

(Кушманов)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

**Ф**отозлектрическим прибором называют полупроводниковый прибор, электрические свойства которого (сила тока, внутреннее сопротивление или электродвижущая сила) изменяются под действием падающего на него излучения.

В зависимости от вида используемого фотоэффекта различают следующие типы фотоэлектрических приборов.

**Фоторезисторы** — полупроводниковые приборы, действие которых основано на использовании фоторезистивного эффекта (внутреннего фотоэффекта), т. е. изменения электрического сопротивления полупроводника в результате поглощения излучения. При этом различают положительный фоторезистивный эффект, если под действием излучения сопротивление уменьшается, и отрицательный фоторезистивный эффект, если сопротивление увеличивается.

**Полупроводниковые фотоэлементы**, иначе фотогальванические элементы, — полупроводниковые приборы, действие которых основано на использовании фотогальванического эффекта, т. е. возникновения в результате поглощения излучения фотоэдс между двумя разнородными полупроводниками или между полупроводником и металлом, разделенными электрическим переходом. Полупроводниковые фотоэлементы непосредственно преобразуют энергию излучения в электрическую без потребления энергии от источников питания.

Полупроводниковые фотоэлементы, работающие при приложенном внешнем напряжении и имеющие один электрический переход, называются *фотодиодами*, а имеющие два перехода — *фототранзисторами*.

Фотоэлектрические приборы широко применяются в различных областях научных исследований и техники: для фотоэлектрического контроля и управления производственными процессами; для приема сигналов лазера, в технике звукового кино, фототелеграфии, технике телевизионной передачи; в фотометрии; для измерения интенсивности инфракрасного излучения; для преобразования солнечной энергии в электрическую; для приема ультрафиолетового и инфракрасного излучений, для сигнализации и ночного видения.

**ФОТОРЕЗИСТОРЫ**

Внутренний фотоэффект состоит в том, что под действием электромагнитной энергии валентному электрону передается полная энергия одного кванта (фотона), в результате чего электрон может перейти в зону проводимости при условии, что величина энергии кванта больше энергии запрещенной зоны:  $h\nu \geq \Delta W$  при возбуждении собственной электропроводности и  $h\nu \geq \Delta W_n$  (или  $h\nu \geq \Delta W_p$ ) при ионизации примесных атомов. Как известно, энергия кванта в видимой части спектра лежит в пределах от 1,5 до 3 эВ; следовательно, длинноволновый порог внутреннего фотоэффекта  $\lambda_0$  лежит далеко в инфракрасной части спектра. Энергия кванта при  $\lambda > \lambda_0$  недостаточна для перевода электрона в зону проводимости.

С другой стороны, существует и коротковолновый порог фотоэффекта, когда увеличение коэффициента поглощения с уменьшением  $\lambda$  приводит к тому, что электромагнитная энергия целиком поглощается в тонком поверхностном слое полупроводника, где скорость рекомбинации значительно больше, чем в объеме. Благодаря этому общая проводимость практически почти не возрастает.

Возможен случай, когда при облучении примесного полупроводника его проводимость уменьшается (так называемый отрицательный внутренний фотоэффект). Это происходит при значительной концентрации ловушек, захватывающих возникающие при облучении носители одного знака, в то время как носители другого знака диффундируют внутрь полупроводника и увеличивают скорость рекомбинации в объеме, уменьшая проводимость полупроводника. Особенностью фоторезисторов является их способность проводить ток в обоих направлениях в соответствии с полярностью включенного последовательно с фоторезистором источника питания.

Изменение температуры фоторезистора ведет к изменению темного тока и фототока, а также длинноволнового порога фотоэффекта.

Для изготовления современных фоторезисторов используют наиболее фоточувствительные полупроводники: кремний, германий, селен, а также соединения свинца: сульфид свинца, селенид свинца и теллурид свинца, аналогичные соединения кадмия, висмута и др. Все они обладают чувствительностью в инфракрасной области спектра вплоть до 4 мкм.

Одним из важнейших параметров фоторезисторов является интегральная чувствительность. Однако в фоторезисторах фототок  $I_{\phi}$  зависит не только от светового потока  $\Phi$ , но также и от приложенного к фоторезистору напряжения  $u$ , поэтому широко пользуются другим параметром — удельной чувствительностью  $K_{\Sigma\phi} = I_{\phi} / \Phi u$ , относя величину интегральной чувствительности к 1 В питающего напряжения. При этом предполагается наличие линейной зависимости между фототоком  $I_{\phi}$  и приложенным напряжением  $u$ .

Основными характеристиками фоторезисторов являются:

- вольтамперная  $I_{\phi} = f(u)$  при  $\Phi = \text{const}$ , где  $I_{\phi}$  — фототок, равный разности между световым током  $I_c$  и темновым током  $I_T$  резистора;
- световая  $I_{\phi} = f(\Phi)$  при  $u = \text{const}$ ;
- спектральная  $I_{\phi} = f(\lambda)$  при  $\Phi = \text{const}$  и  $u = \text{const}$ ;
- инерционная  $I_{\phi} = \varphi(f)$  при  $u = \text{const}$ , где  $f$  — частота изменения светового потока.

Г  
БОЛ  
ЗИСТ

$I_{\phi, \text{мк}}$   
а.  
а.  
а.

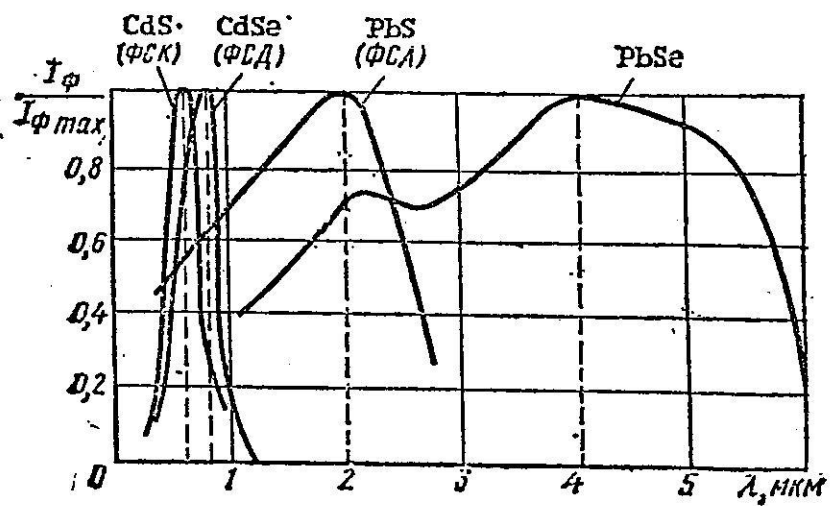


Рис. 1. Спектральная чувствительность фоторезисторов. Везде пропущены с осью

или меньшей инерционностью. Изменение фототока отстает от изменения лучистого потока, и при некоторой частоте  $f$  фототок не будет успевать ни достигать максимально возможного значения, ни уменьшаться до нуля. С увеличением частоты  $f$  амплитуда изменения фототока  $I_{\phi}$  уменьшается при той же амплитуде изменения лучистого потока. Частота, на которой фототок уменьшается на 3 дБ, не превышает десятка килогерц.

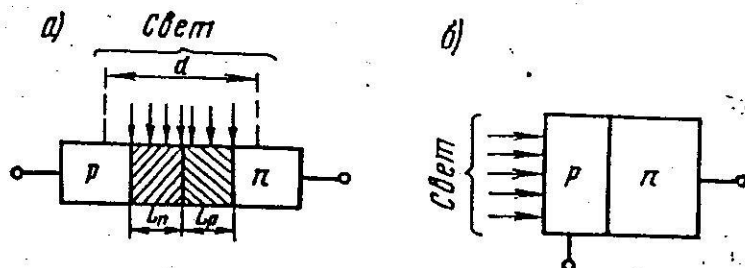
При сравнении фоторезисторов с вакуумными фотоэлементами следует указать, что фоторезисторы обладают гораздо большей интегральной чувствительностью и меньшими размерами, более высокой стабильностью, но зато они инерционны, имеют нелинейную световую характеристику и значительную температурную зависимость.

### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ (ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ)

Рассмотрим работу фотогальванического элемента с  $p$ - $n$ -переходом в вентильном режиме, когда внешнее напряжение равно нулю. В этом режиме при отсутствии освещения ток через фотоэлемент не проходит. При облучении фотоэлемента поглощаемые кванты вызывают переход электронов из валентной зоны в зону проводимости, в результате чего генерируются пары электрон—дырка.

Для создания фотоэда на поверхность фотогальванического элемента должно падать такое электромагнитное излучение, величина квантов которого превышает или, по крайней мере, равна ширине запрещенной зоны  $\Delta W$ . Это излучение сильно поглощается в полупроводнике, поэтому пары электрон—дырка образуются вблизи облучаемой поверхности на небольшой глубине. Для того чтобы фотоэлемент работал эффективно, необходимо, чтобы  $p$ - $n$ -переход был расположен близко от облучаемой поверхности на расстоянии, меньшем диффузионной длины  $L$ , иначе возбужденные носители рекомбинируют, не дойдя до  $p$ - $n$ -перехода, и заметный фототок не появится. Это условие выполняется, если облучать боковую поверхность фотоэлемента на небольшом участке, прилегающем к  $p$ - $n$ -переходу (рис. 6.8а), либо облучать поверхность одной из областей,

Рис. 6.8. Схематическое изображение полупроводниковых фотоэлементов



допустим,  $p$ -области, но толщину этой области сделать меньше диффузионной длины носителей (рис. 6.8б). Во втором случае можно получить большую рабочую поверхность фотоэлемента.

областях размером, примерно равным диффузионной длине неосновных носителей. Только с расстояния, меньшего диффузионной длины, неосновной носитель в процессе движения успевает пересечь границу перехода за время жизни (см. § 1.6). Неосновные носители, генерируемые в *p*- и *n*-областях на большем расстоянии от границы перехода, вследствие рекомбинации не попадают в обедненную область, где сосредоточено электрическое поле перехода.

При оба да генерир поверхность ли — элект ной разнос заряжая г не преодол в *p*-област разом, *p-n*-го процесс тенциалов реходу пр ходе на ве

Через переход протекает дрейфовый фототок неравновесных неосновных носителей. Неравновесные основные носители не могут преодолеть потенциальный барьер перехода и остаются в области генерации. В результате разделения оптически генерируемых носителей концентрации дырок в *p*-области и электронов в *n*-области повышаются, что приводит к компенсации объемного заряда неподвижных примесных ионов на границах перехода. Потенциальный барьер перехода, как и при прямом напряжении, уменьшается на величину фото-ЭДС, называемую напряжением холостого хода  $U_{x,x}$  при разомкнутой внешней цепи. Снижение потенциального барьера увеличивает ток диффузии основных носителей через переход. Он направлен навстречу фототоку. В стационарном состоянии при  $\Phi = \text{const}$  ток диффузии  $I_{df}$  равен дрейфовому току, состоящему из фототока  $I_\Phi$  и теплового тока  $I_0$  перехода, т. е. выполняется условие динамического равновесия

$$I = I_{df} - I_\Phi - I_0 = 0. \tag{7.5}$$

В идеализированном *p-n*-переходе (см. § 2.4) ток диффузии и тепловой ток связаны зависимостью  $I_{df} = I_0 \exp \times (U_{x,x}/\varphi_T)$ . Тогда из условия (7.5) следует, что

$$I_\Phi = I_0 (e^{U_{x,x}/\varphi_T} - 1). \tag{7.6}$$

Эту формулу для напряжения холостого хода можно записать в виде

$$U_{x,x} = \varphi_T \ln(1 + I_\Phi/I_0). \tag{7.7}$$

Напряжение холостого хода не может превышать контактной разности потенциалов *p-n*-перехода  $\varphi_0$ . В противном случае из-за полной компенсации поля в переходе разделение оптически генерируемых носителей полем перехода прекращается. Для невырожденных полупроводников величина  $q\varphi_0$  меньше ширины запрещенной зоны полупроводников [см. (2.16)]. Поэтому для напряжения холостого хода справедливо неравенство  $U_{x,x} \leq \varphi_0 < \Delta E_z/q$ .

Равнов цепи течет приложенн следующие макс во тем р сир р где  $I_\Phi - \Phi$  Это вь стики фот короткого б.1 можнс

Польз перных х кривой б: вого пото координа ка фотоэлемента, совпадающая с

да. Режим фотоэлемента, возникающий, когда приложено обратное напряжение, называется фотодиодным. Особенностью каждой характеристики при  $I_\Phi > 0$  является наличие участка в четвертом квадранте графика. На этом участке *p-n*-переход ведет себя как источник тока, а внешняя цепь — как сопротивление нагрузки. Каждой точке этого участка соответствует определенная величина сопротивления  $R_n$ . Точка характеристики, лежащая на оси напряжений ( $I=0, R_n=\infty$ ), соответствует разомкнутой внешней цепи и определяет напряжение холостого хода  $U_{x,x}$ . Точка, лежащая на оси токов ( $U=0; R_n=0$ ), соответствует короткозамкнутой цепи и определяет ток короткого замыкания  $I_{кз}$ . В случае, когда  $0 < R_n < \infty$ , следует из начала координат провести нагрузочную прямую под углом  $\alpha = \arctg(1/R_n)$  к горизонтальной оси. Пересечение нагрузочной прямой с заданной характеристикой фотоэлемента (точка А на рис.

Световой поток  
 $I_\Phi = \int \Sigma \Phi$   
интегральная  
увеличивается  
Р/и сир р  
[ $\Phi$ ] = лм  
 $1 \text{ лм} = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$   
 $1 \text{ Вт} \approx 680 \text{ лм}$

Световой поток — выра жави скорости прохождения световой энергии через данную точку  
 $\Phi = \frac{dQ}{dt}$   
это аналог мощности и измеряется в Вт (Ватт)

ехода

158-199

159

6.9) определяет рабочие значения тока  $I$  и напряжения  $U$ . Их произведение, которое на графике показано заштрихованной площадью, в свою очередь, определяет величину полезной мощности, отдаваемой фотоэлементом. Величина этой мощности зависит от качества фотоэлемента, его освещенности и сопротивления нагрузки.

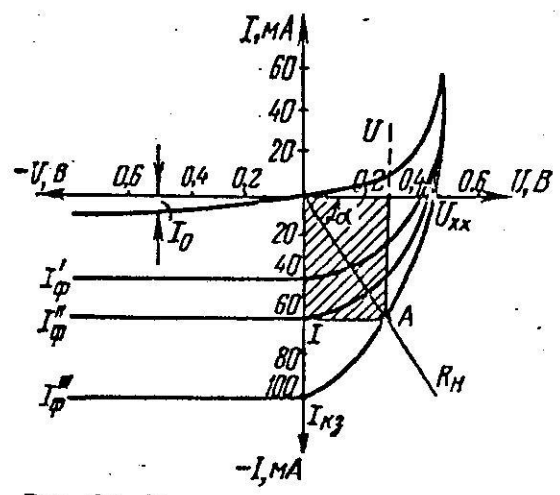


Рис. 6.9. Вольтамперные характеристики освещенного  $p-n$ -перехода

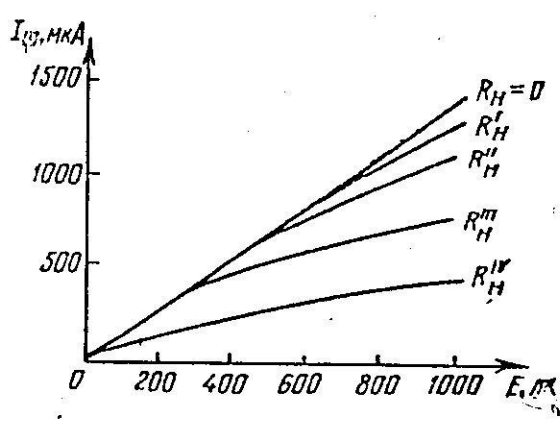


Рис. 6.10. Световые характеристики полупроводникового фотоэлемента

Конструкция меднозакисных, селеновых и селеносеребряных фотоэлементов в общем схожа. На нижний металлический электрод наносится тонкий слой полупроводника, после чего производится термическая обработка, необходимая для образования  $p-n$ -перехода в толще полупроводника. После этого на наружную поверхность полупроводника наносится тонкий, полупрозрачный для света, слой металла. Все это помещается в пластмассовую оправу с окошком для лучистого потока.

Важнейшим параметром фотогальванических элементов является интегральная чувствительность, определяемая по уже известной формуле  $K_{\Sigma} = I_{\phi}/\Phi$ . Значения интегральной чувствительности для различных типов фотогальванических элементов лежат в пределах от  $100 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$  до  $10 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$ .

Световые характеристики фотогальванических элементов линейны лишь при малых значениях светового потока  $\Phi$  (или освещенности  $E$ ); с повышением  $\Phi$  эта линейность нарушается, особенно при включенной нагрузке. На рис. 6.10 дано семейство световых характеристик фотоэлемента  $I_{\phi} = f(E)$  для различных  $R_H$ .

Вид спектральных характеристик (рис. 6.11, максимальная чувствительность каждого элемента принята за единицу) определяется тем, что с изменением длины волны меняется не только число создаваемых каждым квантом пар, но и пространственное распределение последних, так как глубина проникновения излучения зависит от длины волны.

$E = \frac{\Phi}{S}$   
 $[E] = \left[ \frac{\text{лм}}{\text{см}^2} \right]$   
 ак

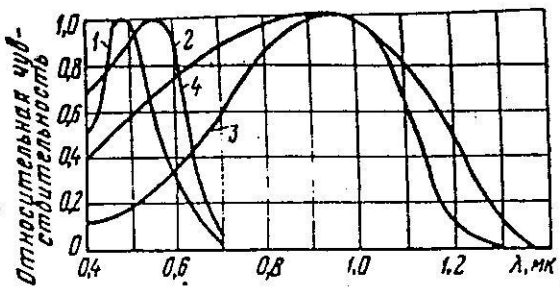
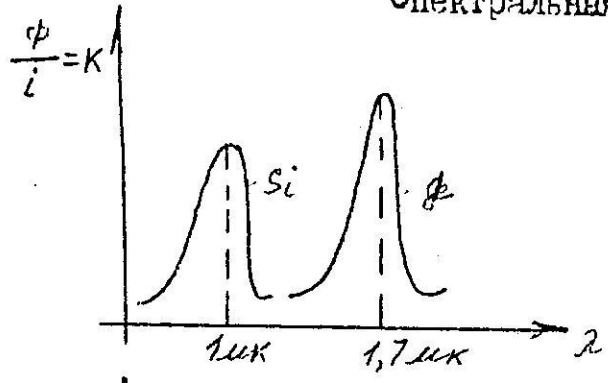


Рис. 6.11. Спектральные характеристики полупроводниковых фотоэлементов:  
 1 — меднозакисного; 2 — сернистоселенового;  
 3 — сернисто-серебряного

Фотоэлектрические процессы в фотогальванических элементах обладают инерционностью. Время установления фототока определяется наибольшим из двух времен — либо временем пробега носителей от облучаемой поверхности до р-п-перехода, либо временем зарядки собственной емкости перехода. Таким образом, с увеличением частоты изменений падающего светового потока  $f$

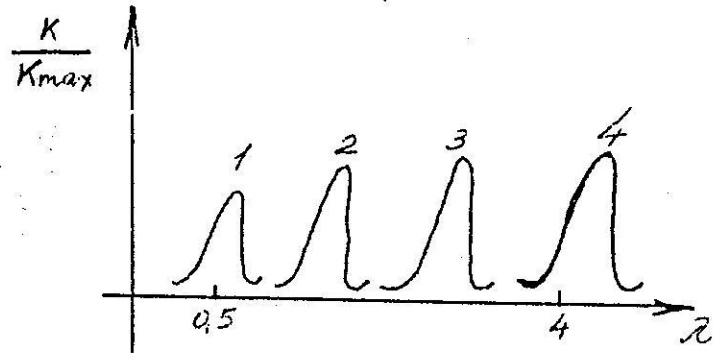
сила возникающего фототока уменьшается. Недостатком фотогальванических элементов является также зависимость их чувствительности от температуры. Чувствительность падает как при сильном нагревании, так и при охлаждении. Стабильность работы фотоэлементов высока, срок службы исчисляется годами.

Спектральная характеристика



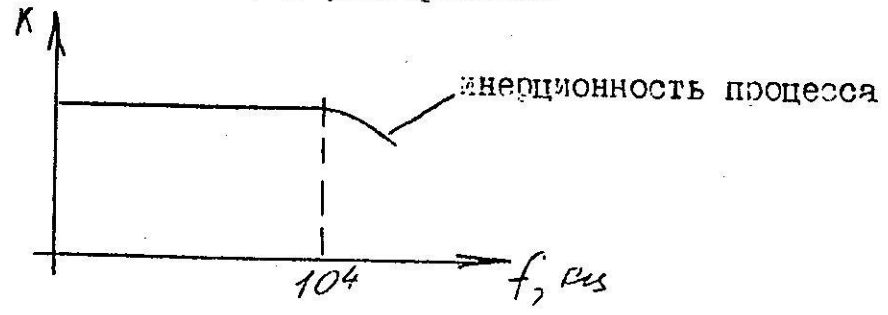
K — интегральная чувствительность  
 $\lambda$  — длина волны

*Совместно со стр. 156 (Фотодетекторы)*

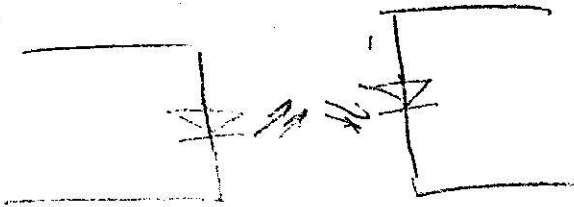


- 1 → сернистый кадмий
- 2 → селенистый кадмий
- 3 → сернистый свинец
- 4 → селенистый свинец

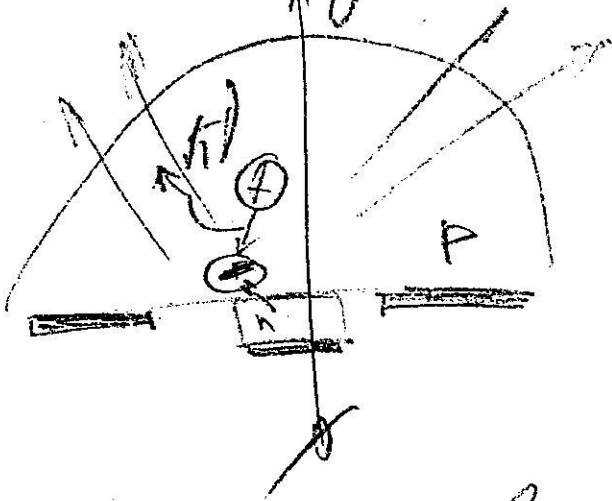
Частотная характеристика



# Оптоэлектронные пары



## Светодиодный индикатор



Включаются в прямом направлении  
Кванты света возникают в процессе  
рекомбинации инжектируемых p-n  
переходом в базу диода неосновных носи-  
телей с основными носителями

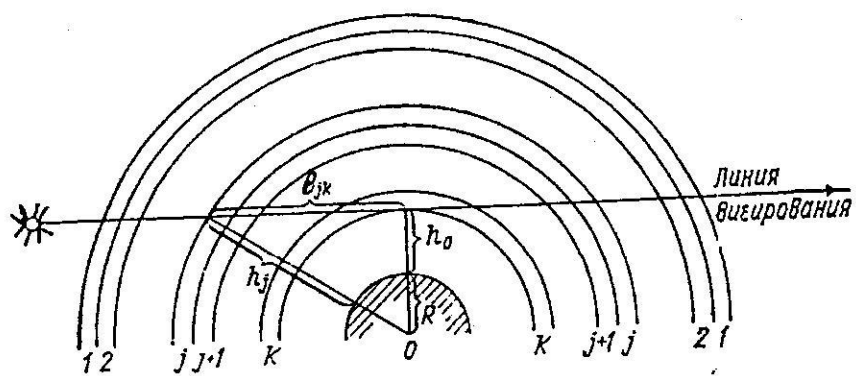


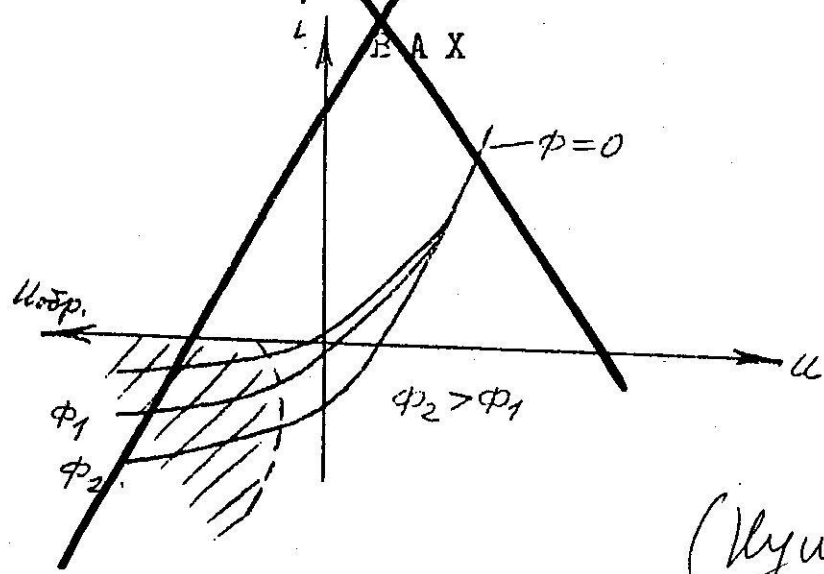
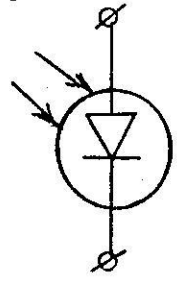
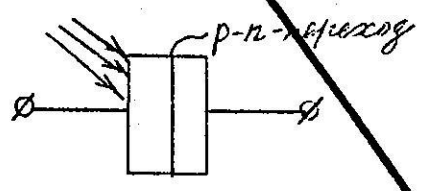
Схема измерений методом ПРО

Рис.2.2



### 3. Фотодиод - фото-гальванический эффект.

Если на границу  $p-n$  - перехода направить поток, то за счет генерации пар свободных носителей в местах поглощения света резко возрастает градиент концентрации, растет диф. ток, за время жизни значительная часть носителей достигает перехода, дрейфуют через переход, который включен на  $U_{обр}$ . Возникший во внешней цепи ток - ФОТОТОК /обратный ток коллекторного перехода/.



(Иушманов)

### ФОТОДИОДЫ И ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

Фотодиод (ФД) — фотоэлектрический полупроводниковый прибор с одним  $p-n$ -переходом, имеющий два вывода. В случае, если прибор имеет два или больше переходов, он называется фототранзистором независимо от числа выводов. В фототранзисторе база может быть отключена (свободная база), либо на нее подается положительное по отношению к эмиттеру смещение (связанная база). В отличие от полупроводниковых фотоэлементов, которые могут работать только в вентильном режиме, без внешнего напряжения (из-за низких пробивных напряжений) фотодиоды обычно работают при значительных обратных напряжениях, приложенных к  $p-n$ -переходу, т. е. в фотодиодном режиме. В вентильном режиме фотодиоды имеют малую интегральную чувствительность.

Устройство фотодиода и схема его включения показаны на рис. 6.12.

~~Между фотодиодом и усилительным транзистором существует некоторая аналогия. В фотодиоде роль эмиттера, управляющего током в цепи коллектора, выполняет световой поток: возникшие под действием света неосновные носители диффундируют через базу к коллекторному переходу и собираются коллектором.~~

В фотодиодном режиме ток во внешней цепи  $I = (u_R - u) / R_n$ , где  $u$  — напряжение источника питания; уравнение, определяющее ток  $I$  ФД при освещении, имеет вид

$$I = -I_\phi + I_0 \left( \exp \frac{e(u_R - u)}{kT} - 1 \right). \quad (6.3)$$

Участки вольтамперных характеристик, расположенные в третьем квадранте рис. 6.9, соответствует фотодиодному режиму. При-

отсутствии освещения характеристика, называемая темновой, имеет вид обычной характеристики выпрямительного диода. Увеличение светового потока  $\Phi$  ведет к росту обратного тока.

Световые характеристики фотодиода  $I = f(\Phi)$  линейны в широком диапазоне изменения светового потока; величина интегральной чувствительности несколько возрастает с увеличением напряжения  $u$ . На рис. 6.13 приведены спектральные характеристики фотодиодов. Так как оптическая генерация пар возможна лишь в случае, если  $h\nu \geq \Delta W$ , то длинноволновый порог фотоэффекта больше у германиевых фо-

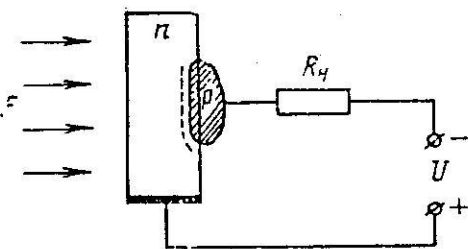


Рис. 6.12. Схема включения фотодиода

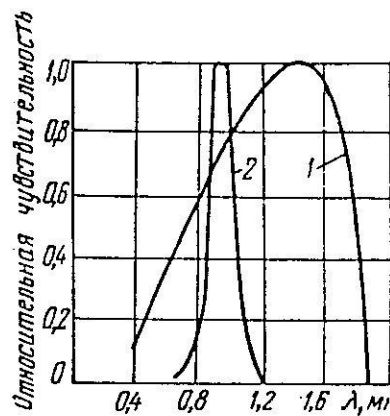


Рис. 6.13. Спектральные характеристики фотодиодов: 1 — германиевого; 2 — кремниевого.

тодиодов, имеющих меньшее значение ширины запрещенной зоны  $\Delta W$ . Кроме того, германиевые фотодиоды могут работать в более широкой спектральной области.

Электрическими параметрами ФД являются темновой ток  $I_T$ , определяемый при небольших обратных напряжениях, дифференциальное сопротивление  $R_{диф} = du/dI$ , максимально допустимое обратное напряжение  $u_{обр макс}$ , рабочее напряжение, напряжение шумов.

К световым параметрам ФД относятся интегральная чувствительность, определяемая при стандартном источнике света и при обратном напряжении 1В, и световой эквивалент шума.

**Фототранзисторы**, в отличие от фотодиодов, имеют обычно два  $p-n$ -перехода и три области — эмиттер, базу и коллектор, каждую из которых можно освещать. В фототранзисторах происходит внутреннее усиление фототока, и поэтому их интегральная чувствительность доходит до нескольких А/лм.

На рис. 6.14 показано устройство фототранзистора типа  $p-n-p$  при освещении области базы.

Рассмотрим работу фототранзистора в схеме со свободной базой. В этом случае при отсутствии освещения фототранзистор ведет себя, подобно усилительному транзистору в схеме с оборванной базой ( $I_G = 0$ ). Через фототранзистор проходит начальный сквозной коллекторный ток  $I'_{к0} = I_{к0} / (1 - \alpha) = (\beta + 1) I_{к0}$ . Ток  $I'_{к0}$  определяется, главным образом, перемещением дырок — неосновных но-

сителей, инжектированных из эмиттера в базу и дошедших до коллекторного перехода. При освещении области базы в ней генерируются пары электрон—дырка. Неравновесные дырки, диффундирующие к коллекторному переходу, свободно экстрагируются коллектором, увеличивая ток  $I_{к0}$  (рис. 6.14). Равным образом, эти

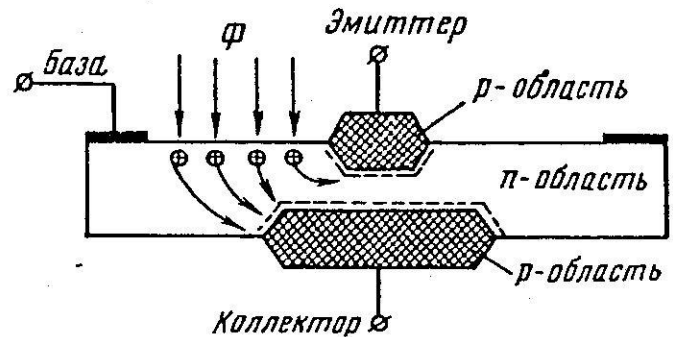


Рис. 6.14. Схематическое изображение фототранзистора

дырки диффундируют и к эмиттерному переходу и также экстрагируются эмиттером. Неравновесные электроны, которые являются основными носителями, практически не могут выйти из объема базы, так как высота энергетического барьера в эмиттерном переходе понижена внешним напряжением очень незначительно. Накопление в базе нескомпенсированного отрицательного объемного заряда вызывает резкое снижение барьера в эмиттерном переходе, усиление инжекции дырок из эмиттера в базу, и ток  $I_k$  возрастает в большей степени, нежели вначале непосредственно под действием света. Таким образом, в фототранзисторе осуществляется усиление фототока, что и объясняет большую интегральную чувствительность его по сравнению с фотодиодом.

Можно освещать в фототранзисторе также область эмиттера или область коллектора. При этом физические процессы в приборе аналогичны.

При включении фототранзистора по схеме ОЭ с освещаемой свободной базой  $I_3 = I_k$  и, следовательно,  $I_k = \alpha I_3 + I_{к0} + I_{фк}$ , где  $I_{фк}$  — фототок, возникающий в цепи коллектора, откуда  $I_k = I_{фк} / (1 - \alpha) + I_{к0} / (1 - \alpha)$ .

Таким образом, первичный фототок  $I_{ф}$  усиливается в фототранзисторе в  $1 / (1 - \alpha) = \gamma = 1 + \beta$  раз. Во столько же раз увеличивается интегральная чувствительность фототранзистора по сравнению с чувствительностью фотодиодов.

При тонкой базе можно получить усиление первоначального фототока  $I_{ф}$  в 100—1000 раз; интегральная чувствительность достигает 2—10 А/лм, а в отдельных образцах превышает 20 А/лм. Величина темнового тока  $I_T$  составляет десятые доли миллиампера, фототока  $I_{ф}$  — десятки миллиампер. ФТ может непосредственно управлять работой реле с током срабатывания до 20 мА. При этом



на коллектор подается обратное напряжение 10—15 В, но нормальный режим сохраняется и при понижении напряжения до 1 В.

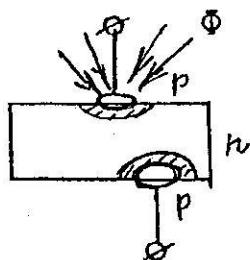
В последние годы определенный интерес представляют работы по созданию мощных тиристоров, управляемых светом, — фототиристоров. Основное их достоинство — полная электрическая развязка цепи управления и главной цепи, что крайне важно при конструировании высоковольтных преобразователей.

Основной трудностью при конструировании мощных фототиристоров является то, что для получения высокой фоточувствительности толщины всех слоев *p-n-p-n*-структуры должны быть достаточно малыми (меньше диффузионной длины неосновных носителей), в то время как для получения высокого рабочего напряжения толщины базовых слоев должны быть большими.

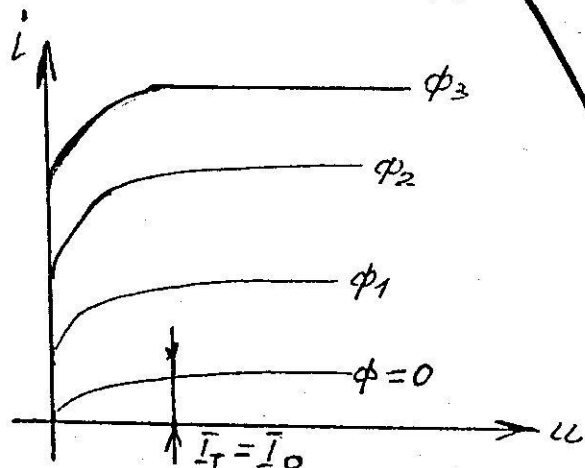
В последние годы разработаны также полевые фототранзисторы, сочетающие в себе низкий уровень шума, малый темновой ток и малую чувствительность к радиации.

### ФОТОТРИОД

Еще менее быстродейств. из-за инерционных процессов в базе.



Статические характеристики триода в схеме ОЭ с "оторванной базой" / управляется базовым током /.



$$\Phi_3 > \Phi_1$$

Роль управления выходным током /в отличие от триода, где работает базовый ток/ берет на себя световой поток, за счет которого рождаются в базе пары носителей.

Спектральные характеристики — приближенные характеристики диода.

$$K_T < K_d$$

Выходные токи больше, чем у диода. Фототриоды чувствительны к температуре средн.

Темновые токи /без Φ/ больше температуры тока диода.