

**Ю. ОВЕЧКИН,
А. САВЧЕНКО,
Н. СМЕРНОВ.**

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ



**Ю. ОВЕЧКИН,
А. САВЧЕНКО,
Н. СМЕРНОВ**

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРИМЕНЕНИЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ДОСААФ
МОСКВА — 1966**

В современной электронной аппаратуре широко применяются полупроводниковые приборы, главным образом диоды и транзисторы.

Применение диодов и транзисторов в электронной аппаратуре в подавляющем большинстве случаев приводит к существенному уменьшению размеров аппаратуры, снижению потребляемой мощности, повышению к.п.д., увеличению срока службы, резкому повышению надежности, снижению эксплуатационных расходов и т. п. Однако зависимость параметров и режимов диодов и транзисторов, в особенности германиевых, от температуры, а также разброс параметров и изменения их значений во времени определяют специфические требования к схемам на полупроводниковых приборах (необходимость применения температурной стабилизации, широкое использование отрицательных обратных связей и т. д.). Это требует от конструктора полупроводниковой аппаратуры глубоких знаний физики работы полупроводниковых приборов, их параметров и характеристик, знаний свойств и эксплуатационных особенностей полупроводниковых приборов, а также умения грамотно использовать справочные данные. Недостаточные знания приводят к неудачам в конструировании аппаратуры, неумению реализовать замечательные свойства диодов и транзисторов, а в ряде случаев — к неоправданному отказу от их использования. Так, например, принципиальной особенностью диодов и транзисторов является их способность с большой эффективностью и надежностью работать при низких (порядка нескольких вольт) напряжениях источников питания. Однако, зачастую диоды и транзисторы используются в предельных режимах, при максимальных значениях напряжений и токов и даже при значительном повышении предельных режимов, что приводит к выходу полупроводниковых приборов из строя.

Самые надежные, долговечные и высококачественные транзисторы или диоды могут быть испорчены за доли секунды в результате перегрузки по току, напряжению или мощности. В таких случаях даже существенное увеличение надежности полупроводниковых приборов не сможет повысить надежности системы в целом. Большое

количество отказов аппаратуры связано также с тем, что при конструировании не учитываются такие специфические особенности диодов и транзисторов, как изменение их параметров в определенных интервалах в зависимости от условий работы и в течение срока службы.

Вопросам проектирования радиоэлектронной аппаратуры посвящен ряд опубликованных за последнее время изданий. Из них могут быть рекомендованы для использования:

Кобзев В. В. и Шишмаков В. Н. Каскады радиоприемников на транзисторах. Госэнергоиздат, 1960;

Лоу и др. Основы полупроводниковой электроники. Изд. «Советское радио», 1958;

Мартынов Б. М. Бесконтактные переключающие устройства. Госэнергоиздат, 1961;

Доронкин Е. Ф. Мультивибраторы на транзисторах. Госиздат, техн. литер., УССР, 1963;

Будинский Я. Усилители низкой частоты на транзисторах. Госиздат, литер. по вопросам связи и радио, 1963;

Ши Р. Ф. Усилители звуковой частоты на полупроводниковых триодах. Изд. иностранной литературы, 1957;

Вассер К. П. Схемы на полупроводниковых триодах. Изд. «Советское радио», 1956;

Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам под редакцией Горюнова Н. Н. Изд. «Энергия», 1964;

Шварц С. Полупроводниковые схемы. Изд. иностранной литературы, 1962.

Для более подготовленных радиолюбителей можно рекомендовать также следующие издания:

Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. Изд. «Советское радио», 1963;

Полупроводниковые приборы и их применение. Сборник статей под ред. Я. А. Федотова. Изд. «Советское радио», выпуски 1—11;

Валитов Р. А. и др. Теория и расчет основных радиотехнических схем на транзисторах. Связьиздат, 1963;

Герасимов С. М. и др. Основы теории и расчета транзисторных схем. Изд. «Советское радио», 1963;

Степаненко И. П. Основы теории транзисторных и транзисторных схем, Госэнергоиздат, 1964.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ

Полупроводниковые приборы — диоды и транзисторы — изготавливаются на основе кристаллов полупроводникового материала (германия, кремния, арсенида галлия, карбида кремния и др.).

С помощью достаточно сложных технологических операций в объеме кристалла создаются области с различным знаком проводимости: электронной — n или дырочной — p . На границах таких областей образуются p — n -переходы. С помощью металлических выводов переход включается в электрическую цепь (рис. 1).

Основным свойством p — n -перехода является его однонаправленность для пропускания электрического тока. При положительном смещении области p относительно области n (прямое смещение) через p — n -переход протекает большой прямой ток при малом падении напряжения на переходе (на рис. 1 включение источника питания для подачи прямого смещения помечено пунктиром).

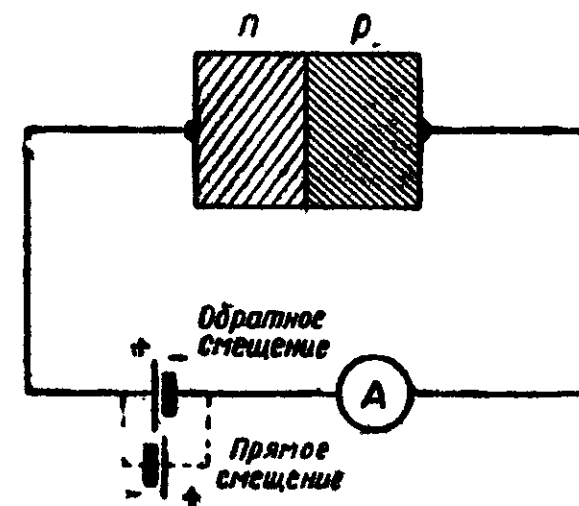


Рис. 1. Схема включения p — n -перехода в электрическую цепь.

При отрицательном смещении области p относительно области n (обратное смещение) через переход протекает малый обратный ток и все напряжение источника питания падает на переходе. Если к p — n -переходу приложено переменное напряжение, ток через переход, а следовательно,

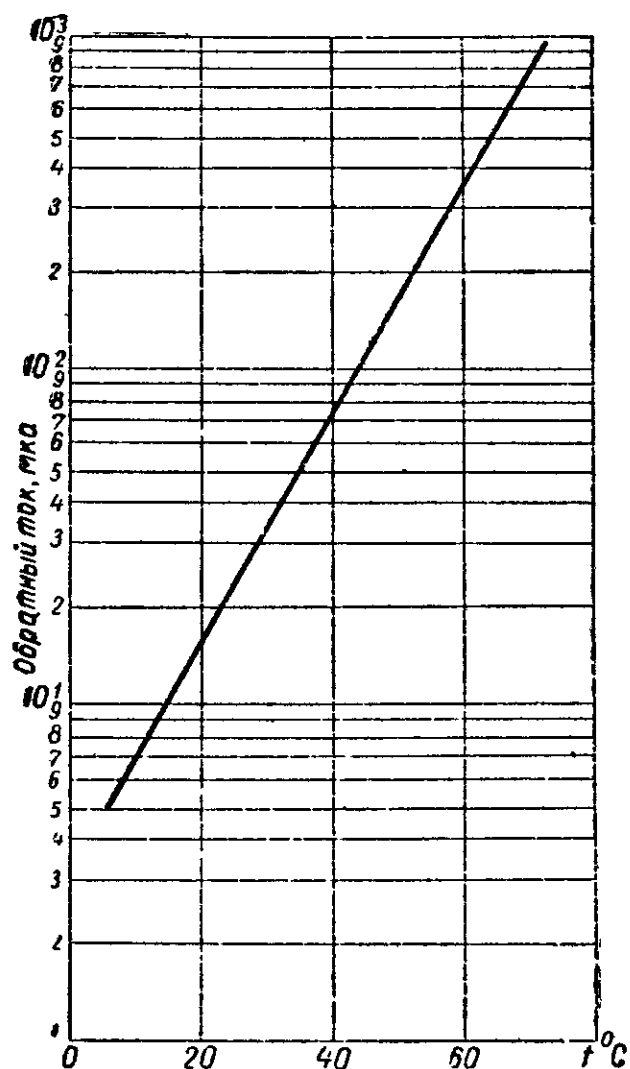


Рис. 2. Примерная зависимость обратного тока p — n -перехода от температуры.

и во внешней цепи проходит лишь в одном направлении во время действия полуволн прямого напряжения. В этом заключается выпрямительное действие p — n -перехода. Во время действия полуволн обратного напряжения через переход протекает в десятки и сотни тысяч раз меньший обратный ток. Величина обратного тока перехода достаточно быстро растет при увеличении температуры (рис. 2). Практически обратный ток удваивается на каждые 10°C повышения температуры.

При высоких температурах (порядка 100°C для германия и порядка 200°C для кремния) полупроводниковый кристалл во-

обще теряет характер электронной или дырочной электропроводности, p — n -переходы при этом исчезают и приборы перестают работать.

Обратный ток p — n -перехода при увеличении приложенного к нему обратного напряжения в некоторых пределах почти не зависит от величины этого напряжения. Однако при больших напряжениях происходит пробой перехода, при этом ток резко увеличивается даже

при небольшом возрастании напряжения. Если не ограничить величину тока в режиме пробоя, переход может быть разрушен. Величины пробивных напряжений для разных переходов, используемых в диодах и транзисторах, могут лежать в пределах от десятых долей вольта до нескольких сотен вольт.

Свойство односторонней проводимости p — n -перехода используется в диодах. Диод — это полупроводниковый прибор с двумя выводами и одним или несколькими p — n -переходами, предназначенный для выпрямления, модуляции, демодуляции, переключения, а иногда и генерирования или усиления электрических сигналов.

Свойства p — n -переходов используются также в транзисторах. Транзистор — это полупроводниковый прибор с двумя p — n -переходами и тремя выводами, предназначенный для усиления, генерирования и переключения электрических сигналов. Схема включения транзистора в электрическую цепь показана на рис. 3.

К одному из переходов — эмиттерному — напряжение приложено в прямом направлении, к другому переходу — коллекторному — в обратном. Средняя область транзистора — база — имеет весьма малую толщину, поэтому почти все носители заряда, попадающие в базу из эмиттерного перехода, достигают коллекторного перехода, образуя ток в цепи коллектора. Величиной этой составляющей тока коллектора можно управлять, изменяя напряжение на эмиттерном переходе. Для этого достаточно небольшие изменения напряжения, поэтому затрачиваемая от источника управляющего (входного) сигнала мощность может быть мала.

В цепи коллектора ток проходит через нагрузку, имеющую большое сопротивление. На нагрузке появляется сигнал с большой амплитудой напряжения. Поэтому выделяемая в выходной цепи мощность значительно превышает мощность, потребляемую на входе. Таким образом, происходит усиление по мощности.

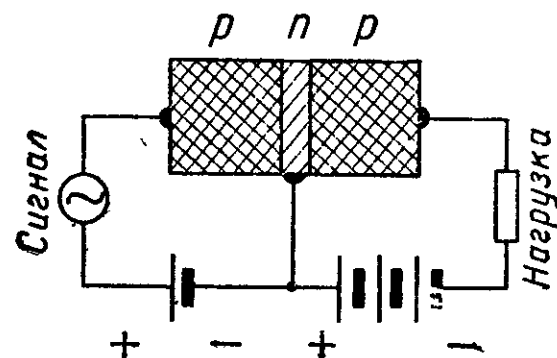


Рис. 3. Схема включения транзистора в электрическую цепь.

Предельная частота, на которой может работать транзистор, зависит главным образом от толщины базовой области, которая в современных высокочастотных транзисторах измеряется долями микрона. Конфигура-

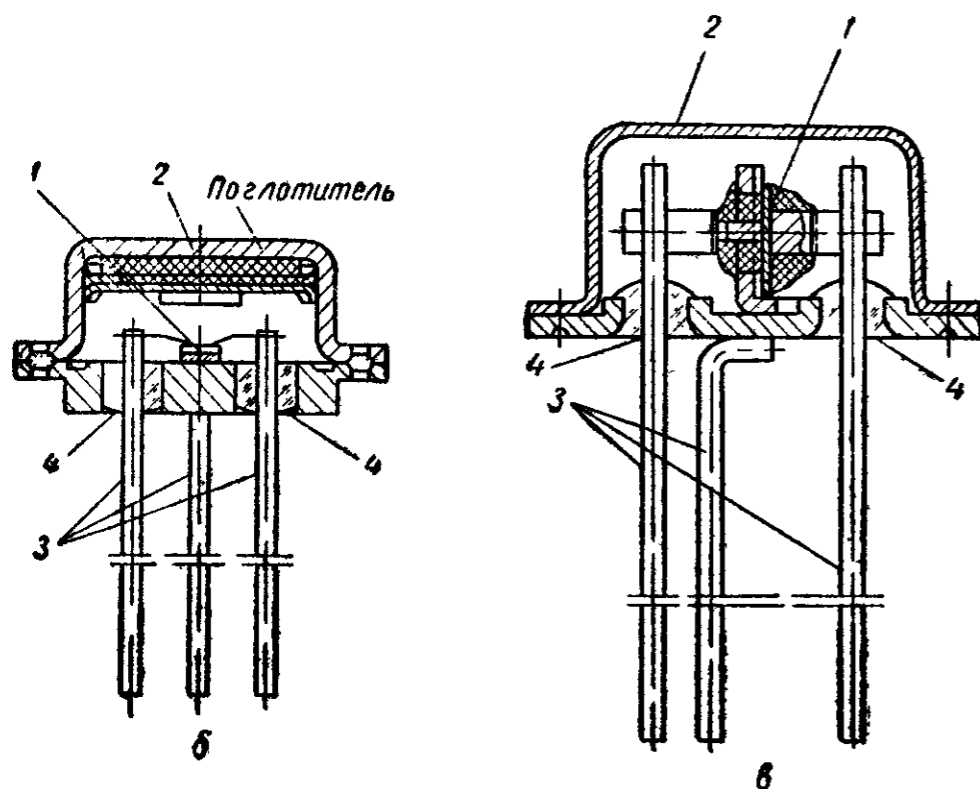
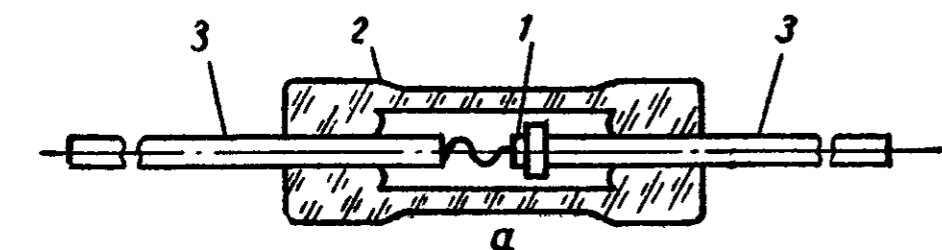


Рис. 4. Конструкция диода и транзистора: а — точечный диод в стеклянном корпусе; б — маломощный транзистор (холодносварная конструкция); в — маломощный транзистор (горячесварная конструкция); 1 — кристалл полупроводникового материала с переходами; 2 — герметичный корпус; 3 — выводы; 4 — изоляторы выводов.

ция и площади эмиттерного и коллекторного переходов определяют величины предельных токов и мощностей, которые могут быть рассеяны прибором. В мощных транзисторах протяженность границы коллекторного перехода может достигать нескольких сантиметров.

Изготовление переходов большой площади с малыми расстояниями между ними предъявляет чрезвычайно высокие требования к качеству и точности обработки исходных материалов, степени их однородности, воспроизводимости технологических процессов, проводимых при высоких температурах. Поэтому изготовление мощных высокочастотных транзисторов является наиболее сложной задачей.

$P-n$ -переходы диодов и транзисторов изготавливаются с помощью различных технологических операций: сплавления, диффузии или комбинации этих процессов, эпитаксиального наращивания, вытягивания из расплава и др. Для защиты готовых диодных или транзисторных структур от воздействия внешней среды и для стабилизации параметров кристаллы с переходами помещаются в герметичные металло-стеклянные корпуса.

Типичные конструкции диодов и транзисторов схематически показаны на рис. 4. Основными элементами конструкций являются: кристалл полупроводникового материала с переходами 1, герметичный корпус 2, выводы 3 и изоляторы 4.

Перед сборкой кристаллы с $p-n$ -переходами и другие элементы конструкции подвергаются тщательной очистке различными химическими методами, включающими травление, промывку, осушение. Операции по сборке диодов и транзисторов производятся в специальной защитной атмосфере.

Для поглощения вредно действующих газов или жидкостей, которые могут попасть внутрь корпуса, перед герметизацией прибора под колпачок помещаются специальные адсорбирующие вещества. Герметизация металлических корпусов производится обычно методом холодной сварки или электросварки.

Нарушение герметичности корпуса полупроводникового прибора приводит к изменению его параметров, их нестабильности, увеличению шумов и может вызвать преждевременный выход прибора из строя.

КЛАССИФИКАЦИЯ И СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЯ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ

Диоды классифицируются по следующим основным группам:

а) выпрямительные (обычно для работы в выпрямителях токов низкой частоты);

б) высокочастотные (для различных схем нелинейного преобразования сигналов высокой частоты);

в) импульсные (для работы в схемах с импульсами микросекундного и наносекундного диапазона);

г) переключающие (четырёхслойные диоды типа *p-n-p-n*, специально предназначенные для переключения больших токов);

д) опорные (стабилитроны, диоды для стабилизации напряжения);

е) варикапы (полупроводниковые конденсаторы, ёмкость которых изменяется при изменении приложенного к ним напряжения);

ж) туннельные (имеющие на вольт-амперной характеристике участок с динамическим отрицательным сопротивлением);

з) диоды СВЧ (специально предназначенные для работы в диапазоне сантиметровых и более коротких радиоволн).

Транзисторы в зависимости от величины максимальной мощности, рассеиваемой прибором, и предельной рабочей частоты разделяются на основные группы, приведенные в табл. 1 приложения.

Всем выпускаемым серийно приборам условные обозначения присваивались ранее по ГОСТ 5461—59. В соответствии с этим стандартом условные обозначения могут состоять из двух или трех элементов: первый элемент обозначения букв Д — для диодов, П — для плоскостных транзисторов; второй элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер типа прибора; третий элемент обозначения — буква, указывающая классификационную группу прибора.

Второй элемент обозначения (число) устанавливается по следующим признакам:

Прибор	Номер прибора
ДИОДЫ	
Точечные германиевые	от 1 до 100
Точечные кремниевые	от 101 до 200
Плоскостные кремниевые	от 201 до 300

Прибор	Номер прибора
Плоскостные германиевые	от 301 до 400
Смесительные СВЧ детекторы	от 401 до 500
Умножительные	от 501 до 600
Видеодетекторы	от 601 до 700
Параметрические германиевые	от 701 до 749
Параметрические кремниевые	от 750 до 800
Стабилитроны	от 801 до 900
Варикапы	от 901 до 950
Туннельные	от 951 до 1 000
Выпрямительные столбы	от 1 001 до 1 100
ТРАНЗИСТОРЫ	
Маломощные германиевые	от 1 до 100
Маломощные кремниевые	от 101 до 200
Мощные германиевые низкочастотные	от 201 до 300
Мощные кремниевые низкочастотные	от 301 до 400
Маломощные германиевые высокочастотные	от 401 до 500
Маломощные кремниевые высокочастотные	от 501 до 600
Мощные германиевые высокочастотные	от 601 до 700
Мощные кремниевые высокочастотные	от 701 до 800

В связи с недостатками старой системы классификации и обозначений полупроводниковых приборов принята новая, более совершенная система обозначений диодов и транзисторов. В соответствии с этой системой приборам присваиваются обозначения, состоящие из четырех элементов.

Первый элемент обозначения: буква Г или цифра 1 — исходный материал — германий; буква К или цифра 2 — кремний; буква А или цифра 3 — арсенид галлия.

Второй элемент обозначения — буква, указывающая класс или группу приборов: Д — диоды; Т — транзисторы; В — варикапы; А — сверхвысокочастотные диоды; Ф — фотоприборы; Н — неуправляемые многослойные

переключающие приборы; У — управляемые многослойные переключающие приборы; И — туннельные диоды; С — стабилитроны; Ц — выпрямительные столбы и блоки.

Третий элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер разработки прибора и его назначение или электрические свойства. Это число устанавливается по следующим признакам:

- 1) выпрямительные диоды:
 - а) малой мощности — от 101 до 199,
 - б) средней мощности — от 201 до 299,
 - в) большой мощности — от 301 до 399;
- 2) универсальные диоды — от 401 до 499;
- 3) импульсные диоды — от 501 до 599;
- 4) варикапы — от 101 до 199;
- 5) СВЧ-диоды:
 - а) сместительные СВЧ-диоды — от 101 до 199,
 - б) видеодетекторы — от 201 до 299,
 - в) модуляторные диоды — от 301 до 399,
 - г) параметрические диоды — от 401 до 499;
- 6) фотоприборы:
 - а) фотодиоды — от 101 до 199,
 - б) фототранзисторы — от 201 до 299;
- 7) неуправляемые многослойные переключающие приборы:
 - а) малой мощности — от 101 до 199,
 - б) средней мощности — от 201 до 299,
 - в) большой мощности — от 301 до 399;
- 8) управляемые многослойные переключающие приборы:
 - а) малой мощности — от 101 до 199,
 - б) средней мощности — от 201 до 299,
 - в) большой мощности — от 301 до 399;
- 9) туннельные диоды:
 - а) усилительные — от 101 до 199,
 - б) генераторные — от 201 до 299,
 - в) переключающие — от 301 до 399;

10) стабилитроны:

- а) малой мощности
напряжение стабилизации от 0,1 до 9,9 в от 101 до 199,
напряжение стабилизации от 10 до 99 в от 210 до 299,
напряжение стабилизации от 100 до 199 в от 300 до 399;
- б) средней мощности
напряжение стабилизации от 0,1 до 9,9 в от 401 до 499,
напряжение стабилизации от 10 до 99 в от 510 до 599,
напряжение стабилизации от 100 до 199 в от 600 до 699;
- в) большой мощности
напряжение стабилизации от 0,1 до 9,9 в от 701 до 799,
напряжение стабилизации от 10 до 99 в от 810 до 899,
напряжение стабилизации от 100 до 199 в от 900 до 999;

11) выпрямительные столбы и блоки:

- а) выпрямительные столбы малой мощности — от 101 до 199,
- б) выпрямительные столбы средней мощности — от 201 до 299,
- в) выпрямительные блоки малой мощности — от 301 до 399,
- г) выпрямительные блоки средней мощности — от 401 до 499,
- д) выпрямительные блоки большой мощности — от 501 до 599;

12) Транзисторы:

- а) транзисторы малой мощности
низкой частоты — от 101 до 199;
средней частоты — от 201 до 299,
высокой частоты — от 301 до 399;
- б) транзисторы средней мощности
низкой частоты — от 401 до 499,
средней частоты — от 501 до 599,
высокой частоты — от 601 до 699;
- в) транзисторы большой мощности
низкой частоты — от 701 до 799,
средней частоты — от 801 до 899,
высокой частоты — от 901 до 999.

Четвертый элемент обозначения — буква, указывающая разновидность типа данной разработки приборов.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ

ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ

Вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 5. В прямом направлении через диод может протекать большой ток, и он представляет собой малое сопротивление.

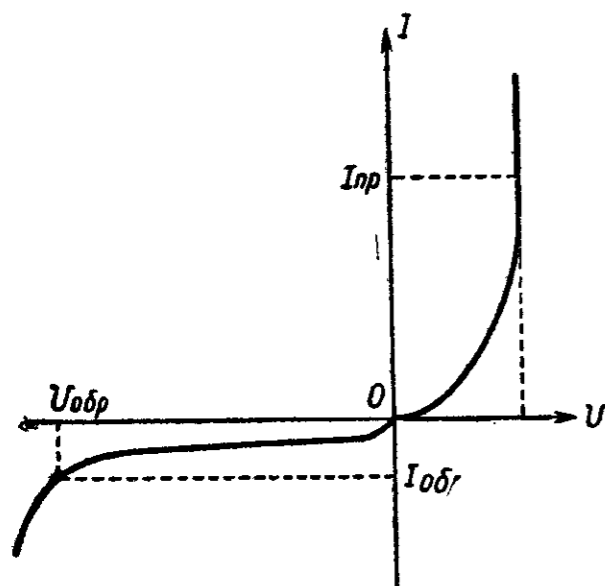


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика диода.

В обратном направлении сопротивление диода велико.

Величину падения напряжения на диоде при протекании через него постоянного прямого тока $I_{пр}$ характеризует параметр $U_{пр}$. Приложенное к диоду постоянное обратное напряжение $U_{обр}$ вызывает протекание постоянного обратного тока $I_{обр}$. Величины обратного напряжения $U_{обр}$ для разных диодов лежат в широком диапа-

зоне от десятков до нескольких сотен вольт. В прямом направлении через мощные диоды могут протекать токи в несколько десятков ампер при прямых напряжениях около 1 в.

Для расчета ряда характеристик необходимо знать дифференциальное сопротивление диода R_d — отношение приращения прямого напряжения на диоде к вызванному им малому приращению тока.

Важным параметром диода является диапазон его рабочих частот Δf (или максимальная частота f_{\max}). Если частота приложенного к диоду переменного напряжения превышает f_{\max} , потери в диоде резко растут и он разогревается.

Диод характеризуется также емкостью C_d , измеряемой между его выводами.

Емкость измеряется при определенном напряжении смещения, указываемом в справочных материалах. Ве-

личина емкости диода влияет на его работу на высокой частоте. Для высокочастотных диодов этот параметр является основным.

Предельный режим диода характеризуется следующими параметрами: $I_{пр. \max}$ — максимальная (предельная) величина постоянного прямого тока через диод; $U_{обр. \max}$ — максимальная (предельная) величина обратного напряжения любой формы и периодичности.

Кроме указанных общих параметров, диоды каждого класса характеризуются еще специфическими параметрами.

Параметры выпрямительных диодов

Выпрямительные диоды предназначены для использования в разнообразных выпрямительных схемах.

Для того чтобы получить высокий коэффициент полезного действия выпрямителя, падение напряжения на диоде при протекании прямого тока должно быть минимальным.

При работе диода в выпрямительном режиме указывается среднее за период значение прямого тока $I_{пр. ср}$ или величина выпрямленного тока $I_{выпр}$. Падение напряжения на диоде при этом характеризуется величиной $U_{пр. ср}$ — средним за период значением прямого напряжения.

Если выпрямитель работает на емкостную нагрузку, мгновенное значение прямого тока может значительно превышать среднее значение тока. Следует помнить, что работа диода на емкостную нагрузку является поэтому наиболее тяжелым режимом работы диода в схеме выпрямителя. Это необходимо учитывать как при выборе схемы выпрямителя, так и при выборе типа диода.

Для характеристики этого режима работы используется параметр $I_{пр. пер. \max}$ — максимальное (предельное) мгновенное значение периодического прямого тока.

Работа диодов в выпрямителе характеризуется также величинами: $U_{обр. ср}$ — среднее за период значение обратного напряжения; $I_{обр. ср}$ — среднее за период значение обратного тока.

Следует учитывать, что при работе диода в схеме выпрямителя в зависимости от схемы и типа нагрузки пиковое значение обратного напряжения может

в 1,57—3,14 раза превышать значение $U_{обр. ср.}$ Пиковое значение обратного напряжения не должно при этом превышать максимального (предельного) значения.

Параметры высокочастотных диодов

Высокочастотные диоды являются приборами универсального назначения. Они могут быть использованы для выпрямления токов в широком диапазоне частот (до нескольких сотен мегагерц) для модуляции, детектирования и других нелинейных преобразований электрических сигналов.

Свойства этих диодов характеризуются теми же общими параметрами, но диапазон их рабочих частот Δf гораздо больше, чем у обычных выпрямительных диодов.

Параметры импульсных диодов

Импульсные диоды предназначены для использования их в качестве ключевых элементов в схемах при малых длительностях импульсов и переходных процессов (микросекунды и доли микросекунд).

При коротких рабочих импульсах необходимо учитывать инерционность процессов включения и выключения диодов. После включения прямого тока (рис. 6) напряжение на диоде устанавливается не мгновенно, а в течение определенного времени.

Интервал времени $\tau_{уст}$ от начала импульса прямого тока до того момента, когда напряжение на диоде упадет до 1,2 установившейся величины, называется временем установления прямого сопротивления диода.

Отношение величины $U_{пр. имп. макс}$ — максимального импульсного прямого напряжения на диоде к величине импульса прямого тока $I_{пр. имп}$ — называется максимальным импульсным сопротивлением $R_{имп. макс}$ диода.

Если на диод, через который протекает прямой ток, подать обратное напряжение, диод запирается также не мгновенно, а в течение некоторого времени (рис. 7).

При протекании прямого тока в базе диода накапливается заряд. При подаче запирающего напряжения этот заряд рассасывается и вызывает протекание импульса

обратного тока, который может во много раз превышать установившуюся величину обратного тока.

Отрезок времени $\tau_{восст}$ от момента, когда ток через диод равен нулю, до момента, когда обратный ток уменьшится до заданного уровня, называется временем восстановления обратного сопротивления диода.

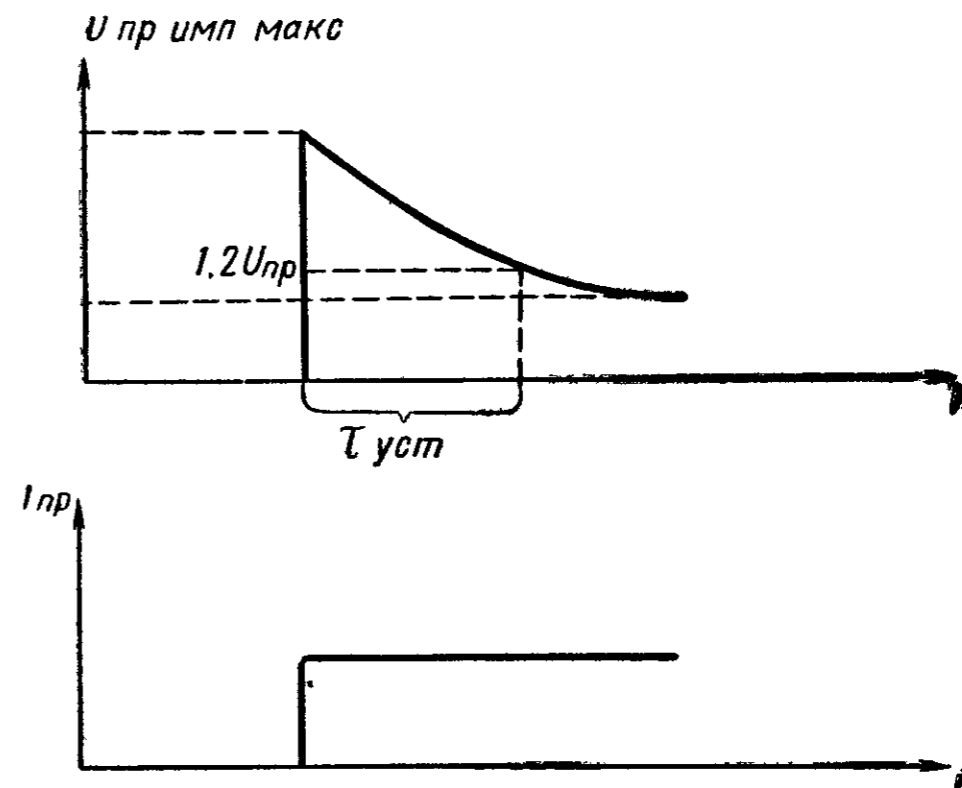


Рис. 6. Время установления прямого сопротивления диода.

Импульсные диоды, как правило, характеризуются, кроме того, малой величиной емкости C_d , измеряемой как емкость между выводами диода при заданном напряжении смещения.

Для импульсных диодов указываются также величины постоянного прямого напряжения $U_{пр}$ при протекании постоянного тока $I_{пр}$ и величина обратного тока $I_{обр}$ при заданной величине обратного напряжения $U_{обр}$.

Предельные режимы определяются величиной $U_{обр. макс}$ — максимального (предельного) обратного напряжения на диоде любой формы и периодичности — и величиной $I_{пр. макс}$ — максимального (предельного) прямого постоянного или импульсного тока при длительной работе.

Параметры опорных диодов

Опорные диоды предназначены для стабилизации уровня напряжения в схеме при изменении величины протекающего через диод тока в широких пределах.

В опорных диодах рабочим является пробойный участок вольт-амперной характеристики при обратном напряжении.

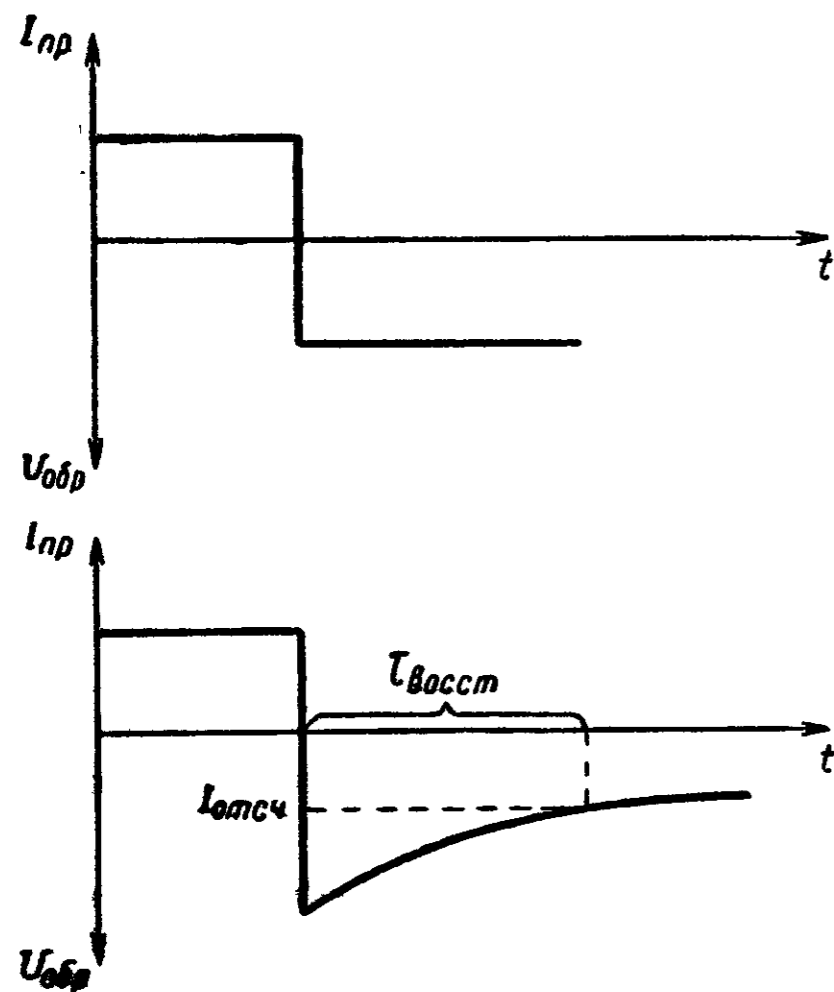


Рис. 7. Время восстановления обратного сопротивления диода.

Основной параметр опорного диода — напряжение стабилизации в рабочей области, где большому изменению тока через диод соответствует относительно малое изменение напряжения. Для опорного диода указывается также минимальный ток стабилизации, при котором гарантируется номинальная величина дифференциального сопротивления. Вольт-амперная характеристика опорного диода приведена на рис. 8.

Важным параметром является величина ТКН — температурного коэффициента напряжения стабилизации, т. е. величина отношения относительного изменения напряжения к абсолютному изменению температуры окружающей среды. Величина ТКН выражается в процентах на градус Цельсия.

Для опорных диодов указываются также максимальный (предельный) ток $I_{ст. макс}$ через диод и максимальная (предельная) мощность $P_{расс}$, рассеиваемая диодом.

Параметры переключающих (четырёхслойных) диодов

Переключающие диоды (неуправляемые и управляемые) предназначены для использования в качестве ключевых элементов в схемах автоматики и других устройствах.

Вольт-амперная характеристика переключающего неуправляемого диода схематически изображена на рис. 9. Участок ОА соответствует выключенному состоянию диода. Через него протекает ток утечки $I_{ут}$, величина которого указывается для определенного напряжения. Вблизи точки А ток через диод резко растет при небольшом увеличении напряжения. Напряжение и ток, соответствующие точке А характеристики, называются соответственно напряжением переключения $U_{пер}$ и током переключения $I_{пер}$. Дифференциальное сопротивление диода в точке А становится равным нулю.

На участке АВ дифференциальное сопротивление диода имеет отрицательный знак. Этот участок соответствует неустойчивому положению рабочей точки, если последовательно с диодом включено малое сопротивление нагрузки (или емкость). При таких условиях рабо-

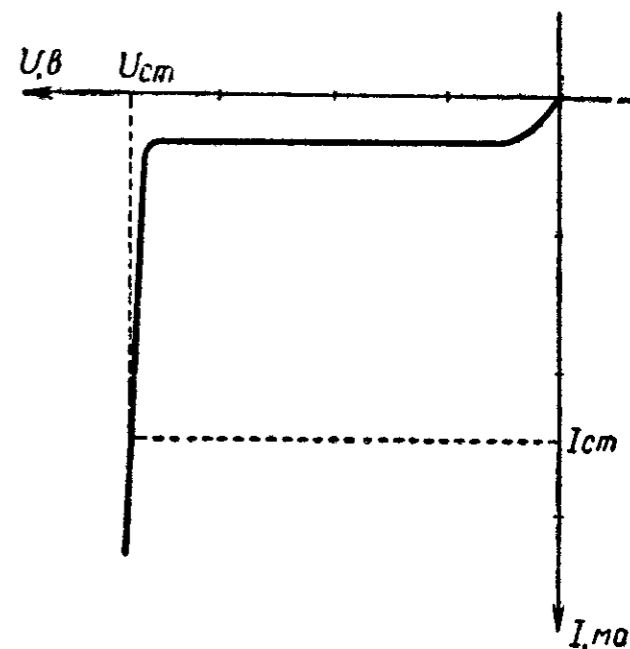


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика опорного диода.

чая точка быстро перемещается на участок характеристики BV , соответствующий включенному состоянию диода. На этом участке дифференциальное сопротивление диода снова положительно. Падение напряжения на диоде $U_{ост}$ при заданной величине тока на данном участке мало.

Для того чтобы поддерживать диод во включенном состоянии, через него должен проходить минимальный ток не менее $I_{выкл}$ — (точка Б) тока выключения.

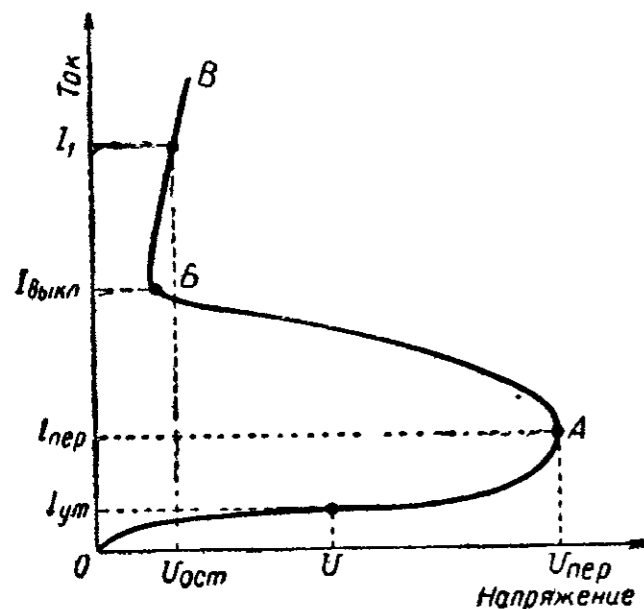


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика переключающего диода.

В отличие от неуправляемых диодов, у которых величина $U_{пер}$ постоянна, напряжение переключения управляемых диодов может изменяться (уменьшаться) при подаче сигнала между специальным управляющим электродом и эмиттером.

Инерционность процессов включения и выключения

диода при подаче на него импульсов напряжения характеризуется временем включения $\tau_{вкл}$ и временем выключения $\tau_{выкл}$.

Время включения — это интервал времени с момента подачи отпирающего импульса, в течение которого напряжение на диоде уменьшается до заданного уровня. Время выключения — минимальный интервал времени, в течение которого на диод должно подаваться запирающее напряжение, выключающее диод.

Емкость переключающего диода C_d измеряется при нулевом напряжении смещения.

Для диода указывается максимальная (предельная) величина импульсного прямого тока $I_{пр. нм. макс}$ при заданной длительности импульса.

Параметры варикапов

Величина емкости p — n -перехода диода зависит от приложенного напряжения. С увеличением обратного напряжения эта емкость уменьшается.

Варикап — это специально сконструированный диод, емкость которого можно менять в широких пределах. Качество емкости характеризуется величиной добротности Q — отношением реактивного сопротивления к полному сопротивлению потерь диода на заданной частоте. За счет уменьшения утечек и величины последовательного сопротивления диода добротность емкости получается большой.

Основной параметр варикапа — величина номинальной емкости $C_{ном}$ при номинальном напряжении смещения. Кроме того, указываются значения максимальной $C_{макс}$ и минимальной $C_{мин}$ емкостей диода соответственно при минимально возможном, соответствующем минимально допустимому значению добротности, и максимальном (предельном) напряжениях смещения.

Стабильность работы варикапа характеризуется величиной ТКЕ — температурного коэффициента емкости — и ТКД — температурного коэффициента добротности.

Параметры туннельных диодов

Вольт-амперная характеристика туннельного диода показана на рис. 10. На характеристике имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Отрицательное сопротивление сохраняется вплоть до очень больших частот (сотни и тысячи мегагерц). Наличие отрицательного сопротивления позволяет использовать туннельные диоды в усилителях, генераторах синусоидальных и релаксационных колебаний, переключающих схемах.

Вольт-амперную характеристику туннельного диода характеризуют следующие параметры:

$I_{макс}$ — ток максимума — величина тока, соответствующая максимуму вольт-амперной характеристики;

$I_{мин}$ — ток минимума — величина тока, соответствующая минимуму характеристики;

$U_{(макс)}$ — напряжение максимума — напряжение на диоде при токе максимума;

Вольт-амперные характеристики транзисторов

Статические вольт-амперные характеристики транзисторов снимаются на постоянном токе по точкам или получаются с помощью специальных характериографов (обычно в виде семейства характеристик).

Статические характеристики могут использоваться для расчета цепей смещения, стабилизации режима, приближенного расчета усилителей низкой частоты и расчета конечных состояний ключевых схем (режима отсечки, режима насыщения).

Чаще всего используются два семейства характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером: входные (зависимость тока базы от напряжения база — эмиттер при фиксированных напряжениях на коллекторе) и выходные (зависимость тока коллектора от напряжения коллектор — эмиттер при фиксированных величинах тока базы). Примеры этих характеристик приведены на рис. 11 и 12 соответственно.

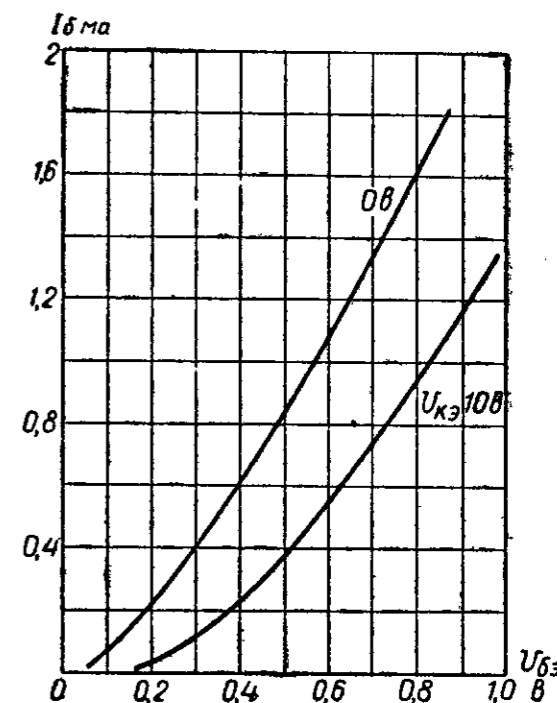


Рис. 11. Примерная входная вольт-амперная характеристика транзистора в схеме с общим эмиттером.

Параметры транзисторов по постоянному току

Параметры по постоянному току характеризуют величины неуправляемых токов через транзистор (связанных с обратными токами переходов). Эти параметры и их зависимость от температуры и приложенных напряжений используются для расчета режима транзисторов по постоянному току и стабильности этого режима. К этим параметрам относятся следующие:

$U_{(мин)}$ — напряжение минимума — напряжение на диоде при токе минимума;

U_n — наибольшее напряжение — напряжение на диоде при протекании тока, равного $I_{макс}$ ($U_n > U_{(мин)}$);

R — отрицательное сопротивление — минимальное значение дифференциального отрицательного сопротивления.

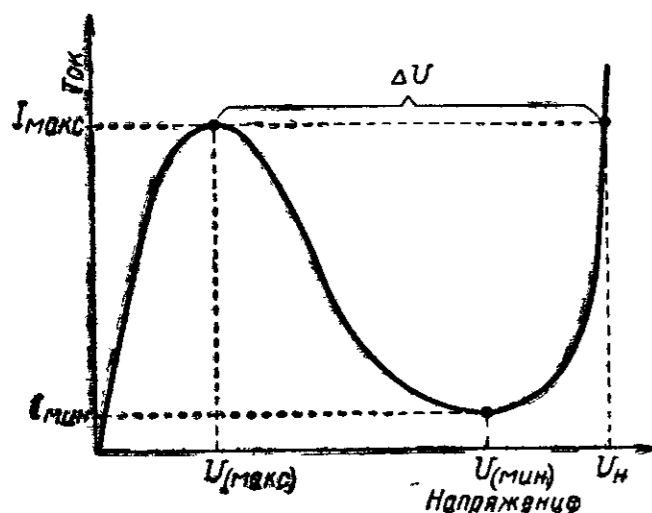


Рис. 10. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

Величина R в значительной степени зависит от напряжения на диоде;

ΔU — максимальное напряжение переключения, снимаемое с диода:

$$\Delta U = U_n - U_{(макс)}.$$

Частотные свойства диода, работающего на малых уровнях сигналов, можно описать, используя параметры

его эквивалентной схемы C_d , L_d , r . Здесь C_d — емкость диода при заданном напряжении смещения, L_d — суммарная индуктивность диода, r — суммарное сопротивление потерь в теле полупроводникового материала, контактах и выводах диода.

Максимальная частота $f_{макс}$, до которой активная составляющая полного сопротивления диода имеет отрицательный знак, что свидетельствует о возможности усиления и генерирования колебаний, равна:

$$f_{макс} = \frac{1}{2\pi RC_d} \sqrt{\frac{R}{r} - 1}.$$

Быстродействие переключающих схем с туннельными диодами характеризуется величиной $\tau_{пер}$ — временем переключения из состояния с напряжением на диоде, которое меньше пикового, в состояние с напряжением, которое больше $U_{(мин)}$.

Величина $\tau_{пед}$ зависит как от свойств самого диода, так и от параметров схемы. Время переключения тем меньше, чем меньше величина отношения $C_d/I_{макс}$.

— обратный ток коллекторного перехода $I_{кб}$ — ток через переход коллектор — база при отключенном эмиттере и заданном напряжении на коллекторе;

— обратный ток эмиттерного перехода $I_{бо}$ — ток через переход эмиттер — база при отключенном коллекторе и заданном напряжении на эмиттере;

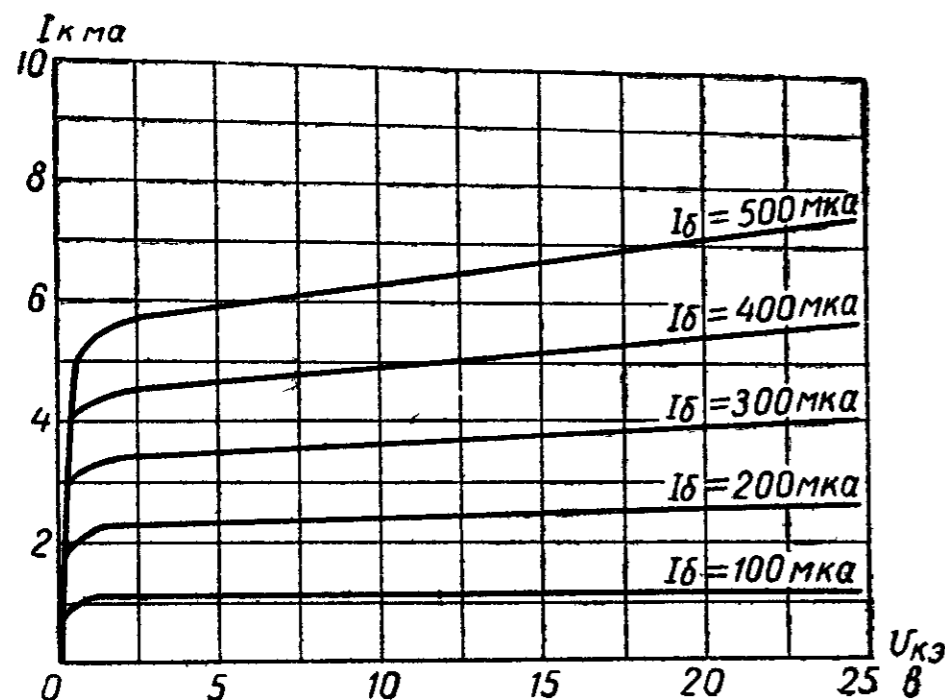


Рис. 12 Семейство примерных выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.

— начальный ток коллектора $I_{кн}$ — ток в цепи коллектора при замкнутых между собой эмиттере и базой и заданном напряжении на коллекторе. В некоторых случаях указывается величина начального тока коллектора при включении между базой и эмиттером активного сопротивления определенной величины;

— ток коллектора запертого транзистора $I_{кз}$ — ток коллектора при запертом (т. е. смещенном в обратном направлении) эмиттерном переходе и заданных напряжениях на эмиттере и коллекторе.

Параметры транзисторов на малых сигналах

Параметры транзисторов на малых сигналах (параметры, измеряемые с помощью сигнала малой амплитуды) характеризуют работу транзисторов в усилительных

схемах. Эти параметры являются дифференциальными. Переменные токи и напряжения в электродах транзисторов при измерениях этих параметров должны быть малыми по сравнению с постоянными токами и напряжениями, определяющими выбор начальной рабочей точки (выбор начального смещения). Сигнал считается малым, если при изменении переменного тока (или напряжения) в два раза величина измеряемого параметра остается практически неизменной в пределах точности измерений.

Поскольку транзисторы имеют резко выраженные нелинейные свойства, величины параметров малого сигнала в определенной степени зависят от выбора начального смещения, выбора режима измерений.

Основными параметрами на малых сигналах являются следующие:

а) параметры транзистора как линейного четырехполюсника.

Эти параметры устанавливают связь между переменными напряжениями и токами на входе и выходе транзистора, представленного в виде линейного четырехполюсника. Наиболее широко используются параметры системы h (h -параметры).

Уравнения четырехполюсника в этой системе имеют вид:

$$U_1 = h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2;$$

$$I_2 = h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2;$$

где I_1 , U_1 , I_2 , U_2 — ток и напряжение на входе и выходе, соответственно.

Если осуществить режим короткого замыкания по переменному току на выходе ($U_2 = 0$) или холостого хода на входе ($I_1 = 0$), то приходим к следующим определениям h -параметров.

Входное сопротивление — h_{11} — отношение напряжения на входе к вызванному им изменению входного тока при условии короткого замыкания по переменному току в выходной цепи. Коэффициент обратной связи по напряжению — h_{12} — отношение изменения напряжения на входе к вызвавшему его приращению напряжения на выходе при условии холостого хода по переменному току на входе.

Выходная проводимость — h_{22} — отношение измене-

ния выходного тока к вызвавшему его изменению выходного напряжения при условии холостого хода по переменному току на входе.

Коэффициент усиления по току — h_{21} — отношение изменения выходного тока к вызвавшему его приращению входного тока при условии короткого замыкания в выходной цепи.

В зависимости от схемы включения к цифровым индексам добавляется буквенный, например:

$h_{21б}$ — коэффициент усиления по току в схеме с общей базой;

$h_{21э}$ — коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером;

$h_{21к}$ — коэффициент усиления по току в схеме с общим коллектором.

Применяются и другие символы для обозначения важнейших параметров малого сигнала, а именно коэффициента усиления по току: для схемы включения транзистора с общей базой α и с общим эмиттером β (под коэффициентом усиления по току понимается отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению входного тока при условии короткого замыкания в выходной цепи).

Соотношение между коэффициентами усиления по току имеет следующий вид:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad \alpha = h_{21б}.$$

Величины h -параметров измеряются, как правило, на низкой частоте (50—1 000 гц) и используются при расчетах низкочастотных усилителей.

На высокой частоте коэффициенты усиления по току становятся комплексными величинами (так же, как и другие параметры), что означает появление фазового сдвига между токами и напряжениями на входе и выходе. Поэтому усилительные свойства транзисторов на высокой частоте характеризуются величиной модуля коэффициента усиления по току $|\alpha|$ или $|\beta|$.

б) Предельная частота усиления по току — f_α — частота, на которой величина $|\alpha|$ уменьшается на 3 дб по сравнению с величиной α_0 , измеренной на низкой частоте. Если частота f_α велика (свыше 20—30 Мгц), непосредственные измерения $|\alpha|$ на ней затруднительны,

В этом случае проще измерить величину модуля $|\beta|$ и пользоваться соотношением:

$$f_\alpha = m |\beta| f,$$

где f — частота, на которой производится измерение величины модуля β ; m примерно равно 1,2 для бездрейфовых транзисторов и 1,6 для большинства дрейфовых транзисторов (обычные сплавные транзисторы — бездрейфовые, изготовленные способом диффузии — дрейфовые).

в) Емкость коллекторного перехода C_k — емкость, измеренная между коллекторным и базовым выводами транзистора при отключенном эмиттере и коллекторе, смещенном в обратном направлении.

г) Емкость эмиттерного перехода C_ϵ — емкость, измеренная между выводами эмиттера и базы при отключенном коллекторе и эмиттере, смещенном в обратном направлении. Величины емкостей C_k и C_ϵ зависят от приложенного напряжения.

д) На высокой частоте усилительные свойства транзистора ухудшаются вследствие действия цепи обратной связи $r'_6 C_k$. Постоянная времени цепи обратной связи на высокой частоте $r'_6 C_k$ — это произведение величины высокочастотного сопротивления базы на величину емкости коллектора.

Возникновение обратной связи в транзисторе на высокой частоте иллюстрируется рис. 13. Ток обратной связи $i_{ос}$ создает на сопротивлении r'_6 падение напряжения обратной связи $U_{ос}$:

$$U_{ос} = i_{ос} \cdot r'_6 \simeq U_{вых} \omega(r'_6 C_k).$$

Отсюда видно, что величина обратной связи пропорциональна произведению $r'_6 C_k$. Эта внутренняя обратная связь может приводить к снижению усиления, самовозбуждению усилителей, искажению частотных характеристик и другим нежелательным явлениям.

е) Максимальная частота генерации f_{\max} — наибольшая частота автоколебаний, достижимая в генераторе на транзисторе данного типа.

С достаточной точностью можно считать, что f_{\max} — частота, на которой коэффициент усиления транзистора по мощности равен единице.

Частота $f_{\text{макс}}$ связана с другими параметрами малого сигнала соотношением:

$$f_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{f_a}{30r'_6C_k}}.$$

ж) Коэффициент шума $F_{\text{ш}}$ — отношение полной мощности шумов на выходе транзистора к той ее части, которая вызвана тепловыми шумами сопротивления источника сигнала. Коэффициент шума выражается в децибеллах. Его величина дается для определенного частотного диапазона и зависит от частоты измерения.

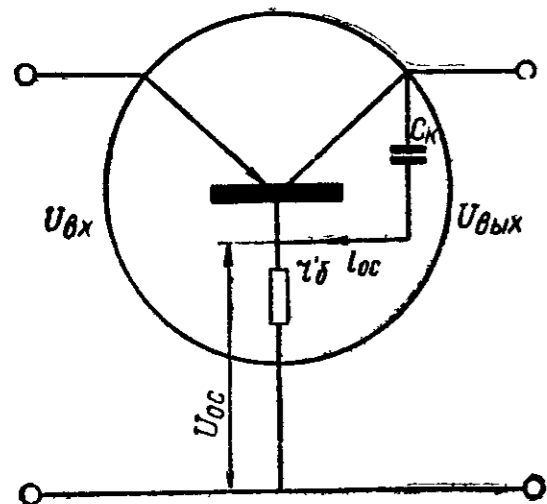


Рис. 13. Действие цепи обратной связи $r_6 C_k$ транзистора на выходной частоте.

Максимальное значение коэффициента шума наблюдается обычно на самых низких частотах (единицы и десятки герц). С ростом частоты коэффициент шума резко падает и достигает минимального значения на частотах 1000—5000 гц. С дальнейшим ростом частоты коэффициент шума медленно возрастает практически до предельных частот усиления. За пределами этого диапазона начинается область быстрого возрастания шумов.

Обычно минимальная величина $F_{\text{ш}}$ соответствует малым токам коллектора (0,1—0,5 ма) и малым коллекторным напряжениям (0,5—1,5 в).

Шумы резко увеличиваются при повышении температуры.

Приводимые в справочниках величины $F_{\text{ш}}$ относятся к оптимальному внутреннему сопротивлению источника сигнала и режиму работы, которые и следует использовать при расчете усилителей с малыми шумами.

Параметры транзисторов на больших сигналах

Параметры на больших сигналах характеризуют работу транзисторов в таких режимах, при которых токи и напряжения между выводами транзистора меняются

в широких пределах. Эти параметры необходимы для расчета ключевых схем, предоконечных и оконечных усилителей низкой и высокой частоты, автогенераторов. К параметрам на больших сигналах относятся:

а) Статический коэффициент усиления по току $B_{\text{ст}}$ (иногда обозначается B):

$$B_{\text{ст}} = \frac{I_k - I_{\text{ко}}}{I_6 + I_{\text{ко}}}.$$

Обычно величина $B_{\text{ст}}$ измеряется в режимах, при которых $I_k \gg I_{\text{ко}}$ и $I_6 \gg I_{\text{ко}}$, следовательно:

$$B_{\text{ст}} = \frac{I_k}{I_6}.$$

б) Статическая крутизна прямой передачи $S_{\text{ст}}$ — отношение постоянного тока коллектора к постоянному напряжению на входе транзистора.

Для схемы с общим эмиттером

$$S_{\text{ст}} = \frac{I_k}{U_6};$$

здесь U_6 — напряжение на базе.

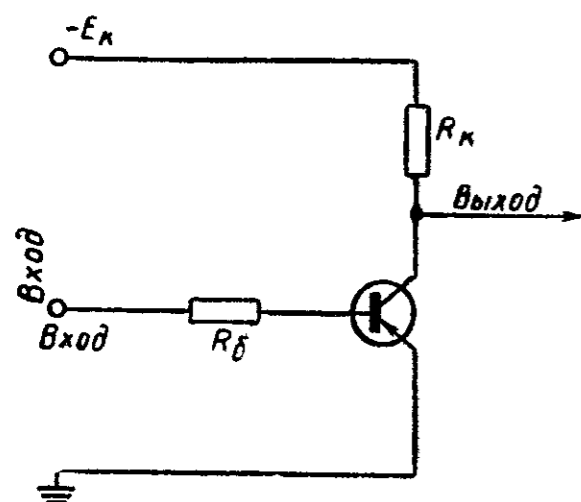
Параметр $S_{\text{ст}}$ используется для транзисторов средней и большой мощности, работающих в таких схемах, где источник входного сигнала имеет малое внутреннее сопротивление, т. е. представляет собой генератор напряжения, а не генератор тока.

в) Напряжение между коллектором и эмиттером транзистора в режиме насыщения $U_{\text{кн}}$. Напряжение $U_{\text{кн}}$ измеряется при определенных величинах коллекторного и базового токов или при определенной глубине насыщения. Глубина насыщения — отношение прямого тока базы к величине тока базы, при котором транзистор находится на границе насыщения. На границе насыщения напряжение между коллектором и базой равно нулю.

г) Напряжение между базой и эмиттером транзистора в режиме насыщения $U_{\text{бн}}$.

д) Время рассасывания τ_p — интервал времени между моментом подачи на базу транзистора запирающего импульса и моментом, когда напряжение на коллекторе достигает уровня 0,1 E_k , где E_k — напряжение питания коллекторной цепи.

Величина времени рассасывания зависит от глубины насыщения транзистора и измеряется при определенных величинах коллекторного и базового токов. Очевидно, что время рассасывания ограничивает быстроедействие ключевых схем (триггеров, мультивибраторов, инверторов и т. д.), что наглядно иллюстрируется рис. 14 (выключение простого транзисторного ключа).



Интервал между соседними импульсами не может стать меньше величины $\tau_{\text{расс}}$. Величина $\tau_{\text{расс}}$ составляет обычно для маломощных транзисторов 0,3—2 мксек.

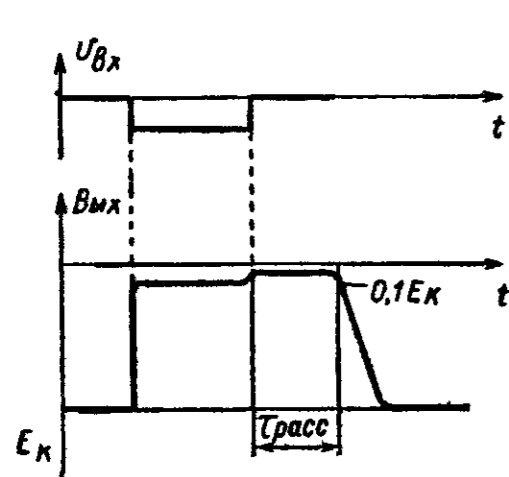


Рис. 14. Иллюстрация времени рассасывания при работе простого транзисторного ключа.

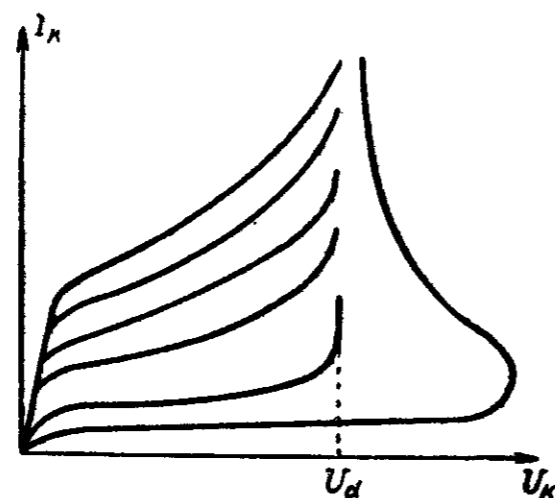


Рис. 15. Выходные вольт-амперные характеристики транзистора в полном диапазоне изменения коллекторного напряжения.

е) При увеличении напряжения на коллекторе величина коэффициента усиления по току α увеличивается. Это увеличение при малых напряжениях незначительно. Но при достаточно высоких напряжениях величина α обычно близка к единице и даже при небольшом увели-

чении она может сделаться равной единице и даже превышать ее. Это означает, что величина коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ может стать бесконечно большой. При этом в цепи коллектора транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, будет протекать очень большой, разрушающий прибор, ток. Вследствие этого напряжение на коллекторе открытого транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, ограничивается величиной напряжения U_{α} , при котором коэффициент усиления по току α становится равным единице (соответственно β обращается в бесконечность).

При напряжениях коллектор — эмиттер, близких к U_{α} , ток коллектора сильно растет при небольшом увеличении напряжения. Выходная вольт-амперная характеристика при напряжении, близком к U_{α} , резко изгибается вверх (рис. 15).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРИБОРАМИ ВЫБОР ТИПА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА

Выбор полупроводниковых приборов является основной задачей при построении схемы. Именно поэтому при выборе типа полупроводникового прибора для применения в каждой конкретной схеме необходимо учитывать его целевое назначение и стоимость. В конкретную схему следует закладывать именно те полупроводниковые приборы, которые для таких схем предназначены. В частности, в усилительных схемах следует использовать те полупроводниковые приборы, для которых гарантируются требуемые параметры малого сигнала. В противном случае стоимость аппаратуры окажется очень высокой и не будет обеспечена взаимозаменяемость полупроводниковых приборов. Действительно, усилитель низкой частоты на транзисторе П16Б (специальный импульсный прибор) работает не лучше, чем на транзисторе П13, а стоимость транзистора П16Б значительно выше.

Для низкочастотных схем (УНЧ приемников, усилителей записи и воспроизведения магнитофонов и т. п.)

рекомендуются следующие полупроводниковые приборы: ПЗ6 (П9А), ПЗ7А (П10А), ПЗ7Б (П10Б), ПЗ9Б (П13Б), П40 (П14), П40А (П14А), П40Б, (П14Б) П41 (П15), П41А (П15А), П42А (П16А), П42Б (П16Б), ГТ108А-Г, ГТ109А-И (в скобках указано обозначение приборов с аналогичными параметрами).

В высокочастотных схемах (УВЧ каскады и гетеродины приемников и т. п.) рекомендуются полупроводниковые приборы: П422, П422А (П402), П423, П423А (П403), ГТ309А-Е, ГТ310А-Е, ГТ313А-В.

Не рекомендуется использовать высокочастотный прибор там, где может работать низкочастотный. Высокочастотные приборы, как правило, очень чувствительны к перегрузкам, усилительные схемы на них подвержены самовозбуждению. Так, например, в приемниках длинноволнового и средневолнового диапазонов можно использовать транзисторы типа П422, П422А, ГТ309В-Е, ГТ310Д-Е.

Частотный предел транзисторов П423, ГТ309А, Б, ГТ310А-Г выше полосы частот ДВ и СВ диапазонов и применение их в этих схемах приводит к неоправданным затратам. Для коротковолнового диапазона радиовещательных приемников можно рекомендовать транзисторы типов П423, ГТ309А, Б, ГТ310В, Г, а для УКВ диапазона транзисторы ГТ310А, Б, ГТ313А-В.

Импульсные схемы рекомендуется проектировать на специально разработанных для этого импульсных приборах, например П42 (П16), П42А (П16А), П42Б (П16Б). Для мощных усилителей НЧ, преобразователей и стабилизаторов можно использовать транзисторы типов П201—203, П4А-Д, П210. Для видеоусилителей телевизоров предназначены транзисторы КТ-601А, для строчной развертки — КТ-802А. Все полупроводниковые приборы необходимо выбирать исходя из мощности рассеяния. Для маломощных схем, работающих на малых коллекторных токах, необходимо выбирать маломощные транзисторы. Применение мощного транзистора в этом случае приведет к неустойчивости работы схемы.

Полупроводниковые триоды представляют собой принципиально низковольтные приборы. Создание высоковольтных приборов связано с большими техническими трудностями и затратами. Применять высоко-

вольтные приборы следует лишь там, где это вызывается действительной необходимостью.

В качестве детекторов в цепях автоматической регулировки усиления (АРУ) приемников, в качестве видеодетекторов и восстановителей постоянной составляющей в телевизорах, в маломощных выпрямителях и т. п. могут применяться диоды: Д2А, Б, В, Г, Д, Е, И; Д9А-К; Д10, Д101, Д101А, Д102, Д103, Д103А, Д104, Д105, Д105А, Д106, Д106А, в выпрямителях промышленной частоты — Д202, Д203, Д204, Д205, Д7А-Ж, Д226ГД.

При конструировании мощных выпрямителей необходимо выбирать диоды из следующей серии: Д244, Д244А, Д244Б, Д242, Д242А, Д242Б, Д243, Д243А, Д243Б, руководствуясь справочными данными и требованиями схемы. Не рекомендуется ставить в маломощные выпрямители мощные диоды с большим обратным током. Это ведет к температурной неустойчивости выпрямителя, росту пульсаций, а также к удорожанию конструкции. В импульсных устройствах рекомендуется использовать специально разработанный для массового применения импульсный диод Д20.

В качестве диодов опорного напряжения применяются стабилитроны типов Д808—Д813.

Условия применения диодов и транзисторов (температура, давление, влажность, ударные и вибрационные нагрузки и т. д.) должны соответствовать требованиям, предусмотренным техническими условиями и указанным в справочных данных.

Если требования на радиоэлектронную аппаратуру в целом более жесткие, чем это допустимо для полупроводниковых приборов, следует создавать необходимые условия для них внутри отдельных блоков аппаратуры.

Отбор и сортировка полупроводниковых приборов на группы по требованиям и нормам параметров, не предусмотренным в справочных данных, приводят к снижению надежности аппаратуры, повышению трудоемкости ее изготовления и себестоимости и практически исключают возможность ее ремонта. Например, схема, рассчитанная на работу с транзистором типа П15 с $\beta = 50-60$ (а гарантируется для П15 величина β в интервале 30—60), имеет низкую надежность. Ремонт такой схемы или ее массовое производство может оказаться невозможным.

Добавление же еще одного недорогого транзистора и введение глубоких отрицательных связей позволяет получить более надежную схему, работоспособную с любыми транзисторами типа П15.

РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Процесс изготовления современных диодов и транзисторов включает в себя комплекс сложнейших технологических операций, термическую и механическую обработку деталей и узлов

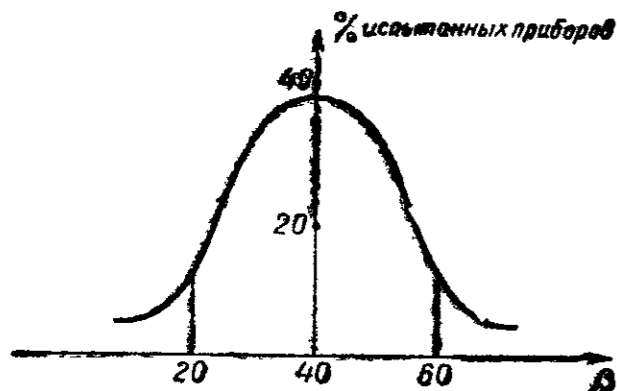


Рис. 16. Кривая распределения транзисторов по параметру β .

и максимальной величинами, указываемыми в справочных материалах.

Некоторые параметры имеют одностороннее минимальное или максимальное ограничение. Вследствие этого разработку и проектирование схем на диодах и транзисторах необходимо осуществлять таким образом, чтобы схема была работоспособной со всеми приборами выбранного типа, параметры которых лежат в интервале значений, оговоренном в справочнике.

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, РЕЖИМА РАБОТЫ И СРОКА СЛУЖБЫ

Значительная зависимость параметров от температуры является принципиальной особенностью полупроводниковых приборов, обусловленной физическими свойствами полупроводников. Величина обратного тока германиевого $p-n$ -перехода увеличивается примерно в 2 раза

при повышении температуры на каждые 10°C . Обратный ток кремниевых $p-n$ -переходов возрастает с температурой быстрее, чем обратный ток германиевых переходов. У кремниевых переходов при повышении температуры на 10°C обратный ток возрастает в 2,5 раза. При этом значительно (до нескольких раз) меняется коэффициент усиления по току β при изменении температуры в пределах рабочего диапазона.

Типичная зависимость β от температуры окружающей среды приведена на рис. 17. Следует отметить, что при температуре ниже $+40^\circ\text{C}$ усилительные свойства транзисторов изменяются незначительно.

При повышении температуры окружающей среды сверх $+40^\circ\text{C}$ коэффициент усиления по току β сильно возрастает. При понижении температуры, начиная от -10°C и ниже, величина β падает.

В соответствии с изменением параметров полупроводниковых приборов от температуры окружающей среды изменяются их входные и выходные характеристики. Типичные входные и выходные характеристики транзистора, включенного в схему с общим эмиттером, при различных температурах приведены на рис. 18 и 19.

Расчет схем необходимо производить с учетом максимальных возможных изменений основных параметров полупроводниковых приборов в рабочем диапазоне температуры.

Чем шире интервал значений параметров, на который рассчитана схема, тем более надежно она будет работать. При этом следует учитывать, что большинство параметров полупроводниковых приборов меняется в зависимости от режима работы. Типичная зависимость коэффициента усиления по току транзистора от величины тока эмиттера приведена на рис. 20. Коэффициент

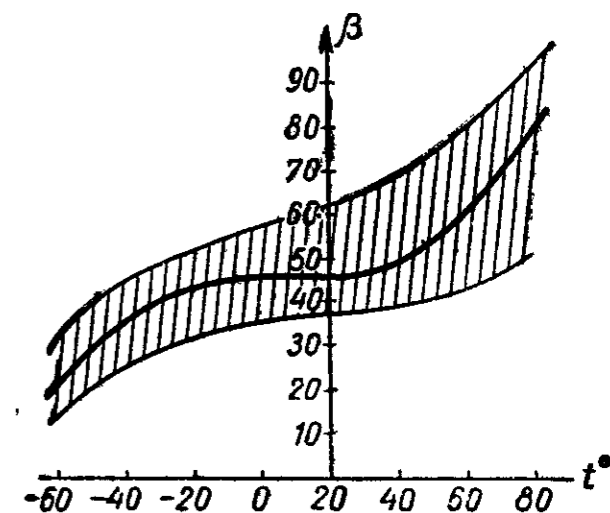


Рис. 17. Типичная зависимость β от температуры окружающей среды.

усиления наиболее существенно меняется в области малых токов, сравнимых с неуправляемыми обратными токами переходов.

Вследствие этого использование, например, мощных приборов при малых токах недопустимо, так как это ухудшает параметры схемы и снижает ее стабильность.

На рис. 21 приведены зависимости обратного тока коллекторного и эмиттерного переходов от напряжения на транзисторе при крайних значениях температурного диапазона.

Схемы на полупроводниковых приборах должны проектироваться с учетом возможности изменения (дрейфа) их параметров в процессе хранения и эксплуатации. Наиболее существенным фактором является дрейф обратных токов переходов и коэффициента усиления транзисторов.

Примерные кривые дрейфа обратного тока коллекторного перехода $I_{к0}$ и коэффициента усиления по току β приведены на рис. 22 и 23 соответственно.

В зависимости от типа приборов и способа их изготовления обратные токи переходов могут увеличиваться или уменьшаться в несколько раз; коэффициент усиления

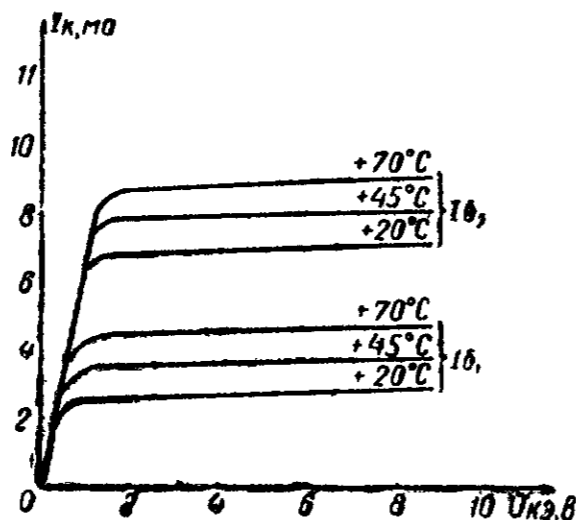


Рис. 19. Примерные выходные характеристики транзистора и их изменение при повышении температуры окружающей среды.

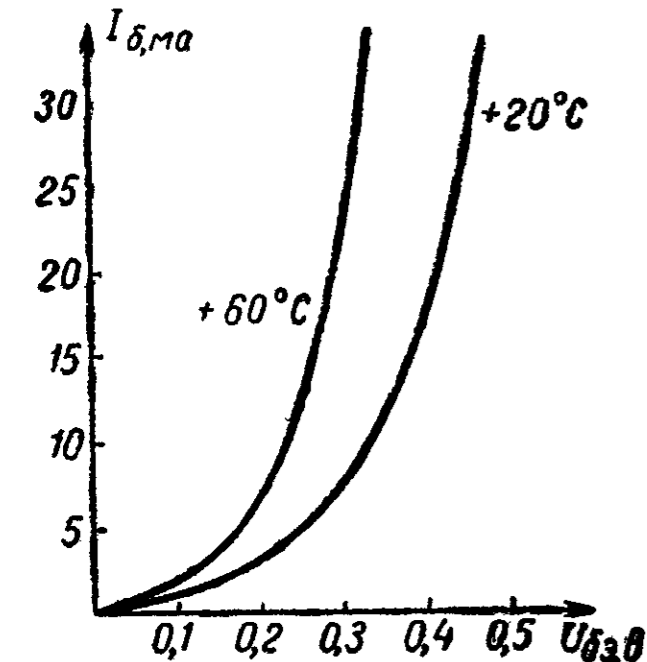


Рис. 18. Примерная входная характеристика транзистора в схеме с общим эмиттером при различных температурах окружающей среды.

транзисторов может увеличиваться или уменьшаться (обычно не более чем на +50%). Качество изготовления также оказывает значительное влияние на параметры приборов. Если герметичность корпусов полупроводниковых приборов нарушается в результате недопустимости механических нагрузок, то это приводит к попаданию влаги и других загрязнений внутрь корпуса прибора. Такие приборы будут иметь значительный дрейф параметров.

Процессы изменения параметров могут протекать достаточно медленно и не всегда могут быть своевременно обнаружены. В результате надежность аппаратуры будет существенно снижена. Тщательное соблюдение правил обращения с полупроводниковыми приборами при монтаже — гарантия их надежной работы.

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Наиболее удобным показателем для количественного выражения надежности полупроводниковых приборов является интенсивность отказов λ . Как известно, λ представляет собой отношение числа отказов полупроводниковых приборов в единицу времени к общему числу испытываемых приборов:

$$\lambda = \frac{n}{Nt},$$

где n — количество отказавших приборов;

N — общее количество испытываемых приборов;

t — время испытаний.

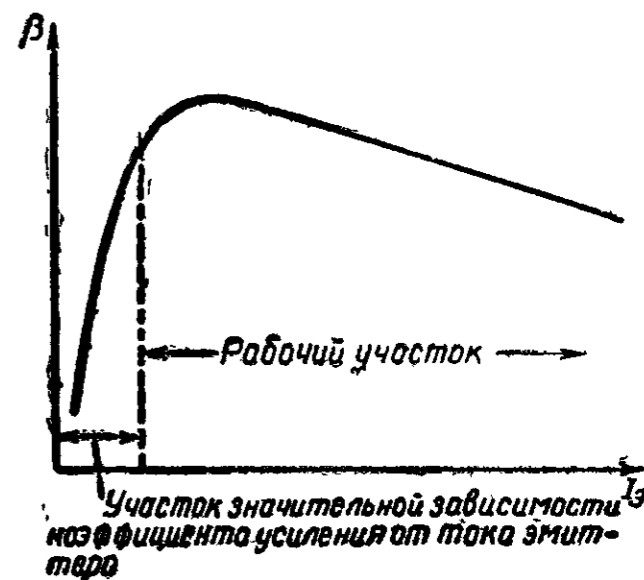


Рис. 20. Зависимость коэффициента усиления по току транзистора от величины тока эмиттера

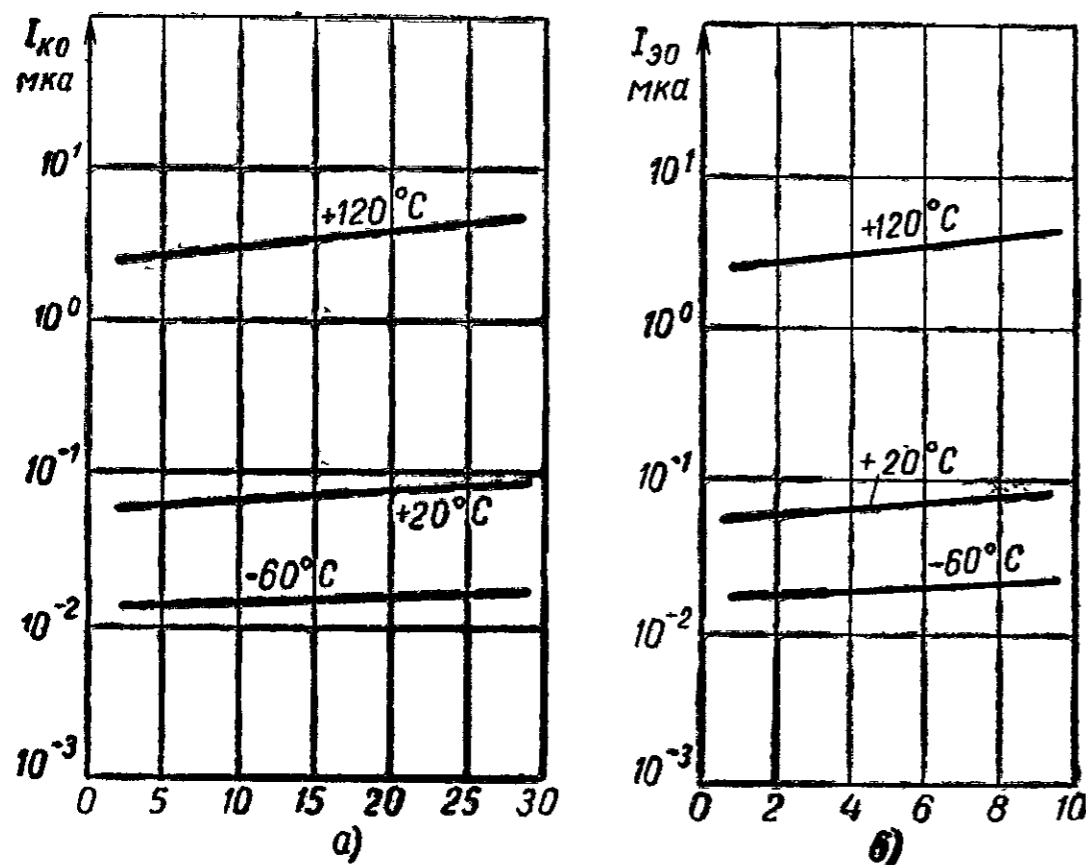


Рис. 21. Примерные зависимости обратного тока коллекторно-базы (а) и эмиттерного (б) переходов от напряжения для кремниевого транзистора при крайних значениях температур.

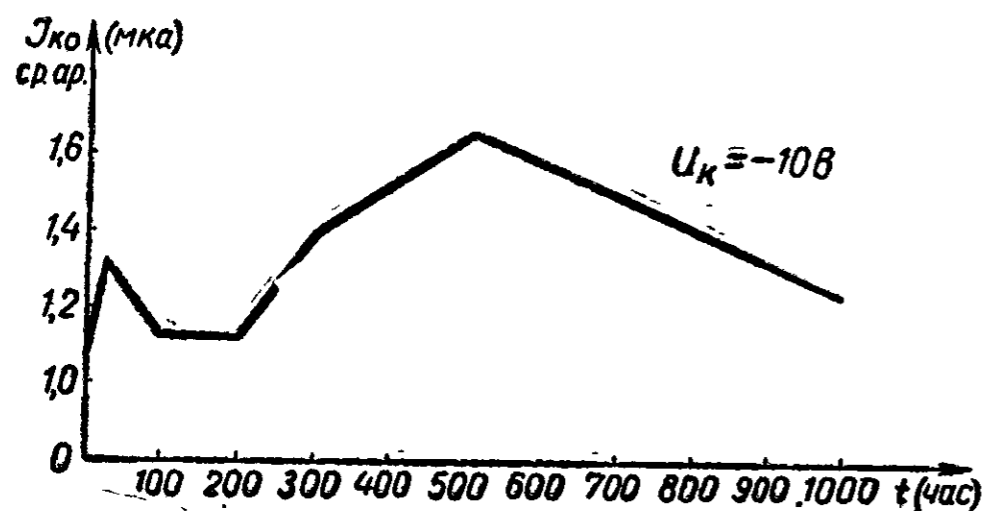


Рис. 22. Примерный дрейф обратного тока коллекторного перехода $I_{ко}$ со временем (усредненная характеристика на 100 транзисторов).

На практике λ задается величиной процента отказов на 1000 часов работы.

Под отказом обычно понимают такое изменение параметров полупроводникового прибора, которое приводит к нарушению нормальной работы схемы. Отказы для полупроводниковых приборов подразделяются на катастрофические (безусловные) и условные (постепенные).

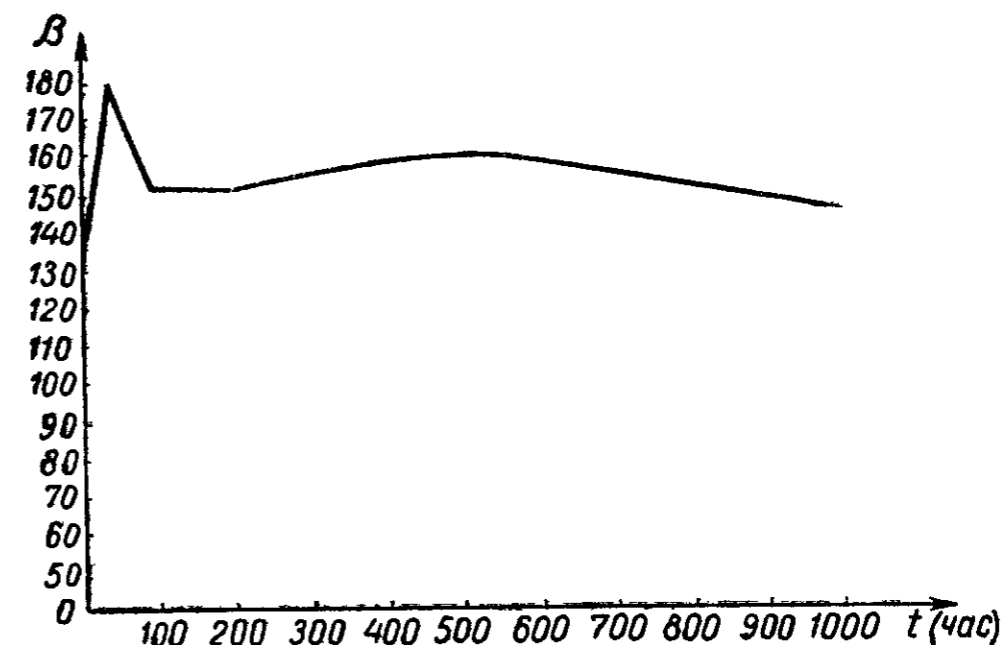


Рис. 23. Примерный дрейф коэффициента усиления по току β со временем.

Катастрофические (безусловные) отказы связаны с полной потерей работоспособности прибора и чаще всего происходят в результате обрывов или коротких замыканий внешних или внутренних выводов электродов и пробоя $p-n$ -переходов.

Условные отказы связаны с постепенным изменением параметров приборов во времени. За критерий условных отказов принимается изменение параметров (обычно коэффициента усиления по току и обратного тока коллекторного перехода) в определенное число раз сверх норм, предусмотренных техническими условиями.

При равенстве количества отказов (λ одинаково) надежность полупроводниковых приборов может быть различной в зависимости от принятых критериев отказов. Поэтому если надежность прибора, полученная при испытаниях на заводах-изготовителях и приведенная в справочных данных, определяется условными отказами,

то надежность прибора в эксплуатации может быть значительно выше надежности, полученной при испытаниях. Практика показывает, что эксплуатационная надежность приборов может быть в 100—1 000 раз больше, чем надежность приборов при испытаниях на заводах.

Высокая надежность работы полупроводниковых приборов достигается в первую очередь путем обеспечения

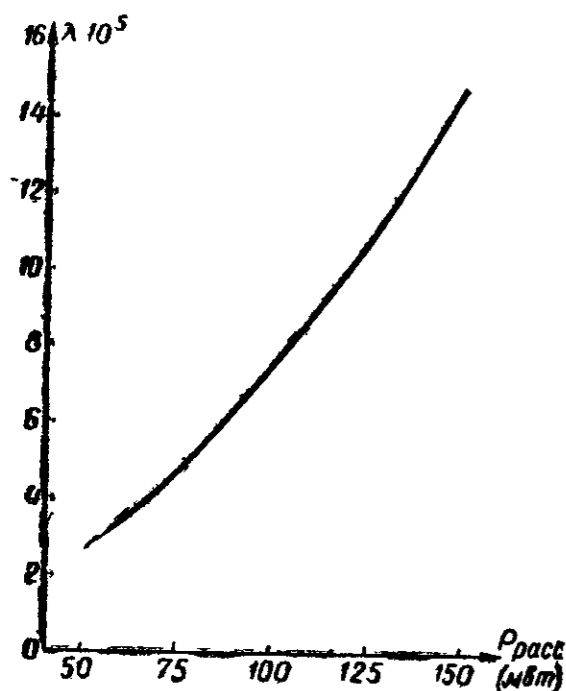


Рис. 24. Зависимость интенсивности отказов (λ) транзисторов от величины рассеиваемой мощности ($P_{\text{расс}}$).

при конструировании аппаратуры оптимальных условий их эксплуатации, стабильности температуры окружающей среды, отсутствия перегрева и механических перегрузок, строгого соблюдения правил монтажа при сборке аппаратуры.

Надежность работы обеспечивается также правильным выбором рабочих напряжений, токов и мощностей, которые должны быть существенно ниже их предельных величин. Примерная зависимость интенсивности отказов (λ) транзисторов от величины рассеиваемой мощности ($P_{\text{расс}}$) приведена на рис. 24,

откуда видно, что надежность работы полупроводникового прибора повышается с облегчением режима. Однако надежность определяется не только выбранным режимом, но и зависит от способа построения схемы. Если, например, схема спроектирована таким образом, что в цепи базы включено большое сопротивление, то такая схема будет ненадежна и нестабильна. Изменения температуры и напряжения источников питания, незначительный дрейф параметров транзистора неизбежно приведут к смещению рабочей точки транзистора, к заходу ее или в область насыщения, где появляются искажения, или в область пробоя. Если в схеме обеспечивается фиксация тока эмиттера (в цепи эмиттера вклю-

чено большое сопротивление), стабильность и надежность ее резко возрастут. Применяя обратные связи по постоянному току, цепочки термокомпенсации, ограничивающие ток сопротивления, защитные диоды и т. п., можно намного увеличить эксплуатационную надежность схемы и безотказную работу полупроводникового прибора в ней в течение длительного времени.

Выше было указано, что полупроводниковым приборам присущи изменения параметров в определенном интервале.

Ориентировочные интервалы изменения важнейших параметров полупроводниковых приборов приведены в табл. 3 приложения. Правильно сконструированная схема должна оставаться работоспособной при изменении параметров в указанном интервале.

Чем больше диапазон изменений параметров полупроводниковых приборов допускает данная схема, тем выше будет ее надежность.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ РАБОТЫ СХЕМ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРИБОРАМИ

При необходимости поддерживать величины параметров схем на полупроводниковых приборах в заданных пределах при изменяющихся условиях эксплуатации нужно принимать специальные меры по стабилизации условий работы диодов и транзисторов.

Как правило, стабилизация условий работы достигается ценой увеличения числа используемых в схеме транзисторов и диодов, повышенного расхода мощности питания, а следовательно, веса и габаритов аппаратуры. Однако достигаемая при этом высокая надежность аппаратуры может являться решающим фактором.

При расчете любой транзисторной схемы прежде всего необходимо обеспечить требуемую стабильность каскада по постоянному току. При расчетах обычно пользуются коэффициентом нестабильности S , который характеризует изменение коллекторного тока транзистора при изменении тока $I_{\text{к0}}$ вследствие изменения температуры или дрейфа во времени. Существуют две схемы питания транзистора по постоянному току: схема с одним общим источником питания (рис. 25) и схема с двумя отдельными источниками — эмиттерным и коллектор-

ным (рис. 26). Коэффициент неустойчивости S этих схем определяется по формуле:

$$S = 1 + \frac{\alpha R_0^1}{(1 - \alpha) R_0^1 + R_3^1},$$

где

$$R_0^1 = R_4 \left(1 + \frac{R_2}{R_4} + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right);$$

$$R_3^1 = R_3 \left(1 + \frac{R_3}{R_3} + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right).$$

Здесь α — коэффициент усиления по току в схеме с общей базой;

R_0^1 — приведенное сопротивление в цепи базы;

R_3^1 — приведенное сопротивление в цепи эмиттера.

Чем больше величина S , тем более неустойчива схема. Приравнявая нулю или бесконечности величины соответствующих сопротивлений (см. рис. 25, 26), можно получить любую из возможных схем питания транзистора и соответственно формулу для расчета коэффициента S . Из формул следует, что наличие сопротивления в цепи базы во всех случаях увеличивает неустойчивость схемы. Поэтому его нужно снижать до минимально возможной величины. Сопротивление в цепи эмиттера уменьшает неустойчивость за счет отрицательной обратной связи по току. Это сопротивление нужно обязательно включать в схему, а величина его должна быть возможно большей. Из всех схем включения транзистора с одним источником питания предпочтение необходимо отдавать комбинированной схеме с обратными связями по току и напряжению как наиболее стабильной (рис. 27). При питании транзисторного каскада от двух источников рекомендуется использовать схему, приведенную на рис. 28. При большом сопротивлении R_3 эта схема наиболее стабильна и коэффициент неустойчивости ее близок к единице.

В радиолюбительской практике приемлемой величиной нужно считать $S = 2 \div 5$. Лучшие результаты можно получить, включив термистор параллельно сопротивлению R_1 (см. рис. 26). Коэффициент неустойчивости S в этом случае может быть даже меньше единицы. В качестве температурно зависимого элемента может быть

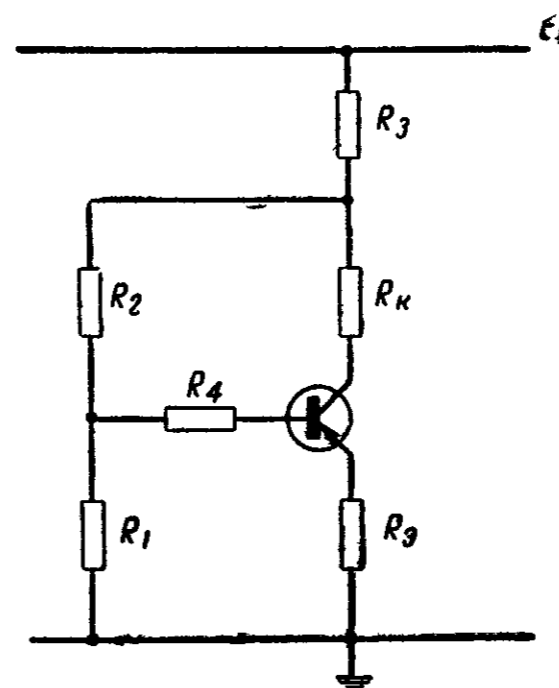


Рис. 25. Схема питания транзистора по постоянному току с одним общим источником питания.

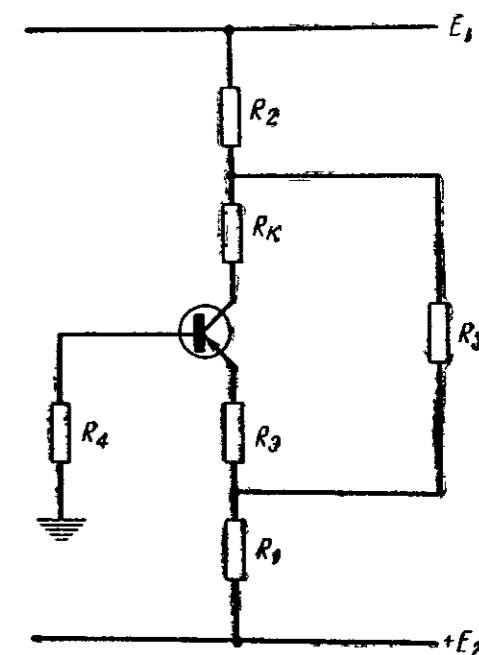


Рис. 26. Схема питания транзистора по постоянному току с двумя раздельными источниками — эмиттерным и коллекторным.

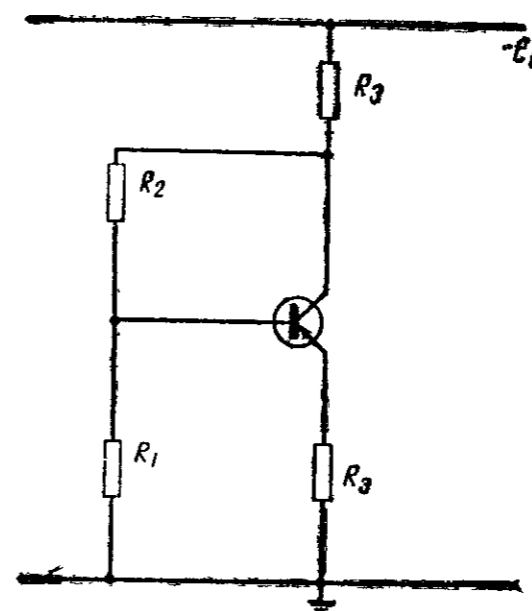


Рис. 27. Комбинированная схема питания транзистора с обратными связями по току и напряжению.

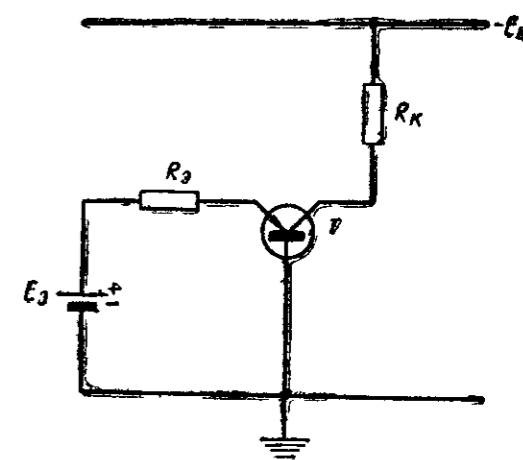


Рис. 28. Схема включения транзистора с общей базой и питанием от двух источников.

использован также и полупроводниковый диод, смещенный в обратном направлении. Коэффициент неустойчивости определяет уход рабочей точки при изменении температуры. Зная S и зависимость тока $I_{ко}$ от температуры ($\Delta I_{ко}$), можно найти изменение коллекторного тока ΔI_k , которое будет изменять падение напряжения на нагрузке коллектора:

$$\Delta U_k = \Delta I_k (R_k + R_s).$$

Таким образом, при изменении температуры рабочая точка (I_k , U_k) смещается ($I_k + \Delta I_k$, $U_k + \Delta U_k$). При большой величине S схема весьма чувствительна к разбросу значений $I_{ко}$. Коэффициент неустойчивости каскада зависит от разброса усилительных свойств транзисторов и, естественно, что изменение S при смене транзисторов приводит к изменению режима работы каскада (точка покоя будет изменяться). Особенно сильно изменяется рабочая точка при высокоомной нагрузке в цепи коллектора — небольшие изменения I_k приводят к большим изменениям U_k . Это сильно сказывается в усилителях НЧ и особенно в их выходных каскадах при полном использовании каскада по напряжению. Даже при небольшом уходе рабочей точки изменяется усиление и появляются нелинейные искажения. Стабилизация режима в данном случае обязательна. Изменение коэффициента усиления по току или значительный его разброс не позволяет получить стабильной амплитуды выходного сигнала в ряде импульсных схем. В этом случае полезно использовать стабилизирующую цепь, показанную на рис. 29. При увеличении β выше расчетного для данной схемы потенциал коллектора не изменяется.

Следовательно, при проектировании высокостабильных схем необходимы:

а) питание цепи эмиттера транзистора от генератора постоянного тока (включение последовательно с эмиттером сопротивления значительной величины). В этом случае ток в цепи коллектора почти не зависит от величин параметров транзистора и электрический режим остается постоянным с точностью до нескольких процентов при всех изменениях условий окружающей среды (в пределах, допускаемых техническими условиями на полупроводниковый прибор). Стабилизация электрического режима работы (выбранной рабочей точки) —

необходимое условие стабилизации выходных параметров схемы;

б) введение в усилительные каскады отрицательной обратной связи, стабилизирующей выходные параметры схемы;

в) включение в цепь базы транзистора (между базой и эмиттером) сопротивления минимально возможной величины для обеспечения стабильности схемы в широком диапазоне температур.

Обычно для транзисторов малой мощности величина сопротивления в цепи базы не должна превышать нескольких тысяч ом, для мощных транзисторов — нескольких ом. Чем больше величина сопротивления в цепи базы, тем значительнее изменения электрического режима при изменениях температуры и тем меньше допустимые коллекторные напряжения. Использование транзисторов в таких схемах, где они хотя бы короткое время работают с отключенной базой (например, при коммутации базы с помощью электромеханического реле), может привести к выходу их из строя. При нестационарных процессах индуктивность в цепи базы может оказывать очень большое сопротивление току базы. Вследствие этого применение индуктивности в цепи базы при работе с короткими импульсами или импульсами с крутыми фронтами — так же недопустимо, как и использование больших сопротивлений в цепи базы;

г) использование в схемах специальных температурно зависимых элементов (например, термисторов или диодов) для компенсации температурных изменений параметров полупроводниковых приборов. Однако, точная компенсация возможна лишь в ограниченном диапазоне температур и обычно метод компенсации оказывается

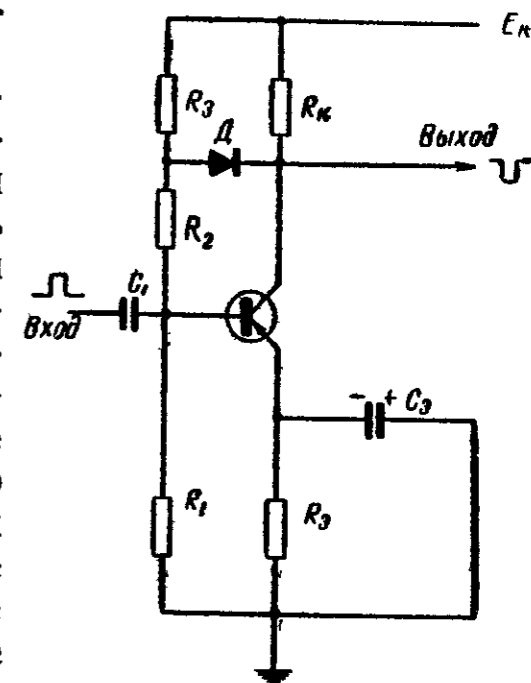


Рис. 29 Схема стабилизации выходного напряжения импульсного усилителя.

эффективным лишь в совокупности с другими методами стабилизации. Необходимо, чтобы термокомпенсирующие элементы располагались в непосредственной близости от тех приборов, изменения параметров которых компенсируются;

д) помещение аппаратуры с полупроводниковыми приборами в среду со стабильной температурой и влажностью.

ГРАНИЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СХЕМ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРИБОРАМИ

Очень часто причиной нарушения работоспособности схем могут быть изменения параметров транзистора.

Для проверки работоспособности схемы с любыми полупроводниковыми приборами данного типа, имеющими параметры в пределах норм, предусмотренных справочными материалами, желательно проводить «граничные испытания» схемы, например проверить работоспособность схемы при крайних значениях температуры, при включении транзисторов, имеющих крайние значения параметров. Если проверяется усилитель, то в схему можно включить транзистор с неблагоприятным сочетанием параметров β и $I_{ко}$ (большая величина тока $I_{ко}$ и малая величина усиления β). Однако транзисторы с крайними значениями параметров составляют весьма небольшой процент от общего количества выпускаемых транзисторов, поэтому следует пользоваться методами имитации изменения (ухудшения) параметров.

Ухудшение параметров диодов и транзисторов может имитироваться следующим образом:

а) включением шунтирующих переходы сопротивлений для увеличения токов $I_{ко}$, $I_{эо}$, $I_{обр}$, $I_{кн}$, $I_{кз}$ и для уменьшения β и $\beta_{ст}$. В частности, если рабочее напряжение на коллекторе транзистора составляет 5 в, то включение сопротивления величиной 50 ком между коллектором и эмиттером транзистора будет имитировать появление неуправляемого тока коллектора величиной $5 \text{ в} / 50 \text{ ком} = 100 \text{ мка}$;

б) включением шунтирующих переходы конденсаторов для увеличения C_k , $C_э$;

в) включением сопротивлений последовательно с выводами приборов для увеличения $r_б$, $R_{пр. \text{ нмн}}$, $U_{кв}$, $U_{бн}$;

г) изменением глубины насыщения транзистора можно изменить величину времени рассасывания τ_p .

Работу схемы следует проверять во всем диапазоне рабочей температуры при минимальных и максимальных напряжениях источников питания.

ПРОВЕРКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПЕРЕД УСТАНОВКОЙ В СХЕМУ

Проверку полупроводниковых приборов можно проводить только на соответствие нормам параметров, приведенных в справочных материалах.

Нельзя проверять полупроводниковые приборы на термоудары, многократные механические удары, термоструктурирование, на длительные вибрации. При таких испытаниях в полупроводниковых приборах могут появиться скрытые дефекты (например, микротрещины в кристалле или изоляторах), которые ведут к отказам при эксплуатации.

Недопустимо испытание полупроводниковых приборов в режимах, превышающих указанные в справочных материалах предельные нормы.

Аппаратура, на которой проводятся испытания, должна обеспечивать точность и стабильность поддержания режима приборов. Испытания должны проводиться строго при той температуре, которая указана в технических условиях.

При подключении диодов и транзисторов к установкам и отключении от них не должны возникать электрические перегрузки испытываемых приборов.

В процессе контроля параметров транзисторы и диоды подключаются к разнообразным измерительным установкам. При этом неизбежны многократные изгибы и другие механические нагрузки на выводы.

Поэтому на гибкие выводы транзисторов следует надевать «разгрузочные» изоляционные шайбы толщиной 2—3 мм, чтобы при подключении к измерительным установкам отсутствовал изгиб выводов у стеклянного изолятора.

ПРЕДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ И РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В полупроводниковых приборах рассеивается часть подводимой к ним электрической мощности. Вследствие этого температура внутренних областей и корпуса полупроводникового прибора превышает температуру окружающей среды. Температура p — n -переходов и внутренних областей полупроводниковых приборов является важнейшим фактором, от которого зависят не только величины основных параметров, но и общая работоспособность приборов. При определенной мощности рассеивания температура p — n -перехода подсчитывается по следующей формуле:

$$T_{\text{пер}} = T_{\text{окр}} + R_t \cdot P_{\text{расс}},$$

где $T_{\text{пер}}$ — температура перехода;
 $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды;
 $P_{\text{расс}}$ — мощность, рассеиваемая в переходе;
 R_t — тепловое сопротивление переход — окружающая среда (оно определяется материалом областей транзистора, его конструкцией и геометрией).

Повышение внутренней температуры перехода в транзисторе может привести к необратимым изменениям в приборе и выходу его из строя.

Максимальная (предельная температура) $T_{\text{макс}}$ указывается в справочных данных. Для транзисторов в качестве $T_{\text{макс}}$ задается максимальная температура области коллекторного перехода, так как именно там происходит выделение большей части рассеиваемой электрической мощности. Для диодов задается максимальная температура корпуса $T_{\text{к макс}}$ при воздействии оговоренных выпрямленных токов и обратных напряжений, так как переход диода всегда имеет хороший тепловой контакт с корпусом.

Рассеиваемая прибором максимальная (предельная) мощность $P_{\text{макс}}$ приводится обычно в справочных данных. Для импульсных приборов указывается величина максимальной импульсной мощности $P_{\text{макс имп}}$.

Величины максимальной мощности рассеивания даются для определенной температуры окружающей среды (или

для некоторого диапазона температуры). При повышении температуры мощность снижается. Например, для маломощных транзисторов мощность рассеивания снижается обычно на 10 мвт при повышении температуры на каждые 5° С.

При превышении максимальной температуры перехода возможны отказы полупроводниковых приборов двух типов. В первом случае при достижении этой температуры полупроводник приобретает собственную проводимость, переходы перестают существовать, резко увеличиваются неуправляемые токи через переходы, падают обратные сопротивления, прибор перестает нормально работать. При остывании перехода работоспособность полупроводникового прибора восстанавливается.

Если же к транзистору, кроме того, приложено высокое напряжение, то в этом случае может развиваться тепловой пробой, который приводит к необратимым изменениям в транзисторе и выходу его из строя.

Превышать указанную в справочных данных предельную мощность, рассеиваемую прибором, и температуру переходов или корпуса прибора опасно.

Следует помнить, что даже кратковременное превышение предельной температуры приводит к необратимым изменениям в приборе и выходу его из строя.

Для того чтобы обеспечить надежную работу приборов, необходимо снижать максимальную рабочую температуру p — n -переходов. Так, в среднем число отказов уменьшается почти в 2 раза при снижении температуры на 10° С от предельной её величины.

Под максимальной рабочей температурой следует понимать не среднюю, а мгновенную температуру (при импульсном режиме работы мгновенная температура может быть значительно выше средней).

При снижении температуры до —30° С и ниже надежность работы полупроводниковых приборов также уменьшается, так как падает β , снижаются пробивные напряжения, возникают механические напряжения в местах соединения материалов с различными коэффициентами теплового расширения. Для германиевых полупроводниковых приборов оптимальным является температурный диапазон — 5 — (+40° С).

ОТВОД ТЕПЛА ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Отвод от полупроводниковых приборов выделяющегося в них тепла является одной из главных задач при конструировании аппаратуры.

Отвод тепла от мощных приборов может осуществляться разными способами: отводом тепла к массивному корпусу аппаратуры, охлаждением с помощью специальных жидких или газообразных теплоносителей и с помощью радиаторов, осуществляющих теплообмен с окружающей средой (обычно воздухом при нормальном давлении).

Во всех случаях радиатор должен рассчитываться таким образом, чтобы его тепловое сопротивление обеспечивало нормальную теплопередачу от корпуса транзистора к окружающей среде.

При любой возможной температуре окружающей среды температура перехода (или корпуса) прибора не должна превышать максимально допустимой величины, указанной в технических условиях.

Наиболее часто используются пластинчатые, односторонние ребристые и двусторонние ребристые радиаторы.

В табл. 4 приложения приведены размеры радиаторов для нескольких типов транзисторов и разных мощностей рассеяния. Эти радиаторы рассчитаны для работы при температуре окружающей среды до $+60^\circ\text{C}$. Транзисторы крепятся к ним непосредственно.

Крепление транзисторов и диодов к радиатору должно обеспечивать их надежный тепловой контакт. Особое внимание обеспечению надежного теплового контакта следует уделять при введении между корпусом прибора и радиатором электроизолирующих прокладок.

Для уменьшения общего теплового сопротивления всегда лучше изолировать радиатор от корпуса аппаратуры, чем транзистор от радиатора. Контактующая с транзистором поверхность радиатора не должна иметь раковин, заусениц, царапин, выбоин и грязи. Транзистор должен крепиться к радиатору с помощью всех предусмотренных средств (болты, фланцы, резьбовые отверстия). Сверление в радиаторе отверстия, общего для всех выводов прибора, не допускается. Отверстия необ-

ходимо сверлить под каждый вывод отдельно, и они должны иметь минимально возможный диаметр. Следует помнить, что область максимального разогрева находится чаще всего между выводами прибора. Общее для всех выводов отверстие ухудшает условия теплопередачи.

Отвод тепла улучшается при вертикальном расположении радиатора, так как это улучшает условия конвекции. Тепловое сопротивление черненных радиаторов (анодированный алюминий) примерно на 10% меньше, чем неокрашенных. Для транзисторов, рассеивающих мощность свыше 20 Вт, применять радиаторы в условиях естественной конвекции нецелесообразно, в этих случаях лучше принудительное охлаждение.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Характерным свойством диодов и транзисторов является пробой $p-n$ -переходов (тепловой и электрический) при воздействии больших напряжений. Ток, протекающий через прибор, и выделяемая в нем мощность при пробое резко растут и достигают разрушающих величин даже при условии небольшого превышения предельного напряжения (рис. 30). Установлено, что подавляющая часть повреждений полупроводниковых приборов и выходов их из строя вызывается превышением предельных напряжений.

В справочных данных указываются следующие параметры предельных напряжений:

— максимальное (предельное) обратное напряжение между коллектором и базой транзистора $U_{кб\text{ макс}}$. Этот параметр используется обычно для расчета режима работы закрытого транзистора или при включении его по схеме с общей базой и генератором тона в цепи эмиттера;

— максимальное (предельное) обратное напряжение на переходе эмиттер—база $U_{эб\text{ макс}}$. Параметр $U_{эб\text{ макс}}$ используется для расчета режима, когда на входе транзи-

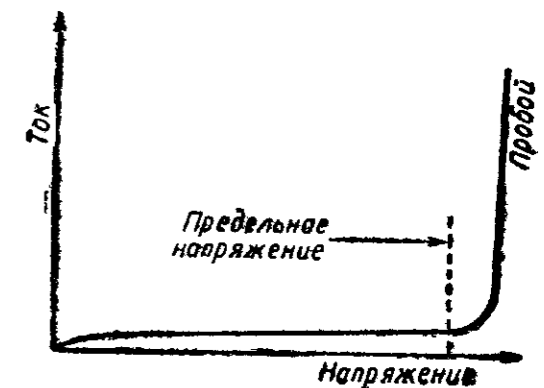


Рис. 30. Пробой $p-n$ -перехода при больших напряжениях.

стора действует запирающее напряжение (усилители класса В, всевозможные импульсные схемы). У сплавных транзисторов напряжение $U_{эб \text{ макс}}$ мало отличается от $U_{кб \text{ макс}}$, у диффузионных величина $U_{эб \text{ макс}}$ может быть от долей вольта до нескольких вольт;

— максимальное (предельное) обратное напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{эк \text{ макс}}$ при условии короткого замыкания эмиттера с базой. В ряде случаев приводится величина $U_{кэ \text{ макс}}$ при условии включения между базой и эмиттером определенного активного сопротивления R_6 . Этот параметр используется при расчетах режима работы транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером при отсутствии запирающего напряжения и определенном сопротивлении в цепи базы.

При наличии запирающего напряжения база — эмиттер предельное напряжение коллектор — эмиттер определяется таким образом, чтобы его величина в сумме с запирающим напряжением база — эмиттер не превышала оговоренной техническими условиями величины предельного напряжения база — коллектор.

Величины параметров $U_{кэ \text{ макс}}$, $U_{эб \text{ макс}}$ даются для определенной температуры перехода. При повышении температуры предельные напряжения, как правило, снижаются. Температурные коэффициенты снижения напряжения обычно равны: для $U_{кэ \text{ макс}}$ — $0,4 \text{ в/}^\circ\text{С}$ и для $U_{э}$ — $1 \text{ в/}^\circ\text{С}$.

Тепловой пробой возникает вследствие лавинообразного нарастания температуры $p-n$ -перехода, к которому приложено большое обратное напряжение.

Выделяемая за счет прохождения обратного тока электрическая мощность разогревает переход. При этом обратный ток увеличивается. Увеличение тока вызывает увеличение разогревающей мощности и т. д.

Если не созданы нормальные условия теплоотвода и тепло не успевает достаточно быстро рассеиваться, то равновесие между генерацией тепла и его отводом нарушается, и прибор разрушается вследствие перегрева.

Тепловой пробой может быть причиной выхода из строя мощных диодов и транзисторов, у которых величина обратного тока доходит до десятков миллиампер (при высокой температуре), если эти приборы работают в условиях плохого теплоотвода (например, без радиатора необходимой площади).

Включение стабилизирующего сопротивления в цепь эмиттера, уменьшение сопротивления в цепи базы до минимально возможной величины, снижение коллекторного напряжения позволяют снизить вероятность возникновения теплового пробоя.

Однако для того, чтобы избежать теплового пробоя, в первую очередь необходимо улучшить отвод тепла от диодов и транзисторов.

При электрическом пробое наблюдается резкое увеличение тока при напряжении на переходе, приближающемся к пробивному. При этом на переходе выделяется большая мощность, он нагревается и разрушается.

Ток при электрическом пробое увеличивается практически мгновенно вслед за увеличением напряжения; этот вид пробоя проявляется даже при очень коротких (порядка 10^{-9} сек.) импульсах напряжения, приложенного к переходу.

Для пробоя характерна локализация его в отдельных точках перехода. Плотность тока в этих местах очень высока и здесь наиболее вероятно его повреждение (например, образование замыкающей перемычки коллектор — эмиттер в транзисторах).

Локализация пробоя ведет к тому, что отдельные точки перехода существенно разогреваются даже при воздействии коротких импульсов перенапряжения. Вследствие этого не допускается превышение напряжения на приборе по сравнению с предельным по справочным данным независимо от длительности импульса напряжения.

При расчете схем необходимо учитывать изменение пробивного напряжения от условий во входной цепи транзистора (R_6 , $R_э$, запирающее напряжение) и от температуры окружающей среды. На рис. 31, 32 показаны типичные зависимости этого напряжения от сопротивления в цепи базы транзистора, температуры окружающей среды и запирающего напряжения. На рис. 33 показано изменение выходной вольт-амперной характеристики транзистора с ростом сопротивления в цепи эмиттера. Сопротивление в цепи базы, при котором начинается резкое снижение напряжения, называется критическим базовым сопротивлением $R_{6 \text{ кр}}$. Величины $R_{6 \text{ кр}}$ для транзисторов различных типов приведены ниже в таблице.

Тип транзистора	П13—П15	П16	П20—П21	П8—П11	П41Б	
$R_{бкр}$. . .	200 ом	300 ом	300 ом	200—300 ом	1—2 к	
Тип транзистора	КТ—601А	П104—П106	П25—26Б	П4А—П4Г		П210—210А
$R_{бкр}$. . .	1—2 к	300 ом	100 ом	10—15 ом		5—8 ом

Если в схеме величина сопротивления в базе больше критической, то величина напряжения на коллекторе

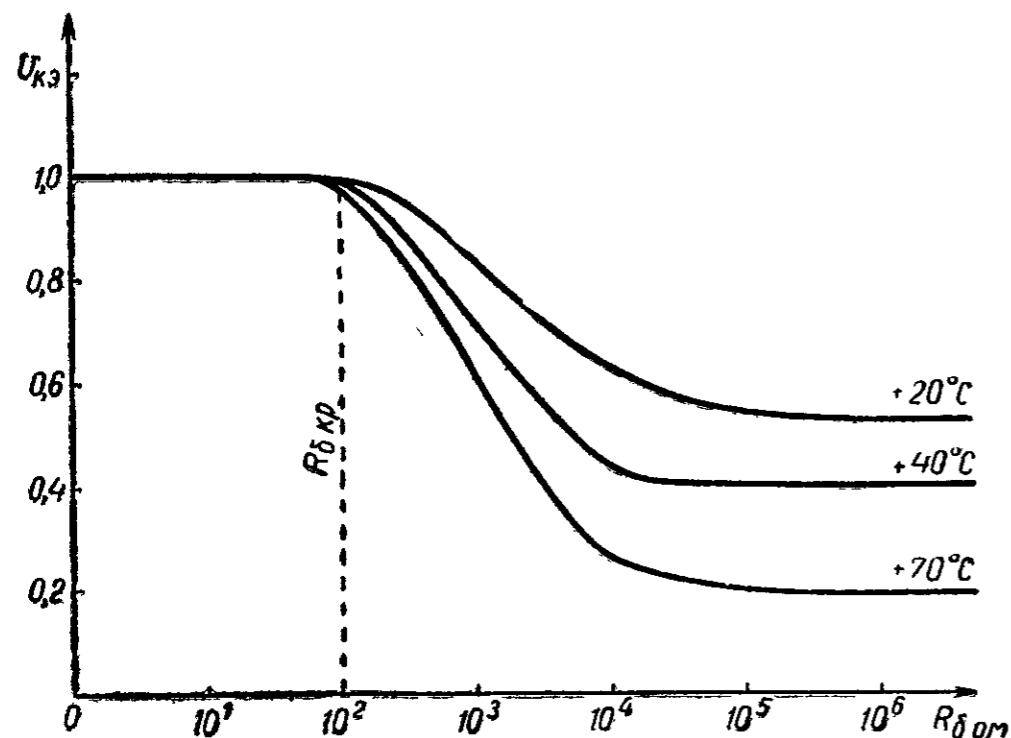


Рис. 31. Нормализованная зависимость пробивного напряжения от сопротивления в цепи базы при различных температурах окружающей среды.

транзистора не должна превышать предельно-допустимой с учетом снижения напряжения при данном сопротивлении в базовой цепи.

Для увеличения надежности действия полупроводниковых приборов следует снижать рабочие напряжения

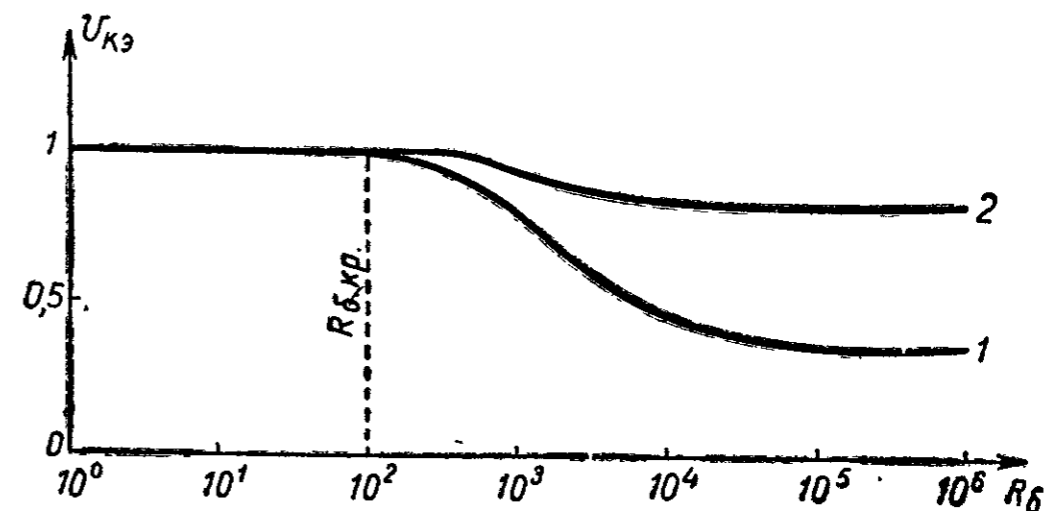


Рис. 32. Нормализованная зависимость пробивного напряжения от сопротивления в цепи базы: 1 — без запирающего напряжения; 2 — с запирающим напряжением.

на них. Так, надежность диодов и транзисторов значительно возрастает при уменьшении рабочего напряжения до уровня 0,70 от предельного. Следует помнить, что в процессе работы и хранения пробивное напряжение $p-n$ -переходов может уменьшаться (в некоторых случаях до 30%). Отсутствие запаса по напряжению приведет в этом случае к пробое и выходу прибора из строя.

Однако не следует выбирать напряжение питания для схем с диодами и транзисторами и слишком малой величины (сравнимой с напряжением насыщения прибора). При этом ухудшаются параметры приборов и снижается стабильность схемы.

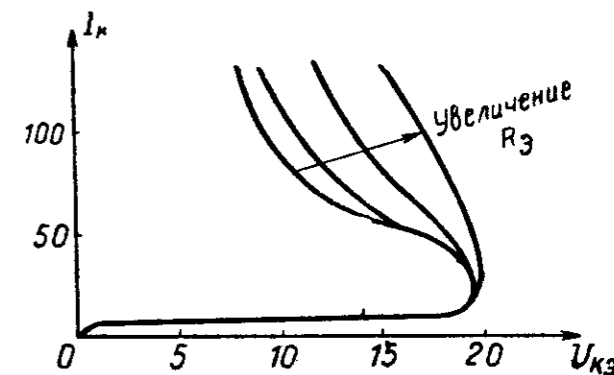


Рис. 33. Изменение вольт-амперной характеристики коллекторного $p-n$ -перехода в области больших напряжений от сопротивления в цепи эмиттера ($R_{э}$) (ток в миллиамперах, напряжение в вольтах).

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТОКИ

В справочниках приводится значение максимального (предельного) тока коллектора $I_{к\text{ макс}}$. Превышение $I_{к\text{ макс}}$ приводит к пробое переходов, сгоранию внутренних соединительных проводников и выходу прибора из строя.

У некоторых типов транзисторов наблюдается так называемый «токовый пробой» — резкое и быстрое увеличение тока до большой величины при токах, превышающих критическое значение. Вследствие этого превышение предельно-допустимых токов не допускается даже на короткое время (в импульсном режиме).

Надежность работы диодов и транзисторов резко увеличивается при снижении рабочих токов ниже предельных значений.

Однако нельзя выбирать рабочие токи и очень малой величины, сравнимой с величиной неуправляемых обратных токов через переходы. Это приводит к ухудшению параметров приборов, значительному изменению параметров и электрического режима при изменении температуры.

Рекомендуется ограничивать рабочие токи через полупроводниковые приборы (в том числе импульсные) величиной, не превышающей 0,70 от предельных величин.

Нельзя использовать диоды и транзисторы при токах, равных предельным.

Использование полупроводниковых приборов в каких-либо совмещенных предельных режимах (например, по току и напряжению) неизбежно приведет к выходу прибора из строя.

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК

При проектировании надежных схем следует всегда помнить о необходимости защиты полупроводниковых приборов от перегрузок.

При работе транзистора в режиме переключения на индуктивную нагрузку появляется всплеск напряжения, величина которого может в несколько раз превышать постоянное напряжение питания E_k . При выключении (запирании) транзистора накопленная в индуктивности энергия может привести к повреждению транзистора.

Существуют различные схемы защиты транзисторов от перенапряжения, поглощающие часть накопленной индуктивностью энергии или блокирующие транзистор от попадания в опасную высоковольтную область. Схема защиты с помощью RC -цепи приведена на рис. 34. Показанная на рис. 34 пунктиром емкость C_n является паразитной емкостью нагрузки. Для этой схемы емкость конденсатора и сопротивление выбирают из следующих соотношений:

$$C \geq \frac{2L E_k^2}{U_m^2 R_n^2};$$

$$R = \frac{U_m R_n}{\sqrt{2} E_k},$$

где U_m — разность между напряжением источника питания и предельно-допустимым напряжением коллектор — эмиттер.

При расчетах необходимо принимать L и E_k наибольшими, а R_n наименьшей из возможных величин.

Схема защиты от всплесков напряжений, использующая шунтирующий диод, приведена на рис. 35, а на рис. 36 приведена форма напряжения на коллекторе транзистора.

При запирании транзистора напряжение на его коллекторе повышается. При сравнении потенциала коллектора с напряжением E_k последующее увеличение напряжения на коллекторе невозможно, так как диод открывается. Перепад напряжения на индуктивности в этом случае отсутствует.

Физический смысл защиты транзистора с помощью диода состоит в том, что энергия, запасенная индуктивностью, передается с помощью диода источнику питания. Источник питания должен обладать способностью поглотить эту энергию и при этом увеличение напряжения на нем должно быть незначительным.

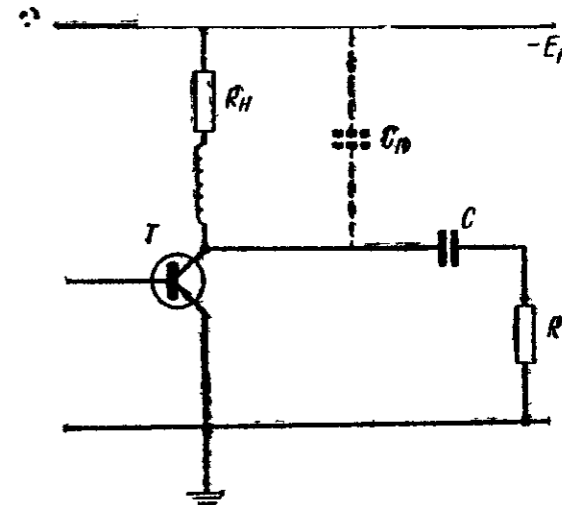


Рис 34 Схема защиты транзистора от перенапряжения с помощью последовательной цепи RC .

В качестве поглощающего энергию элемента можно применять конденсатор. Схема такой защиты приведена на рис. 37. Параллельно конденсатору включается разрядное сопротивление. При включении ток течет через L и R_H . Схема гашения в этот момент не работает. При выключении транзистора коллекторный потенциал быстро

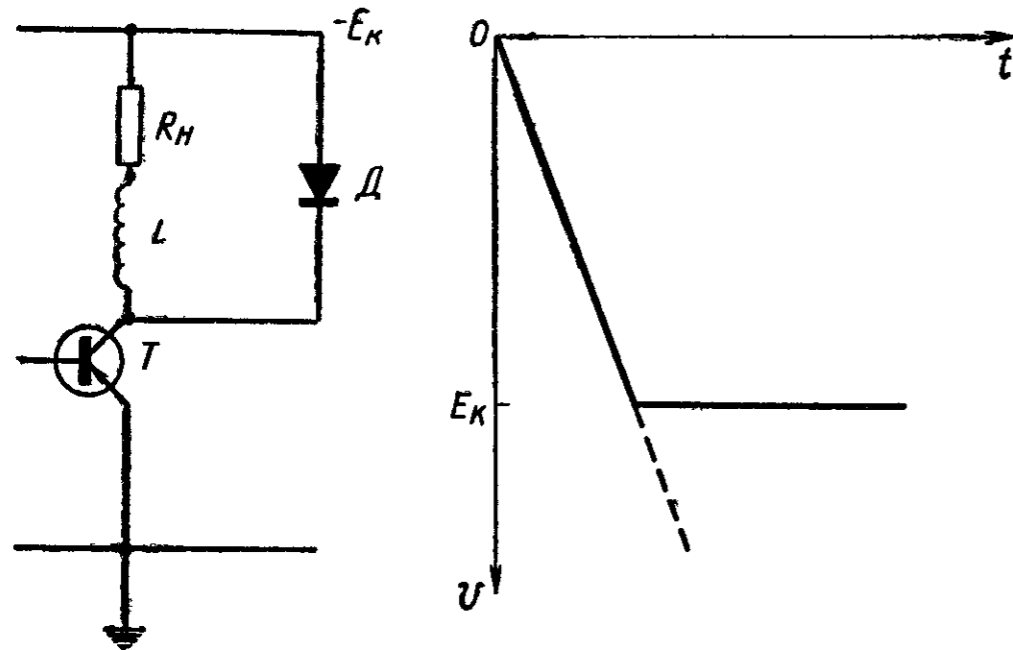


Рис. 35. Схема защиты транзистора от всплесков напряжения с помощью шунтирующего диода.

Рис. 36. Форма напряжения на коллекторе при действии шунтирующего диода.

ро спадает до величины, несколько меньшей E_K . Конденсатор заряжается через диод, заимствуя энергию у индуктивности. При запираии диода емкость разряжается на сопротивление R . Для этой схемы емкость и сопротивление рассчитываются по следующим формулам:

$$C = \frac{LE_K^2}{2U_m^2 R_H^2}; \quad R = \frac{2U_m R_H}{\sqrt{2} E_K}.$$

Конденсатор до момента следующего выключения должен полностью разрядиться. При высокой скорости переключения сопротивление R необходимо выбирать малой величины, а емкость следует исключать. В этом случае ток индуктивности будет падать с постоянной времени $L/(R+R_H)$. Схема рис. 37 применяется при повышенных напряжениях источника питания, когда есть

опасность попадания рабочей точки на пробойный участок характеристики.

Для уменьшения мощности, рассеиваемой на транзисторе в момент выключения, можно применять и вариант схемы защиты, приведенный на рис. 38. В момент включения конденсатор, заряженный до напряжения E_K , разряжается через сопротивление R и транзистор. В момент выключения емкость заряжается через диод. Рассеяние мощности на транзисторе при большой

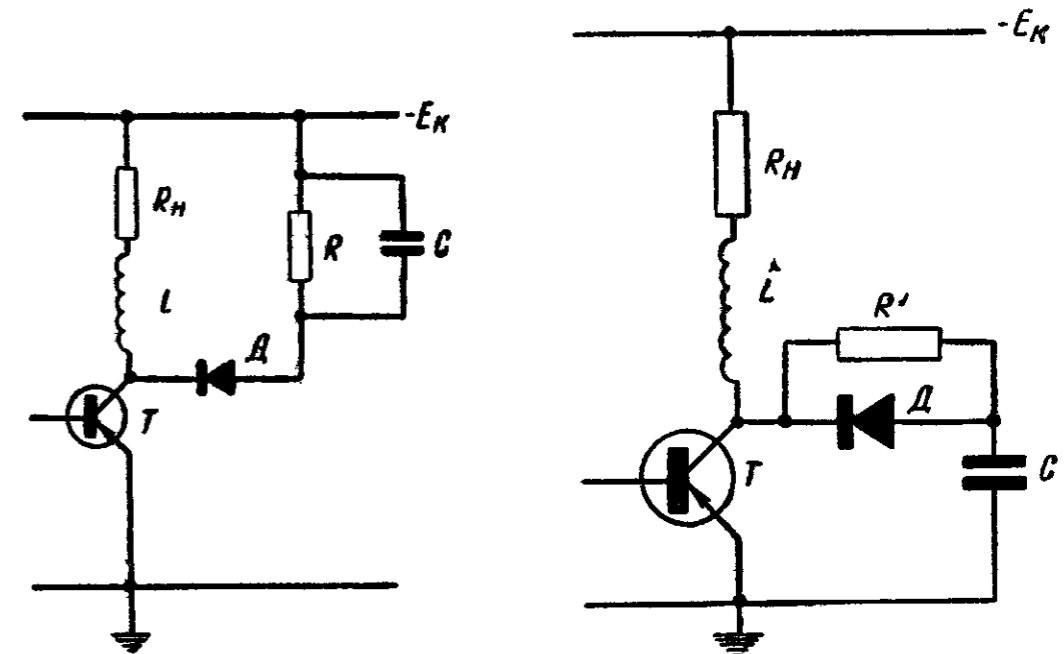


Рис. 37. Схема защиты транзистора от перенапряжения с помощью конденсатора.

Рис. 38. Схема защиты, обеспечивающая малое рассеяние в момент выключения транзистора.

величине R минимально и определяется прямым падением напряжения на диоде. Емкость должна успевать разряжаться в течение времени, когда транзистор открыт.

Для защиты усилителей от случайных перенапряжений применяются опорные диоды. Потенциал коллектора $U_{кэ}$ в нормальном режиме каскада усилителя равен $E_K - I_K R_H$ и выбирается меньше предельно-допустимого значения $U_{кэ}$. В случае неисправностей в базовой цепи I_K упадет и напряжение коллектор — эмиттер может повышаться до E_K , вызывая перегрузку транзистора.

Схема защиты с опорным диодом, используемая в широкополосных и других высокочастотных усилителях,

приведена на рис. 39 (Д—опорный диод типа Д808—813). Смещение выбирается таким образом, чтобы $U_{кз}$ было меньше напряжения стабилизации опорного диода. При нормальной работе опорный диод не проводит и не влияет на частотную характеристику усилителя. При повышении напряжения сверх установленной величины диод шунтирует транзистор, предохраняя его от повреждения.

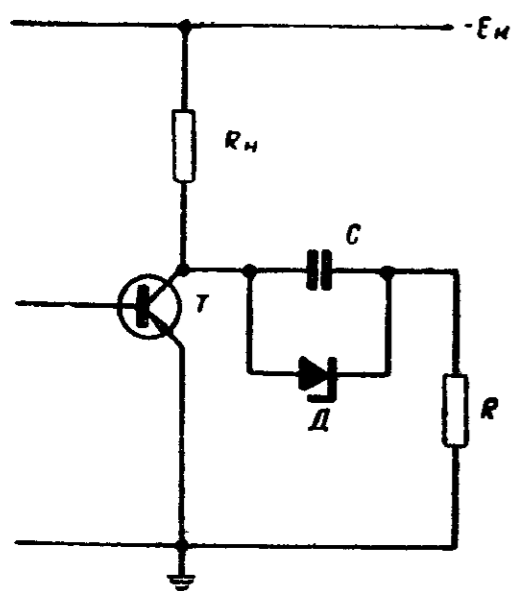


Рис. 39 Схема защиты транзистора в широкополосном усилителе.

Методы защиты двухкаскадных усилителей с непосредственной связью показаны на рис. 40. В схеме рис. 40, а любое возрастание тока базы первого транзистора $I_{б1}$ приводит к возрастанию тока базы второго. Это может приводить к перегрузке второго транзистора и выходу его из строя. Схемы рис. 40, б и в лишены этого недостатка.

В схеме рис. 40, б возросший коллекторный ток транзистора T_1 вследствие чрезмерного роста входного тока приводит к повышению потенциала коллектора T_1 и, следовательно, базы T_2 . При соответствующем выборе E_k , $E_э$, R_1 транзистор T_2 может закрываться при определенном уровне сигнала на входе. В данной схеме транзистор T_2 оказывается защищенным от всплесков входного напряжения (тока). Схема защиты рис. 40, в действует аналогично.

Таким образом, при выборе типа схемы и типа транзистора в усилителях с непосредственными связями необходимо руководствоваться следующим:

- а) после каскада с общим эмиттером необходимо включать транзистор такого же типа;
- б) после каскада с общим коллектором (эмиттерный повторитель) необходимо включать транзистор другой проводимости (после транзистора типа $p-n-p$ следует включать транзистор типа $n-p-n$).

Напряжение между электродами полупроводниковых приборов рекомендуется ограничивать также с помощью последовательного соединения полупроводниковых приборов.

В случае последовательного соединения приборов напряжения на них выравниваются с помощью конденсаторов или шунтирующих сопротивлений (рис. 41, 42, 43).

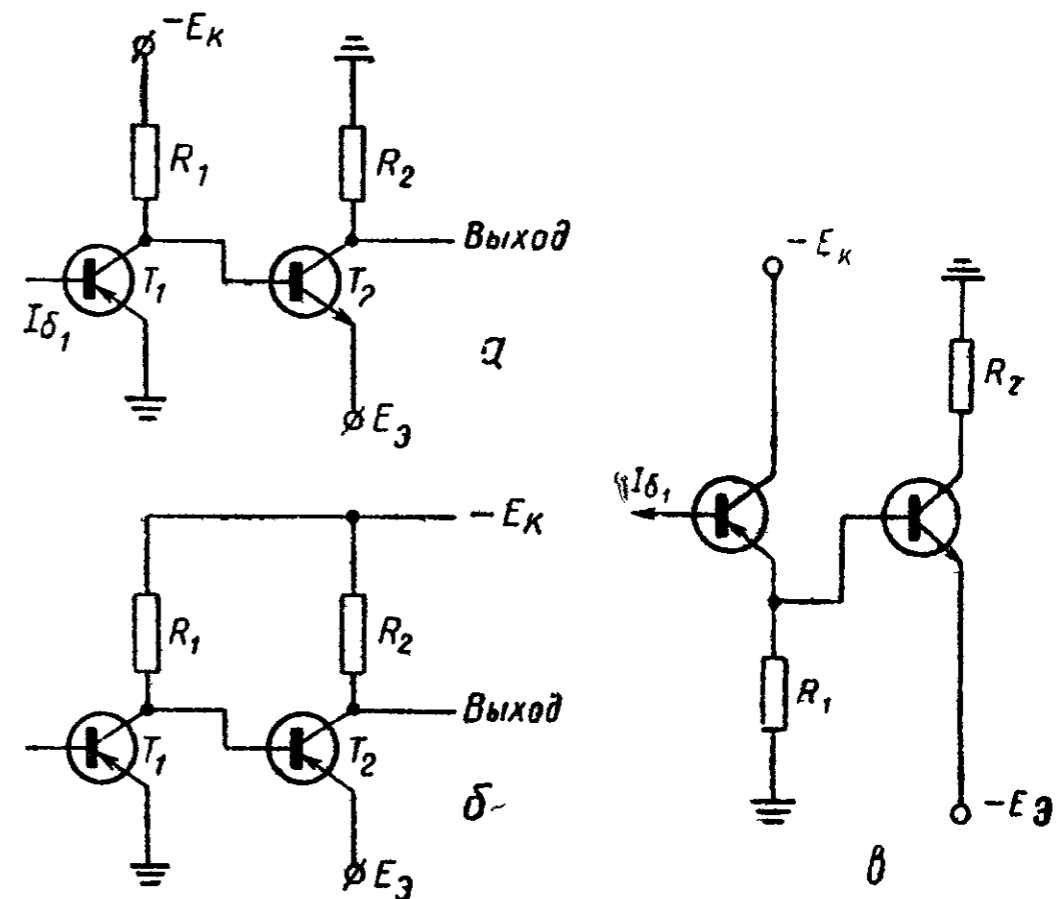


Рис. 40. Схемы двухкаскадных усилителей с непосредственной связью.

Для защиты полупроводниковых приборов от перегрузок по току рекомендуются следующие способы:

- а) включение токоограничительных сопротивлений последовательно с выводами полупроводниковых приборов. Для защиты транзистора необходимо включать два сопротивления — в эмиттер и коллектор;

- б) шунтирование полупроводниковых приборов сопротивлениями;

- в) параллельное включение полупроводниковых приборов.

В случае параллельного включения токи в отдельных приборах должны выравниваться с помощью сопротив-

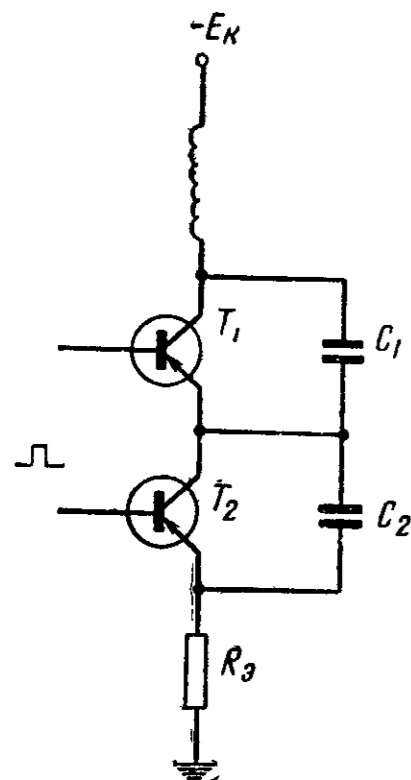


Рис. 41. Выравнивание пиковых напряжений на транзисторах с помощью конденсаторов.

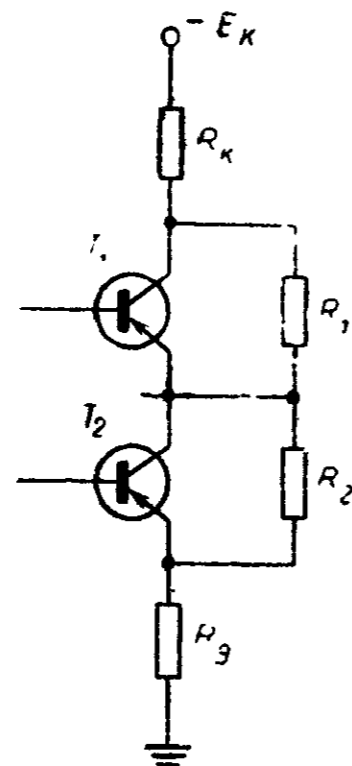


Рис. 42. Выравнивание напряжений на транзисторах с помощью сопротивлений.

лений, включенных последовательно с диодами или в эмиттерную цепь транзисторов.

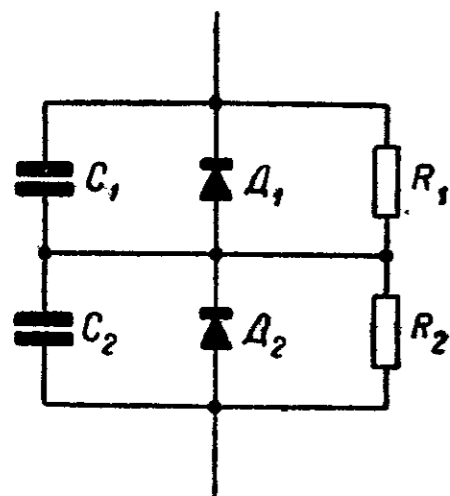


Рис. 43. Выравнивание напряжений на диодах с помощью сопротивлений (для постоянного тока) и емкостей (при нестационарных процессах).

Отбор полупроводниковых приборов с одинаковыми параметрами с целью выравнивания напряжений или

токов приводит, как правило, к выходу их из строя, так как в процессе работы параметры приборов могут значительно измениться.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ НЕКОТОРЫХ СХЕМ

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ, РАБОТАЮЩИЕ НА МАЛЫХ УРОВНЯХ СИГНАЛА

На рис. 44, а изображена наиболее распространенная схема усилительного каскада с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером. Такое включение транзистора позволяет получить в каскаде усиление и по току, и по напряжению.

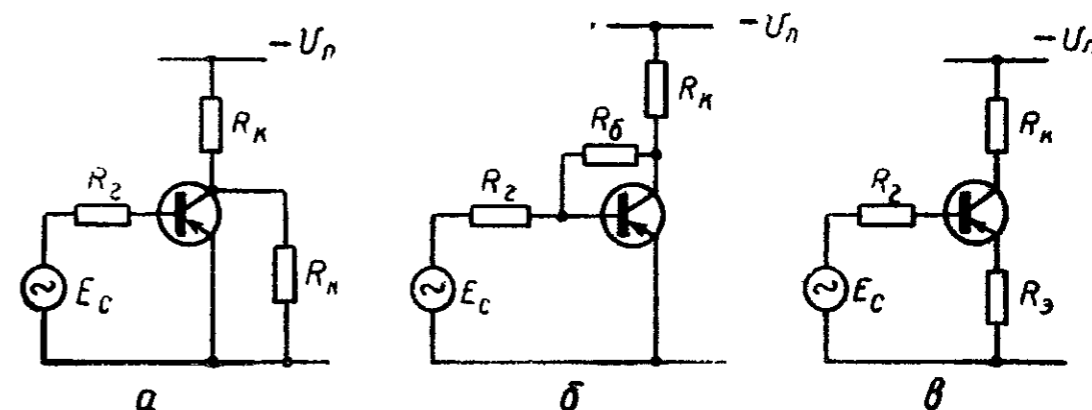


Рис. 44. Схемы включения транзисторов по переменному току. Цепи смещения и разделительные конденсаторы не показаны.

Для того чтобы нелинейные искажения усиленного сигнала были малы, полный размах переменного напряжения на коллекторе не должен превышать 50—70% величины U_n напряжения источника питания. При выборе типа транзистора следует руководствоваться следующими расчетными соотношениями:

1. Частота f_a должна в 10—20 раз превышать максимальную рабочую частоту $f_{\text{раб. макс.}}$.

2. Максимальное рабочее напряжение $U_{кэ \text{ макс}}$ на коллекторе транзистора достигает величины $U_{кэм} = U_n$ в случае активной нагрузки и $U_{кэм} \approx 2 U_n$ в случае индуктивной нагрузки или трансформатора.

3. Максимальный импульс тока коллектора $I_{\text{км}}$:

$$I_{\text{км}} = \frac{U_{\text{п}}(R_{\text{к}} + R_{\text{н}})}{R_{\text{к}}R_{\text{н}}}.$$

4. Средняя мощность $P_{\text{к}}$, рассеиваемая на коллекторе:

$$P_{\text{к}} = I_0 U_0,$$

где I_0 и U_0 — положение выбранной рабочей точки.

5. Входное сопротивление каскада $R_{\text{вх}}$:

$$R_{\text{вх}} \approx h_{11\text{э}}.$$

6. Выходное сопротивление каскада $R_{\text{вых}}$:

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{к}}.$$

7. Коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{н}}$ — отношение выходного напряжения к э.д.с. источника сигнала:

$$K_{\text{н}} = \beta \frac{R_{\text{к}}R_{\text{н}}}{(R_{\text{к}} + R_{\text{н}})(R_{\text{г}} + R_{\text{вх}})}.$$

8. Коэффициент усиления по току $K_{\text{т}}$ — отношение тока в нагрузке $R_{\text{н}}$ к величине тока базы:

$$K_{\text{т}} = \beta \frac{R_{\text{г}}R_{\text{к}}}{(R_{\text{г}} + R_{\text{вх}})(R_{\text{к}} + R_{\text{н}})}.$$

9. Коэффициент усиления по мощности $K_{\text{м}}$:

$$K_{\text{м}} = K_{\text{н}}K_{\text{т}}.$$

Для того чтобы уменьшить влияние величины коэффициента усиления по току транзистора β на усиление каскада, вводится цепь отрицательной обратной связи по напряжению (рис. 44, б) или по току (рис. 44, в).

В первом случае каскад будет иметь очень малое входное сопротивление и при $\frac{\beta R_{\text{к}}}{R_{\text{б}}} \gg 1$ его коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{н1}}$ равен:

$$K_{\text{н1}} = \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{г}}}.$$

Во втором случае каскад имеет большое входное сопротивление $R_{\text{вх1}}$:

$$R_{\text{вх1}} = R_{\text{э}}\beta.$$

При условии, что $h_{11\text{э}} \ll \beta R_{\text{б}}$, коэффициент усиления такого каскада по напряжению $K_{\text{н2}}$ равен:

$$K_{\text{н2}} \approx \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{б}}}.$$

Таким образом, оказывается, что коэффициент усиления каскада по напряжению в обоих случаях почти не зависит от величины β и остается стабильным при работе в диапазоне температур и при смене транзисторов. Естественно, что при этом коэффициенты усиления $K_{\text{н1}}$ и $K_{\text{н2}}$ оказываются существенно меньше, чем $K_{\text{н}}$ (меньшими, чем в каскаде без обратной связи).

Для обеспечения стабильной работы усилителя рекомендуется производить расчет его параметров, используя удвоенную величину обратного тока коллектора $I_{\text{ко}}$, соответствующего максимальной рабочей температуре и максимальному рабочему напряжению на коллекторе. При расчете следует принимать во внимание изменение коэффициента усиления β от минимального до максимального значения, предусмотренного для данного типа транзистора.

Оконечный каскад усилителя низкой частоты, работающий в режиме классов А и В

В конечных и предоконечных каскадах транзисторы работают при больших уровнях сигнала. Для увеличения коэффициента полезного действия усилителя необходимо полное использование транзистора по напряжению.

Наибольшее применение в выходных каскадах находит способ включения транзистора с общим эмиттером. Обычно в выходных каскадах используется трансформаторная связь с нагрузкой.

Расчетные соотношения для выбора типа транзистора в усилителе класса А следующие:

1) задается величина выходной мощности P ;

2) мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора одноконтурного усилителя, $P_{\text{к1}} = 1,2P$; для двухконтурного усилителя $P_{\text{к2}} = 0,6P$;

3) максимальное напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{\text{кэм}}$ достигает удвоенной величины напряжения источника питания $U_{\text{п}}$:

$$U_{\text{кэм}} = 2U_{\text{п}};$$

4) определяется величина постоянного тока коллектора начального смещения рабочей точки I_0 :

$$I_0 = \frac{1,2P}{U_{\pi}} \quad (\text{для одноконтурного каскада});$$

$$I_0 = \frac{0,6P}{U_{\pi}} \quad (\text{для двухконтурного каскада});$$

5) максимальный ток коллектора $I_{\text{км}}$ достигает величины, равной $2I_0$;

6) максимальный ток базы $I_{\text{бм}}$ достигает величины:

$$I_{\text{бм}} = \frac{I_0}{B_{\text{ст. мин}}}.$$

7) для получения в нагрузке заданной мощности величина приведенного ко всей первичной обмотке сопротивления нагрузки должна быть:

$$R_{\text{н1}} = \frac{U_{\pi}^2}{1,2P} \quad (\text{для одноконтурного каскада});$$

$$R_{\text{н2}} = \frac{U_{\pi}^2}{0,3P} \quad (\text{для двухконтурного каскада}).$$

Для выбора типа транзистора в двухтактном усилителе класса В расчетные соотношения следующие:

1) задаются величина выходной мощности P и напряжение источника питания U_{π} ;

2) мощность, рассеиваемая на коллекторе каждого транзистора,

$$P_{\text{к}} (\text{мвт}) = \frac{P (\text{мвт})}{6,2};$$

3) средний ток коллектора

$$I_{\text{к ср}} (\text{ма}) = \frac{0,75P (\text{мвт})}{U_{\pi} (\text{в})};$$

4) максимальный импульс тока коллектора

$$I_{\text{км}} (\text{ма}) = \frac{2,4P (\text{мвт})}{U_{\pi} (\text{в})};$$

5) максимальное напряжение на коллекторе транзистора

$$U_{\text{км}} = 2U_{\pi};$$

6) мощность, потребляемая от источника питания,

$$P_{\pi} = 1,5P.$$

Для оконечных каскадов используются обычно сплавные транзисторы.

УСИЛИТЕЛИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

Усилители промежуточной частоты выполняются по схеме с общей базой, общим эмиттером или по каскодной схеме ОЭ-ОБ.

В качестве элементов связи между каскадами можно использовать одиночные контуры, двухконтурные фильтры и более сложные системы связанных контуров.

Для уменьшения влияния параметров транзисторов на форму резонансной кривой усилителя связь транзисторов с контурами делается слабой.

Критерием слабой связи является малость вносимых транзистором в контур дополнительных реактивностей. Слабая связь транзисторов с контурами приводит к проигрышу в усилении по мощности на каскад, однако это вполне оправдывается за счет упрощения настройки и повышения надежности схемы.

Автоматическая регулировка усиления в усилителях ПЧ обычно осуществляется за счет изменения эмиттерного тока транзисторов или с помощью управляемых делителей напряжения на нелинейных элементах.

Для обеспечения изменения коэффициента усиления в широких пределах оказывается необходимым изменять эмиттерный ток транзистора в 10—30 раз. При этом имеет место значительное изменение входной и выходной емкости и входного сопротивления каскада, а если связь транзистора с контуром выбрана недостаточно слабой, работа системы автоматической регулировки усиления приводит к нежелательным изменениям полосы пропускания усилителя.

Транзистор, используемый в усилителе ПЧ должен удовлетворять условию: $t_a > 10 f_{\text{пр}}$.

Коэффициент усиления каскада ПЧ по напряжению можно определить по формуле:

$$K_{\text{н}} = SR_{\text{ое}} n_{\text{к}} n_{\text{б.н.}}$$

где: S — крутизна транзистора;

R_{oe} — резонансное сопротивление контура;

n_k — коэффициент включения транзистора со стороны выхода;

n_b — коэффициент включения транзистора со стороны входа.

Крутизна транзистора зависит от тока эмиттера и приближенно может быть найдена по формуле:

$$S(\text{ма/в}) \approx \frac{1}{30} I_s (\text{ма}).$$

Коэффициенты включения n_k и n_b выбираются из условия обеспечения слабой связи транзистора с контуром, их величины зависят от входных и выходных сопротивлений транзистора. Для схемы ОБ величина входного сопротивления лежит в пределах 10—40 ом, выходное сопротивление — 10—20 ком. Схема ОЭ имеет входное сопротивление 0,3—1 ком, выходное сопротивление 10—20 ком.

Входное сопротивление каскодной схемы такое же, как и схемы ОЭ; выходное сопротивление лежит в пределах 100—500 ком.

Сопротивления, вносимые в контур со стороны входа и выхода транзистора, подсчитываются по формулам:

$$R_{вх}^1 = \frac{R_{вх}}{n_b^2} \quad R_{вых}^1 = \frac{R_{вых}}{n_k^2},$$

Выбор напряжения источника питания рабочей точки, расчет максимального тока и предельной мощности производятся так же, как и для усилителя НЧ.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ

Основная схема двухтактного преобразователя постоянного напряжения в переменное приведена на рис. 46. Использовано наиболее распространенное включение транзисторов по схеме с общим эмиттером. Транзисторы T_1 и T_2 поочередно находятся в открытом (насыщенном) или закрытом состоянии. Если, например, открыт T_1 , то к обмотке I_a приложено напряжение источника питания. Суммарный ток нагрузки и намагничивания трансформатора в цепи коллектора растет до величины $I_6 \cdot B_{ст}$. При этом транзистор выходит из режима насыщения и напряжение на обмотке I_a падает. Падает

напряжение и на обмотке I_6 , уменьшая ток базы T_1 . Возникает регенеративный процесс, оканчивающийся запиранием транзистора T_1 и отпиранием T_2 . Далее процессы повторяются с рабочей частотой.

Расчетные соотношения, необходимые для выбора транзисторов:

1. Рабочая частота преобразователя на мощных транзисторах выбирается в пределах 400—3 000 гц.

2 Максимальный ток коллектора открытого транзистора

$$I_{км} = \frac{1,3P}{U_{п}},$$

где P — мощность преобразователя, вт;

$U_{п}$ — напряжение источника питания.

3. Максимальное напряжение, действующее между коллектором и эмиттером закрытого транзистора:

$$U_{кэм} \approx 2,2U_{п}.$$

4. Мощность, рассеиваемая в каждом транзисторе, приблизительно равна:

$$P_k = 0,1P.$$

5. Задается минимальная и максимальная температура окружающей среды и способ теплоотвода.

По этим данным можно ориентировочно выбрать тип транзистора.

Пример. Преобразователь с мощностью 50 вт должен работать от источника с напряжением 14 в при температурах до +50° С.

Находим:

$$I_{км} = \frac{1,3 \cdot 50}{14} = 4,7 \text{ а};$$

$$U_{кэм} = 2,2 \cdot 14 \approx 31 \text{ в};$$

$$P_{тр} = 5 \text{ вт}.$$

Подходящим является транзистор типа П4Б.

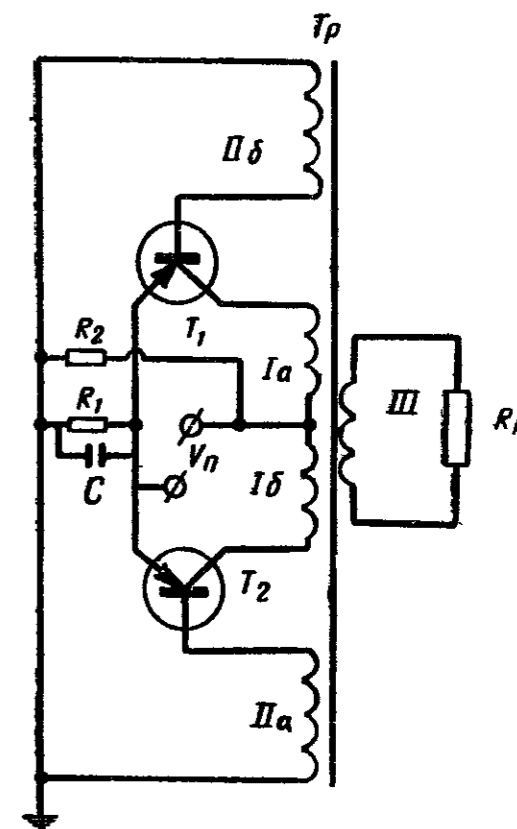


Рис. 46. Преобразователь

Принципиальная схема статического триггера приведена на рис. 47. Триггер представляет собой двухкаскадный усилитель с глубокой положительной обратной связью. Триггер имеет два устойчивых состояния — один транзистор проводит (включен), а другой закрыт (выключен) и наоборот. Переход схемы из одного состояния в другое происходит при воздействии запускающего импульса. Глубокая положительная обратная связь обу-

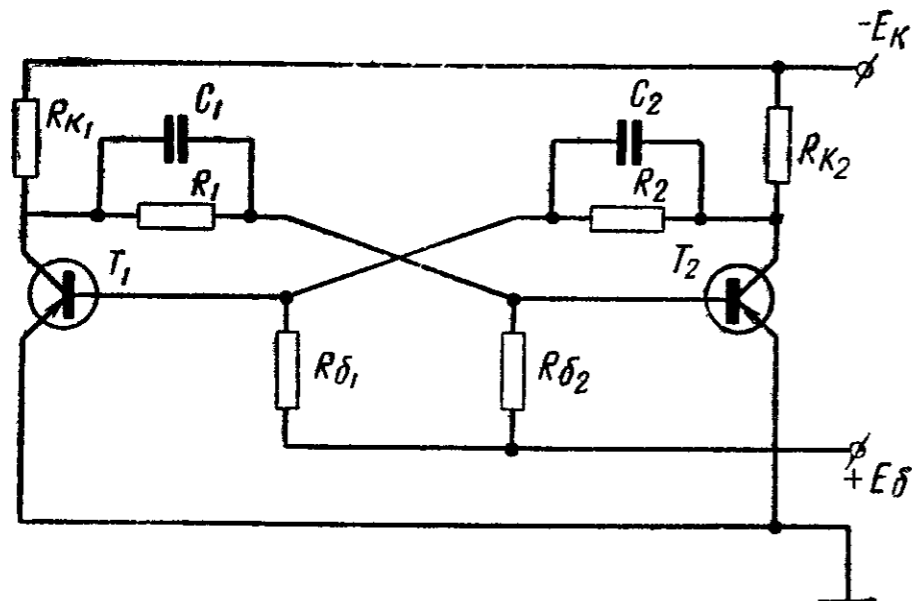


Рис 47 Триггер

словливает лавинообразный процесс переключения триггера. Приведенная на рис. 47 схема симметрична, так как соответствующие элементы каскадов одинаковы; это наиболее распространенная схема триггера. Запирающее смещение на базу в схеме триггера обеспечивается специальным источником напряжения. Можно спроектировать схему триггера с одним источником питания E_K . В этом случае запирающее смещение создается автоматически вследствие протекания тока включенного транзистора по общему эмиттерному сопротивлению $R_э$. Однако такая схема менее устойчива, особенно при эксплуатации в широком диапазоне температур.

Для получения наибольшей надежности при наименьшем количестве деталей следует применять схему триггера с насыщением. Однако высокое быстродействие не может быть получено в насыщенной схеме.

Предотвратить насыщение можно с помощью диодов, включенных в цепь коллектора. Метод устранения насыщения способом задания смещения в базу из условия $|I_б| \ll \left| \frac{I_K}{\beta_{ст}} \right|$ (рабочая точка находится в активной области) и подбора транзисторов с одинаковыми β не рекомендуется, так как схема будет работать неустойчиво при изменении температуры и с течением времени.

Запуск триггера можно осуществлять как положительными, так и отрицательными импульсами. Отрицательные импульсы подаются на базу закрытого транзистора, положительные — на базу открытого.

Положительный запускающий импульс должен обеспечить необходимый ток для полного рассасывания накопленного заряда в базе за допустимое время и переключения.

Для триггера целесообразно выбрать транзисторы, предназначенные для импульсных схем, так, чтобы работа триггера возможно полнее определялась параметрами, которые оговорены в справочных данных.

Расчетные соотношения для выбора транзистора:

1. Для того чтобы транзистор надежно запирался, ток смещения должен быть равен:

$$I_{см} \approx \frac{E_б}{R_б} \geq 2I_{ко макс},$$

где $I_{ко макс}$ — обратный ток коллекторного перехода для максимальной рабочей температуры и напряжения;

$E_б$ — напряжение смещения; выбирается из условия $E_б \leq 0,7U_{бэ макс}$.

Предельно-допустимое напряжение $U_{бэ макс}$ для диффузионных транзисторов имеет величину 0,5÷2 в (значительно меньше $U_{кб макс}$), а для сплавных примерно равно $U_{кб макс}$.

2. Для того чтобы транзистор надежно открывался, необходимо, чтобы выполнялось условие $0,5 \beta_{мин}: I_{б мин} > I_K$ (β при минимальной температуре), т. е. ток базы должен обеспечить режим насыщения и требуемый ток нагрузки.

3. Максимальная рабочая частота триггера приблизительно равна:

$$f_{\text{макс}} \approx \frac{f_a}{\beta}.$$

4. Предельно-допустимое напряжение транзистора должно быть:

$$U_{\text{к макс}} \geq 1,4 E_{\text{к}}.$$

5. Сопротивление в цепи коллектора:

$$R_{\text{к}} \geq \frac{E_{\text{к}}}{I_{\text{кн}}},$$

где $I_{\text{кн}} \leq 0,7 I_{\text{к макс}}$.

Здесь $I_{\text{кн}}$ — ток насыщения транзистора, $I_{\text{к макс}}$ — предельно-допустимый ток транзистора.

6. Мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора:

$$P_{\text{к}} = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{6} E_{\text{к}} I_{\text{кн}} (\tau_{\text{ф}} + \tau_{\text{сп}}) + I_{\text{кн}} U_{\text{кн}} t_{\text{н}} + E_{\text{к}} I_{\text{ко}} (T - t_{\text{н}}) \right] \leq P_{\text{к макс}},$$

где:

$P_{\text{к макс}}$ — предельно-допустимое значение мощности рассеяния на коллекторе для максимальной рабочей температуры.

Следует иметь в виду, что все значения в формуле берутся при максимальных напряжениях и температуре с необходимым запасом.

Сопротивление коллектора следует выбирать возможно меньшей величины для повышения быстродействия триггера и нагрузочной способности, но при этом мощность, рассеиваемая на коллекторе, не должна превышать допустимого значения.

Величину ускоряющей емкости проще определить экспериментально, добиваясь минимального времени переключения.

Не следует выбирать значение емкости очень малым (менее 300 пф).

ПРАВИЛА КОНСТРУИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СХЕМ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРИБОРАМИ

КРЕПЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Способ крепления полупроводниковых приборов должен предусматривать соблюдение следующих основных правил:

а) сохранение герметичности корпуса прибора. Особенно бережного обращения требуют стеклянные изоляторы выводов. Изгиб выводов должен производиться так, чтобы отсутствовала деформация вывода у стеклянного изолятора (рис. 48). Изгиб выводов можно производить на расстоянии не меньше 10 мм от корпуса прибора. Это предотвращает случаи появления трещин в изоляторах.

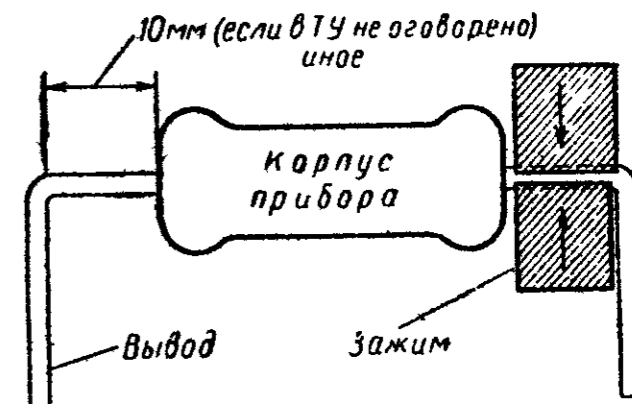


Рис. 48. Метод изгиба выводов полупроводниковых приборов.

Трещины приводят к резкому изменению параметров вследствие потери герметичности. Изгиб жестких выводов у мощных полупроводниковых приборов неизбежно приводит к появлению трещин в стеклянных изоляторах;

б) крепление транзисторов и мощных диодов за корпус с использованием всех точек и средств крепления, предусмотренных конструкцией (болты, отверстия, специальные фланцы);

в) надежный тепловой контакт корпуса полупроводниковых приборов с теплоотводом;

г) свободную конвекцию воздуха;

д) отсутствие механических резонансов в диапазоне частот, предусмотренных в технических условиях на приборы и аппаратуру в целом.

Нельзя располагать полупроводниковые приборы вблизи тех элементов схемы, в которых при работе выделяется значительное тепло: мощных ламп и сопротив-

лений, силовых трансформаторов, дросселей. Температура вблизи корпусов этих элементов может значительно превышать среднюю температуру внутри устройства.

Не рекомендуется также располагать полупроводниковые приборы в сильном магнитном поле постоянных магнитов или мощных трансформаторов и дросселей.

На выводы прибора, помещенного в магнитное поле, при прохождении тока действуют механические силы. Величина и характер их могут оказаться разрушительными для тех частей соединительных проводников, которые располагаются внутри корпуса прибора и изготавливаются иногда из проволоки очень малого диаметра (например, в сверхвысокочастотных транзисторах).

СПОСОБЫ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ВЫВОДОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СХЕМЕ

Большинство типов полупроводниковых приборов (кроме СВЧ) рассчитано на применение паяных соединений выводов с элементами схем. Как правило, пайка выводов должна производиться на расстоянии не менее 10 мм от корпуса прибора. При пайке необходимо осуществлять теплоотвод между корпусом полупроводниковых приборов и местом пайки. Следует помнить, что полупроводниковые приборы необратимо разрушаются даже при кратковременном нагревании до температуры выше $+150^{\circ}\text{C}$. Вследствие этого для пайки следует использовать припой с температурой плавления, указанной в технических условиях на прибор. Обычно температура плавления не должна превышать $+260^{\circ}\text{C}$ (например, припой ПОС-40).

Необходимо, чтобы паяльник не перегревался. Температура паяльника должна поддерживаться на заданном уровне. Корпус паяльника должен быть заземлен и время пайки должно быть минимальным. Необходимо защищать корпус и изоляторы выводов полупроводниковых приборов от попадания на них паров паяльного флюса. Попадание жидкости на полупроводниковые приборы при промывке паяных соединений недопустимо. Базовые выводы транзисторов необходимо присоединить в схему первыми и отключать последними. Не рекомендуется подавать напряжение на транзистор, базовый вывод которого отключен. Не рекомендуется производить

монтаж или установку СВЧ приборов при воздействии на них внешних полей мощных СВЧ генераторов.

Перед установкой СВЧ приборов в аппаратуру последняя должна быть заземлена. Присоединение выводов полупроводниковых приборов методом точечной электросварки допускается лишь в случае, когда это оговаривается в технических условиях. При этом должны предусматриваться меры, гарантирующие полную защиту полупроводниковых приборов от протекания по ним токов во время сварки (за пределами области сварки).

ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СХЕМЕ

Опыт работы показывает, что большая часть повреждений аппаратуры вызывается порчей полупроводниковых приборов во время измерений режимов, при наладке и контроле схем.

Наконечники проводов измерительных приборов должны иметь конструкцию, гарантирующую от случайных замыканий цепей в схемах.

При настройке не следует подавать сигналы между выводами транзисторов и диодов от генераторов с малым внутренним сопротивлением; через приборы могут при этом протекать большие, превышающие предельные, токи.

Недопустима проверка схем на полупроводниковых приборах с помощью омметров или других приборов, дающих токи в измеряемую цепь, так как при этом возможны повреждения транзисторов и диодов, особенно маломощных диодов СВЧ, очень чувствительных к перегрузкам.

Замена транзисторов, диодов и других элементов при ремонте должна производиться только при выключенных источниках питания.

Таблица 1

Классификация транзисторов

Транзисторы	Максимальная рассеиваемая мощность, <i>вт</i>	Предельная рабочая частота, <i>Мгц</i>
Малой мощности низкой частоты . .	до 0,3	до 3
Средней мощности низкой частоты .	0,3—3	, 3
Большой мощности низкой частоты .	свыше 3	, 3
Малой мощности средней частоты .	до 0,3	3—30
Средней мощности средней частоты .	0,3—3	3—30
Большой мощности средней частоты .	свыше 3	3—30
Малой мощности высокой частоты .	до 0,3	30—300
Средней мощности высокой частоты .	0,3—3	30—300
Большой мощности высокой частоты .	свыше 3	30—300
Малой мощности сверхвысокой частоты .	до 0,3	свыше 300
Средней мощности сверхвысокой частоты	0,3—3	, 300
Большой мощности сверхвысокой частоты	свыше 3	, 300

Ориентировочные интервалы изменения важнейших параметров полупроводниковых приборов, определяющих надежность их работы

Параметр	Критерий годности (сохранения работоспособности прибора)
Постоянное прямое напряжение	$U_{пр.} < 1,5 U_{пр.}^*$
Постоянный обратный ток	$I_{обр.} < 5 I_{обр.}^*$
Время восстановления обратного сопротивления	$\tau_{восст.} < 1,5 \tau_{восст.}^*$
Обратный ток коллектора	$I_{ко} < 5 I_{ко}^*$
Обратный ток эмиттера	$I_{эо} < 5 I_{эо}^*$
Коэффициент усиления по току	$0,7 \beta_{мин.}^* \leq \beta \leq 1,5 \beta_{макс.}^*$
Статический коэффициент усиления по току	$0,7 B_{ст мин.}^* \leq B_{ст} \leq 1,5 B_{ст макс.}^*$
Коэффициент шума	$F_{ш} < F_{ш}^* + 3\delta\delta.$
Напряжение стабилизации	$U_{ст.} = U_{ст.}^* \pm 10\%$
Дифференциальное сопротивление	$R_d \leq 1,5 R_d^*$

* Значение параметра, соответствующее справочным данным или техническим условиям на полупроводниковые приборы.

Таблица 3

Размеры пластинчатого радиатора
при температуре окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$

Тип транзистора	Рассеиваемая мощность, вт	Размеры пластины $l \times l \times d$, мм
П 302	5	$90 \times 90 \times 4$
П 302	5,4	$100 \times 100 \times 4$
П 601	1	$50 \times 50 \times 3$
П 601	2	$75 \times 75 \times 3$
П 601	3	$100 \times 100 \times 3$
П 601	4	$75 \times 75 \times 4$
П 201	2	$40 \times 40 \times 4$
П 4	1	$50 \times 50 \times 3$
П 4	2	$65 \times 65 \times 3$
П 4	3	$90 \times 90 \times 3$
П 210	5	$110 \times 110 \times 3$

l — ширина и длина пластины;
 d — толщина пластины.

Таблица 4

Размеры ребристых радиаторов
при температуре окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$

Тип радиатора	Тип транзистора	Рассеиваемая мощность, вт	Размеры радиатора, мм							
			$l \times L$	h	d	n	b	Δ	n_L	$n_{l_1+l_2}$
Односторонний	П4	5,5	100×100	20	4	9	10	2	—	—
	П201, П4	4	60×60	12	4	7	7	2,5	—	—
	П201, П4	8	80×80	20	5	9	7	2,5	—	—
	П201, П4									
	П210	10	120×120	25	5	11	9	3	—	—
Двусторонний	П210	9	120×120	27	4	—	10	3	12	3

l — длина радиатора;
 L — ширина радиатора (сторона, на которой развиты ребра);
 d — толщина плиты;
 n — число ребер;
 b — расстояние между ребрами;
 Δ — толщина ребра;
 n_L — число ребер полной длины;
 $n_{l_1+l_2}$ — число ребер неполной длины;
 h — высота ребра.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Основные типы и конструкции диодов и транзисторов	5
Классификация и система обозначения диодов и транзисторов	9
Основные характеристики и параметры диодов и транзисторов	14
Параметры диодов	14
Параметры транзисторов	23
Проектирование схем с полупроводниковыми приборами	31
Выбор типа полупроводникового прибора	31
Разброс параметров полупроводниковых приборов	34
Изменение параметров полупроводниковых приборов от температуры, режима работы и срока службы	34
Надежность и долговечность полупроводниковых приборов	37
Основные методы стабилизации работы схем с полупроводниковыми приборами	41
Граничные испытания схем с полупроводниковыми приборами	46
Проверка полупроводниковых приборов перед установкой в схему	47
Предельная мощность и рабочая температура полупроводниковых приборов	48
Отвод тепла от полупроводниковых приборов	50
Предельные напряжения	51
Предельные токи	56
Методы защиты полупроводниковых приборов от электрических перегрузок	56
Рекомендации по проектированию некоторых схем	63
Усилители низкой частоты, работающие на малых уровнях сигнала	63
Усилители промежуточной частоты	67
Преобразователи напряжения	63
Статические триггеры	70
Правила конструирования и эксплуатации схем с полупроводниковыми приборами	73
Крепление полупроводниковых приборов	73
Способы присоединения выводов полупроводниковых приборов в схеме	74
Измерение и контроль режимов работы полупроводниковых приборов в схеме	75
Приложение	76

*Юрий Алексеевич Овечкин,
Анатолий Михайлович Савченко,
Николай Николаевич Смирнов*

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Редактор *А. А. Васильев*
Художественный редактор *Г. А. Ушаков*
Технический редактор *Р. Б. Хазен*
Корректор *В. Н. Липидус*

Г34583. Подписано к печати 29/III-66 г. Изд. № 1/4056
Бумага 84×108¹/₂, 2,5 физ. п. л. = 4,20 усл. п. л. Уч.-изд. л. 3,819.
Цена 16 коп. Тираж 100000 экз., в т. ч. эксп. 2000 экз.
Издательство ДОСААФ, Москва, Б-66, Ново-Рязанская ул., 26

4-я военная типография. Зак. 1628.