

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Конспект лекций

ПЕНЗА 2004

УДК 621.38

Предложен конспект лекций, рассчитанный как на самостоятельное освоение основных теоретических положений дисциплины «Электротехника и электроника», так и в качестве дополнительного материала при проведении занятий по электротехнике и электронике.

Конспект лекций подготовлен на кафедре «Вычислительная техника» и предназначен для студентов специальности 22.01.00 (Вычислительные машины, комплексы, системы и сети).

Составитель: **Л.А.Брякин**

Под редакцией **Н.П.Вашкевича**

Рецензент **М.М.Бутаев**, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, учёный секретарь
НТС ФГУП НИИ «Рубин»

3. Полупроводниковые приборы

3.1 Полупроводники

3.1.1 Общие сведения

Полупроводники – материалы, обладающие средней проводимостью между хорошими проводниками и хорошими диэлектриками. Особенностью полупроводников является уменьшение сопротивления с ростом температуры. В качестве полупроводников наиболее часто используют германий (Ge), кремний (Si), арсенид галлия, селен, различные оксиды, нитриды и карбиды.

Поведение атома определяется валентными электронами. Любое свойство можно представить соответствующими энергетическими диаграммами, на которых изображаются валентная зона, зона проводимости и запрещенная зона (рисунок 3.1).

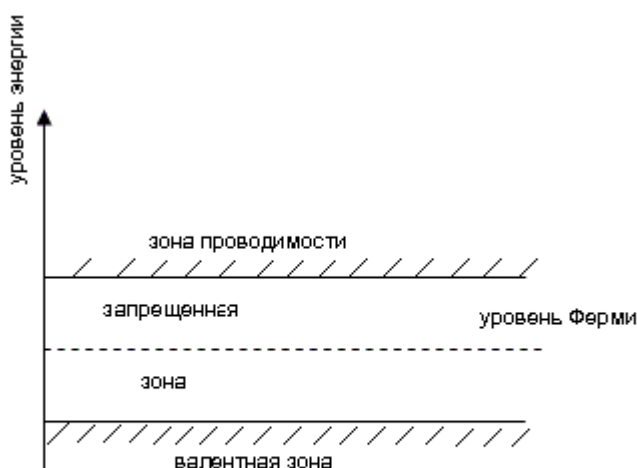


Рисунок 3.1

Валентная зона представляет совокупность разрешённых энергий для валентных электронов. Зона проводимости – совокупность разрешенных энергий для свободных электронов. Именно свободные электроны способны создать ток под действием приложенного внешнего напряжения или под действием разности концентраций (градиента) носителей заряда. Запрещенная зона – совокупность энергий, которые запрещены для электронов данного вещества. В запрещённой зоне нет энергетических уровней (если они не созданы специ-

ально, например, атомами примесей), на которых могли бы находиться электроны. Ширина запрещённой зоны у используемых в настоящее время в качестве полупроводников материалов лежит в диапазоне от 0,1эВ до 3эВ (электронвольт).

В запрещенной зоне можно определить для полупроводников уровень Ферми. Уровень Ферми это энергетический уровень, вероятность появления электрона на котором равна 1/2. Для полупроводника положение уровня Ферми определяется концентрацией носителей заряда. Если использовать вероятностную функцию Ферми, то можно заметить, что при температуре близкой к нулю полупроводник превращается в хороший диэлектрик. С ростом температуры увеличивается вероятность попадания электронов в зону проводимости и появляется электропроводность у полупроводников.

Известно, что в полупроводниках Ge, Si имеется по четыре валентных электрона, которые при сближении атомов в составе вещества образуют новые, ковалентные связи. Это приводит к тому, что совокупная энергия системы оказывается минимальной и система оказывается устойчивой.

При разрушении ковалентной связи электрон оказывается в зоне проводимости и образует свободный носитель заряда. Нарушенная ковалентная связь называется «дыркой», она ведет себя подобно положительному заряду. В результате разрушения ковалентной связи генерируется пара электрон-дырка, процесс зарождения свободных носителей заряда называется генерацией. Процесс генерации в полупроводниках может происходить под действием температуры, света, электрического поля (ударной ионизации) и под действием какого-либо излучения.

Обратный процесс называется рекомбинацией, когда свободный электрон восстанавливает ковалентную связь. Чтобы повысить быстродействие полупроводниковых приборов для обеспечения меньшего времени рекомбинации используют специальные центры рекомбинации – примеси, разрешённые энергетические уровни которых располагаются в запрещённой зоне исходного полупроводника.

Собственный полупроводник – абсолютно чистый и однородный полупроводник, у которого количество свободных электронов равно количеству дырок. Энергия Ферми в собственном полупроводнике располагается посередине запрещенной зоны. Если в полупроводниковом приборе используется собственный полупроводник, то это подчеркивается в описании этого прибора символом «i». Концентрация свободных электронов в собственном полупроводнике обозначается символом n_i , а свободных дырок – символом p_i .

3.1.2 Примесный полупроводник

Полупроводник n-типа или электронный полупроводник образуется из собственного полупроводника путём добавления пятивалентных атомов мышьяка, сурьмы, фосфора. В этом случае пятый валентный электрон не участвует в образовании ковалентной связи, уровень энергии этого электрона оказывается близок к энергии дна зоны проводимости. То есть, чтобы этот электрон освободился достаточно небольшого приращения энергии. Значительное количество атомов в примеси приводит к повышению энергии Ферми в сторону зоны проводимости.

Концентрация свободных электронов в электронном полупроводнике обозначается символом n_n . Одновременно со свободными электронами в n-полупроводнике имеются свободные дырки, концентрация которых обозначается символом p_n . Дырки в электронном полупроводнике являются неосновными носителями заряда.

Полупроводник p-типа или дырочный полупроводник, обладающий дырочной проводимостью, образуется добавлением трехвалентных атомов алюминия, бора, индия или галлия. При этом при образовании ковалентных связей одна связь окажется недостроенной и какой-либо электрон, разрушая существующую ковалентную связь, достраивает данную связь, образуя неподвижный ион. Разрушенная ковалентная связь соответствует дырке. При этом уровень энергии Ферми смещается вниз относительно середины запрещенной зоны.

Концентрация свободных дырок в дырочном полупроводнике обозначается символом p_p . Одновременно со свободными дырками в р-полупроводнике имеются свободные электроны, концентрация которых обозначается символом n_p . Электроны в дырочном полупроводнике являются неосновными носителями заряда.

Для любого полупроводника справедливо равенство:

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i p_i.$$

3.1.3 Токи в полупроводниках

Различают четыре разновидности токов в зависимости от типа свободных носителей заряда и от причины их движения:

- дырочный
- электронный
- диффузионный
- дрейфовый.

Дырочный ток – направленное движение дырок под действием какой-либо причины, а электронный ток – направленное движение электронов. Причиной появления тока может быть внешнее электрическое поле, приложенное к полупроводнику (дрейфовый ток) или различие в концентрациях носителей заряда (диффузионный ток).

Сочетая причину тока и тип свободных носителей заряда, образующих ток в данном случае, можно выделить следующие четыре разновидности токов в полупроводниках:

- дрейфовый электронный ток
- дрейфовый дырочный ток
- диффузионный электронный ток
- диффузионный дырочный ток.

Величина электронного и дырочного токов зависит от подвижности электронов или дырок. Если напряженность внешнего электрического поля

повышается, то пропорционально будет расти скорость носителей зарядов и ток. Но при достижении определенной критической скорости дальнейший рост скорости носителей заряда прекращается.

3.2 Полупроводниковый диод

3.2.1 Контактные явления

Рассмотрим поведение примесных полупроводников с разной проводимостью при создании металлургического контакта между ними.

В исходном состоянии в полупроводнике р-типа образуются дырки, как положительные свободные заряды, и отрицательные неподвижные ионы. Аналогичная ситуация, но с другими знаками, наблюдается в полупроводнике n-типа. При металлургическом контакте электроны устремляются в полупроводник р-типа, компенсируя свободные дырки вблизи зоны контакта. В то же время дырки из дырочного материала устремляются в электронный полупроводник, связывая свободные электроны вблизи контакта материалов. Через незначительное время процесс обмена носителями прекратится, поскольку в полупроводнике р-типа оголятся отрицательные ионы, что препятствует дальнейшему переходу электронов из n-полупроводника, а в полупроводнике n-типа оголятся положительные ионы, мешая движению дырок через р-n-переход. Образуется р-n-переход (рисунок 3.2а), ширина которого w зависит от концентрации примесей и от разности энергий Ферми в исходных материалах. Р-n-переход – это область объёмных неподвижных зарядов, в которых практически отсутствуют свободные носители зарядов. В результате образования р-n-перехода энергия Ферми оказывается одинаковой во всем материале. Обычно процесс образования перехода демонстрируется энергетическими диаграммами (рисунок 3.2б).

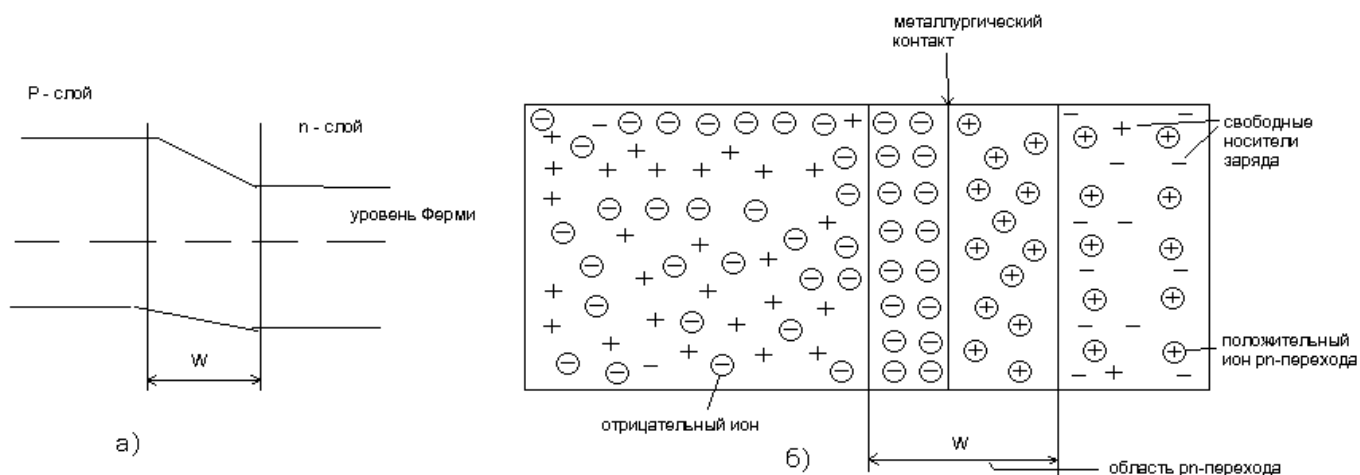


Рисунок 3.2

Известно, что р-п-переход обладает вентильными свойствами, пропуская ток в одном направлении и не пропуская в другом, то есть он обладает свойствами диода. Подобные структуры могут быть созданы другим способом: металлургический контакт металла и полупроводника позволяет создать переход Шотки. Особенностью этого перехода и диодов, построенных на его основе, является высокое быстродействие. Диод Шотки обладает меньшим прямым падением напряжением, чем р-п-переход на основе кремния. Если использовать два полупроводника с одинаковой проводимостью, но с разной шириной запрещенной зоны, то при этом образуется гетеропереход, который обладает вентильными свойствами и позволяет при использовании современных материалов повысить быстродействие биполярных структур.

3.2.2 Р-п-переход и его свойства

При анализе поведения р-п-перехода обычно рассматривают его работу при прямом смещении перехода, когда токи через него максимальны, и при обратном смещении, когда токи через него минимальны.

Модель перехода при прямом смещении предложена на рисунке 3.3.

Под действием приложенного внешнего напряжения дырки из тела полупроводника дырочной проводимости (р типа) устремляются в область объемного отрицательного заряда, нарушая баланс системы. В то же время свободные электроны электронного полупроводника (п типа) устремляются к области

объёмного положительного заряда р-n-перехода, нейтрализуя в определённой степени этот заряд.

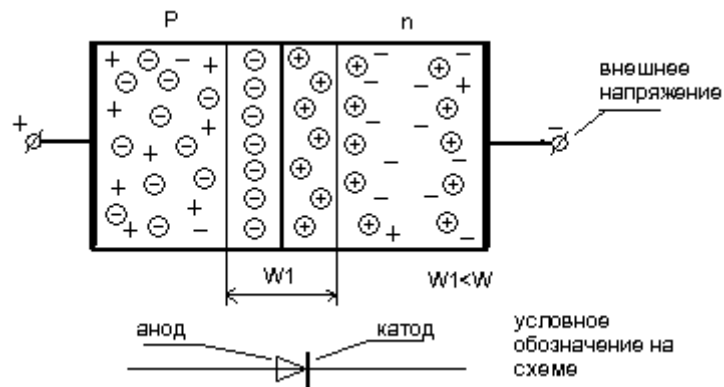


Рисунок 3.3

Уменьшение объёмного заряда оказывается эквивалентным уменьшению ширины р-n-перехода. Поскольку величина заряда в области р-n-перехода уменьшилась, через переход потекут электронные и дырочные токи. Рост внешнего тока при повышении приложенного напряжения происходит по экспоненте и очень быстро, т.е. чтобы при прямом смещении р-n-переход не разрушился, необходимо предусмотреть какие-либо меры ограничения тока, если внешнее напряжение больше одного вольта.

Модель р-n-перехода при обратном смещении предложена на рисунке 3.4.

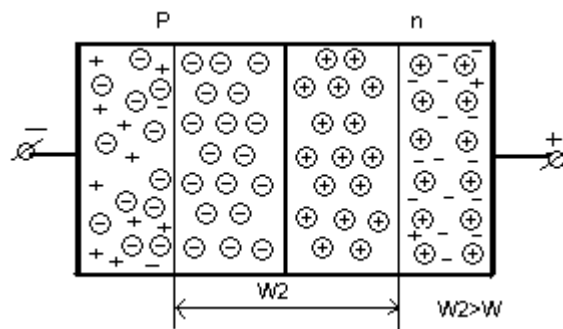


Рисунок 3.4

При подаче обратного напряжения произойдет расширение области р-n-перехода, т.е. объем неподвижных зарядов в р-n-переходе увеличится. При обратном смещении через р-n-переход могут течь ток термогенерации ($I_{ТГ}$) и тепловой ток (I_0). Ток термогенерации объясняется процессом генерации пар электрон – дырка в области р-n-перехода. Именно эта составляющая тока объясняет рост внешнего тока при увеличении обратного напряжения, поскольку с ростом обратного напряжения возрастает ширина области р-n-перехода. Тепловой ток объясняется тем, что под действием тепла свободные носители зарядов, обладая запасом энергии, могут случайно попасть в р-n-переход, что и создает тепловой ток. Поскольку площадь сечения р-n-перехода при изменении внешнего напряжения не меняется, то тепловой ток не зависит от напряжения. Описанное поведение р-n-перехода от внешнего напряжения достаточно хорошо описывается формулой:

$$i_D = I_0 (e^{u/\varphi_t} - 1),$$

где u -приложенное к диоду напряжение с учётом знака, φ_t – тепловой потенциал, примерно равный при комнатной температуре 25мВ. При прямом смещении диода знак напряжения считается положительным.

Зависимость позволяет построить вольтамперную характеристику диода, вид которой показан на рисунке 3.5.

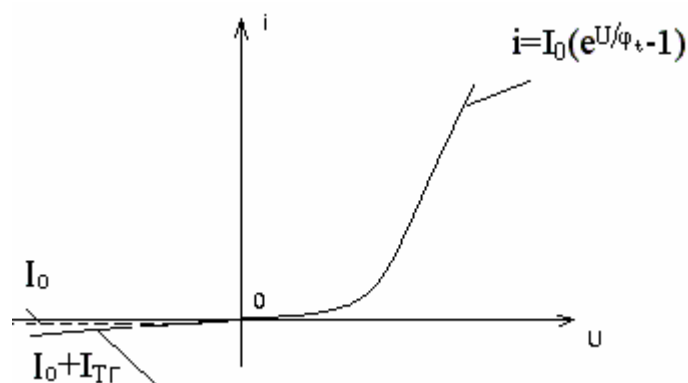


Рисунок 3.5

Для р-n-перехода определяется понятие пробоя. Тепловой пробой – это разрушение р-n-перехода из-за несоответствия количества поступающего тепла и рассеиваемого.

Туннельный пробой наблюдается в том случае, если ширина р-n-перехода очень мала и энергия электронов в валентной зоне полупроводника р-типа равна энергии зоны проводника n-типа. При приложении небольшого прямого напряжения наблюдается пробой. Это явление используется в специальных туннельных диодах.

Лавинообразный пробой наблюдается при обратном смещении. При повышении обратного напряжения все внешнее напряжение оказывается приложенным к области р-n-перехода. Если приложенное напряжение таково, что передает значительную энергию электронам, термогенерируемым в области р-n-перехода, то свободные электроны приобретают достаточную энергию, чтобы при столкновении разрушить ковалентную связь, тем самым увеличить число электронов в р-n переходе. Произойдет лавинообразное увеличение числа электронов, лавинообразно возрастёт внешний ток. Если внешний ток не ограничен, то его рост будет продолжаться до теплового пробоя диода. Если же внешний ток ограничить, то напряжение на р-n-переходе зафиксируется на определенном уровне, который почти не зависит от величины тока, т.е. диод будет стабилизировать напряжение.

3.2.3 Особенности расчёта схем с диодами и упрощённые модели диодов

Поскольку вольтамперная характеристика не линейна, возникает проблема расчёта электрических цепей, в состав которых входит диод. Проблема может быть решена, по крайней мере, тремя способами:

1. Применением графического метода расчета. При этом необходимо использовать график зависимости тока через диод от прямого падения напряжения на диоде. В расчетах будем пренебрегать обратными токами р-

n переходов. Пусть необходимо определить ток в цепи, предложенной на рисунке 3.6а.

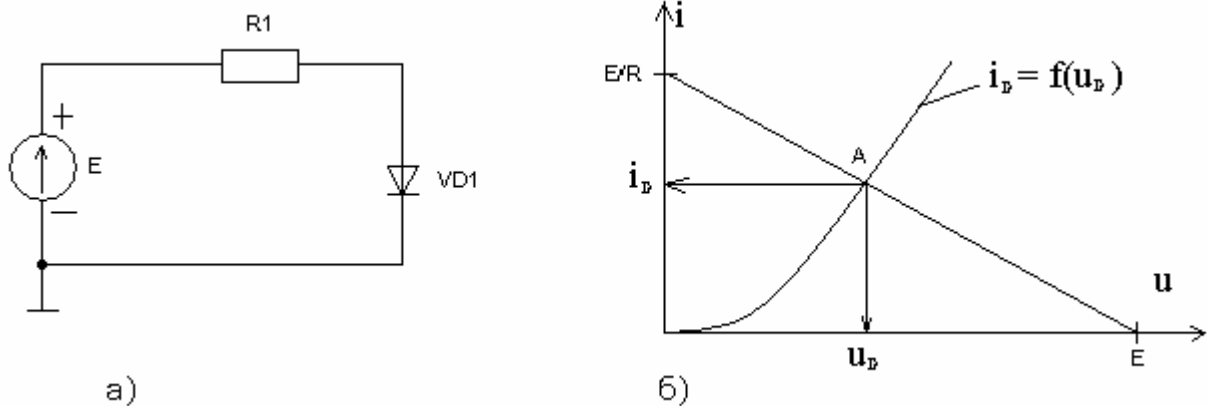


Рисунок 3.6

Для предложенной схемы справедливо выражение:

$$E = U_R + U_D = I \cdot R + U_D;$$

Из этого выражения выразим напряжение на диоде и значение тока:

$$U_D = E - U_R = E - I \cdot R;$$

$$I = \frac{E - U_D}{R}$$

Можно заметить, что первое равенство справедливо в точке пересечения двух линий: $U_D = f_1(I_D)$ и $E - I \cdot R = f_2(I)$. Первая функция определяется вольтамперной характеристикой диода, а вторая функция может быть представлена прямой линией, соединяющей точку E на оси напряжения с точкой E/R1 на оси тока (смотри рисунок 3.6б). Единственная точка пересечения является решением задачи и определяет значение установившегося тока в цепи I_D и значение падения напряжения на диоде при этом токе U_D .

Хотя теоретически графический метод может дать высокую точность, на практике им пользоваться неудобно и точность вычислений будет невелика, поскольку диоды даже одного типа имеют разные вольтамперные характеристики.

2. Аналитический способ предполагает применение формулы зависимости тока через диод от приложенного напряжения:

$$i_D = I_0 (e^{u/\varphi_t} - 1)$$

Применение аналитической модели диода при оперативных расчётах практически невозможно.

3. Применением при расчёте простейших моделей диодов. В этом случае результат будет тем точнее, чем больше приложенное напряжение питания всей схемы отличается от прямого падения напряжения на диоде.

Обратим внимание на этот метод, который представляет практический интерес.

При необходимости расчета величины тока с достаточно высокой точностью, зная примерное значение прямого тока через диод можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию вольтамперной характеристики диода (рисунок 3.7а).

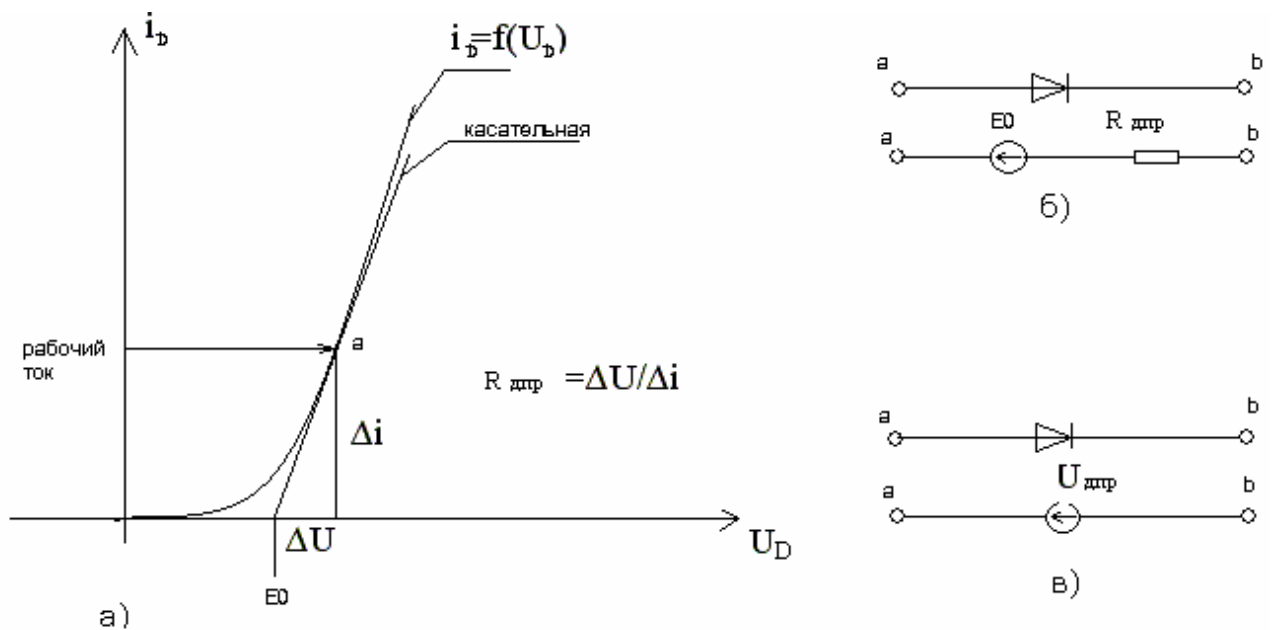


Рисунок 3.7

При этом проводится касательная к точке с рабочим значением тока на вольт-амперной характеристике и прямо смещённый диод замещается источником электродвижущей силы ($-E_0$) и резистором с сопротивлением R_D . Сопротивление этого резистора определяется отношением приращения падения напряжения на диоде в рабочей точке к соответствующему приращению тока через диод. Условное обозначение диода и схема его замещения при прямом токе показаны на рисунке 3.7б. Заметим, что источник э.д.с. направлен против прямого тока диода, то есть противодействует току.

Если напряжение питания схемы E значительно больше прямого падения напряжения на диоде, модель диода может быть упрощена и сведена к источнику э.д.с. с напряжением $U_{д.пр}=(0.6-0.8)V$, если диод кремниевый или с напряжением $U_{д.пр}=(0.2-0.4)V$, если диод германиевый. Условное обозначение диода и его эквивалентная схема при прямом смещении в этом случае показаны на рисунке 3.7в. С температурой прямое падение напряжения $U_{д.пр}$ на p-n переходе уменьшается на 2-3 мВ при повышении температуры на $1^{\circ}C$. Если необходимо учитывать обратный ток через диод, то следует помнить, что с ростом температуры на каждые $10^{\circ}C$ обратный ток германиевого диода удваивается, для кремния удвоение тока наблюдается при росте температуры на каждые $7^{\circ}C$.

3.2.4 Параметры полупроводниковых диодов

Названия многих параметров говорят об их сути и поэтому не поясняются.

- 1) Максимально допустимый прямой ток через диод.
- 2) Максимальный обратный ток через диод (величина максимально допустимого обратного тока при заданной температуре и при заданном обратном напряжении).
- 3) Максимальный импульсный прямой ток (определяется допустимой величиной при заданной длительности импульса тока и заданном интервале между импульсами).
- 4) Максимальное прямое падение на диоде при заданном прямом токе.
- 5) Максимально допустимое обратное напряжение на диоде.

- 6) Паразитная ёмкость диода (определяется при каких – либо конкретных условиях работы диода).
- 7) Время восстановления обратного сопротивления диода определяется как максимальное время, в течение которого может течь ток через обратно смещённый диод, если перед этим моментом через диод тёк прямой ток заданной величины. Значение обратного тока при определении быстродействия диода указывается.

При прямом смещении р-п перехода происходит процесс накопления неосновных носителей заряда в области р-п перехода. При быстром изменении полярности внешнего напряжения неосновные носители, оказавшие в области объемных зарядов р-п переходов, экстрагируются (возвращаются назад) в область своего родного полупроводника. До тех пор, пока неосновные носители присутствуют в области р-п перехода, течёт обратный ток.

3.2.5. Разновидности диодов

1) Выпрямительные диоды.

Предназначены для преобразования переменного напряжения в однополярное пульсирующее. Дальнейшее преобразование полученного пульсирующего сигнала с помощью сглаживающих фильтров позволяет получить практически постоянное напряжение. Особенностью выпрямительных диодов является большой допустимый прямой ток в статике и в импульсном режиме. Обычно выпрямительные диоды используют на частоте сети (напоминаем, что частота сетевого напряжения в нашей стране равна 50Гц). Рассмотрим два варианта схемных решений выпрямителей.

На рисунке 3.8 предложена схема однополупериодного выпрямителя и временные диаграммы сигналов на выходе вторичной обмотки силового трансформатора Т1 и на нагрузке, роль которой в схеме выполняет резистор R, при отсутствии конденсатора сглаживающего фильтра и при наличии конденсатора с большой ёмкостью.

При отсутствии конденсатора на нагрузке R будет наблюдаться пульсирующее напряжение. В тот момент, когда u_2 положительно относительно общего провода, диод оказывается смещён в прямом направлении и передаёт положительную полуволну в нагрузку. Когда напряжение u_2 отрицательно, диод смещён в обратном направлении, ток через него отсутствует и в нагрузке формируется нулевое напряжение.

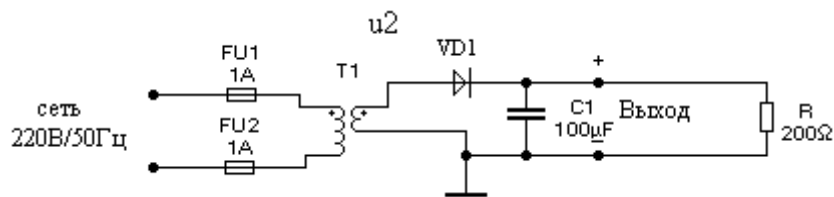


Рисунок 3.8

Следующая положительная полуволна пойдёт в нагрузку. Чтобы преобразовать пульсирующее напряжение в почти постоянное напряжение, используют сглаживающие фильтры. Простейший фильтр – электролитический конденсатор большой ёмкости. При этом амплитуда пульсаций связана с потребляемым током и ёмкостью конденсатора соотношением $C \cdot \Delta U = I_n \cdot T$, где T-интервал времени между двумя положительными полуволнами. При частоте сети равной 50Гц для однополупериодного выпрямителя этот интервал равен 20мс.

Двухполупериодный выпрямитель отличается тем, что обе полуволны вторичного напряжения u_2 проходят в нагрузку с одной и той же полярностью. То есть, временной интервал T будет в двухполупериодном выпрямителе равен 10мс. В простейшем случае этот выпрямитель может быть построен на основе диодного моста по схеме, предложенной на рисунке 3.9а. Используемые в схеме выпрямительные диоды включены по схеме, которая называется диодным мостом. На рисунке 3.9б предложено условное изображение диодного моста и его включение.

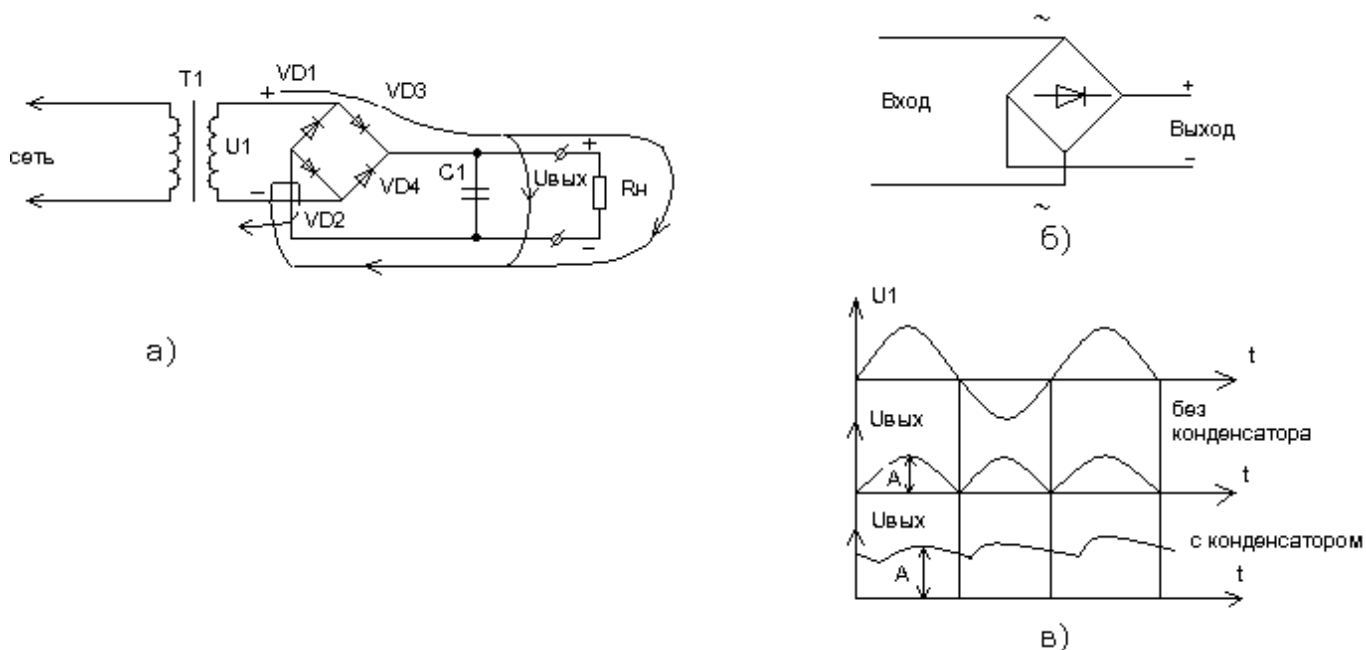


Рисунок 3.9

Формируемый на выходе моста пульсирующий сигнал имеет частоту в 2 раза большую, чем исходный гармонический сигнал. Диоды включены таким образом, чтобы любая полуволна проходила в нагрузку с одной полярностью. При необходимости, задав полярность входного напряжения, легко изобразить путь тока. Двухполупериодный выпрямитель может быть реализован с использованием всего двух диодов при условии использования на выходе силового трансформатора двух одинаковых, включенных последовательно обмоток (рисунок 3.10). Точки рядом с обмотками указывают на условное начало обмотки.

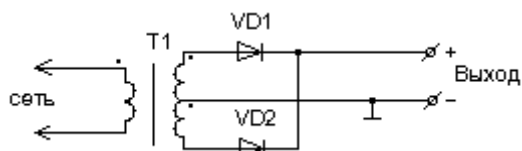


Рисунок 3.10

2) Варикап - это диод, предназначенный для использования в качестве переменной емкости. Он может быть использован при подстройке контура и используется при обратном смещении. Меняя обратное напряжение можно менять ёмкость варикапа.

3) Светоизлучающий диод и полупроводниковый лазер.

Предназначены для преобразования протекающего через них тока в свет. Используются при прямом смещении. Лазер отличается определенными конструктивными особенностями. При управлении светодиодами необходимо ограничивать ток через диод. Ограничение тока осуществляется с помощью резистора. Возможное включение светодиода показано на рисунке 3.11.

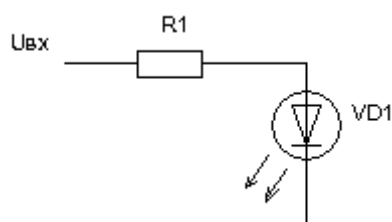


Рисунок 3.11

Сопротивление резистора определяется из выражения:

$$R1 = \frac{U^1 - U_{д.пр}}{I_{д.пр}},$$

где U^1 - максимальное напряжение на входе, равное уровню логической единицы в данном случае, $U_{д.пр}$ - прямое падение напряжения на диоде, $I_{д.пр}$ - прямой ток через диод.

При расчёте резистора по справочнику определяется требуемый прямой ток и прямое падение напряжения на светодиоде. Зная уровень логической единицы легко рассчитать сопротивление резистора. Если на вход схемы подать напряжение питания, а коммутировать цепь катода светодиода, то легко предложить схему, в которой светодиод будет светиться при нулевом уровне на входе (*попробуйте предложить такую схему*).

4) Фотодиод предназначен для преобразования оптического сигнала в электрический. Может быть использован для формирования сигнала при обратном

смещении. При этом в момент освещения высокое обратное сопротивление фотодиода существенно уменьшается до десятков и единиц кОм.

5) Оптрон – полупроводниковый прибор, в котором входная и выходная цепи связаны оптической связью.

Различают оптроны в зависимости от используемых компонентов: диодные, транзисторные, резисторные. Оптроны находят широкое применение при необходимости в процессе передачи информации обеспечить гальваническую развязку источника сигнала и приемника. На рисунке 3.12 показано включение диодного оптрона.

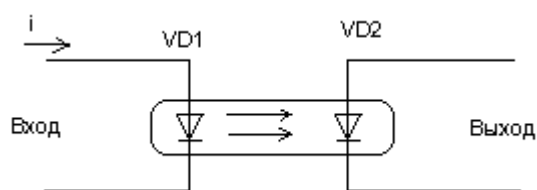


Рисунок 3.12

При подаче управляющего тока на светодиод VD1 возникает световой поток, который воспринимается фотодиодом VD2. После прохождения сигнала с этого диода через усилитель-формирователь на приемном конце будет сформирован уровень логической единицы. Если же ток через светодиод отсутствует, то на выходе усилителя-формирователя будет формироваться логический ноль.

6) Импульсные диоды отличаются малыми значениями паразитных емкостей и малым временем рассасывания неосновных носителей. Время восстановления этих диодов мало.

7) Стабилитрон предназначен для стабилизации напряжения. Стабилизация наступает при обратном смещении стабилитрона в момент лавинного пробоя р-п перехода. Традиционное схемное включение стабилитрона предлагается на рисунке 3.13.

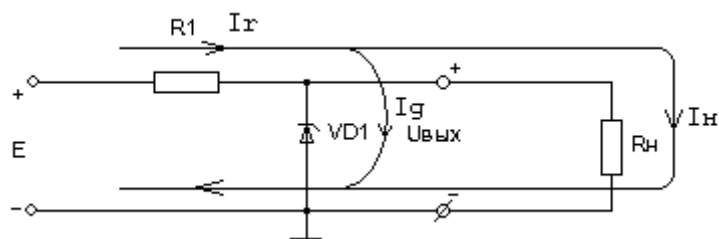


Рисунок 3.13

При расчете предложенной схемы необходимо знать ток I_n или диапазон токов, которые потребляются нагрузкой R_n . Выбирается по справочнику стабилитрон, который имеет напряжение стабилизации, требуемое в данной схеме. При выборе стабилитрона необходимо обратить внимание на возможный диапазон изменения тока в нагрузке. Если ток в нагрузке практически не меняется, то стабилитрон может быть рассчитан на минимальную рассеиваемую мощность, при этом по справочнику определяется минимальный и максимальный токи стабилизации. Разработчик задает ток обратно смещенного стабилитрона с учетом справочных данных, тем самым определяется ток через резистор $R1$:

$$I_R = I_n + I_d.$$

Поскольку выходное напряжение определяется напряжением стабилизации стабилитрона $U_{ст}$, легко рассчитать сопротивление резистора. $R1 = (E - U_{ст}) / (I_n + I_d)$ Непременно необходимо определить мощность, рассеиваемую на резисторе и соответствующим образом выбрать резистор.

3.3 Биполярные транзисторы

3.3.1 Общие сведения

Биполярный транзистор – совокупность двух взаимосвязанных p-n-переходов.

Различают транзисторы прямой проводимости (p-n-p) и обратной (n-p-n). В настоящее время транзисторы обратной проводимости находят большее применение. Простейшая конструкция биполярного транзистора типа n-p-n, условное изображение на электрических схемах и возможное включение в качестве усилителя показаны на рисунке 3.14.

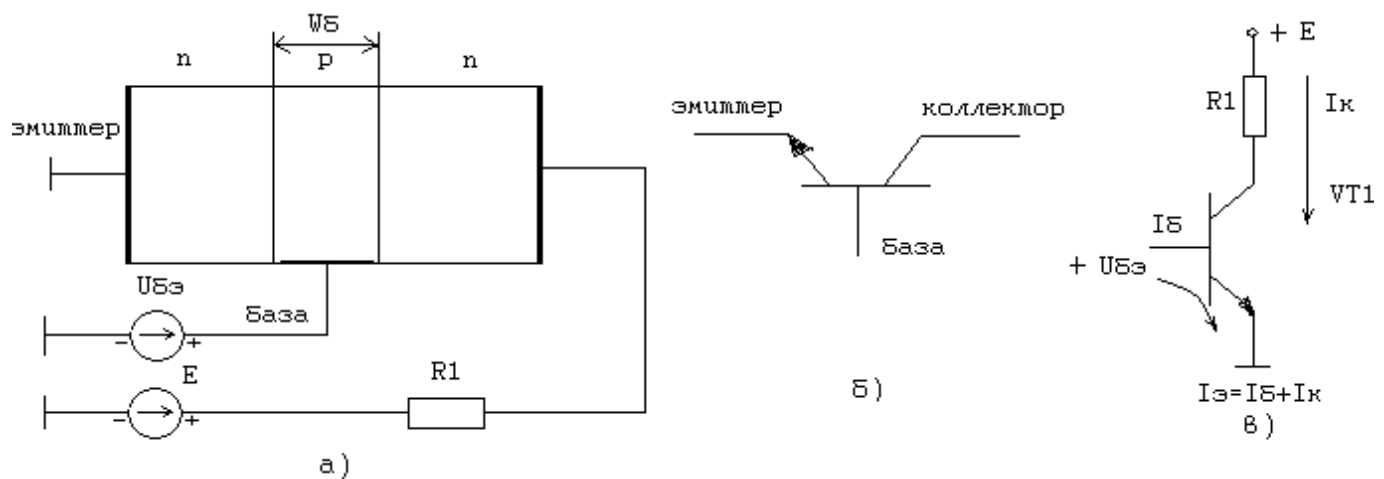


Рисунок 3.14

Конструктивно выбирают область базы $w_б$ транзистора (рисунок 3.14а) очень узкой. Концентрация дырок в базе невысокая, а концентрация электронов, наоборот, высокая. Транзистор работает следующим образом. При подаче прямого смещающего напряжения база – эмиттер $U_{бэ}$ через эмиттерный переход будут протекать два тока:

- дырочный ток из базы в эмиттер. За счет низкой концентрации дырок этот ток невелик;
- электронный ток – из эмиттера в базу. Попадая в область базы, электроны, благодаря тонкой базе, с высокой вероятностью оказываются в области коллекторного перехода. Если при этом коллектор обратнo смещен, то это способствует переходу свободных электронов из базы в коллектор. Именно этот поток электронов оказывается полезным и создает коллекторный ток. Чем тоньше база, тем выше коэффициент усиления транзистора по току, тем больше коллекторный ток, тем ближе по величине коллекторный ток к эмиттерному току.

Для транзистора можно определить несколько основных соотношений, которые справедливы при работе транзистора в линейном режиме.

$I_э = I_б + I_к$, то есть эмиттерный ток равен сумме коллекторного и базового токов.

$I_K/I_E = \alpha < 1$, где α – интегральный коэффициент передачи тока в схеме с общей базой. $\alpha = 0.95 \dots 0.998$. Если в формуле используются приращения токов, то имеем дело с параметром h_{216} – дифференциальным коэффициентом передачи тока в схеме с общей базой. α примерно равен h_{216} .

$I_K/I_B = \beta > 1$, где β – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером, $\beta = 15 \dots 300$. Схема включения транзистора при этом показана на рисунке 3.14в. Если в формуле используются приращения токов, то имеем дело с параметром $h_{21э}$ – дифференциальным коэффициентом усиления тока в схеме с общим эмиттером. Эти коэффициенты примерно равны, то есть $\beta \approx h_{21э}$.

В схеме с общим эмиттером входной ток задаётся в базовую цепь транзистора, а выходной ток снимается с коллектора. Для того, чтобы β был велик, не только выбирается тонкая база, но и конструктивно создают площадь коллектора, значительно превышающую площадь эмиттера.

Существуют транзисторы многоэмиттерные и многоколлекторные, которые находят применение в составе интегральных схем.

Обратными токами р-п-переходов обычно можно пренебречь. Стрелка эмиттера указывает на возможное направление тока.

Для биполярных транзисторов определяют несколько режимов работы.

1. Режим отсечки. Выключенное или закрытое состояние транзистора. Наблюдается при обратном смещении обоих переходов. На практике считают, что транзистор находится в режиме отсечки, когда напряжение база – эмиттер близко к нулю или при небольшом смещающем напряжении.
2. Линейный режим. Наблюдается, когда эмиттерный переход прямо смещен, а коллекторный – обратно смещен. При этом для транзистора справедливы предложенные коэффициенты α и β . Транзистор способен в этом режиме почти линейно усиливать сигнал. Этот режим иногда называют активным. Биполярный транзистор является токовым прибором,

т.е. управляется током и всегда необходимо предусматривать ограничение тока базы, например, резистором. При плавном повышении тока базы линейно с коэффициентом β возрастает коллекторный ток. Если в коллекторной цепи присутствует резистор, то рост коллекторного тока будет сопровождаться уменьшением напряжения коллектор – эмиттер. До тех пор, пока напряжение на коллекторе выше напряжения на базе, транзистор остается в линейном режиме, т.е. способен линейно усиливать сигнал.

3. Режим насыщения – оба перехода транзистора оказываются прямо смещенными. Коллекторный ток достигает своего максимального значения, которое определяется не транзистором, а цепью нагрузки. В режим насыщения транзистор входит, когда $I_b > I_{кн} / \beta$, где I_b – ток в базовой цепи, $I_{кн}$ – ток в цепи коллектора. Чтобы транзистор оказался заведомо в режиме насыщения, выбирают степень насыщения $S > 2$. $I_b = S * I_{кн} / \beta$. В режиме насыщения в базу поступает такое количество неосновных носителей, что коллектор не способен их поглотить. В результате при попытке выключить транзистор, эти неосновные носители создадут значительную задержку выключения транзистора. Режим насыщения или близкий к нему линейный режим, находит широкое применение в цифровой технике. При этом говорят, что транзистор открыт или включен.

3.3.2 Основные схемы включения транзистора

В зависимости от того, какой из электродов транзисторов является общим для входной и выходной цепи, различают три основные схемы включения:

Схема с общим эмиттером находит наибольшее применение, обладает средним входным сопротивлением и средним выходным, способна усиливать сигнал по току и напряжению. Простейшая схема усилительного каскада предложена на рисунке 3.15а.

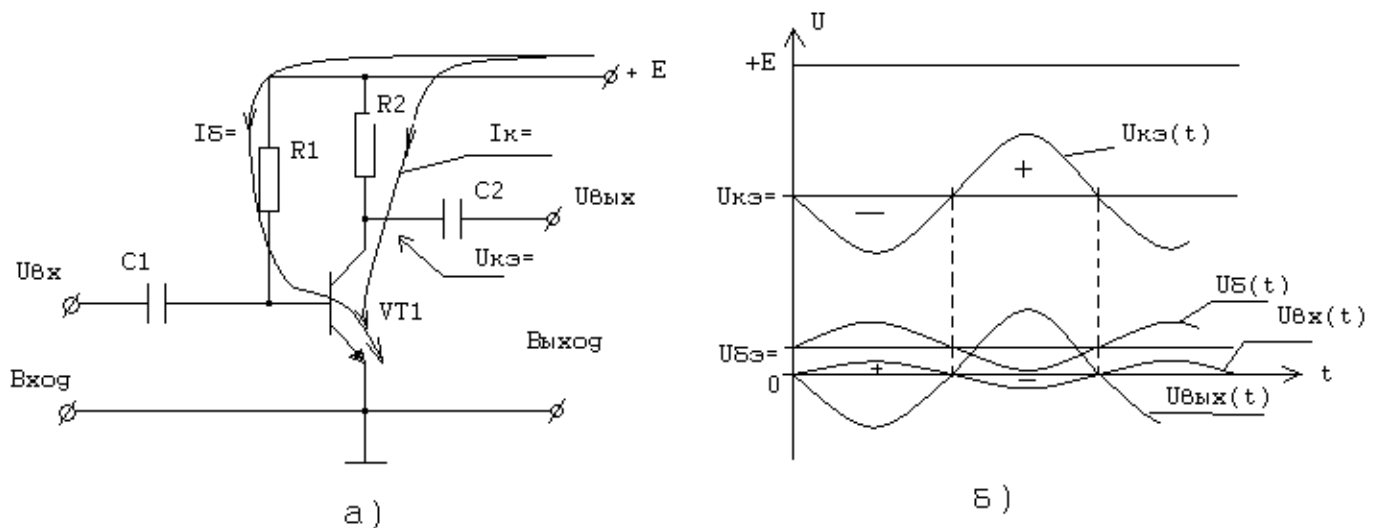


Рисунок 3.15

Можно заметить, что эмиттер в данной схеме – общий электрод для входной и выходной цепей. R2 – резистор коллекторной нагрузки позволяет преобразовать изменение коллекторного тока в изменение коллекторного напряжения по следующей формуле: $U_{кэ} = E - I_{к} \cdot R2$. R1 – резистор, который задает начальный ток базы. Разумным образом выбирая сопротивление этого резистора задаём начальное напряжение коллектор – эмиттер ($U_{кэ=}$) и начальный ток базы ($I_{б=}$) и коллектора ($I_{к=}$). Справедливы равенства:

$$I_{б=} = I_{к=} / \beta, \quad U_{кэ=} = E - R2 \cdot I_{к=}$$

Конденсатор C1 служит для исключения влияния источника сигнала на режим работы транзистора в статике, пропускает только переменную составляющую сигнала. Конденсатор C2 служит для преобразования однополярных изменений напряжения на коллекторе в двухполярные изменения напряжения на нагрузке и исключает влияние цепи нагрузки на статический режим работы транзистора. В предложенном варианте схемы, чтобы каскад усиливал линейно сигнал, необходимо разумным образом выбирать режим работы транзистора по постоянному току. Одно из условий работы каскада в линейном режиме можно представить в виде неравенства: $E > U_{кэ=} > 0$. На рисунке 3.15б показаны временные диаграммы сигналов в схеме с общим эмиттером в предположении синусоидального сигнала на входе $u_{вх}(t)$. Можно заметить, что амплитуда выходного

напряжения на рисунке больше амплитуды входного сигнала, причём, если на входе положительная полуволна, на выходе – отрицательная и наоборот. Отношение выходного напряжения к входному называют коэффициентом усиления по напряжению: $k_u = u_{\text{вых}}/u_{\text{вх}}$.

Схема с общим коллектором, или эмиттерный повторитель, обладает высоким входным сопротивлением, низким выходным, не усиливает по напряжению ($k_u \approx 1$), усиливает по току и обладает хорошими частотными свойствами. Чтобы эмиттерный повторитель был работоспособен, необходимо правильно задать начальное положение рабочей точки. Этого можно достичь применением резисторных делителей или использованием двухполярных питающих напряжений, как это сделано на рисунке 3.16а. Временные диаграммы работы каскада предложены на рисунке 3.16б.

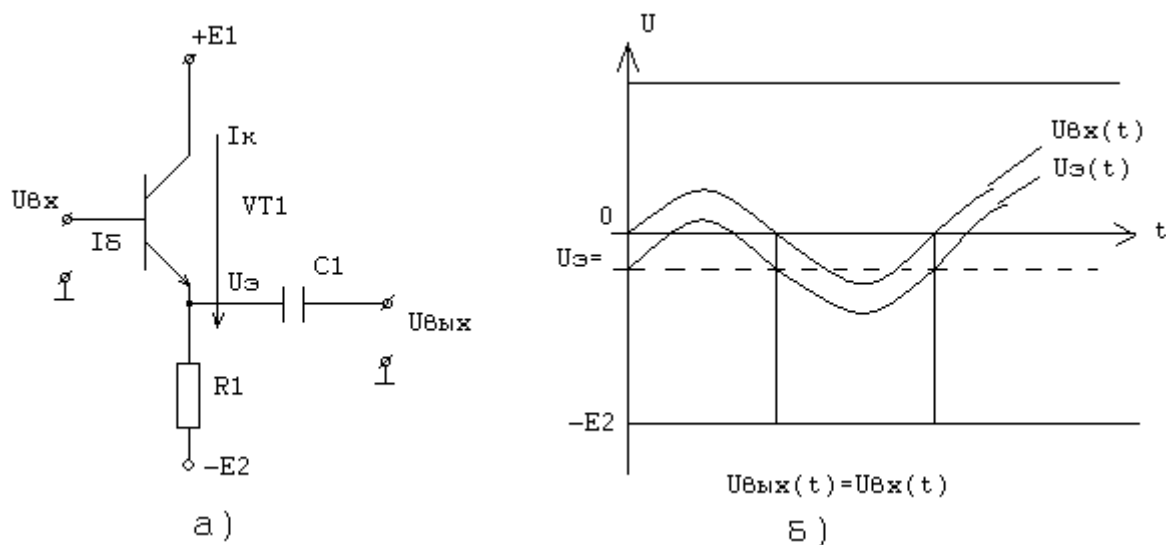


Рисунок 3.16

Сигнал на эмиттере транзистора является копией сигнала на базе, но смещен вниз на прямое падение напряжения база – эмиттер, то есть для кремниевого транзистора примерно на $0,7\text{В}$: $U_{\text{Э}} \approx 0,7\text{В}$. Наличие конденсатора $C1$ на выходе позволяет избавиться от этой постоянной составляющей, Так что с высокой точностью для схемы справедливо равенство:

$$u_{\text{вых}}(t) \approx u_{\text{вх}}(t).$$

Схема с общей базой обладает максимально низким входным сопротивлением и высоким выходным сопротивлением, не усиливает по току, а усиливает по напряжению, обладает хорошими частотными свойствами. Возможное схемное решение каскада в этом случае и временные диаграммы работы предложены на рисунке 3.17.

В данном случае база транзистора соединена с общим проводом. Входной сигнал подается на эмиттер через конденсатор, а выходной снимается с коллектора. Поскольку база соединена с общим проводом по постоянному току, чтобы обеспечить нормальный режим, приходится эмиттерную цепь питать от источника другой полярности. При этом эмиттерный ток определяется сопротивлением $R1$ и напряжением источника $E2$.

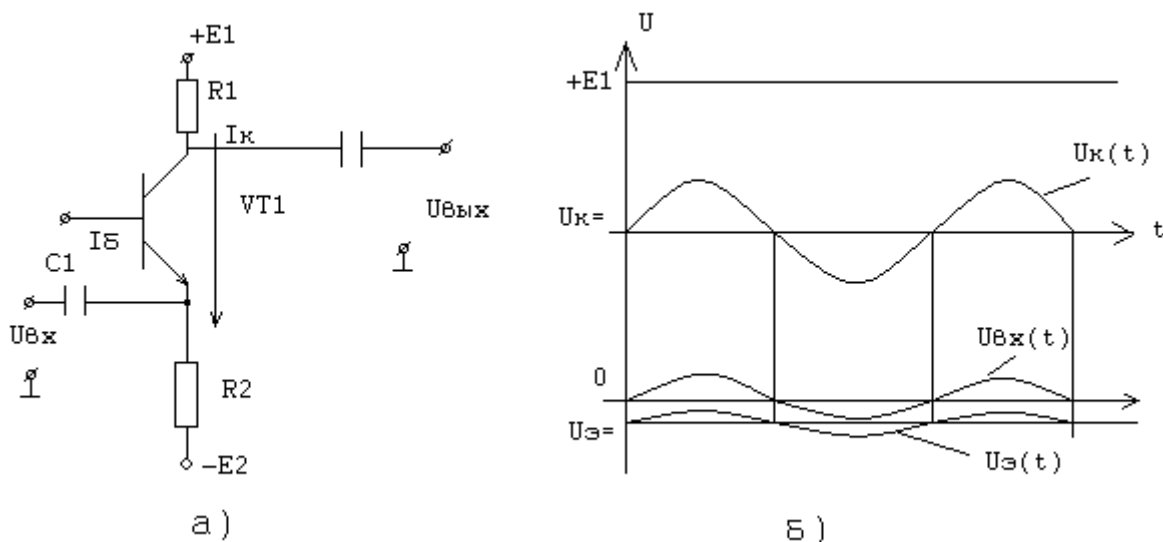


Рисунок 3.17

3.3.3 Основные параметры биполярных транзисторов

Обратим внимание на некоторые параметры транзисторов, которыми характеризуют поведение транзисторов в справочной литературе. Названия некоторых параметров не требуют объяснения, а некоторые рассмотрим подробнее. Разделим свойства транзисторов на электрические параметры и на предельные эксплуатационные данные.

Электрические параметры

1. Статический коэффициент усиления (передачи) тока в схеме с общим эмиттером часто определяют при конкретных значениях коллекторного тока и напряжения на коллекторе, при определённой температуре. Например, для транзистора КТ315А коэффициент $h_{21э}$ лежит в диапазоне 20-90 при токе коллектора в 1мА и напряжении коллектор-эмиттер равном 10В.
2. Ёмкость (точнее максимальное значение ёмкости) коллекторного перехода при известном напряжении коллектор-база на известной частоте. Для транзистора КТ315А ёмкость не более 7пФ при напряжении 10В и частоте 10МГц. Влияние этой ёмкости на быстродействие схемы на транзисторе очень велико, поскольку она связывает выход с входом в схеме с общим эмиттером и является компонентом отрицательной обратной связи. Обратная связь – заведение выходного сигнала или его части на вход схемы. Отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления схемы, а положительная – увеличивает. Поскольку выходной сигнал схемы с общим эмиттером находится в противофазе к входному (рисунок 3.15б), то есть положительной полярности сигнала на входе соответствует отрицательная полярность, то конденсатор пытается уменьшить влияние напряжения на базе на выходное напряжение транзистора при передаче переменного сигнала. Его влияние равносильно подключению между коллектором и эмиттером конденсатора с ёмкостью в $h_{21э}$ раз большей величины.
3. Модуль коэффициента передачи тока – значение модуля коэффициента $h_{21э}$ на определённой частоте, например на частоте в 100МГц.
4. Граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером при заданном напряжении между коллектором и эмит-

тером и заданном токе коллектора. Это частота $f_{гр}$, на которой модуль коэффициента $h_{21э}$ уменьшается в 1.41 раза по сравнению с коэффициентом на низкой частоте. Различают транзисторы низкочастотные ($f_{гр} < 30 \text{ МГц}$), средней частоты ($30 \text{ МГц} < f_{гр} < 300 \text{ МГц}$) и высокочастотные ($f_{гр} > 300 \text{ МГц}$).

Предельные эксплуатационные данные

1. Постоянное напряжение коллектор - база.
2. Постоянное напряжение коллектор – эмиттер при известном сопротивлении резистора между базой и эмиттером.
3. Постоянный коллекторный ток при заданном температурном диапазоне.
4. Импульсный ток коллектора при заданных температурах и, быть может, заданных продолжительностях действия этого тока и периода действия.
5. Постоянная рассеиваемая мощность коллектора – максимально допустимая мощность рассеивания на транзисторе. Различают транзисторы малой мощности ($P_k < 0.3 \text{ Вт}$), средней мощности ($0.3 \text{ Вт} < P_k < 1.5 \text{ Вт}$) и мощные ($1.5 < P_k$).

3.4 Полевые транзисторы

3.4.1 Общие сведения

В отличие от биполярных транзисторов, которые управляются током, полевые транзисторы управляются напряжением. Входное сопротивление полевых транзисторов очень велико. Полевые транзисторы можно разделить на МДП- или МОП-транзисторы и полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом. Буквосочетание МДП расшифровывается как металл-диэлектрик-полупроводник, а сочетание МОП расшифровывается как металл-окись-

полупроводник. В обоих случаях буквенное сочетание объясняется конструкцией полевого МДП-транзистора, в котором используется полупроводник (рисунок 3.18а), на поверхность которого нанесён диэлектрик или окись кремния, то есть тоже диэлектрик, а на поверхности диэлектрика располагается металлический электрод, называемый затвором.

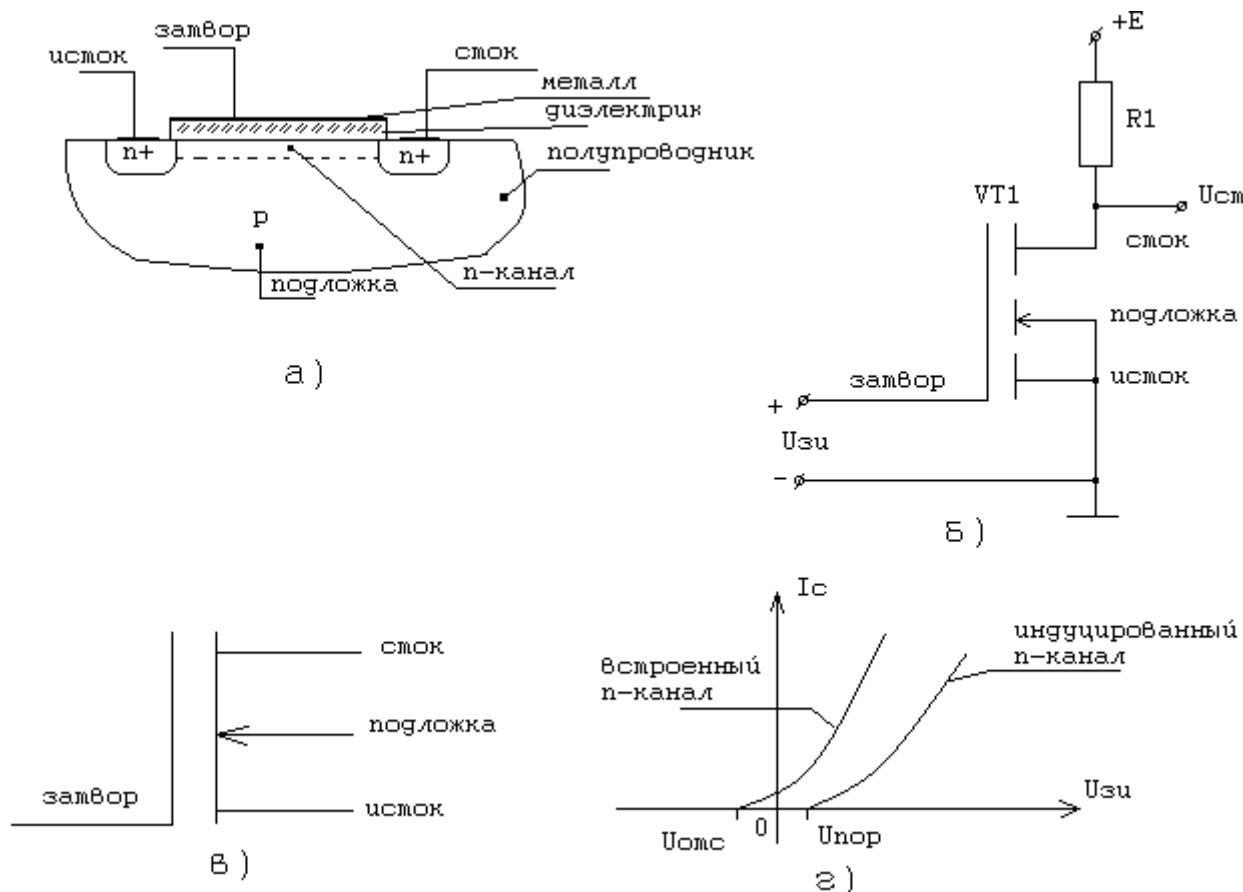


Рисунок 3.18

Исток – электрод, который формирует носители заряда, от которого эти заряды перемещаются под затвором к стоку. Сток – электрод, который принимает, на который стекают заряды. Создается полевой транзистор на полупроводнике n или p типа, который образует подложку, т.е. дополнительный четвертый электрод. Подложка обычно соединяется с истоком. Рассмотрим принцип работы МДП транзистора, конструкция которого предложена на рисунке 3.18а, а условное обозначение и возможное включение в качестве усилительного кас-

када предложено на рисунке 3.18б. В полупроводнике р-типа образованы две области полупроводника n-типа с повышенной концентрацией свободных электронов, которые образуют исток и сток. Если под диэлектриком при нулевом напряжении на затворе относительно истока присутствует полупроводник р-типа, как это изображено на рисунке, то между стоком и истоком образуются два встречно включенных р-n-перехода, проводимость между стоком и истоком в этом случае отсутствует.

При подаче положительного напряжения на затвор относительно истока вблизи поверхности увеличивается концентрация свободных электронов, что при превышении напряжения на затворе величины $U_{\text{пор}}$ (рисунок 3.18г) приводит к формированию канала проводимости n-типа. То есть между стоком и истоком образуется канал электронной проводимости. Появление канала показано на рисунке пунктиром. С ростом напряжения канал проводимости расширяется, проводимость растёт. Транзистор описанного типа называют МДП-транзистором с индуцированным каналом. Условное обозначение его на схемах показано на рисунке 3.18б.

Если при изготовлении транзистора вблизи диэлектрика сформирован канал проводимости конструктивно, то есть между стоком и истоком при нулевом напряжении на затворе присутствует проводимость, то это МДП-транзистор со встроенным каналом. Его условное изображение на схемах предложено на рисунке 3.18в. на рисунке 3.18г предложены зависимости тока стока от напряжения на затворе для описанных транзисторов.

Если транзистор строится на полупроводнике n-типа, а носители заряда в канале р-типа, то в условном обозначении направление стрелки на линии, обозначающей подложку, должно быть противоположным указанному на рисунках 3.18б и 3.18в направлению.

Широкое применение находят полевые транзисторы с управляющим р-n переходом, для нормальной работы которых желательно р-n перехода затвора смещать в обратном направлении. Конструкция полевого транзистора с р-n-переходом и его условное обозначение показано на рисунке 3.19.

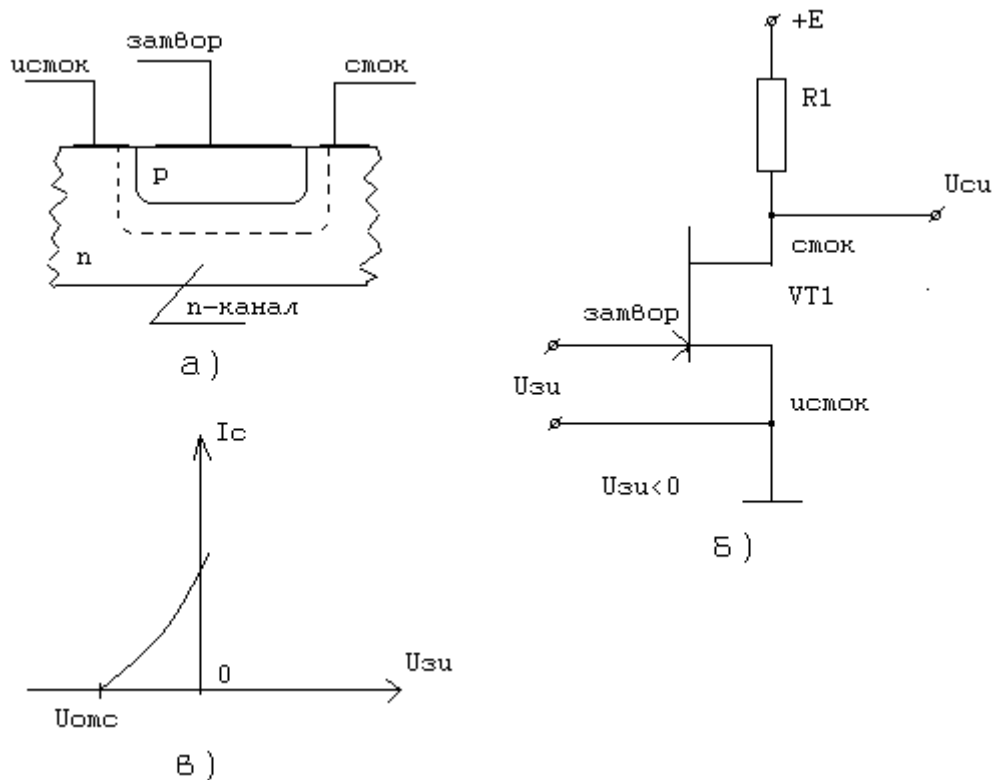


Рисунок 3.19

При нулевом напряжении на затворе относительно истока существует канал проводимости n-типа. Пунктиром показана условно граница p-n-перехода. Напоминаем, что в самом переходе практически нет свободных носителей заряда. Так что проводить ток будет только тот слой полупроводника, который расположен под пунктирной линией.

Если на затвор подать напряжение отрицательной полярности, то переход обратно смещается, ширина его растёт, то есть граница перехода смещается вниз. Это приводит к уменьшению ширины канала, к росту сопротивления между стоком и истоком, что приводит с достижением напряжения отрицательной полярности величины $U_{отс}$ (рисунок 3.19в) к уменьшению тока стока до нуля, канал исчезает. Подача на затвор напряжения положительной полярности смещает p-n-переход в прямом направлении, ток стока растёт, но растёт и ток затвора. Транзистор теряет своё достоинство: высокое входное сопротивление. Поэтому прямое смещение перехода допускается только при весьма малых входных напряжениях, при которых входным током ещё можно пренебречь.

В статике полевые транзисторы характеризуются крутизной характеристики S , то есть величиной отношения приращения тока стока Δi_c к приращению напряжения на затворе $\Delta u_{зи}$, которое вызвало приращение тока стока:

$$S = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{зи}} \frac{mA}{B}.$$

Крутизна характеристики зависит от выбранного начального положения рабочей точки, то есть от начальной величины тока стока при нулевом входном сигнале.

3.4.2 Основные параметры полевых транзисторов

Электрические параметры

1. Крутизна характеристики определяется при заданных значениях напряжений сток-исток и затвор-исток, при определённой температуре.
2. Напряжение отсечки (или пороговое напряжение) при заданных значениях напряжения сток-исток и допустимом в этом случае токе стока, (весьма малом значении).
3. Ток утечки затвора при заданных напряжениях сток-исток и затвор-исток.
4. Максимальная рабочая частота.
5. Ёмкость входная и проходная при заданных напряжениях.

Предельные эксплуатационные данные

1. Напряжение сток-исток при заданных температурах.
2. Напряжение затвор-исток.
3. Постоянная рассеиваемая мощность.
4. Ток стока.

Литература

1. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. - М.: ВШ, 1973.- 752с., ил.
2. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие. / Л.А.Бессонов, И.Г.Демидова, М.Е.Заруди и др.; Под ред. Л.А.Бессонова.- М.: ВШ, 1980 – 472с., ил.
3. Н.М.Белоусова, О.В.Толчеев. Преподавание электротехники. – М.: ВШ, 1988.- 191с., ил.
4. М.Ю.Анвельт, Ю.Х.Пухляков, М.А.Ушаков. Электротехника. – М.: Учпедгиз, 1963. – 240с., ил.
5. Л.Р.Нейман, К.С.Демирчян. Теоретические основы электротехники. В двух томах. Т.1. Л.: Энергия, 1975. – 524с., ил. Т.2. Л.: Энергия, 1975. – 408с., ил.
6. Г.Г.Рекус, А.И.Белоусов. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. М.: ВШ, 1991. – 416с, ил.
7. В.В.Крылов, С.Я.Корсаков. Основы теории цепей для системотехников. – М.: ВШ, 1990.-224с. ил.
8. В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев. Электроника.-М.: ВШ, 1991-622с., ил.
9. Е.П.Угрюмов. Элементы и узлы ЭЦВМ. М.: ВШ, 1976-232с., ил.
10. А.Г.Алексенко, И.И.Шагурин. Микросхемотехника: Учебное пособие для ВУЗов. Под ред. И.П.Степаненко. –М.: Радио и связь, 1982-416с., ил.
11. В.В.Пасынков, Л.К.Чиркин. Полупроводниковые приборы. –М.: ВШ, 1987-479с.
12. И.П.Степаненко. Основы микроэлектроники. М.: Сов. радио, 1980-424с.
13. Н.М.Соломатин. Логические элементы ЭВМ. 1990.
14. П.Хоровиц, У.Хилл. Искусство схемотехники. –М.: Мир, 1983. В двух томах. 598с. и 590с.
15. К.В.Шалимова. Физика полупроводников. –М.: Энергия, 1971-312с.
16. И.Е.Ефимов и др. Микроэлектроника.- М.: ВШ, 1987-416с.

17. В.И.Карлащук. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение. – М.: Солон-Р, 1999.
18. Электротехника и электроника / Методические указания к лабораторным и самостоятельным работам. Составители: Л.А.Брякин, А.С.Бычков. Часть 1.- Издательство ПГУ, Пенза, 2003.-66с.
19. Электротехника и электроника / Методические указания к лабораторным занятиям и самостоятельной работе. Составитель Л.А.Брякин. Часть 2.- Издательство ПГУ, Пенза, 2003.-44с.