

а дифференциальное сопротивление — по выходным характеристикам в соответствии с выражением

$$r_i = \left. \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta I_{\text{с}}} \right|_{U_{\text{зи}} = \text{const}} = \frac{U_{\text{си}}' - U_{\text{си}}''}{I_{\text{с}}(E) - I_{\text{с}}(D)}$$

Статический коэффициент усиления $\mu = dU_{\text{си}}/dU_{\text{зи}}$ при $I_{\text{с}} = \text{const}$ обычно рассчитывается по формуле $\mu = S r_i$.

Условные графические обозначения полевых транзисторов показаны на рис. 2.17.

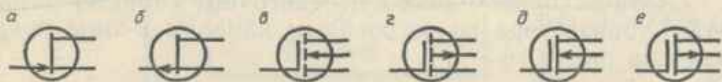


Рис. 2.17. Условные обозначения полевых транзисторов:

а, б — с р-п-затвором и каналами п- и р-типов соответственно; в, г — с изолированным затвором и индуцированными каналами п- и р-типов; д, е — с изолированным затвором и встроенными каналами п- и р-типов

Полевые транзисторы используются в усилителях с большим входным сопротивлением, ключевых и логических устройствах, а также в управляемых аттенуаторах в качестве элемента, сопротивление которого изменяется под действием управляющего напряжения.

2.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Оптоэлектронным называют полупроводниковый прибор, излучающий или преобразующий электромагнитное излучение или чувствительный к этому излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, либо использующий подобное излучение для внутреннего взаимодействия его элементов.

По принципу действия и выходному эффекту оптоэлектронные полупроводниковые приборы подразделяются на излучающие, приемники излучения и оптопары, или оптроны.

Излучающие полупроводниковые приборы. Излучающим называют полупроводниковый прибор, предназначенный для непосредственного преобразования электрической (или световой) энергии в энергию светового излучения. Излучающие полупроводниковые приборы подразделяются на четыре группы: светоизлучающие диоды, лазеры, электролюминесцентные порошковые и пленочные излучатели.

Наиболее характерным представителем излучающих полупроводниковых приборов является светоизлучающий диод (СИД), который преобразует электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения. Если ЭДП светоизлучающего диода включить в прямом направлении, то в результате инъекции подвижных носителей заряда начнется их интенсивная рекомбинация в прилегающих к ЭДП областях полупроводника и в самом ЭДП. При рекомбинации зарядов происходит переход электронов с более высоких энергетических уровней, лежащих в зоне проводимости, на более низкие, расположенные в валентной зоне. Этот переход сопровождается выделением части энергии в виде тепла (фононная рекомбинация) или электромагнитного излучения (фотонная рекомбинация). В СИД используется фотонная рекомбинация, которая является преобладающей в полупроводниках из арсенида (GaAs) и фосфида (GaP) галлия, карбида кремния (SiC) и сопровождается излучением видимого света в диапазоне от красного до голубого.

Если в одном кристалле полупроводника создать несколько излучающих ЭДП, то получится матричный СИД, используемый в цифровых и буквенных индикаторах. При соответствующем включении отдельных групп ЭДП матричного СИД высвечивается цифра или буква.

Полупроводниковые приемники излучения. Принцип действия полупроводниковых приемников электромагнитного излучения основан на использовании фотоэлектрических явлений, или фотоэффектов. Различают два вида фотоэффекта — внутренний и внешний.

Под внутренним фотоэффектом понимают переход электронов вещества на более высокий энергетический уровень под действием излучения. Это приводит к изменению концентрации подвижных носителей заряда и, следовательно, к изменению электрических свойств полупроводника.

Внешний фотоэффект представляет собой фотоэлектронную эмиссию, которая заключается в том, что испускание электронов тем или иным веществом происходит при воздействии на это вещество ультрафиолетового, видимого или инфракрасного излучения.

Полупроводниковыми приемниками излучения являются фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры, в которых используется внутренний фотоэффект.

Фоторезистор представляет собой фоточувствительную полупроводниковую пластинку или пленку (обычно из сульфида или селенида кадмия, а также из сульфида свинца) нанесенную на диэлектрическую подложку. От концов пластинки делают выводы и помещают ее в пластмассовый корпус с окошком. Если между выводами фоточувствительной пластинки включить источник ЭДС, в цепи потечет небольшой ток, называемый темновым током. При освещении пластинки через окошко в корпусе сила тока увеличивается, что эквивалентно уменьшению сопротивления фоторезистора.

Фотодиод — это фотогальванический приемник излучения без внутреннего усиления, фоточувствительный элемент которого имеет структуру полупроводникового диода. В основу работы фотодиода положена зависимость обратного тока от освещенности.

Вольт-амперная характеристика неосвещенного фотодиода ($\Phi = 0$) подобна ВАХ обычного полупроводникового диода. При освещении в ЭДП происходит дополнительная генерация пар электрон — дырка. Электрическим полем ЭДП дырки перебрасываются в p -область, а электроны — в n -область, что приводит к увеличению потока неосновных носителей через ЭДП. Если к диоду подключен внешний источник напряжения в обратном направлении, то это явление будет сопровождаться увеличением обратного тока. Такой режим работы фотодиода называют фотопреобразовательным.

Переход образовавшихся в результате освещения фотодиода дырок в p -область, а электронов в n -область вызывает увеличение потенциала p -области и снижение потенциала n -области. В результате между p - и n -областями возникает разность потенциалов, или фотоЭДС. Предельно возможное значение фотоЭДС равно контактной разности потенциалов: до 0,6 В у селеновых и кремниевых фотодиодов и до 0,87 В у фотодиодов из арсенида галлия.

Следовательно, фотодиоды можно использовать в качестве источников ЭДС.

Фототранзистор — это фотогальванический приемник излучения, фоточувствительный элемент которого содержит структуру транзистора, обеспечивающую усиление.

Конструктивно фототранзистор выполняется таким образом, чтобы световой поток воздействовал на базовую область. Обычно фототранзистор включается по

схеме ОЭ, и через его коллекторный переход при отсутствии освещения протекает темновой ток $I_{КЭ0} = (1 + \frac{h_{21E}}{\beta}) I_{КБ0}$. При освещении базы в ней происходит генерация дополнительных пар электрон — дырка. Дырки, являющиеся в *n*-базе неосновными носителями заряда, диффундируют к коллекторному переходу и втягиваются его полем в коллектор, образуя первую составляющую коллекторного фототока $I_{\phi 1}$. Для электронов электрическое поле коллекторного перехода представляет потенциальный барьер, поэтому если вывод базы оставить неподключенным, то неравновесные электроны останутся в базе, уменьшая потенциальный барьер эмиттерного перехода. Это вызовет инжекцию дырок из *p*-эмиттера в базу, которые диффундируют к коллекторному переходу и образуют вторую составляющую коллекторного фототока $I_{\phi 2}$.

Если базовый вывод подключить к источнику напряжения, как это делается у обычного биполярного транзистора, то можно получить не только оптическое, но и электрическое управление коллекторным током фототранзистора.

Фототиристором называют фотогальванический приемник излучения, фоточувствительный элемент которого имеет структуру тиристора. Работа фототиристора подобна работе тринистора. Различие заключается в том, что напряжение включения, при котором происходит переход фототиристора из закрытого состояния в открытое, определяется не управляющим током, а освещенностью одной из баз.

Фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры широко применяются в устройствах автоматики и измерительной техники, системах телеуправления и сигнализации, в вычислительной технике, фотометрии, импульсных устройствах, оптопарах и др.

Оптопары. Оптопарой, или оптроном, называют оптоэлектронный полупроводниковый прибор, содержащий излучающий и фотоприемный элементы, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция (рис. 2. 18).

В источнике светового излучения ИС энергия электрического сигнала преобразуется в световое излучение. Световое излучение через оптический канал ОК поступает на фотоприемник ФП, в котором преобразуется в электрическую энергию.

Излучателями в оптопарах обычно служат СИД.



Рис. 2.18. Структурная схема оптопары

В оптических каналах используются полимерные оптические клеи и лаки, незатвердевающие вазелиноподобные и каучукоподобные оптические среды, а также волоконно-оптические световоды. В качестве фотоприемников в оптопарах применяются фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. В зависимости от типа фотоприемника различают резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные оптопары.

Оптоэлектронные интегральные микросхемы состоят из одной или нескольких оптопар и электрически соединенных с ними одного или нескольких согласующих или усилительных устройств.

Проблемы комплексной микроминиатюризации РЭА ускоряют развитие оптоэлектроники. В ряде случаев оптопара успешно используется вместо импульсных трансформаторов, реле, переключателей, переменных резисторов и потенциометров, а также других радиокомпонентов, имеющих механически перемещающиеся детали и плохую физическую и конструктивно-технологическую совместимость с полупроводниковыми и микроэлектронными приборами.

2.6. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ АКТИВНЫЕ И ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Интегральными микросхемами (ИМС) называют функциональные узлы РЭА, изготовленные методом интегральной технологии, при которой совмещаются процессы изготовления входящих в узел элементов и процессы объединения их в функциональную конструктивно завершенную структуру.

По технологии изготовления интегральные микросхемы делятся на полупроводниковые, пленочные и гибридные.

Элементы полупроводниковых ИМС. Полупроводниковыми называют такие интегральные микросхемы, в которых все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме полупроводника.

Активные и пассивные элементы полупроводниковых ИМС могут быть реализованы на основе биполярной транзисторной структуры (рис. 2.19, а). Выводы эмит-