

§ 54. Фотоэлектрический эффект. Фотоэлементы. Фотореле

Когда на поверхность проводника падают лучи света, то металл испускает электроны и сам заряжается поэтому положительно. Это явление испускания электронов освещаемой поверхностью металла носит название *фотоэлектрического эффекта*, или сокращенно *фотоэффекта*.

Фотоэффект был открыт в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем и изучен профессором Московского университета Александром Григорьевичем Столетовым в 1888—1890 гг. Столетов установил, что металл (первые опыты проводились с цинком), заряженный отрицательно, быстро утрачивает свой заряд, если на поверхность металла направить лучи света, и в особенности ультрафиолетовые лучи (рис. 198). Столетов измерял величину разрядного тока и обнаружил, что, во-первых, разрядный ток мгновенно прекращался при выключении света и, во-вторых, величина разрядного тока, измеряющаяся, очевидно, количеством электронов, вырываемых светом из металла, пропорциональна падающей на поверхность металла энергии излучения данного спектрального состава. Последующими опытами было показано, что скорость выбрасываемых из металла электронов возрастает с уменьшением длины волны излучения, иначе говоря, скорость электронов возрастает при увеличении частоты излучения.

В высшей степени важная особенность явления фотоэффекта заключается в том, что для каждой данной металлической поверхности существует вполне определенная минимальная частота излучения, способного вырывать из металла электроны; освещение металла лучами меньшей частоты не дает никакого эффекта.

Перечисленные свойства фотоэффекта необъяснимы с точки зрения волновой природы света; они, однако, легко могут быть поняты с точки зрения квантовой теории. Исходя из теории квантов, Эйнштейн (1905 г.) дал простое уравнение, вскрывающее сущность фотоэффекта.

Квант радиации (излучения) с частотой ν имеет энергию, равную $h\nu$ ($h=6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек — постоянная Планка; т. I. § 90). Представим себе, что вся эта энергия переходит к некоторому электрону, находившемуся внутри атома вещества. Если A_1 есть работа, необходимая для вырывания электрона из атома (т. е. для ионизации атома), и A_2 — работа, необходимая для выведения электрона сквозь поверхностный слой вещества, то кинетическая энергия электрона,

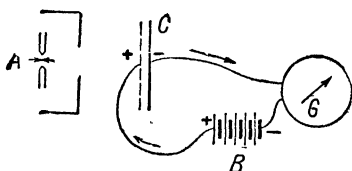


Рис. 198. Схема опытов А. Г. Столетова. А — источник света (дуга), С — катод, на освещенную поверхность которого лучи света проникают через металлическую сетку, служащую анодом.

вырвавшегося наружу, будет:

$$K = h\nu - (A_1 + A_2). \quad (15)$$

В этом уравнении Эйнштейна содержится объяснение всех основных свойств фотоэффекта. Мы видим, что для вылета электронов необходимо освещать поверхность тела лучами такой частоты ν , чтобы $h\nu$ было больше суммы $A_1 + A_2$. Кинетическая энергия, а следовательно, и скорость вылетающих электронов тем более велики, чем больше частота излучения ν , т. е. чем меньше длина волны. Число выброшенных электронов определяется числом падающих на поверхность тела квантов, поэтому количество испускаемых в секунду электронов пропорционально мощности поглощаемой телом радиации.

При освещении рентгеновыми лучами, имеющими очень большую частоту, происходит выбрасывание электронов, которые были расположены глубоко внутри атома (для них работа вырывания A_1 велика). Освещение видимыми и ультрафиолетовыми лучами вызывает всегда освобождение самого внешнего в атоме электрона.

От описанного выше *нормального* фотоэффекта отличают так называемый *селективный* (избирательный) фотоэффект, наблюдаемый у щелочных металлов. Особенность селективного фотоэффекта заключается в том, что при освещении щелочного металла радиацией, имеющей некоторую определенную длину волны, обнаруживается максимум электронной эмиссии; если освещать тот же металл лучами большей или меньшей частоты, то выбрасывается меньшее число электронов.

Фотоэффект практически безынерционен: время запаздывания фотоэффекта по отношению к моменту освещения поверхности во всяком случае не превышает $3 \cdot 10^{-9}$ сек.

Если электроны вырываются действием радиации из атомов вещества, но при этом остаются внутри тела, а не выбрасываются наружу, то электропроводность вещества возрастает. Этим явлением *внутреннего* фотоэффекта объясняется резкое увеличение электропроводности селена, когда он подвергается освещению (стр. 171).

Приборы для наблюдения и использования фотоэффекта — *фотоэлементы* — устраивают обычно следующим образом (рис. 199). Часть внутренней поверхности колбы покрывают слоем металла (например, слоем натрия, калия, цезия и т. д., обычно эти металлы наносят на «подслой» из серебра), этот слой металла служит катодом. Часть колбы оставляют прозрачной для освещения катодного слоя.

Внутри колбы помещают второй электрод — анод, представляющий собой сетку, кольцо или просто металлический ввод в центре. Колба откачивается, и между электродами накладывается разность потенциалов. Электроны, выбрасываемые под действием света из катодного слоя металла, устремляются к аноду и обуславливают прохождение тока.

Для наблюдения фотоэффекта включают в цепь гальванометр. Получаемый ток зависит от освещенности и составляет обычно доли миллиампера. При постоянной освещенности фототок сначала растет с напряжением, но при увеличении напряжения до 200—250 в все электроны, выбрасываемые катодом, улавливаются анодом, достигается ток насыщения и дальнейшее повышение напряжения уже не приводит к увеличению тока.

Фотоэффект с чистых металлических поверхностей достаточен для использования только при освещении ультрафиолетовыми лучами. При изготовлении технических фотоэлементов металлический катод особым образом «обрабатывается» (его подвергают действию серы, водорода, кислорода), что повышает его чувствительность.

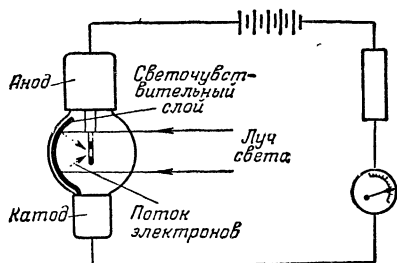


Рис. 199. Фотоэлемент.

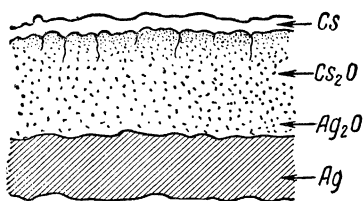


Рис. 200. Строение кислородно-цезиевого катода.

Для усиления фототока колбу фотоэлемента наполняют инертным газом (неоном или аргоном); в этом случае каждый фотоэлектрон, двигаясь с большой скоростью к аноду, вызывает по пути ионизацию многих атомов газа, что порождает ионный ток, в несколько раз больший, чем ток фотоэлектронной эмиссии.

Высокой чувствительностью к видимым и инфракрасным лучам обладают фотоэлементы с кислородно-цезиевыми катодами. Для получения таких катодов внутреннюю поверхность стеклянной колбы покрывают (химическим способом) слоем серебра. Поверхность этого слоя серебра окисляют разрядом в кислороде. На эту «подстилку» осаждают пары цезия (перегонкой при температуре 180—190°). В результате такой обработки катод оказывается состоящим из четырех слоев (рис. 200): серебра, окиси серебра, окиси цезия и тонкой поверхностной пленки адсорбированного цезия. Свет вырывает электроны из атомов цезия, ионизируя атомы цезия, которые быстро вновь нейтрализуются свободными электронами серебра, проникающими на поверхность через слои окислов серебра и цезия.

Кислородно-цезиевые фотокатоды дают в вакуумных фотоэлементах ток порядка 15—20 мка/лм, а в газонаполненных фотоэлементах — до 70—150 мка/лм; они наиболее чувствительны к лучам

с длиной волны $0,62 \mu$ (оранжево-желтый цвет), но пригодны и для инфракрасных лучей с длиной волны до $1,1 \mu$.

Строение, аналогичное кислородно-цезиевому фотокатоду, и сходные с ним свойства (даже большую чувствительность) имеют активированные кислородом сурьмяно-цезиевый и сисмито-цезиевый катоды.

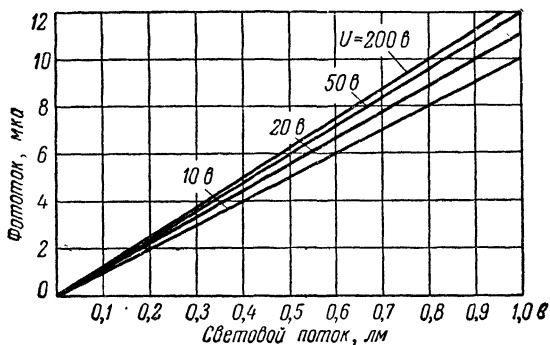


Рис. 201. Световая характеристика вакуумного кислородно-цезиевого элемента.

Высокой чувствительностью (до $80\text{—}100 \text{ мкА/лм}$) отличаются сурьмяно-калиево-натриевые фотокатоды (их называют также мультищелочными); при добавлении цезия чувствительность мультищелочных фотокатодов удалось повысить до 180 мкА/лм . Однако вся эта группа фотокатодов пригодна только для видимого света.

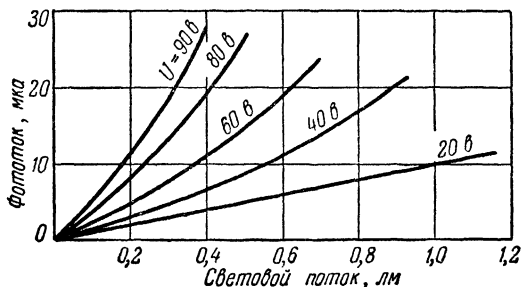


Рис. 202. Световая характеристика газонаполненного фотоэлемента.

В вакуумных фотоэлементах ток строго пропорционален световому потоку (рис. 201), в газонаполненных фотоэлементах линейная зависимость между током и световым потоком сохраняется только для небольших анодных напряжений или малых световых потоков (рис. 202). Газонаполненные фотоэлементы в тысячи раз более

инерционны, чем вакуумные, но все же инерционность их невелика (порядка 10^{-6} сек.).

Большое распространение получили *фотоэлементы с запирающим слоем*. Эти фотоэлементы не требуют внешнего источника тока. Такой фотоэлемент (рис. 203) представляет собой две изготовленные из металла и полупроводника пластинки соприкасающиеся друг с другом и покрытые сверху тонким полупрозрачным слоем металла (или же сетчатым электродом). Верхний слой металла (или сетчатый электрод) соединяют проводником с нижней пластинкой. Под действием света на границе между металлом и полупроводником, обладающей униполярной проводимостью (стр. 173), возникает электродвижущая сила, возрастающая с увеличением светового потока.

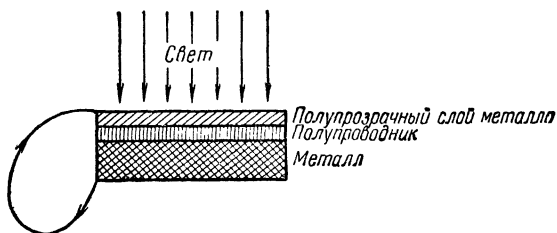


Рис 203. Фотоэлемент с запирающим слоем

До недавнего времени из фотоэлементов с запирающим слоем практически использовались главным образом *меднозакисные (купроксные) элементы* (слой закиси меди на меди). Эти фотоэлементы имеют внутренне сопротивление порядка 400 омов. При сопротивлении внешней цепи 100—300 омов их фототок равен примерно 80—100 мкА/лм . В настоящее время применяются более совершенные *сернисто-серебряные фотоэлементы (ФЭСС)*, чувствительность которых достигает 2000—5000 мкА/лм ; они восприимчивы не только к видимым лучам, но и к инфракрасным лучам (с длиной до 1,35 μ). Еще более чувствительны *сернистоталлиевые фотоэлементы* (до 4000—6000 мкА/лм), полупроводниковый слой в них создают из смеси сернистого таллия с теллуром, осаждая их возгонкой в вакууме на железную пластинку; верхний полупрозрачный электрод образуют распылением золота.

Фотоэлементы позволяют преобразовать изменения интенсивности и изменения окраски света в электрические токи. На этом основаны их многочисленные применения. В соединении с ламповыми усилителями фотоэлементы сделали возможным осуществление чувствительных автоматов, реагирующих на изменения освещенности: открывающих двери, включающих и выключающих освещение, управляющих светфорами, сортирующих мелкие предметы и т. д.

Действие *фотореле*, применяемых в указанных и аналогичных случаях, понятно из рис. 204.

Часто вместо электроламповых усилителей и электромагнитных приборов в фотоавтоматах применяют *тиратроны*. Тиратрон

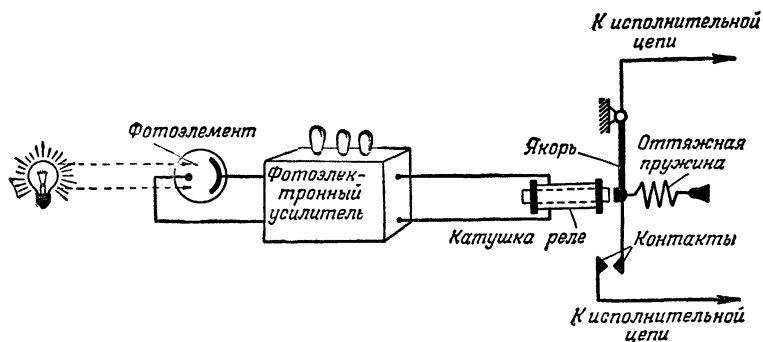


Рис. 204. Схема фотореле.

представляет собой трехэлектродную лампу, наполненную парами ртути или аргоном и отличающуюся чрезвычайно крутой характеристикой: при недостаточных напряжениях сетки анодный ток не проходит через тиратрон, а при определенном напряжении сетки

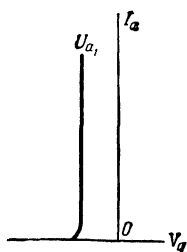


Рис. 205. Вольт-амперная характеристика тиратрона.

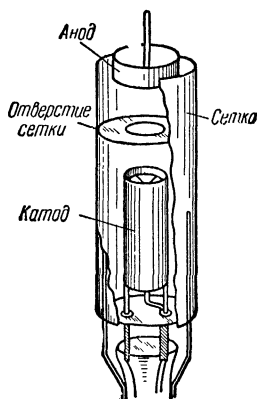


Рис. 206. Тиратрон.

он сразу достигает максимальной величины (тиратрон «зажигается», замыкая цепь анодного тока). Такая практически вертикальная характеристика (рис. 205) объясняется тем, что по устройству тиратрона, в котором управляющий электрод (сетка) представляет собой цилиндр с отверстием (рис. 206), при достаточно большом отрицательном потенциале сетка тормозит и отбрасывает обратно к

катоду все испускаемые накалившимся катодом электроны. А когда при определенном потенциале сетки начинает преобладать поле анода, то электроны, увлекаемые полем анода, ионизируют газ, порождают электронные лавины и зажигающийся разряд в тиратроне замыкает цепь анодного тока. При этом потенциал сетки, если он и изменится, уже не влияет на разряд, а внутреннее падение напряжения между анодом и катодом благодаря резкому уменьшению сопротивления снижается в зажженном тиратроне до 15—20 в. Если анодное напряжение выключено хотя бы на сотые доли секунды, — разряд погасает.

Ток фотоэлемента сообщает сетке тиратрона потенциал, нужный для зажигания тиратрона. Анодный ток тиратрона приводит в действие приборы автоматической сигнализации, небольшие моторчики или электромагнитные приборы, замыкающие цепь тока еще большей величины.

В разнообразных фотоавтоматах нередко используют невидимые ультрафиолетовые и инфракрасные лучи. В этом случае лучи прожектора пропускают через особые фильтры, например через тонкую пластинку эбонита, через «черное» стекло (марблит) и т. п. Отражая невидимый луч от хорошо замаскированных зеркал, которые отбрасывают луч на спрятанный фотоэлемент, осуществляют надежную фотоохрану складов, зданий, путей. При этом приборы автоматической сигнализации (а в условиях войны и автоматической защиты) регулируют так, чтобы они приходили в действие, когда невидимый луч фотоограждения где-либо прерван. Человек, прошедший через такую невидимую для него линию охраны, сам не зная того, мгновенно приводит в действие приборы сигнализации или защиты.

Благодаря фотоэлементам (в сочетании с электронно-ламповыми усилителями) оказалось возможным осуществить звуковое кино (§ 95) и телевидение (§ 96).

§ 55. Вторичная электронная эмиссия. Электронные умножители

Когда на поверхность металла в вакууме падает ток электронов, то, как показал Ланге (1925 г.), не все электроны поглощаются металлом — часть их отражается поверхностью металла. Наряду с этим при достаточно большой скорости электронов, бомбардирующих поверхность металла, из металла вышибаются электроны, образующие вместе с отраженными электронами встречный поток, в котором число электронов иногда в несколько раз превышает число электронов первичного потока, направленного на поверхность металла. Это явление носит название *вторичной электронной эмиссии*. Аналогичное вышибание электронов (вторичная эмиссия) наблюдается также при бомбардировке электронами диэлектриков, например стекла.