

Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.

Оптоэлектронный полупроводниковый прибор – это полупроводниковый прибор, чувствительный к электромагнитному излучению в оптическом диапазоне спектра, или излучающий электромагнитную энергию в том же диапазоне, или использующий электромагнитное излучение для своей работы.

Оптический диапазон спектра электромагнитных волн занимает интервал длин волн от 1 мм до 1 нм. Оптический диапазон включает в себя три поддиапазона: ультрафиолетовый (1нм – 0,38мкм), видимый (0,38 – 0,78 мкм) и инфракрасный (0,78 мкм – 1 мм). Рабочим диапазоном полупроводниковых приборов является область длин волн 0,2 – 20 мкм.

Оптические диапазоны спектра электромагнитных волн

Ультрафиолетовый

$$\lambda = 1\text{нм} \div 0,38\text{мкм}$$

Видимый

$$\lambda = 0,38\text{мкм} \div 0,78\text{мкм}$$

Инфракрасный

$$\lambda = 0,78\text{мкм} \div 1\text{мм}$$

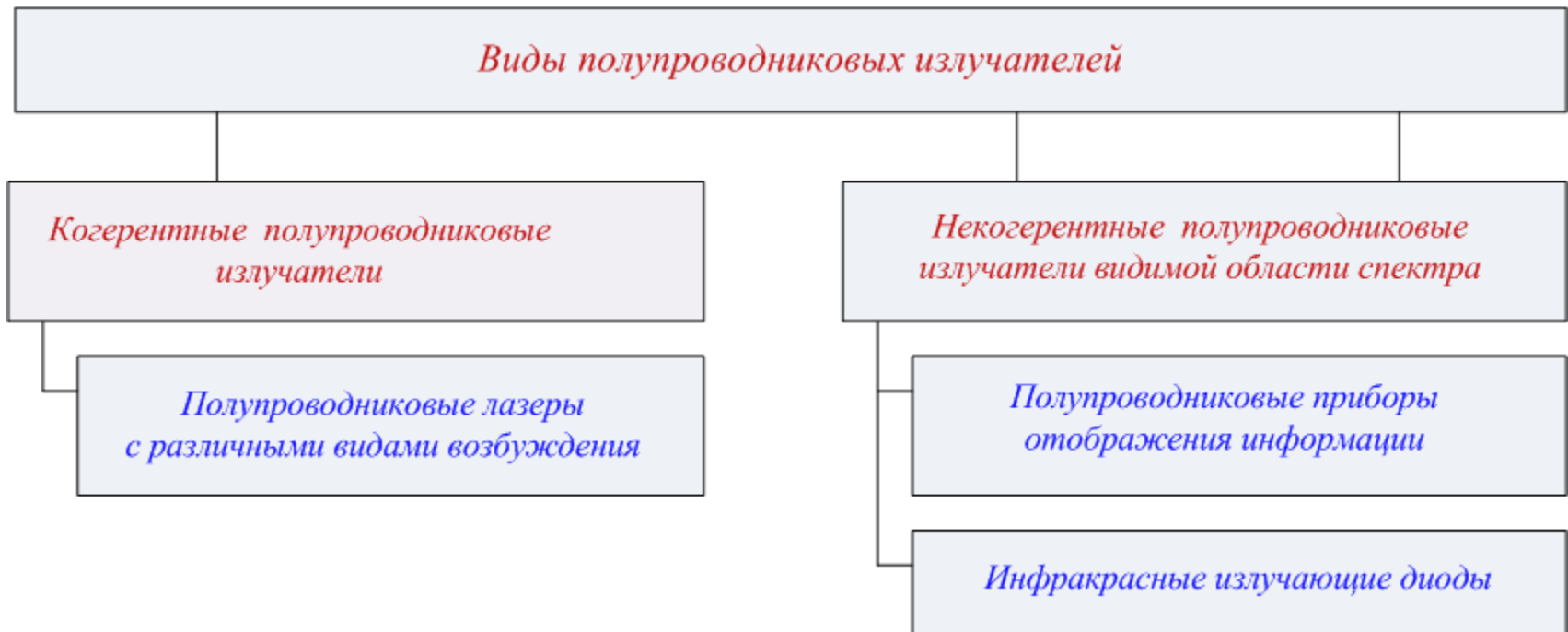
Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.

Классификация оптоэлектронных приборов



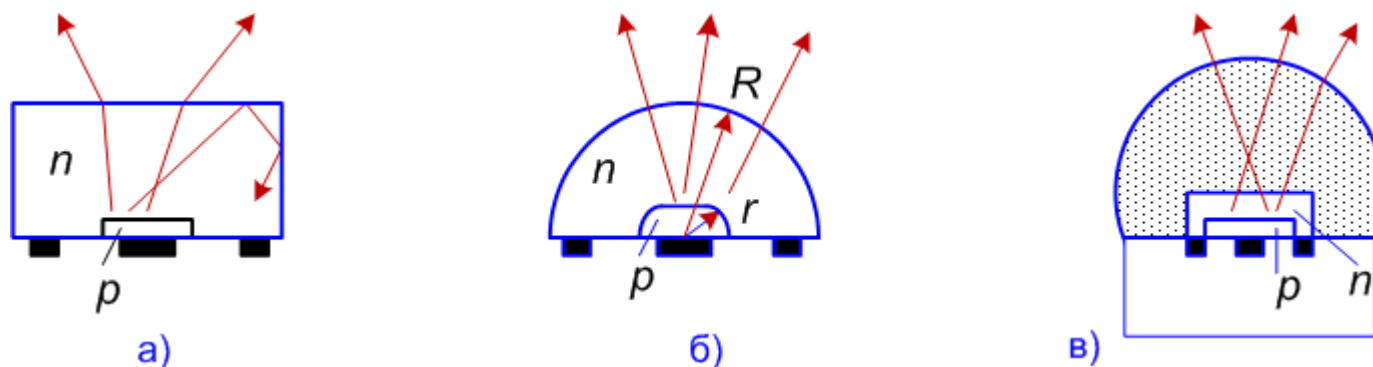
Полупроводниковый излучатель.

Полупроводниковый излучатель – это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию в энергию электромагнитного излучения в оптическом диапазоне спектра.



Полупроводниковый излучатель. Светоизлучающий диод.

Светоизлучающий диод (СИД) – это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.



Конструктивное исполнение полупроводниковых излучателей: а – плоская конструкция, б – с полусферическим кристаллом полупроводника, в – с прозрачным полусферическим покрытием.

*Характеристики и параметры полупроводниковых излучателей можно разделить на **фотометрические**, характеризующие приборы как источники излучения, и **электрические**, характеризующие приборы как элементы электронных схем.*

Полупроводниковый излучатель. Основные характеристики и параметры.

Основные параметры и характеристики полупроводниковых излучателей

Сила света – излучаемый световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучаемого кристалла (кд).

Яркость излучения – отношение силы света в заданном направлении к площади светящейся поверхности; измеряется в канделах на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) при заданном значении прямого тока.

Видность – отношение светового потока (оцениваемой глазом мощности) к истинной полной мощности лучистой энергии.

Яркостная характеристика представляет собой зависимость яркости излучения от протекающего через излучатель прямого тока.

Спектральная характеристика – зависимость мощности излучения от длины волны.

Полупроводниковый приемник излучения.

Полупроводниковый приемник излучения – это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, чувствительный к электромагнитному излучению оптического диапазона или преобразующий энергию электромагнитного излучения непосредственно в электрическую энергию.

Классификация полупроводниковых приемников

в соответствии с характером взаимодействия оптического излучения с веществом

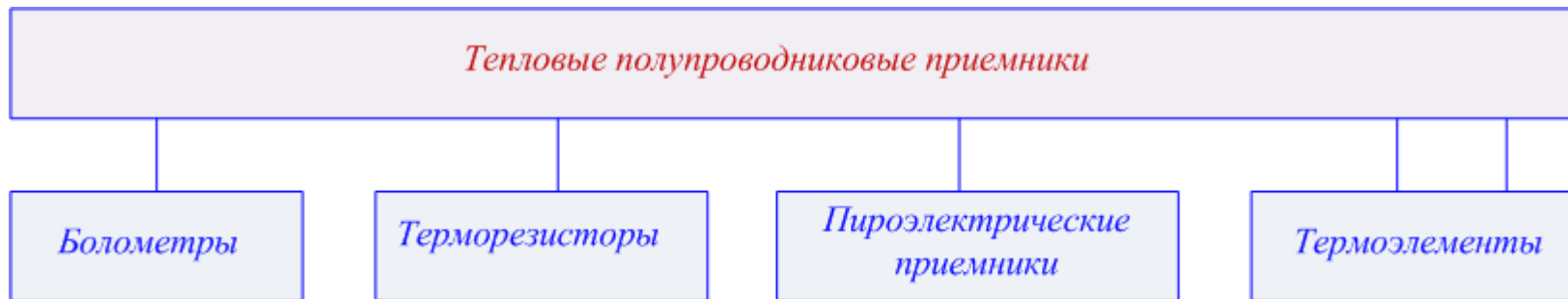
Тепловые полупроводниковые приемники

В тепловых приемниках поглощенная энергия увеличивает тепловую энергию кристалла, следствием чего является изменение его физических свойств.

Фотозлектрические полупроводниковые приемники

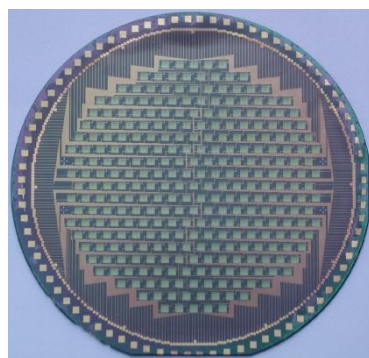
Работа фотозлектрических приемников основана на внутреннем фотоэффекте – образовании неравновесных носителей заряда внутри полупроводниковой структуры под действием оптического излучения.

Тепловые полупроводниковые приемники. Болومتر.



Болометр предназначен для регистрации и измерения параметров теплового излучения в широком спектральном диапазоне.

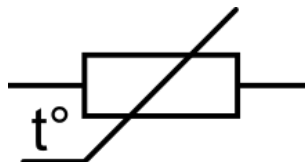
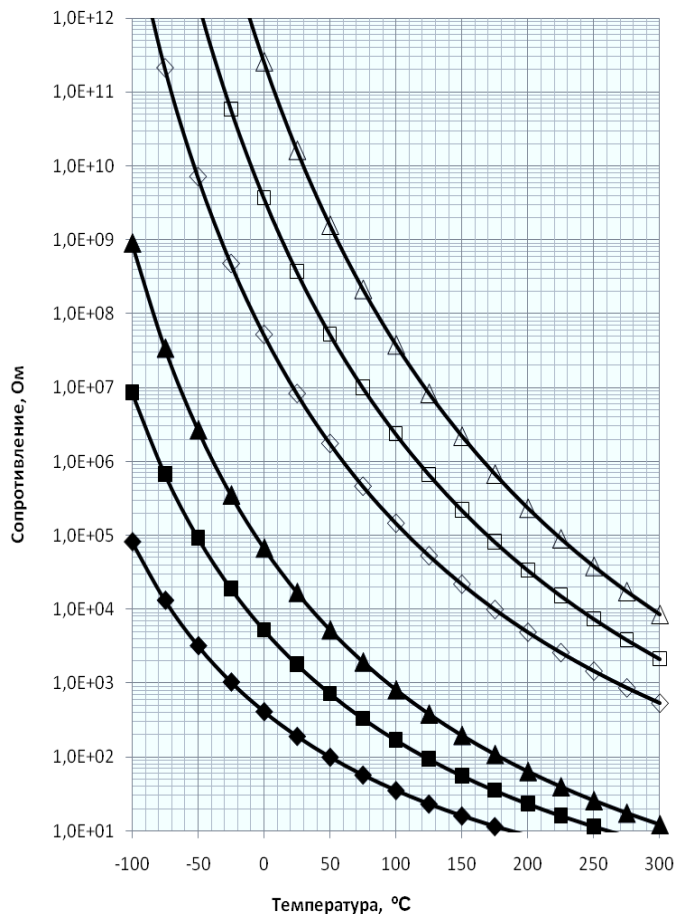
Болометрическая матрица



Болометр

Тепловые полупроводниковые приемники. Терморезистор.

Терморезистор (термистор) – полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры.



Зависимость величины сопротивления терморезисторов с ОТКС от температуры для разных значений постоянной В.

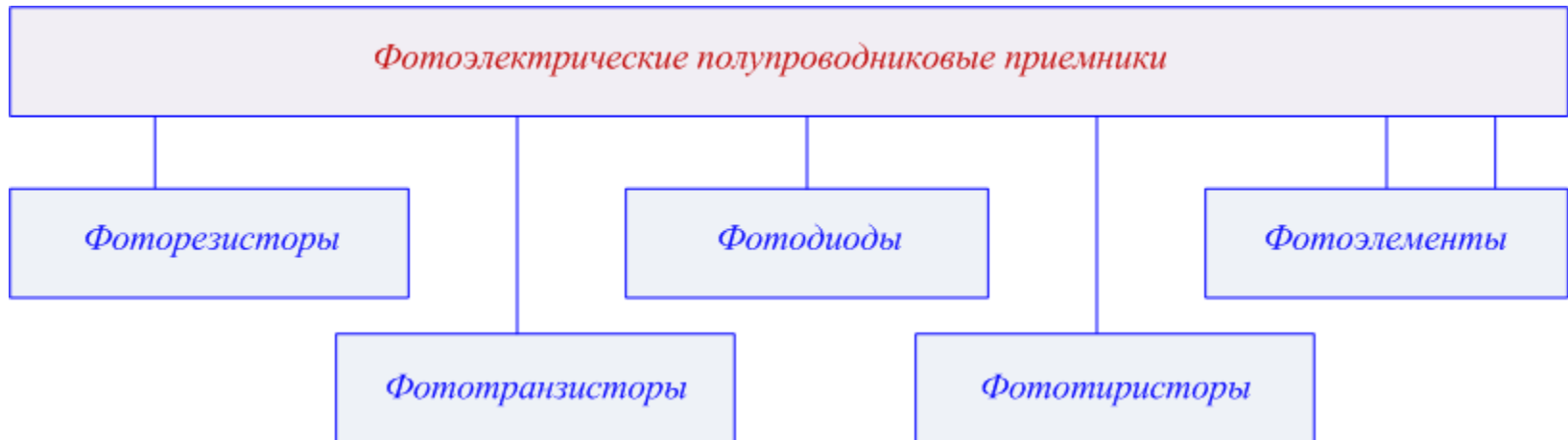
◆ 1 ■ 2 ▲ 3 ◇ 4 □ 5 ▲ 6

$$1 - R_{20^{\circ}\text{C}} = 220 \text{ Ом} \quad 2 - R_{20^{\circ}\text{C}} = 2,2 \text{ кОм}$$

$$4 - R_{150^{\circ}\text{C}} = 22 \text{ кОм}$$

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники.

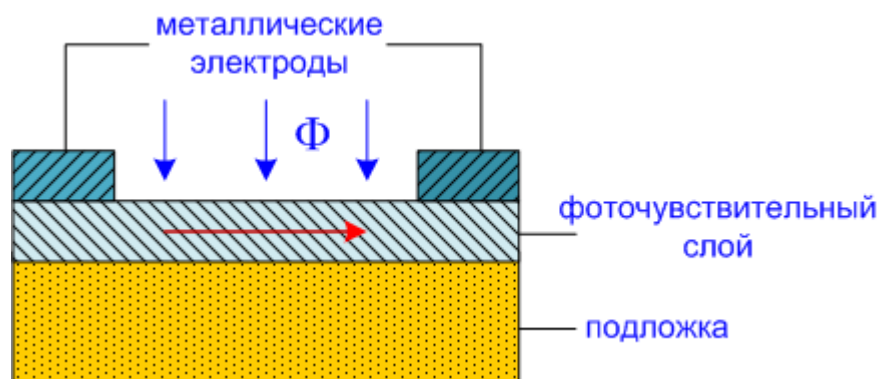
Работа фотоэлектрических приемников основана на внутреннем фотоэффекте – образовании неравновесных носителей заряда внутри полупроводниковой структуры под действием оптического излучения. Подавляющая часть фотоэлектрических приемников использует две формы внутреннего фотоэффекта, которые называются фоторезистивным и фотогальваническим эффектами.



Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Фоторезистор.

Фоторезистор представляет собой полупроводниковый резистор, действие которого основано на фоторезистивном эффекте.

Фоторезистивный эффект – это изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное действием оптического излучения – концентрация носителей заряда в полупроводнике увеличивается и сопротивление полупроводника уменьшается.



Конструкция фоторезистора



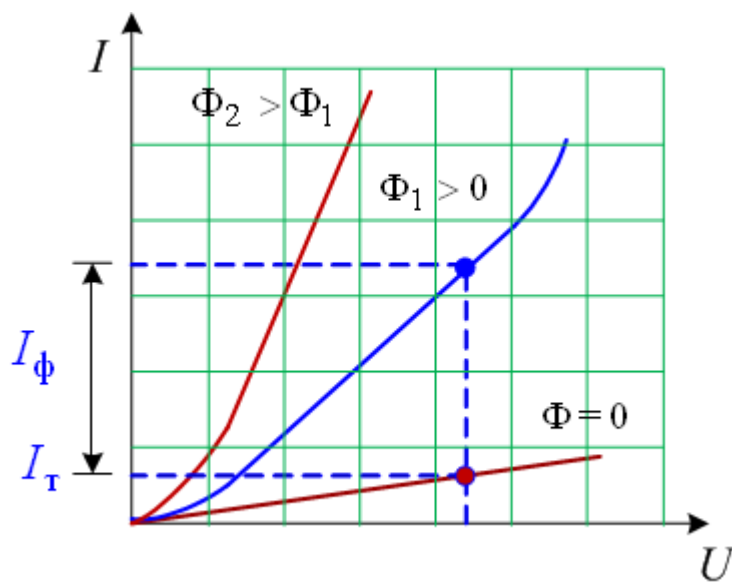
Фоторезистор GL5528

В качестве полупроводникового материала для фоторезисторов обычно используют сульфид кадмия, селенид кадмия или сульфид свинца.

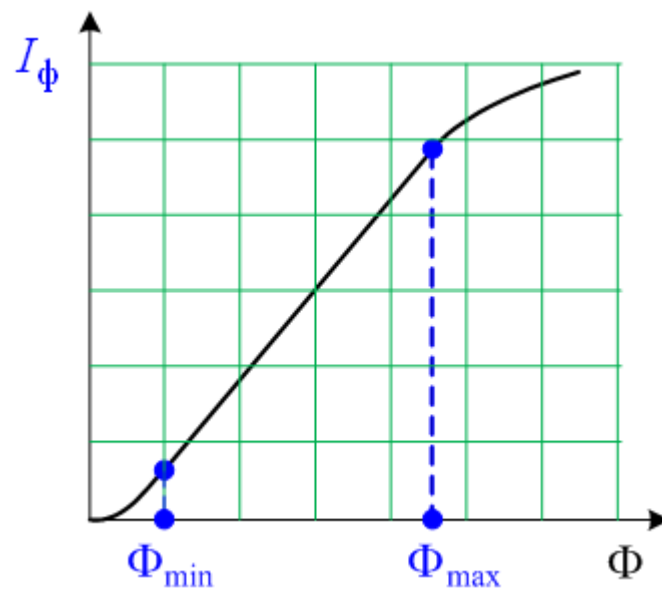
Фоторезистор. Основные характеристики и параметры.

Вольт-амперная характеристика фоторезистора – зависимость тока от напряжения при постоянном световом потоке, который, таким образом, является параметром семейства вольт-амперных характеристик.

Световая (люкс-амперная) характеристика представляет собой зависимость фототока от падающего на фоторезистор светового потока.



Семейство вольт-амперных характеристик фоторезистора

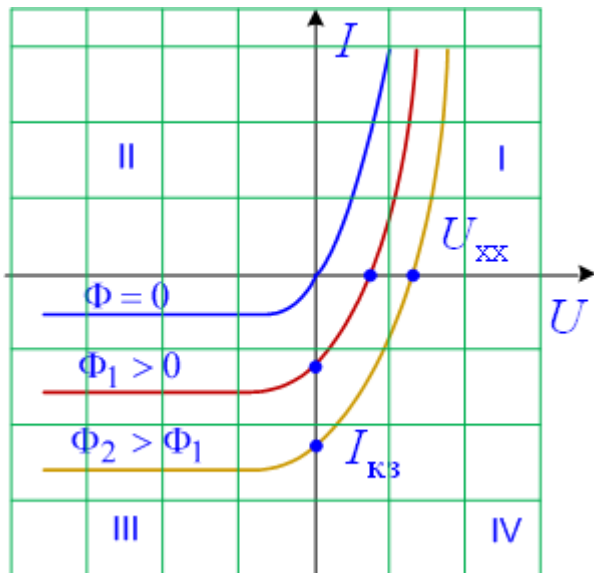


Световая характеристика фоторезистора

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Фотодиод.

Фотодиод – это фотоэлектрический приемник излучения на основе диодной структуры, действие которого обусловлено фотогальваническим эффектом в обратном смещенном выпрямляющем переходе.

Фотогальваническим эффектом называют явление возникновения фото-ЭДС за счет разделения носителей заряда, возникающих под действием оптического излучения, электрическим полем выпрямляющего электрического перехода.



Темновая ВАХ (при $\Phi = 0$) представляет собой ВАХ обычного p-n-перехода. При этом обратный тепловой ток насыщения носит название темнового тока.

Увеличение светового потока вызывает рост обратного тока через переход и характеристики смещаются вниз.

В рабочем диапазоне изменения обратных напряжений обратные токи практически не зависят от напряжения. В диапазоне положительных напряжений ток фотодиода быстро возрастает с увеличением напряжения.

Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода.

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Фотодиод.

При разомкнутой внешней цепи между электродами фотодиода наводится фото-ЭДС, которую называют напряжением холостого хода:

$$U_{\text{хх}} = \varphi_{\text{T}} \ln \left(1 + \frac{I_{\Phi}}{I_0} \right).$$

При закорачивании освещенного фотодиода во внешней цепи протекает фототок короткого замыкания :

$$I_{\text{кз}} = -I_{\Phi}.$$

Подключение к освещенному фотодиоду нагрузочного резистора приводит к возникновению фото-ЭДС $U_{\Phi} < U_{\text{хх}}$ и протеканию обратного тока фотодиода:

$$I = I_{\Phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{U_{\Phi}}{\varphi_{\text{T}}} \right) - 1 \right] < |I_{\text{кз}}|.$$

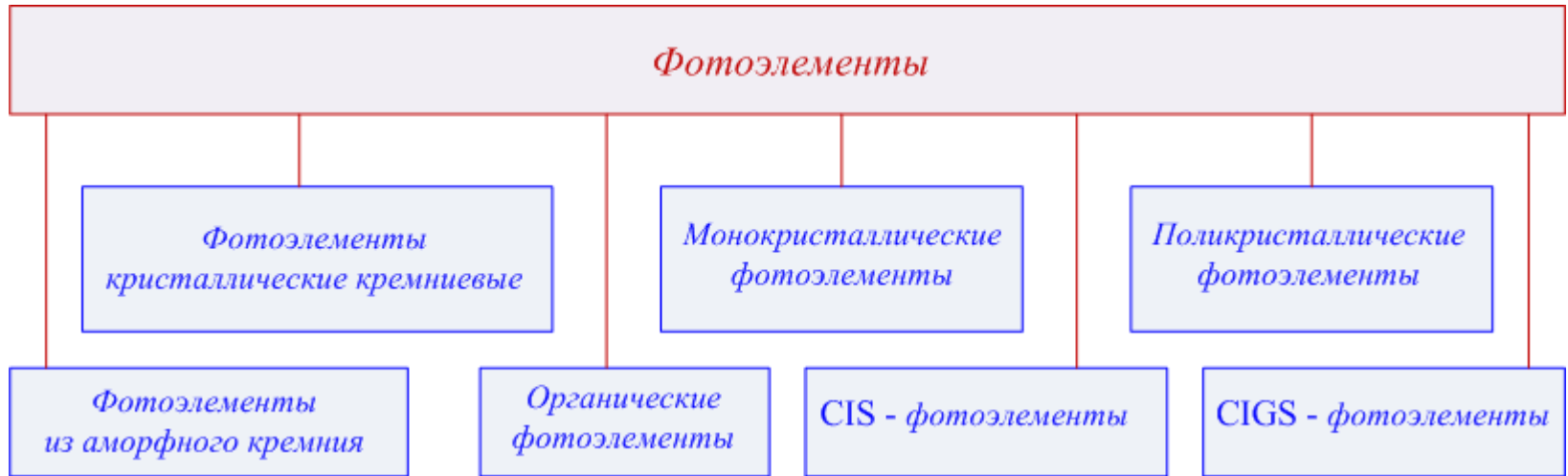
Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Фотоэлементы.

Полупроводниковый фотоэлемент – это фотоэлектрический приемник излучения с выпрямляющим электрическим переходом, предназначенный для непосредственного преобразования световой энергии в электрическую.

Принцип действия фотоэлемента основан на работе выпрямляющего электрического перехода в фотогальваническом режиме. При этом внешние источники питания отсутствуют, а фотоэлемент сам является источником энергии, генерируя фото-ЭДС, значение которой зависит от величины светового потока.

Фотогальванический режим – режим работы фотодиода без внешнего источника напряжения [ГОСТ 21934-83 «ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ и ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА. Термины и определения.].

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Фотоэлементы.



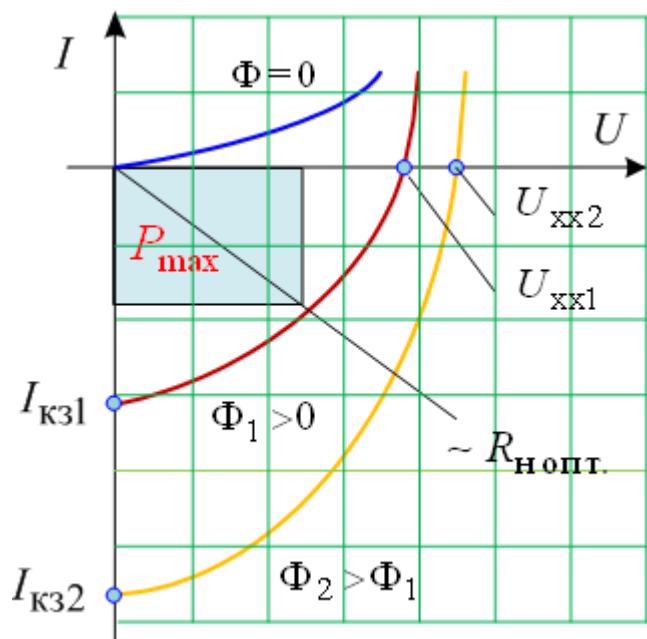
CIS – Copper Indium Selenide, соединения селена с медью и индием.

CIGS – Copper Indium Gallium Selenide, соединения селена с медью, индием и галлием.



Фотоэлементы. Вольт-амперная характеристика.

Вольт-амперные характеристики фотоэлемента представляют собой расположенные в IV квадранте участки ВАХ освещенного p-n-перехода.



Точки пересечения ВАХ с осью напряжений соответствуют напряжениям холостого хода, а точки пересечения с осью токов — токам короткого замыкания. Семейство вольт-амперных характеристик показывает, что с ростом светового потока напряжение холостого хода и абсолютная величина тока короткого замыкания увеличиваются.

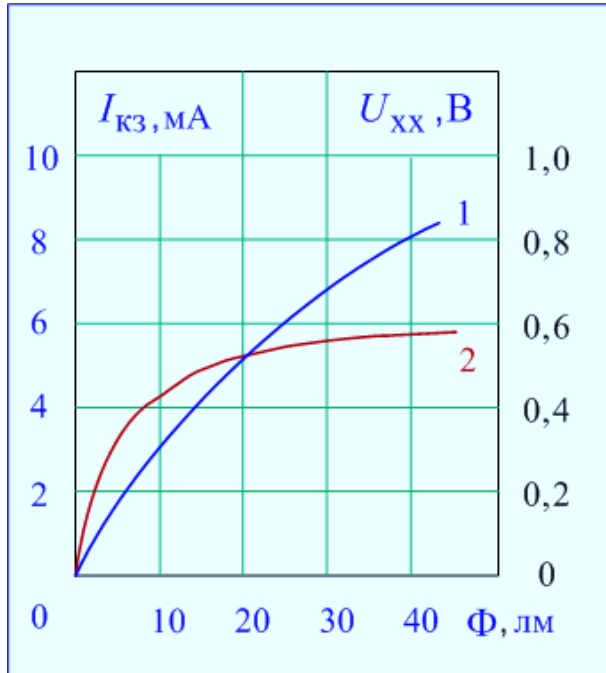
Оптимальному режиму работы фотоэлемента соответствует наибольшая площадь прямоугольника с вершиной на ВАХ при данной освещенности.

Вольт-амперные характеристики фотоэлемента.

У кремниевых фотоэлементов напряжение холостого хода составляет величину порядка 0,5-0,55 В, а плотность тока короткого замыкания при средней освещенности — 20-25 мА/см². Поскольку ширина запрещенной зоны арсенида галлия больше, чем кремния, поэтому арсенид-галлиевый фотоэлемент обладает большим значением напряжения холостого хода, но меньшим током короткого замыкания.

Фотоэлементы. Световые характеристика.

Световые характеристики фотоэлемента – это зависимости напряжения холостого хода и тока короткого замыкания от величины светового потока.



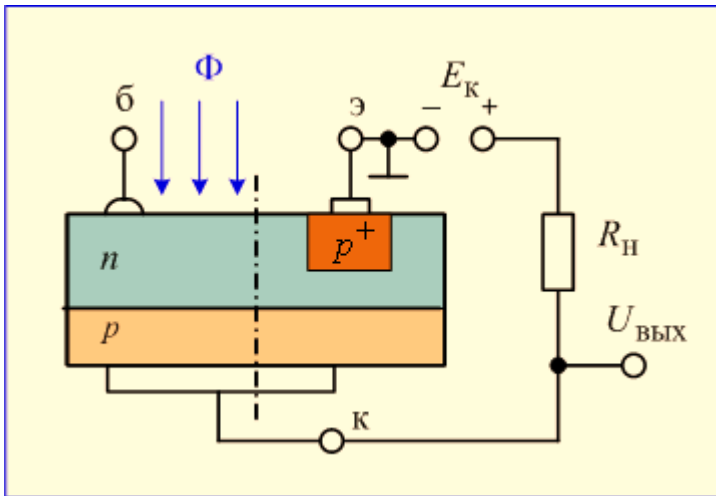
Коэффициент полезного действия фотоэлемента – это отношение максимальной мощности P_{max} , которую можно получить от фотоэлемента, к полной мощности $P_{\text{изл}}$ лучистого потока, падающего на рабочую поверхность фотоэлемента:

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{изл}}}$$

Световые характеристики фотоэлемента:
1 – при коротком замыкании; 2 – при холостом ходе.

В настоящее время фотоэлементы широко применяются для непосредственного преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию. Такие фотоэлементы называются солнечными преобразователями. Совокупность электрически соединенных солнечных преобразователей образуют солнечную батарею.

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Биполярный фототранзистор.

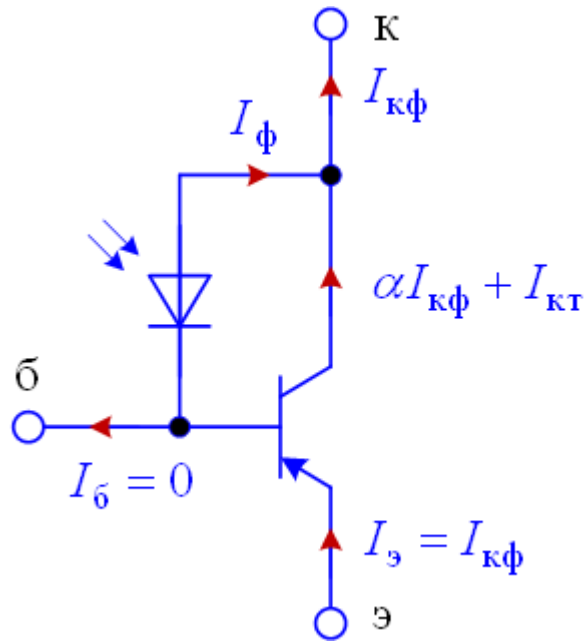


Биполярный $p-n-p$ -фототранзистор содержит эмиттерную область p^+ -типа, область базы n -типа, большая часть которой является пассивной и открытой световому потоку, и широкую коллекторную область p -типа. Корпус фототранзистора содержит прозрачное окно, через которое световой поток падает на пассивную часть базы.

Структура биполярного $p-n-p$ -фототранзистора

*Обычно биполярный фототранзистор применяют при его включении по схеме с общим эмиттером. При этом вывод базы может оставаться неподключенным. Такое включение называется **включением с плавающей базой** и характерно только для фототранзисторов.*

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Биполярный фототранзистор.



Ток коллектора фототранзистора при освещении и включении с плавающей базой определяется выражением

$$I_{кф} = (\beta + 1)I_{\phi} + (\beta + 1)I_{кт}.$$

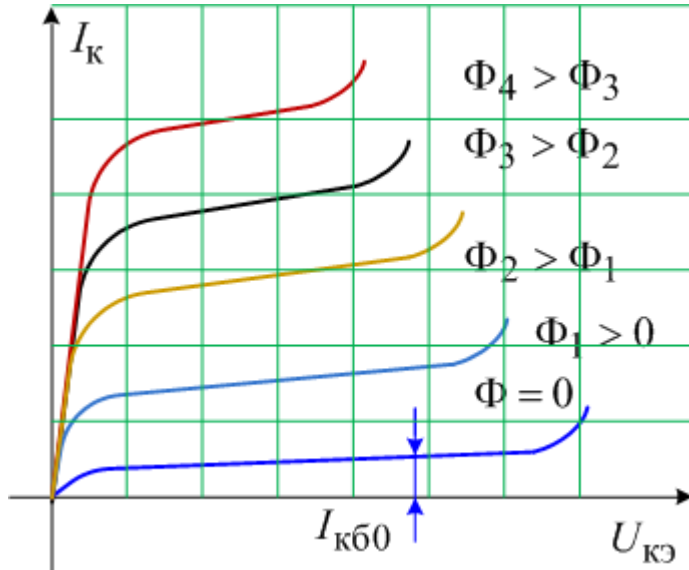
Фототранзистор можно представить в виде фотодиода и усилительного транзистора, который увеличивает чувствительность эквивалентного фотодиода в $(\beta + 1)$ раз.

Эквивалентная схема биполярного р-п-р-фототранзистора

Биполярный фототранзистор обладает наибольшей чувствительностью к оптическому излучению при включении по схеме с общим эмиттером с плавающей базой. Поэтому у первых конструкций фототранзисторов вывод базы вообще отсутствовал. Однако наличие вывода базы позволяет использовать не только оптическое, но и электрическое управление фототранзистором. Вывод базы применяется для подачи смещения, задающего положение рабочей точки, и обеспечения температурной стабилизации.

Биполярный фототранзистор. Выходные вольт-амперные характеристики.

Выходные вольт-амперные характеристики фототранзистора аналогичны выходным характеристикам обычного биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, но параметром семейства служит не ток базы, а световой поток.



$$I_K = f_{\text{ВЫХ}}(U_{КЭ}) \Big|_{\Phi = \text{const}}$$

Крутой начальный участок характеристик соответствует режиму насыщения.

С ростом величины светового потока происходит увеличение генерируемого фототока и характеристики смещаются вверх.

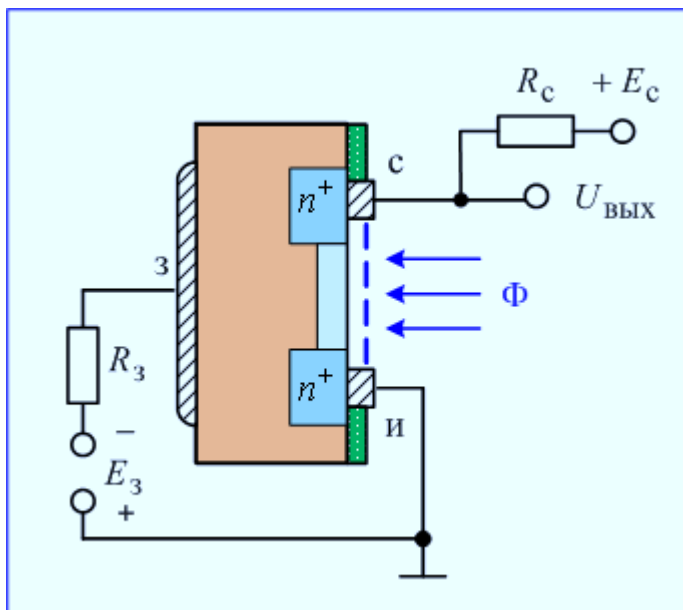
Семейство вольт-амперных характеристик биполярного фототранзистора

Биполярный фототранзистор. Основные параметры.

Основные параметры фототранзисторов.

| | |
|----|--|
| 1. | <p>Коэффициент усиления по фототоку $k_{I_{\Phi}} = \frac{I_{\text{кф}}}{I_{\Phi}} = (\beta + 1)$</p> |
| | <p>Отношение фототока коллектора фототранзистора с плавающей базой фототоку освещаемого p-n-перехода, измеренному в диодном режиме.</p> |
| 2. | <p>Световая характеристика биполярного фототранзистора $I_{\text{кф}} = f(\Phi)$</p> |
| | <p>Зависимость фототока коллектора от светового потока.</p> |
| 3. | <p>Интегральная токовая чувствительность фототранзистора $K_{\Phi} = \frac{I_{\text{кф}}}{\Phi}$</p> |
| | <p>Отношение изменения тока коллектора фототранзистора к изменению потока излучения при холостом ходе на входе и коротком замыкании на выходе по переменному току.</p> |
| 4. | <p>Спектральная характеристика фототранзистора – зависимость фототока от длины волны падающего света.</p> |

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Полевой фототранзистор.



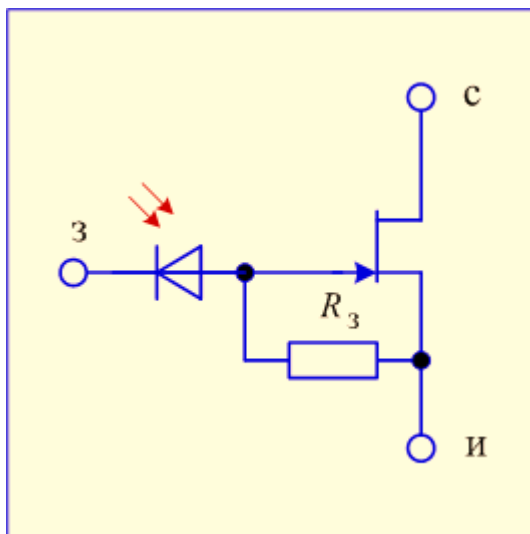
Световой поток генерирует неравновесные носители в области затвора и переходах затвор-канал, затвор-исток и затвор-сток. Электрическое поле управляющего перехода разделяет неравновесные носители заряда и в цепи затвора появляется фототок

$$I_{\phi} = I_{\phi 3К} + I_{\phi 3И} + I_{\phi 3С}$$

Структура полевого фототранзистора с управляющим переходом.

Фототок создает на резисторе R_3 в цепи затвора падение напряжения $\Delta U_{3И} = R_3 I_{\phi}$, которое вызывает увеличение тока стока $\Delta I_C = S R_3 I_{\phi}$.

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Полевой фототранзистор.



$$\Delta I_C = S R_3 I_\Phi.$$

Таким образом, полевой фототранзистор эквивалентен фотодиоду затвор-канал и усилительному полевому транзистору с управляющим переходом.

Эквивалентная схема полевого фототранзистора с управляющим переходом.

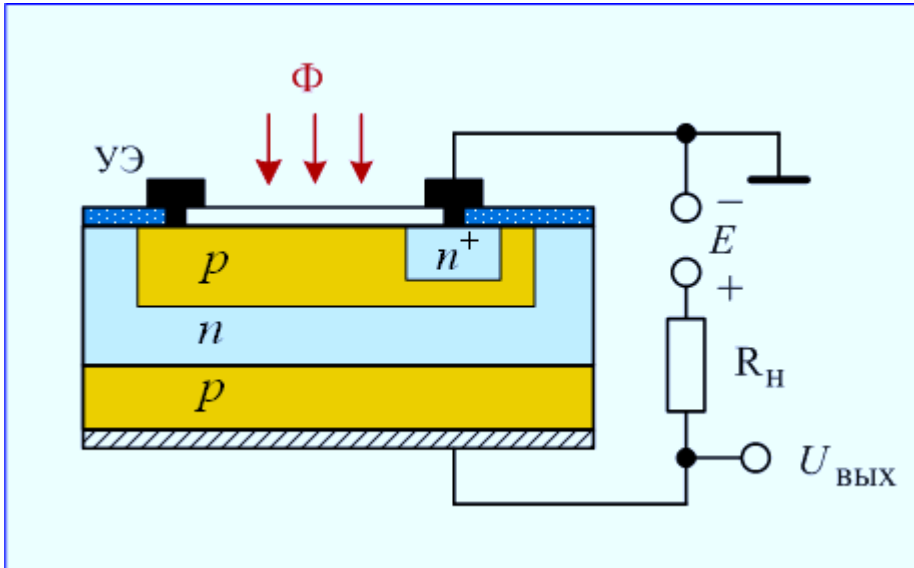


Фототранзистор
L14G3

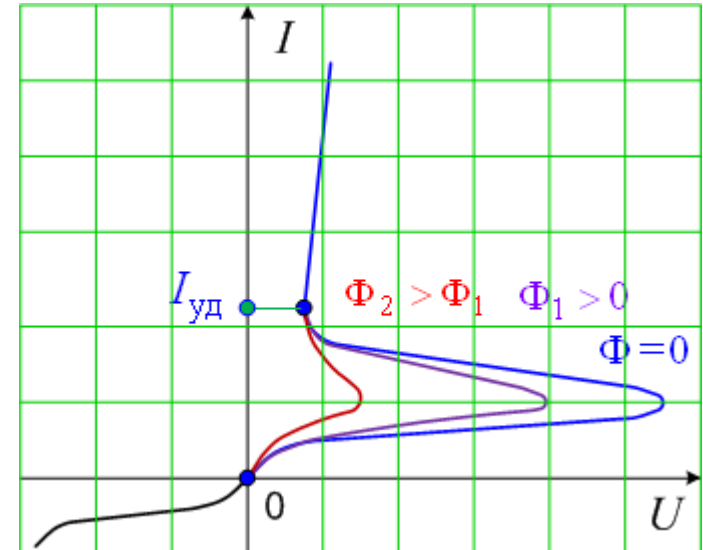
Примечание. Характеристики и параметры полевого фототранзистора аналогичны по смыслу характеристикам и параметрам биполярных фототранзисторов.

Фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Фототиристор.

Фототиристором называют тиристор, напряжение включения которого уменьшается с увеличением освещенности.



Структура фототиристора.



Семейство вольт-амперных характеристик фототиристора.

Основными параметрами фототиристора являются пороговый поток $\Phi_{\text{пор}}$, обеспечивающий гарантированное включение фототиристора; минимальная длительность импульса светового потока, обеспечивающая включение при заданном световом потоке; время включения и выключения; рабочая длина волны.

Оптоэлектронные пары.

Оптоэлектронная пара (оптопара) – это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция (гальваническая развязка).

Состав оптоэлектронной пары

Излучающие элементы

Инфракрасный излучающий диод

Светодиод

Электролюминесцентный
порошковый излучатель

Пленочный излучатель

Фотоприемные элементы

Фоторезистор

Фотодиод

Фототранзистор биполярный

Фототиристор

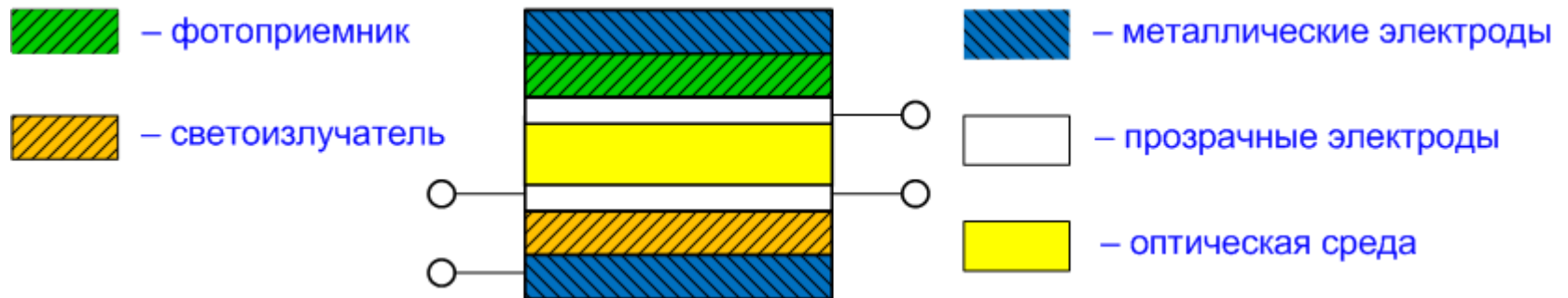
Однопереходный фототранзистор

Оптоэлектронные пары (оптопары).

Принцип действия оптопар основан на двойном преобразовании энергии. В излучателе электрический сигнал вызывает изменением светового потока, который излучается на рабочей длине волны в направлении фотоприемника, проходит через оптическую среду с малым затуханием и в фотоприемнике преобразуется в электрический сигнал, вызывая в зависимости от вида оптопары изменение тока, напряжения или сопротивления.

Оптическая связь между излучателем и фотоприемником осуществляется за счет электрически нейтральных фотонов и только в одном направлении – к фотоприемнику, где энергия излучения практически полностью поглощается.

Гальваническая развязка входной и выходной цепей оптопары достигается за счет оптически прозрачной диэлектрической среды между излучателем и фотоприемником.

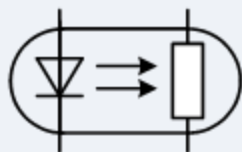


Обобщенная структура оптоэлектронной пары.

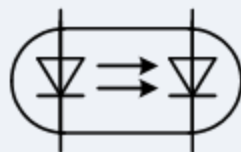
Оптоэлектронные пары (оптопары).

Классификация оптоэлектронных пар в зависимости от вида фотоприемника

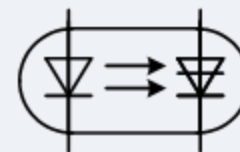
*Резисторная
оптоэлектронная пара*



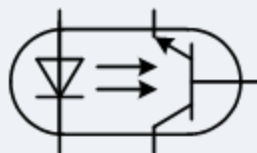
*Диодная
оптоэлектронная пара*



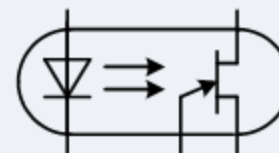
*Тиристорная
оптоэлектронная пара*



*Транзисторная оптоэлектронная пара
с биполярным фототранзистором*



*Транзисторная оптоэлектронная пара
с однопереходным фототранзистором*



Оптоэлектронные пары. Основные параметры.



Оптоэлектронные пары. Основные параметры.

Выходные электрические параметры оптоэлектронных пар – характеризуют электрический режим фотоприемника.

Максимально допустимый выходной ток через фотоприемник во включенном состоянии оптопары

Максимально допустимое выходное обратное напряжение

Выходная емкость

Параметры передачи – характеризуют взаимосвязь входных и выходных сигналов на низких и высоких частотах, а также частотные и импульсные свойства оптопар.

Коэффициент передачи оптопары

Граничная частота входных сигналов

Максимальная скорость передачи сигналов

Время нарастания выходного импульса

Время спада выходного импульса

Время задержки фронта импульса

Время включения

Время выключения

Оптоэлектронные пары. Основные параметры.

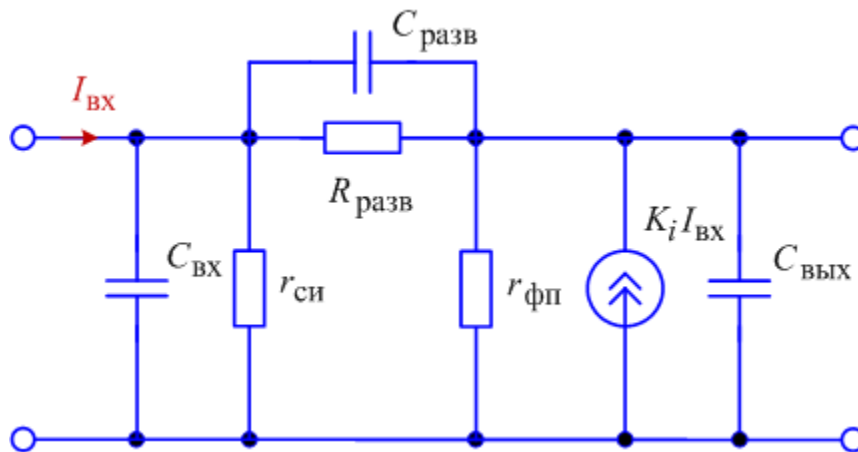
Параметры гальванической развязки

Максимально допустимое напряжение между входом и выходом – характеризует электрическую прочность оптопары и обычно превышает 1 кВ

Максимально допустимая скорость изменения напряжения между входом и выходом – определяется из условия, что выходной сигнал помехи, проникающий через проходную емкость, не превышает заданного уровня

Сопротивление гальванической развязки

Проходная емкость



При анализе аналоговых электронных схем оптопару можно представить линейной малосигнальной эквивалентной схемой

Вопросы для самоконтроля.

1. *Оптическая связь между излучателем и фотоприемником в оптоэлектронной паре осуществляется за счет:*

а) оптически прозрачной диэлектрической среды между излучателем и фотоприемником; б) электрически нейтральных фотонов.

2. *Фоторезистивный эффект – это:*

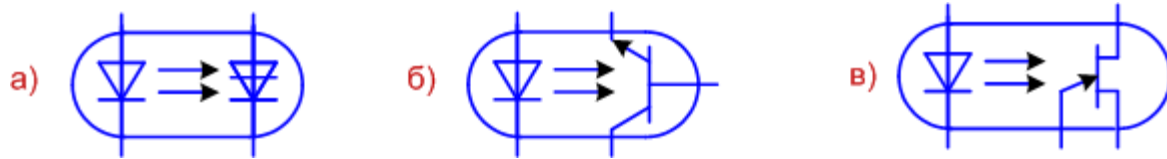
а) явление возникновения фото-ЭДС; б) режим работы фотодиода без внешнего источника напряжения; в) изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное действием оптического излучения.

3. *Фототиристор – это:*

а) фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения на основе транзисторной структуры, способный к внутреннему усилению фототока;
б) фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения, действие которого обусловлено фотогальваническим эффектом в обратном смещенном выпрямляющем переходе;
в) фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения, напряжение включения которого уменьшается с увеличением освещенности;
г) фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения, действие которого основано на фоторезистивном эффекте.

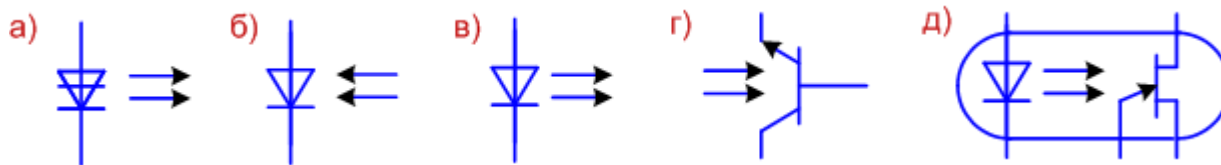
Вопросы для самоконтроля.

4. Представлены условные графические обозначения оптоэлектронных пар:



Укажите условное графическое обозначение транзисторной оптоэлектронной пары с однопереходным фототранзистором.

5. Представлены условные графические обозначения оптоэлектронных полупроводниковых приборов:



Укажите условное графическое обозначение фотодиода.