

($U_s=0$) дает значение граничной частоты $\nu_{\text{мин}} = \frac{c}{\lambda_{\text{макс}}}$, ниже которой (при $\nu < \nu_{\text{мин}}$ или $\lambda > \lambda_{\text{макс}}$) фотоэффект прекращается. Отсюда далее можно найти работу вырывания электрона из металла

$$eP = h\nu_{\text{мин}}. \quad (35.8)$$

Экстраполируя прямую до пересечения с осью ординат, получаем также значение $-P$ (см. рис. 1.147).

На рис. 1.147 приведен график зависимости U_s от ν , полученной Лукирским для одного из металлов. Экспериментальные точки прекрасно укладываются на прямую. Тангенс угла наклона прямой, согласно (35.7), равен

$$\text{tg } \alpha = \frac{\Delta U_s}{\Delta \nu} = \frac{h}{e}. \quad (35.9)$$

Зная e , можно, таким образом, определить h . В целом экспериментальная зависимость $U_s = f(\nu)$

подтверждает справедливость закона сохранения энергии (35.5) в элементарном акте фотоэффекта.

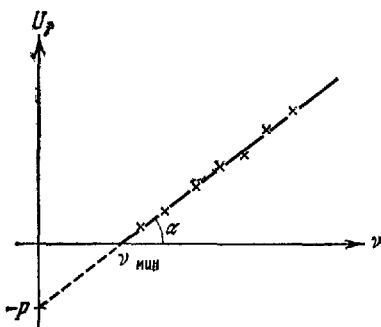


Рис. 1.147.

§ 36. Практические применения фотоэффекта. Фотоэлементы

Фотоэлектрические явления нашли огромное применение в технике; использование их позволило осуществить звуковое кино, телевидение, видение в темноте и т. д. Поэтому фотоэлектрический эффект представляет интерес не только как явление, изучение которого сыграло особую роль в установлении правильного взгляда на природу света, но и для инженерной практики.

В зависимости от судьбы электронов, поглотивших фотон, различают три основных вида фотоэффекта:

1. В металлах наблюдается описанный выше, в предыдущем параграфе, в н е ш н и й ф о т о э ф ф е к т. Падающий на поверхность металла свет испытывает поглощение свободными электронами практически в очень тонком слое вещества. Поглотив фотоны, электроны приобретают энергию $h\nu$, достаточную для преодоления работы выхода, и часть из них вырывается н а р у ж у в вакуум или газ.

2. В прозрачном диэлектрике и полупроводнике фотон поглощается в н у т р и кристалла электроном, связанным с определенным атомом решетки. При таком в н у т р е н н е м ф о т о э ф ф е к т е электрон вырывается из атома, но остается внутри кри-

сталла. Возникшие узлы с нарушенными электрическими свойствами становятся способными поглощать и рассеивать длинноволновое излучение и тем самым приводят к изменению окраски кристалла. При прохождении жестких γ -излучений энергия, поглощенная кристаллом и затрачиваемая на возбуждение его атомов, в некоторых телах способна сразу же излучаться обратно в виде кратковременной вспышки света — с ц и н т и л л я ц и и. В случае полупроводников вырванный электрон попадает в зону проводимости (т. II, § 28), становится свободным и снижает тем самым электрическое сопротивление. О таких фотосоппротивлениях, проводимость (и сопротивление) которых сильно меняется с освещенностью, уже упоминалось в т. II, § 28.

3. **Вентильный фотоэффект.** На границе металл—полупроводник или в области p — n -переходов (т. II, § 28) образуется запирающий слой (рис. 1.148). При освещении полупроводника светом с фотонами, обладающими необходимой энергией $h\nu$, вырванные из атомов n -полупроводника электроны проходят запирающий слой в пропускном направлении и, скапливаясь на внешней границе p -полупроводника, создают постоянную разность потенциалов U . Если соединить проводником обе граничные поверхности, то через него потечет ток, измеряемый гальванометром G . Разность потенциалов U является электродвижущей силой по отношению к замкнутой цепи. Эта э. д. с. создает в проводнике фотоэлектрический ток I_{ϕ} , который, в соответствии с (35.1), пропорционален падающему лучистому потоку Φ .

Приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии излучения в электрическую, называются фотоэлементами. Фотоэлементы бывают разных типов.

Вакуумные фотоэлементы. Это фотоэлементы, основанные на использовании внешнего фотоэффекта. Изготавливаются они в виде стеклянного баллона, внутренняя поверхность которого покрыта, примерно наполовину, слоем чувствительного вещества, образующим «фотокатод». Это вещество выбирается в зависимости от предъявляемых к фотоэлементу требований, в особенности — области спектра, в которой он должен работать. Для работы в видимой области спектра особенно широко применяются сурьмяно-цезиевые фотокатоды. Анодом служит металлическая петелька или сетка, помещенная в центре баллона. При достаточной разности потенциалов между катодом и анодом все электроны, вылетающие с фотокатода, будут собираться на аноде.

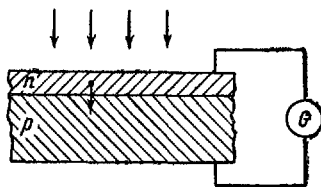


Рис. 1.148.

В этом случае сила тока в приборе будет строго пропорциональна интенсивности падающего на фотокатод излучения, причем сила тока будет меняться при изменении светового потока практически мгновенно, без всякой «инерции». Выпускаемые советской промышленностью вакуумные сурьмяно-цезиевые фотоэлементы СЦВ-3, СЦВ-4, СЦВ-51 при рабочем напряжении в 240 в обладают минимальной чувствительностью в 80 *мкА/лм*.

Газонаполненные фотоэлементы. Ток в фотоэлементе может быть усилен, если наполнить баллон газом и создать между электродами такое напряжение, чтобы фотоэлектроны могли, ускоряясь, производить ионизацию газа. При этом вновь образованные электроны будут, двигаясь к аноду, в свою очередь ускоряться и производить повторную ионизацию, положительные ионы устремятся к катоду, внося свою долю в усиление тока.

Для наполнения фотоэлементов используют инертные газы, не способные вступать в химические соединения с металлическими частями фотоэлемента: неон, аргон. Давление газа должно быть достаточно малым, чтобы электроны на длине свободного пробега могли приобрести энергию, необходимую для ионизации. Практически это давление составляет сотые доли миллиметра ртутного столба.

Значительное увеличение тока в газонаполненном фотоэлементе покупается ценой отказа от безынерционности и строгой пропорциональности между током и освещенностью вакуумного фотоэлемента. Поэтому область применения таких фотоэлементов ограничена.

Фотоэлементы с «запирающим слоем». Эти фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте и свойствах поверхности соприкосновения полупроводник — металл, обладают целым рядом достоинств. Как и вакуумные фотоэлементы, они дают фототок, строго пропорциональный интенсивности падающего света (неизменного спектрального состава!). Они обладают чрезвычайно большой чувствительностью, в особенности к видимым и инфракрасным лучам. Высокими качествами обладают разработанные в СССР серно-галлиевые фотоэлементы с чувствительностью, достигающей 6 *ма/лм*, и серно-серебряные фотоэлементы. Фотоэлементы с запирающим слоем являются единственными в своем роде приборами, непосредственно преобразующими световую энергию в электрическую.

Правда, и вакуумный фотоэлемент дает ток за счет энергии света, но основную работу совершает внешний источник тока — батарея. В отсутствие света цепь этой батареи разомкнута (см. рис. 1.145), и свет в основном играет роль реле, включающего батарею.

Современные кремниевые фотоэлементы с запирающим слоем дают мощность свыше 500 мквт/лм, что означает к.п.д. ~ 10%. Если учесть число превращений, которые претерпевает солнечная энергия — исходный источник любой энергии на Земле (кроме ядерной) — и окончательный к.п.д. этой цепи, то эта величина представится большой. Прогресс в технике изготовления фотоэлементов так стремителен, что любые данные в этой области через небольшое время становятся устаревшими, и не исключено, что именно фотоэлементы с запирающим слоем лягут в основу приборов, непосредственно преобразующих солнечную энергию в электрическую. Их неоценимое достоинство — отсутствие каких-либо движущихся частей.

При нормальном падении солнечных лучей фотоэлемент площадью в 10 м² (с указанным к.п.д. ~ 10%) обеспечит работу электромотора с помощью свыше 1 квт.

В течении многих месяцев безотказно работают «солнечные батареи» из кремниевых фотоэлементов на советских космических кораблях, позволяя поддерживать радиосвязь с Землей.

Фотоэлементы находят очень широкое применение в производстве: счет деталей на конвейере, сортировка деталей и для других автоматических и телемеханических установок, на транспорте, в военной технике, для передачи изображений по телеграфу, в звуковом кино.

Не имея возможности рассмотреть все эти применения, остановимся на последнем. Для записи звука на киноленту применяется следующий метод. Электрические колебания используются для попеременного ослабления и усиления интенсивности пучка света. Для этого поляризованный пучок света от источника постоянной интенсивности пропускается через конденсатор Керра (см. § 19), на пластины которого подается переменное электрическое напряжение, поступающее с микрофона (после усиления). Таким образом, интенсивность светового пучка меняется в соответствии с изменением напряжения. Далее пучок света попадает на узкую дорожку, оставленную на киноленте, и «записывает» звук в виде полоски переменной прозрачности.

Для воспроизведения звука сквозь эту дорожку пропускается свет от источника постоянной интенсивности. После прохождения сквозь ленту его интенсивность меняется по тому же закону, как и интенсивность пучка света, с помощью которого производилась запись. Далее свет падает на фотоэлемент, который дает ток, меняющийся по величине в соответствии с изменением интенсивности светового потока. Этот переменный ток воспроизводит переменный ток в микрофоне записывающего устройства. После усиления он поступает в репродукторы, воспроизводя записанные звуки.

Для усиления фототоков, а также для других приложений часто пользуются явлением, получившим название вторичной электронной эмиссии.

Явление состоит в том, что при обстреле некоторых веществ быстрыми электронами наблюдается вылет из него новых элек-

тронов. При некоторых условиях можно добиться того, чтобы каждый падающий электрон выбивал из вещества по несколько «вторичных» электронов.

Величина вторичной эмиссии характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии σ — отношением числа вылетающих из эмиттера электронов n_2 к числу падающих n_1 :

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1}.$$

В зависимости от вещества и энергии падающих электронов σ может достигать десяти и более.

Вторичная электронная эмиссия широко используется для усиления слабых токов, в частности фототоков. На рис. 1.149 мы приводим схематическое изображение фотоэлемента с однократным вторичным усилением.

Фотоэлектроны с K ускоряются электрическим полем, и значительная часть их, пролетая сквозь анод A , представляющий собой сетку, попадает на вторичный эмиттер E . Выбитые из него электроны меньших скоростей, чем первичные, собираются анодом. В то время как обычные вакуумные элементы дают ток, достигающий $0,08 \text{ ма/лм}$, фотоэлемент описанного типа дает около $0,5 \text{ ма/лм}$.

Особенно высокое усиление тока дает прибор, изобретенный А. А. Кубецким, получивший название фот о э л е к т р о н н о г о у м н о ж и т е л я.

В этом приборе производится повторное усиление тока за счет вторичной эмиссии, что приводит к его многократному усилению.

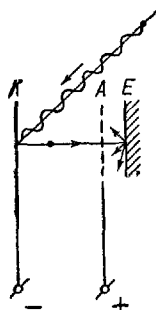


Рис 1 149

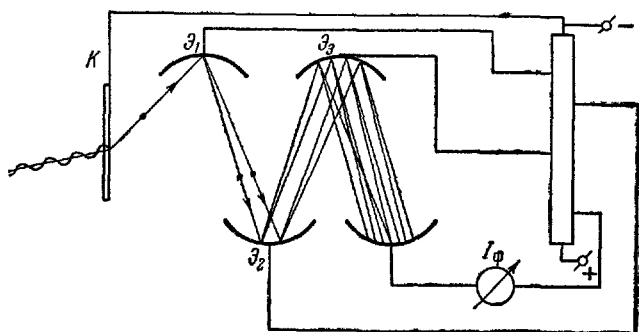


Рис 1 150.

Схема прибора приведена на рис. 1.150. Фотоэлектроны с K ускоряются в электрическом поле и, попадая на первый эмиттер \mathcal{E}_1 ,

выбивают из него в σ раз большее число электронов. Эти электроны, ускоряясь, в свою очередь попадают на \mathcal{E}_2 , выбивая из него еще большее число электронов. Для того чтобы электроны следовали по необходимым маршрутам, электродам придают специальную форму и сообщают им нужные потенциалы.

В современных промышленных образцах фотоэлектронного умножителя при девяти ступенях усиления достигается общее увеличение тока в $2 \cdot 10^6$ раз при напряжении питания в 1000—1500 в. Такой фотоэлектронный умножитель имеет размеры, немного превышающие размеры обычной радиолампы. Чувствительность его достигает 10 а/лм (вместо $8 \cdot 10^{-5} \text{ а/лм}$ вакуумного фотоэлемента).

На фотоэлектрическом эффекте основаны все современные системы телевидения, т. е. передачи изображений по радио. Для передачи изображений по радио необходимо световые сигналы превратить в электрические, причем число таких сигналов в секунду весьма велико. Передаваемое изображение разбивается на элементы, величина которых определяет четкость изображения (четкость возрастает с уменьшением размеров элементов, т. е. ростом их числа), причем в случае движущегося изображения вся картина (т. е. все множество элементов) должна передаваться 25 раз в секунду.

Наиболее удачными приборами, используемыми для передачи по радио движущихся изображений, являются иконоскоп и разновидность иконоскопа ортikon.

Основной частью иконоскопа является так называемая мозаика. Она представляет собой листок слюды толщиной от 0,025 до 0,050 мм, на который с одной стороны нанесен сплошной слой металла, с другой — множество мелких (до 0,01 мм в диаметре) крупинок серебра, не соприкасающихся друг с другом и sensibilizированных (т. е. очувствленных) при помощи цезия (собственно мозаика). Отдельные зерна серебра образуют с металлической подложкой электрические конденсаторы, включенные параллельно друг другу.

Поверхность мозаики последовательно, строчка за строчкой, обегается 25 раз в секунду электронным лучом.

В момент обстрела электронами зерна мозаики приобретают положительный потенциал: если зерно до обстрела было не заряжено, то под ударами быстрых электронов оно отдает больше вторичных электронов, чем получает из луча. Потенциал зерен достигает примерно $+3 \text{ в}$. После прохождения луча зерно принимает часть вторичных электронов, выбитых из соседних зерен, и потенциал его падает примерно до $-1,5 \text{ в}$. Так обстоит дело, если мозаика не освещена. Если теперь осветить мозаику, спроектировав на нее какое-то изображение при помощи специальной оптики, то в результате фотоэффекта потенциал зерен изменится. В зависимости от освещенности зерен их потенциал окажется различным: чем интенсивнее освещенность, тем больше электронов потеряет данное зерно, тем больше будет его потенциал. Однако прямая пропорциональность (линейная зависимость между освещенностью и потенциалом) в иконоскопе не имеет места. Таким образом, на поверхности мозаики установится распределение потенциала в соответствии с распределением яркости спроектированного на нее изображения. Изменение потенциала металлической подложки мозаики, обусловленное перезарядкой зерен мозаики, используется, будучи усиленным, в качестве видеосигнала. Далее видеосигнал передается по радио, как и сигнал, получаемый с микрофона при трансляции речи или музыки. В приемнике-телевизоре электронный луч обегает поверхность электроннолучевой трубки в том же порядке, что и электронный луч

иконоскопа, причем принимаемые видеосигналы, поступая на модулирующий электрод (т. II, § 38), меняют интенсивность этого луча. В соответствии с этим поверхность трубки светится с большей или меньшей яркостью, воспроизводя распределения яркости изображения, спроектированного на мозаику иконоскопа.

Наличие вторичной электронной эмиссии в иконоскопе является не достоинством, а существенным недостатком прибора. Его можно устранить, лишь используя в электронном луче столь медленные электроны, чтобы они не могли выбивать вторичные. Эта идея и осуществлена в ор т и к о н е.

§ 37. Квантовая структура света

Законы теплового излучения и фотоэлектрического эффекта дали целый ряд неоспоримых, но косвенных доказательств квантовой природы света. Приведем несколько важных экспериментальных доказательств существования фотонов, полученных в более поздних специально поставленных опытах.

В 1922 г. А. Ф. Иоффе и Н. И. Добронравов поставили специальные опыты по элементарному фотозффекту с помощью рентгеновских лучей.

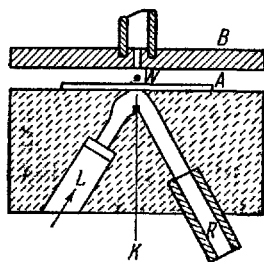


Рис. 1.151.

Схема их установки приведена на рис. 1.151. В толстой эбонитовой пластинке делалась полость, из которой через трубку *R* откачивался воздух. Эта полость играла роль миниатюрной рентгеновской трубки. Катодом служил конец тоненькой алюминиевой проволоки *K*, освещаемой ультрафиолетовыми лучами через кварцевое окошко *L*. Между алюминиевой провололочкой и пластинкой *A* (являвшейся анодом рентгеновской трубки) прикладывалась разность потенциалов около 12 000 в.

Освещение подбиралось настолько слабым, чтобы с *K* срывалось около 1000 фотоэлектронов в секунду. Вырванные электроны ускорялись полем высокого напряжения и, ударяясь о пластинку *A*, резко тормозились, испуская рентгеновские лучи. Таким образом, из антикатада *A* испускалось около $n=1000$ рентгеновских импульсов в секунду.

Алюминиевая пластинка *A* толщиной порядка $5 \cdot 10^{-3}$ мм и вторая, параллельная ей, пластинка *B* образовывали плоский конденсатор, в котором взвешивалась заряженная висмутовая пылинка *W* с радиусом *r* около $3 \cdot 10^{-5}$ см на расстоянии *d*, равном примерно 0,02 см от антикатада *A*. Пылинка время от времени теряла равновесие — рентгеновское излучение вырывало из нее электрон, в силу чего менялся ее заряд. Потеря электрона происходила через различные промежутки времени. Средний промежуток времени оказался равным 30 минутам. Независимые наблю-