

ЛЕКЦИЯ 5

ФОТОТОК. ОПИСАТЕЛЬНАЯ КРИВАЯ И ОПИСАТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В *фотоэлектрических приборах* осуществляется преобразование световой энергии в электрическую. По принципу действия эти приборы делятся на две группы: *фотоприборы с внешним фотоэффектом* (электровакуумные и газонаполненные) и *фотоприборы с внутренним фотоэффектом* (полупроводниковые приемники излучения).

Электровакуумные фотоэлектрические приборы

Электровакуумный фотоэлемент, использующий фотоэлектронную эмиссию, - это диод, у которого на внутренней поверхности стеклянного баллона нанесен фотокатод. Под действием электромагнитного излучения фотокатод эмиттирует электроны. Анод, выполненный в виде металлического кольца, собирает электроны. В электровакуумных фотоэлементах в баллоне создается высокий вакуум. В газонаполненных для заполнения баллона используют инертный газ, и увеличение в них тока, текущего через прибор, происходит за счет несамостоятельного газового разряда.

Свойства и особенности фотоэлементов отражаются на их *вольт-амперных* $I_\Phi = f(U)$ при $\Phi = const$ и *энергетических* $I_\Phi = f(\Phi)$ при $U = const$ характеристиках (где I_Φ - фототок, Φ - световой поток). а также *спектральных характеристиках* $K\phi(\lambda) = f(\lambda)$ (где $K\phi$ - чувствительность фотокатода к квантам света с длиной волны λ). Вид этих характеристик для вакуумных фотоэлементов показан на рис, 11.1.

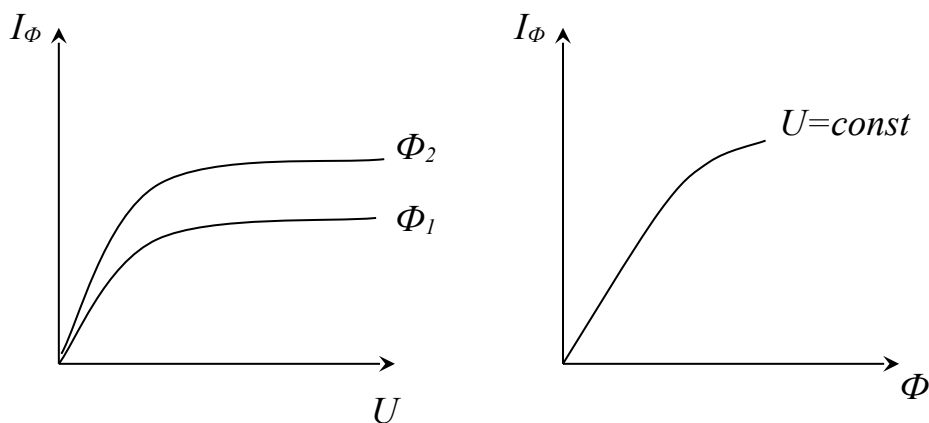


Рис.11.1

Электровакуумные фотоэлементы обладают малой инерционностью. Применяются в различных устройствах автоматики, аппаратуре звукового кино, приборах для физических исследований. Основные их недостатки - невозможность миниатюризации, высокие анодные напряжения, малая интегральная чувстви-

тельность - ограничивают их применение, и во многих видах аппаратуры вместо них используют полупроводниковые приемники излучения.

Остановимся подробнее на разновидности вакуумного фотоэлектрического прибора - *фотоэлектронного умножителя* (ФЭУ). Рабочие токи обычных фотоэлементов составляют всего несколько микроампер. Этот недостаток в ФЭУ отсутствует, так как в них осуществляется усиление фототока за счет вторичной электронной эмиссии. Принцип работы ФЭУ заключается в следующем (рис.11.2). В ФЭУ используют вспомогательные электроды (диноды D_1, D_2, \dots, D_m), с которых осуществляется вторичная эмиссия. Слабый световой поток (порядка 10^{-3} лм и меньше) вызывает фотоэлектронную эмиссию из фотокатода ФК. Вылетевшие электроны под действием ускоряющего поля направляются и фокусируются на электрод D_1 , выполненный из металла с большим коэффициентом вторичной эмиссии $\sigma = 6 \dots 8$. Выбитые из динода D_1 вторичные электроны

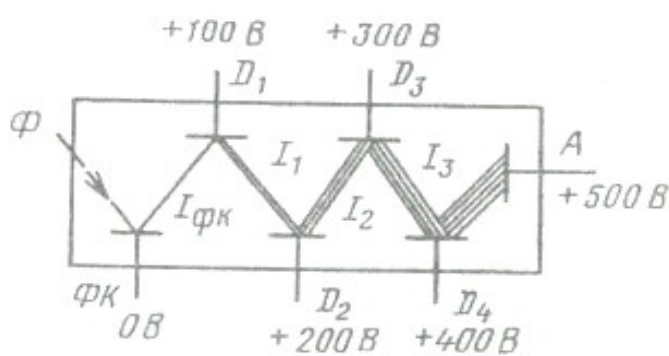


Рис.11.2

образуют ток

$$I_1 = \sigma I_{\text{ФК}},$$

где $I_{\text{ФК}}$ - ток, образованный первичными электронами фотокатода. Поле второго динода D_2 ускоряет появившиеся вторичные электроны, которые в свою очередь выбивают вторичные электроны из динода D_3 и т.д. Если m - число динодов, то к аноду A придет поток электронов в σ^m раз больший, чем было испущено фотокатодом. Коэффициент усиления ФЭУ $M = \sigma^m$. Потери электронов в одном ускоряющем и фокусирующем каскаде системы учитывают с помощью коэффициента γ . Тогда $M = (\gamma\sigma)^m$.

Для повышения эффективности работы ФЭУ разработаны приборы с различной формой и расположением электродов. Основные параметры ФЭУ: область спектральной чувствительности; число ступеней умножения; коэффициент усиления; темновой¹ ток, ограничивающий минимальный световой поток, который может регистрировать ФЭУ.

Одна из последних разработок ФЭУ использует эффект умножения числа носителей заряда в p - n -переходе под действием быстрых электронов, обладающих значительной энергией. В качестве умножающих элементов используются диодные и транзисторные структуры. При бомбардировке свободными электронами с энергией до 10 кэВ в p - n -переходе идет генерация пар носителей заряда. На p - n -переход подается обратное напряжение. Поле перехода разделяет носители, в цепи анода появляется ток. Коэффициент усиления пропорционален коэффициенту умножения носителей в полупроводнике. Такие гибридные ФЭУ имеют боль-

шие выходные токи (до 0,5 А в стационарном и до 20 А в импульсном режиме). Малые габариты и высокое быстродействие дают возможность применять ФЭУ для регистрации световых потоков малой интенсивности в астрономии, телевидении, фототелеграфии. Импульсные и высокочастотные ФЭУ применяют для регистрации слабых световых импульсов, следующих через наносекундные промежутки времени.

Фотопроводимость полупроводников

При падении на fotocувствительную поверхность прибора оптического излучения оно частично отражается и частично поглощается поверхностью. При поглощении оптического излучения в полупроводниковом материале возникают электроны и дырки, которые создают избыточную электропроводность, называемую фотопроводимостью (*внутренний фотоэффект*). Степень фотопроводимости зависит от коэффициента поглощения фотонов материалом, скорости генерации носителей заряда, от квантового выхода, т.е. от числа электронно-дырочных пар, образуемых под действием одного кванта излучения.

Для полупроводниковых материалов при оценке проходящей, отраженной и поглощенной световой энергии используют ряд коэффициентов, из которых отметим *коэффициент поглощения* α_{ϕ} . Коэффициент α_{ϕ} является постоянной величиной, характеризующей уменьшение мощности излучения по координате x , направленной в глубь полупроводника нормально к его поверхности:

$$P(x) = P_{\text{пад}}(0)e^{-\alpha_{\phi}x}$$

где $P_{\text{пад}}(0)$ - мощность излучения падающего на поверхность полупроводника.

Зависимость коэффициента поглощения от длины волны излучения (частоты, энергии кванта) называют *спектром поглощения*. Отдельные области спектра соответствуют различным механизмам поглощения энергии излучения в полупроводниках. Существует ряд механизмов поглощения энергии, из которых наиболее значимыми являются собственное и примесное поглощения.

Фотопроводимость возникает, когда энергия фотонов превышает некоторое пороговое значение. При *собственном поглощении* пороговую энергию определяет ширина запрещенной зоны, а при *примесном* - энергия активации соответствующего уровня примесного центра.

Свойства фотоприборов описываются системой характеристик и параметров. Наиболее часто используются следующие характеристики:

- *спектральная характеристика* чувствительности отражает реакцию прибора на воздействие излучения с различной длиной волны. Она определяет спектральную область применения прибора;
- *энергетическая характеристика* отражает зависимость фотоответа прибора от интенсивности возбуждающего потока излучения (ампер-ваттная, вольт-ваттная, люкс-амперная характеристики);
- *пороговые характеристики* показывают способность фотоприбора регистрировать излучение малой интенсивности;

- *вольт-амперная характеристика* отражает зависимость тока фотоприемника от приложенного к нему напряжения.

Из большого числа используемых параметров отметим следующие: *темновое сопротивление* - сопротивление прибора в отсутствие падающего на него излучения; *I_T -темновой ток*, проходящий через прибор при указанном напряжении в отсутствие потока излучения; *токовая чувствительность S_I* (А/лм или А/Вт) определяет значение фототока, создаваемого единичным потоком излучения.

Инерционность прибора характеризуют частотные характеристики, которые описывают зависимость чувствительности от частоты модуляции излучения или длительности импульсов, а также постоянные времени нарастания τ_n и спада $\tau_{сп}$ фотоотклика при импульсном излучении.

Фоторезисторы

Фоторезистор – это полупроводниковый резистор, действие которого основано на фоторезистивном эффекте.

При облучении фоторезистора фотонами в полупроводниковом фоточувствительном слое возникает избыточная концентрация носителей заряда. Если к фоторезистору приложено напряжение, то через него будет проходить дополнительная составляющая тока – фототок, обусловленный избыточной концентрацией носителей.

Фототок соответствует прохождению через фоторезистор и через внешнюю цепь электронов.

Принцип устройства фоторезистора поясняется на рис. 11.3,а.

На диэлектрическую пластину 1 нанесен тонкий слой полупроводника 2 с контактами 3 по краям. Схема включения фоторезистора приведена на рис. 11.2,б. Полярность источника питания не играет роли.

Если облучения нет, то фоторезистор имеет некоторое большое сопротивление R_T , называемое *темновым*. Оно является одним из параметров фоторезистора и составляет $10^4 - 10^7$ Ом. Соответствующий ток через фоторезистор называют *темновым током*.

При действии излучения с достаточной энергией фотонов на фоторезистор в нем происходит генерация пар подвижных носителей заряда (электронов и дырок) и его сопротивление уменьшается.

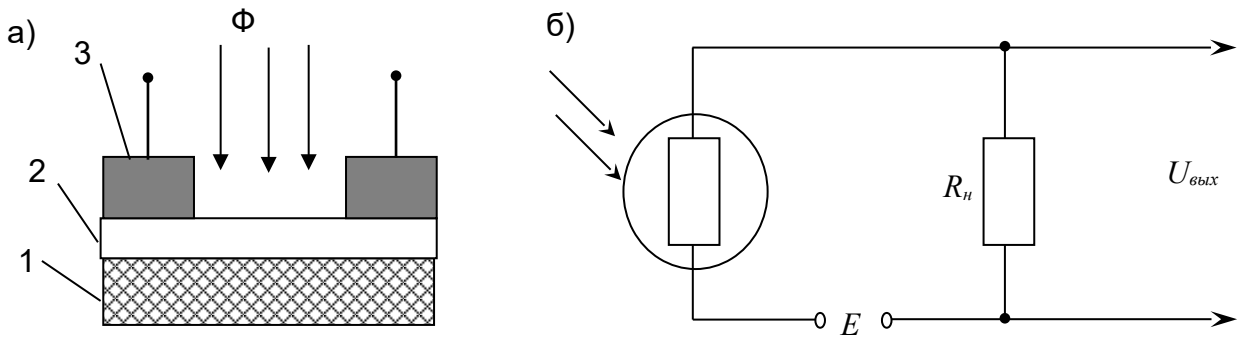


Рис.11.3. Принцип устройства и схема включения фоторезистора

Для фоторезисторов применяют различные полупроводники, имеющие нужные свойства. Так, например, сернистый свинец наиболее чувствителен к инфракрасным, а сернистый кадмий – к видимым лучам. Фоторезисторы характеризуются *интегральной чувствительностью* S , т.е. отношением фототока I_ϕ к световому потоку Φ при номинальном значении напряжения: $S = I_\phi / \Phi$

А также *удельной чувствительностью*, т. е. интегральной чувствительностью отнесенной к 1 В приложенного напряжения:

$$S_{уд} = \frac{I}{(\Phi U)},$$

где Φ – световой поток.

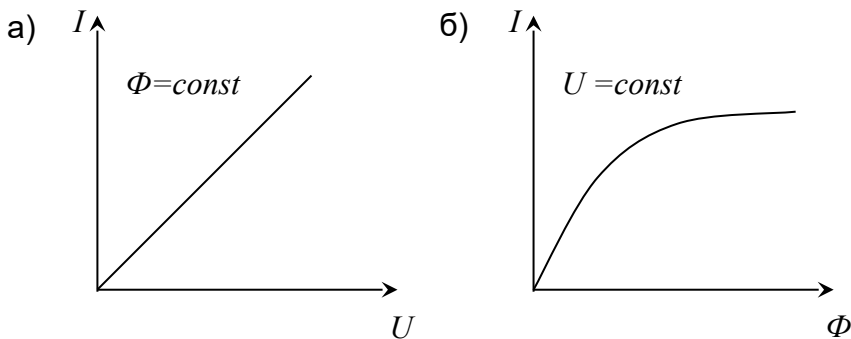


Рис.11.4. Вольт-амперная (а) и энергетическая (б) характеристики фоторезистора

Обычно удельная чувствительность составляет несколько сотен или тысяч микроампер на вольт-люмен.

Фоторезисторы имеют линейную *вольт-амперную* и нелинейную *энергетическую характеристику* (рис. 11.4).

Спектральная характеристика фоторезистора -

зависимость фототока от длины волны падающего света (рис. 11.5). Для каждого фоторезистора существует свой максимум спектральной характеристики $S_{\lambda,max}$ - Это связано с различной шириной запрещенной зоны используемых материалов. Максимум спектральной характеристики может находиться в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой частях спектра.

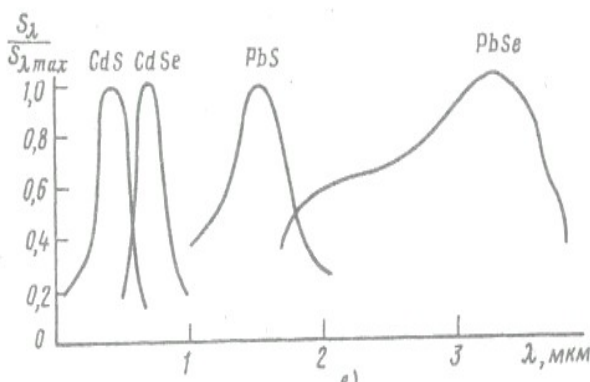


Рис.11.5. Спектральные характеристики фоторезисторов

К параметрам фоторезисторов кроме темнового сопротивления и удельной чувствительности следует еще отнести максимальное допу-

стимое рабочее напряжение (до 600 В), кратность изменения сопротивления (может быть до 500), температурный коэффициент фототока $TK\Phi = \frac{\Delta I}{I \cdot \Delta T}$. Значительная зависимость сопротивления от температуры характерна для полупроводников, является недостатком фоторезисторов. Существенным недостатком надо считать также их большую инерционность, объясняющуюся довольно большим временем рекомбинации электронов и дырок после прекращения облучения. Практически фоторезисторы применяются лишь на частотах не выше нескольких сотен герц или единиц килогерц. Собственные шумы фоторезисторов значительны. Тем не менее, фоторезисторы широко применяются в различных схемах автоматики и во многих других устройствах.

Фотодиоды

Фотодиодом называют полупроводниковый диод в которых используется внутренний фотоэффект, т.е. обратный ток диода зависит от освещенности (светового потока). Фотодиоды изготавливаются на основе электронно-дырочных переходов, контактов металл-полупроводник и гетеропереходов. (Рис. 11.6,а).

Под воздействием светового потока на электронно-дырочный переход и прилегающие к нему области происходит генерация пар носителей заряда, проводимость диода возрастает и обратный ток увеличивается. Добавка к обратному току, связанная с освещением, называется *фототоком* I_ϕ . Полная величина обратного тока $I_{обр} = I_T + I_\phi$, где I_T - темновой ток (при нулевом световом потоке $\Phi = 0$), т.е. это обратный ток обычного диода.

Фототок обычно представляют выражением $I_\phi = S_{I_{инт}}\Phi$, а коэффициент пропорциональности $S_{I_{инт}}$ называют *интегральной токовой чувствительностью фотодиода*. Интегральная чувствительность обычно составляет десятки миллиампер на люмен. Она зависит от длины волны световых лучей и имеет максимум при некоторой длине волны, различной для разных полупроводников.

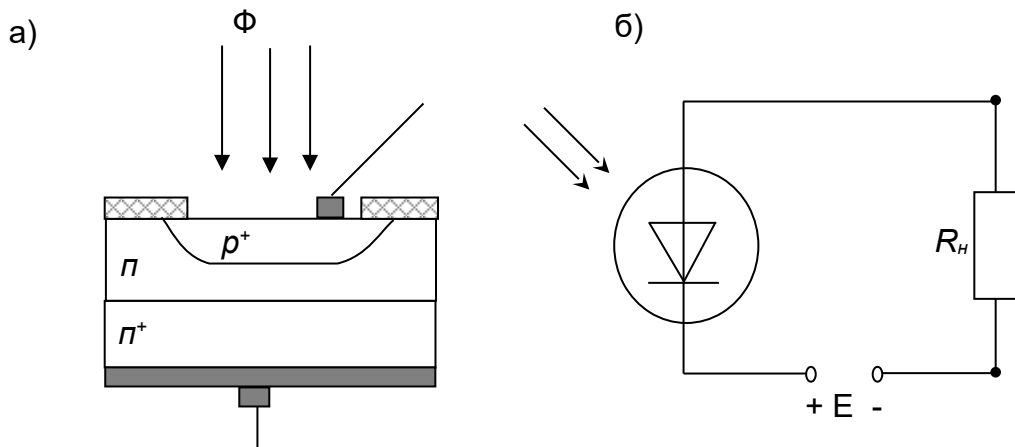


Рис.11.6. Принцип устройства и схема включения фотодиода

Темновой ток фотодиода ($\Phi=0$) описывается уравнением

$$I_T = I_0 [\exp(U / \varphi_T) - 1]; U < 0$$

где $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ - температурный (тепловой) потенциал,

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, q – заряд электрона
а семейство вольт-амперных характеристик при $\Phi \neq 0$

$$I_{обр} = I_T + I_\phi = I_0 [\exp(U / \varphi_T) - 1] + S_{инт} \Phi,$$

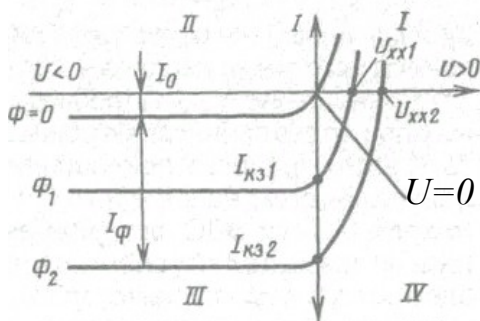


Рис.11.7

Это семейство характеристик изображено в III квадранте на рис.11.7. На рис.11.6, б показана схема включения фотодиода с резистором R_n . Изменение напряжения на резисторе R_n и есть полезный эффект, связанный с освещением. Если $R_n = 0$ (режим короткого замыкания), то в цепи течет так называемый фототок короткого замыкания $I_{кз}$, соответствующий на рис. 11.7 значению при $U = 0$.

Имеется несколько разновидностей фотодиодов. У лавинных фотодиодов происходит лавинное размножение носителей в $p-n$ –переходе и за счет этого в десятки раз возрастает чувствительность. В фотодиодах с барьером Шотки имеется контакт полупроводника с металлом. Это диоды с повышенным быстродействием. Улучшенными свойствами обладают фотодиоды с гетеропереходами. Все фотодиоды могут работать и как генераторы ЭДС. Наибольшее распространение в ВОСП получили лавинные и $p-i-n$ фотодиоды.