увидел убедительное доказательство того, что свет имеет прерывистую структуру: излучается и поглощается отдельными порциями.

Из того, что свет излучается порциями, ещё не вытекает вывода о прерывистости структуры самого света. Ведь и минеральную воду продают в бутылках, но отсюда не следует, что вода состоит из неделимых частей.

Лишь явление фотоэффекта показало, что свет имеет прерывистую структуру: излучённая порция световой энергии Е = hv сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем. Поглотиться может только вся порция целиком.

Кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света hv идёт на совершение работы выхода А и на сообщение электрону кинетической энергии:

Работа выхода — это минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул металл.

Равенство (10.2) называется уравнением Эйнштейна.

Заметим, что формула (10.2) справедлива для электронов, находящихся у поверхности металла. Если энергию поглощает электрон на некоторой глубине в металле, то часть поглощённой энергии теряется вследствие неизбежных столкновений электрона в веществе.

Объясним, почему свободные электроны, движущиеся с большими скоростями, не покидают металл.

Благодаря тепловому движению часть электронов выходит за пределы кристаллической решётки металла. Электроны, оставшиеся в металле, уходят вглубь кристаллической решётки вследствие явления электростатической индукции. Поверхностный слой оказывается заряженным положительно. Образуется так называемый двойной электрический слой, напряжённость поля которого направлена вверх (рис. 10.4). На электрон, вылетевший из металла и попавший в область поля, действует сила, возвращающая его назад. Только электроны, имеющие достаточно большую энергию, могут преодолеть это поле и покинуть металл. Обычно этого не происходит. Именно поэтому электрону надо сообщить дополнительную энергию, которую и несёт порция электромагнитного излучения.

Уравнение (10.2) объясняет основные факты, касающиеся фотоэффекта. Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии hv в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла. Скорость vm электронов согласно формуле (10.2) определяется только частотой v света и работой выхода А, зависящей от типа металла и состояния его поверхности. От интенсивности света скорость не зависит.

Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота v света больше некоторого минимального значения vmin. Ведь для того, чтобы электрон мог выйти из металла, необходимо, чтобы электрон обладал энергией, равной работе выхода. Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы или равна ей:

В последнем случае энергия вырванного электрона равна нулю, но поле, созданное между электродами, его ускорит, и электрон долетит до анода, фототок будет отличен от нуля.

Предельную частоту vmin и предельную длину волны Хтлх называют красной границей фотоэффекта.

Они выражаются так: где Я.тах (Хкр) — максимальная длина волны, при которой фотоэффект ещё наблюдается.

Это название связано со световыми волнами, так как максимальная длина волны видимого света соответствует красному цвету.

Работа выхода А зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота vmin фотоэффекта (красная граница) для разных веществ различна.

Для каждого вещества существует максимальная длина волны падающего на него излучения, при которой фотоэффект ещё наблюдается. При больших длинах волн излучения фотоэффекта нет.

Для цинка красной границе соответствует длина волны (ультрафиолетовое излучение).

Именно этим объясняется опыт по прекращению фотоэффекта с помощью стеклянной пластинки, поставленной на пути луча и задерживающей ультрафиолетовые лучи. Работа выхода у алюминия или железа больше, чем у цинка. У щелочных металлов работа выхода, напротив, меньше, а длина волны, соответствующая красной границе, больше. Так, для натрия.

Пользуясь уравнением Эйнштейна (10.2), можно найти постоянную Планка h. Для этого нужно экспериментально определить частоту v света, работу выхода А и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов.

Подобные измерения и расчёты дают h = 6,63 • 1(Г34 Дж • с. Точно такое же значение было найдено и самим Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления — теплового излучения.

Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами, дополнительно подтверждает правильность предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

Мы рассмотрели явление внешнего фотоэффекта. Помимо этого явления, наблюдается внутренний фотоэффект в диэлектриках и полупроводниках, который заключается в том, что при поглощении света увеличивается их проводимость (фоторезисторы).