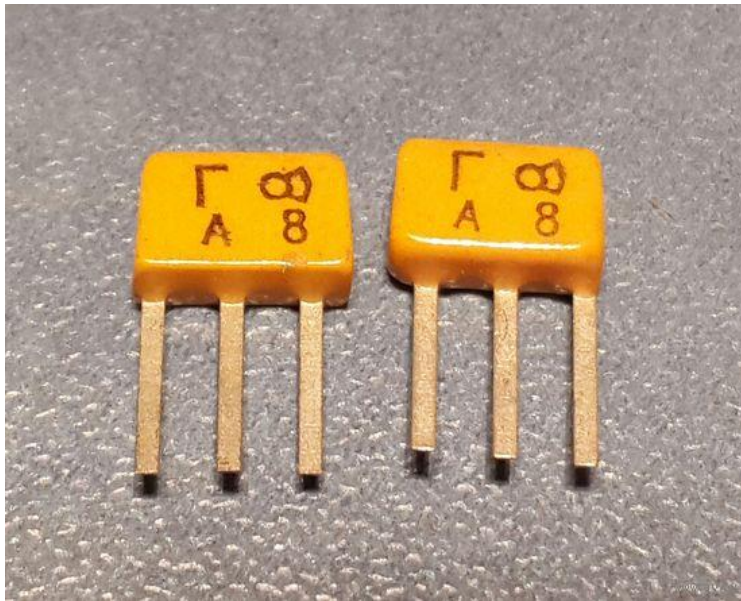


3. Транзисторы и тиристоры



Транзистор – полупроводниковый прибор, обладающий усилительными свойствами, с двумя взаимодействующими электрическими переходами и тремя (или более) выводами. Транзисторы предназначены для усиления и генерации электрических сигналов.

В зависимости от способа управления транзисторы делятся на две группы:

1. Биполярные транзисторы.

В таких транзисторах используются носители заряда двух типов: электроны и дырки. Управление движением зарядов в этих транзисторах осуществляется током.

2. Полевые (униполярные) транзисторы.

В образовании выходного тока в таких транзисторах принимают участие носители заряда одного знака (электроны или дырки). Управление движением зарядов в этих транзисторах осуществляется напряжением.

3.1 Биполярные транзисторы

На рисунке 8 приведено условное графическое обозначение двух типов биполярных транзисторов: $n-p-n$ и $p-n-p$.

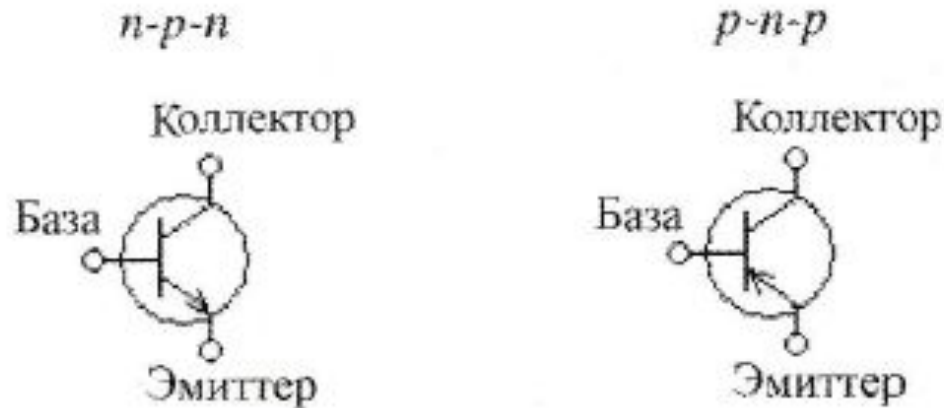


Рис. 8

3.2 Принцип работы биполярного транзистора

Физическая модель биполярного транзистора и схема его включения в активном режиме приведены на рисунке 9.

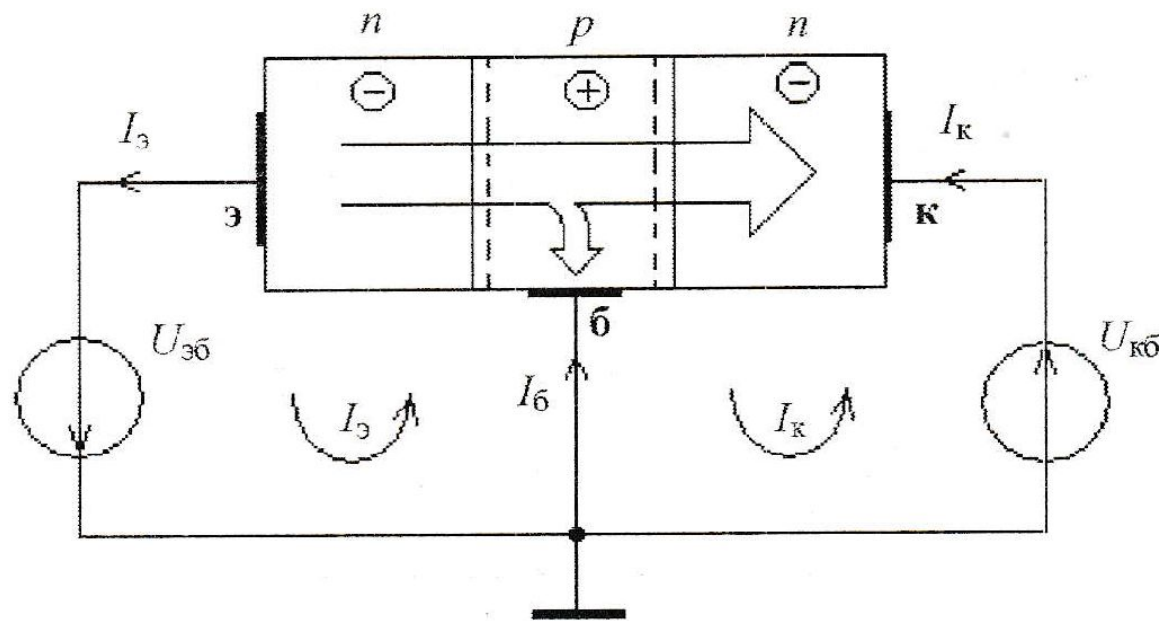


Рис. 9

Эмиттер выполнен из сильно легированного полупроводника и является инжектором носителей заряда для области базы. База слабо легирована примесями. Ширина базы много меньше диффузионной длины. Коллектор сильно легирован примесями и предназначен для экстракции (поглощения) носителей зарядов, инжектируемых эмиттером.

При работе в активном режиме полярности источников напряжения $U_{эб}$, $U_{кб}$ выбираются так, что эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный переход – в обратном направлении.

Основные соотношения токов в биполярном транзисторе:

$$1) I_э = I_к + I_б;$$

$$2) I_б = \alpha I_э + I_{к0};$$

$$3) I_к = \beta I_б,$$

где $I_б$ – ток базы; $I_к$ – ток коллектора; $I_э$ – ток эмиттера, α – коэффициент передачи тока эмиттера ($\alpha = I_к / I_э$, $\alpha = 0,95 \dots 0,99$); β – коэффициент передачи тока базы; $I_{к0}$ – собственный тепловой ток коллекторного перехода.

3.3 Схемы включения биполярного транзистора

Различают три схемы включения транзистора:

1. С общей базой ($\alpha = I_K / I_Э \leq 1$) (рис. 10):

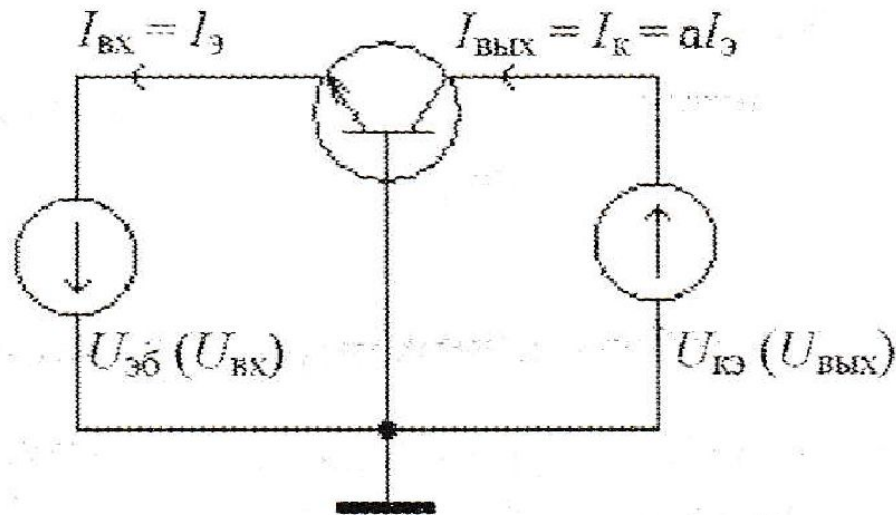


Рис. 10

2. С общим эмиттером ($\beta = I_{\text{к}} / I_{\text{б}} \gg 1$) (рис. 11):

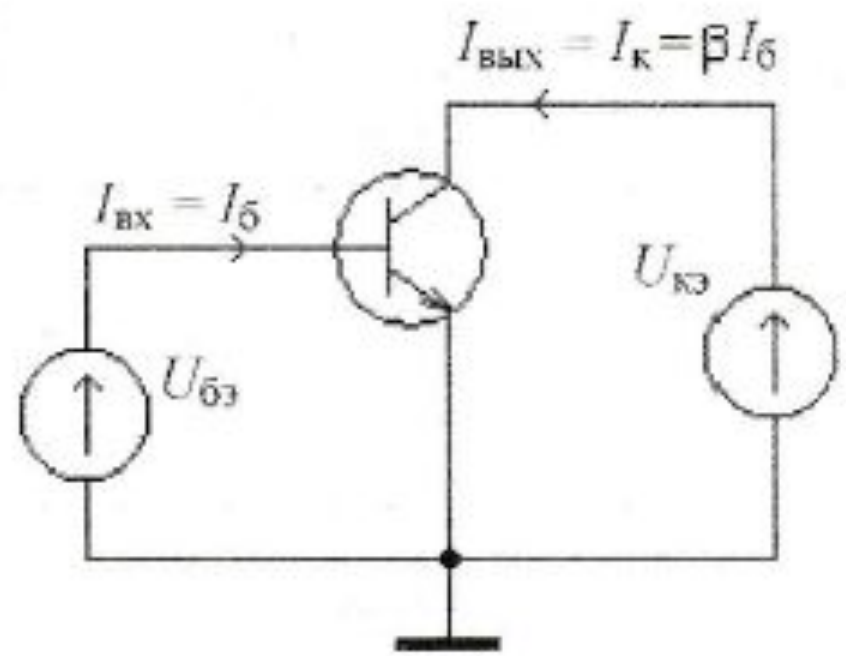


Рис. 11

3. С общим коллектором (рис. 12):

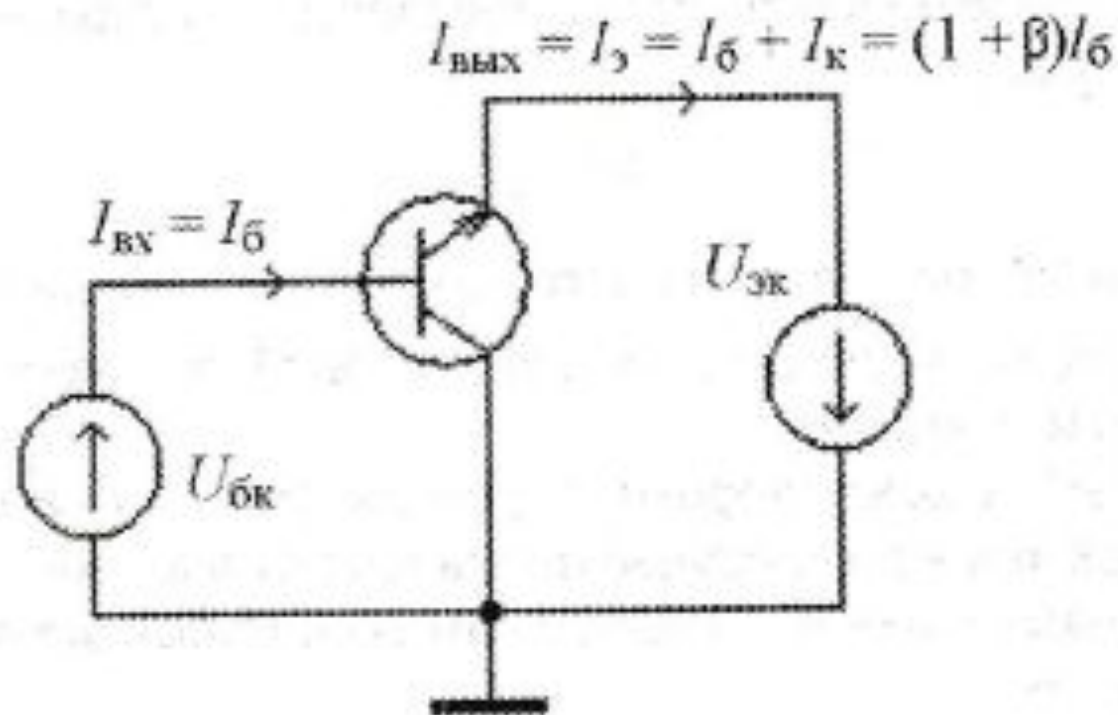


Рис. 12

При включении с общей базой (ОБ) транзистор усиливает входной сигнал по напряжению и мощности, но имеет наименьшее входное и наибольшее выходное сопротивления, а также коэффициент усиления по току, который меньше единицы.

При включении с общим коллектором (ОК) транзистор обладает наибольшим входным и наименьшим выходным сопротивлениями и коэффициентом усиления по току и мощности, большим единицы. Коэффициент усиления по напряжению меньше единицы.

При включении с общим эмиттером (ОЭ) транзистор имеет промежуточные (между ОБ и ОК) входное и выходное сопротивления, усиливает сигнал по напряжению и по току и, как следствие, позволяет получить наибольшее усиление мощности.

Все эти характеристики учитываются при проектировании электронных устройств.

3.4 Режимы работы транзистора

В зависимости от величины и полярности напряжений между выводами транзистора различают четыре режима работы транзистора:

1. Активный режим (нормальный, усилительный).

$$I_{\text{вых}} = kI_{\text{вх}},$$

где k – коэффициент передачи по току. Коллекторный переход смещен в обратном направлении, а эмиттерный переход – в прямом направлении. Этот режим работы транзистора соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера и обеспечивает минимальные искажения усиливаемого сигнала. Такой режим используется в усилителях и генераторах электрических сигналов.

2. Режим отсечки коллекторного тока.

Эмиттерный и коллекторный переходы смещены в обратном направлении. В коллекторной цепи ток транзистора в режиме отсечки практически равен нулю:

$$I_k = I_{k_0},$$

где I_{k_0} — тепловой ток коллекторного, обратного смещенного перехода. Режим отсечки используется для размыкания цепей передачи сигналов.

3. Режим насыщения.

Эмиттерный и коллекторный переходы смещены в прямом направлении. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Режимы отсечки и насыщения применяется в ключевых схемах.

4. Инверсный режим.

Эмиттерный переход смещен в обратном, а коллекторный переход – в прямом направлении. Входным током является ток коллектора, а выходным – ток эмиттера. Такой режим используется в цифровых и логических схемах, а также в схемах двунаправленных переключателей.

3.5 ВАХ биполярного транзистора

Входная и выходная вольт-амперные характеристики биполярного транзистора представляют собой зависимости токов от напряжений на выводах биполярного транзистора, представленные в виде семейства графиков.

Входная ВАХ биполярного транзистора $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$ для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, приведена на рисунке 13,а, а выходная ВАХ $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$ – на рисунке 13,б.

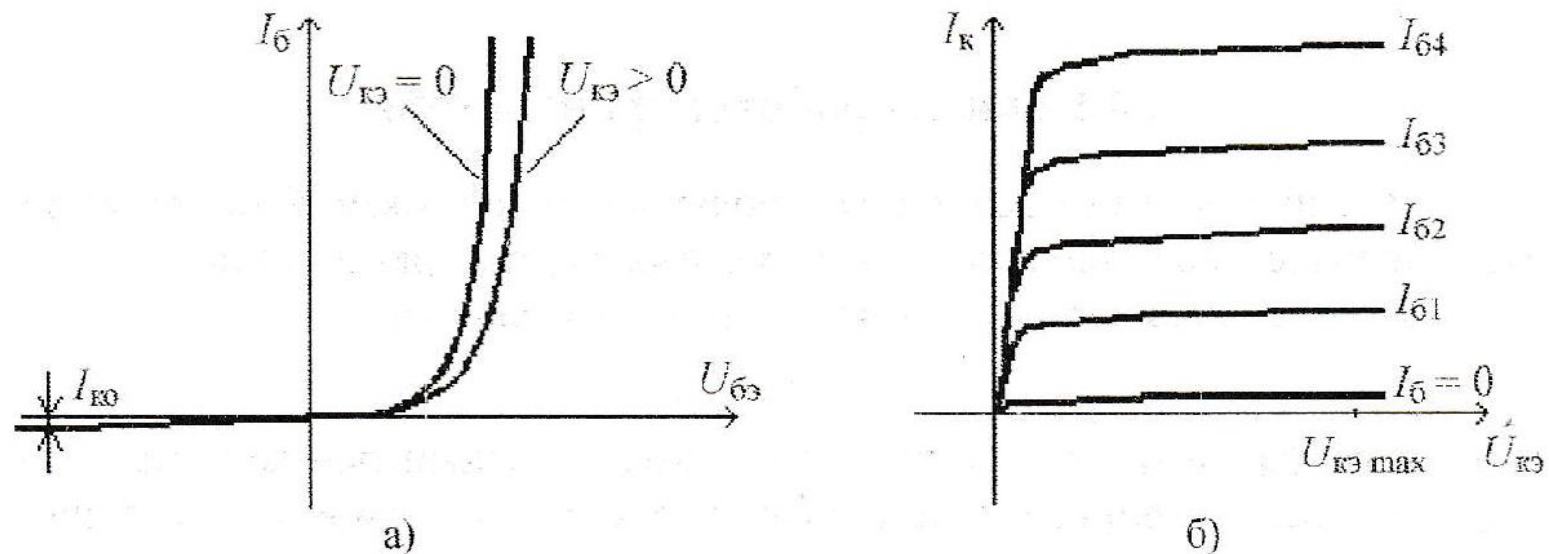
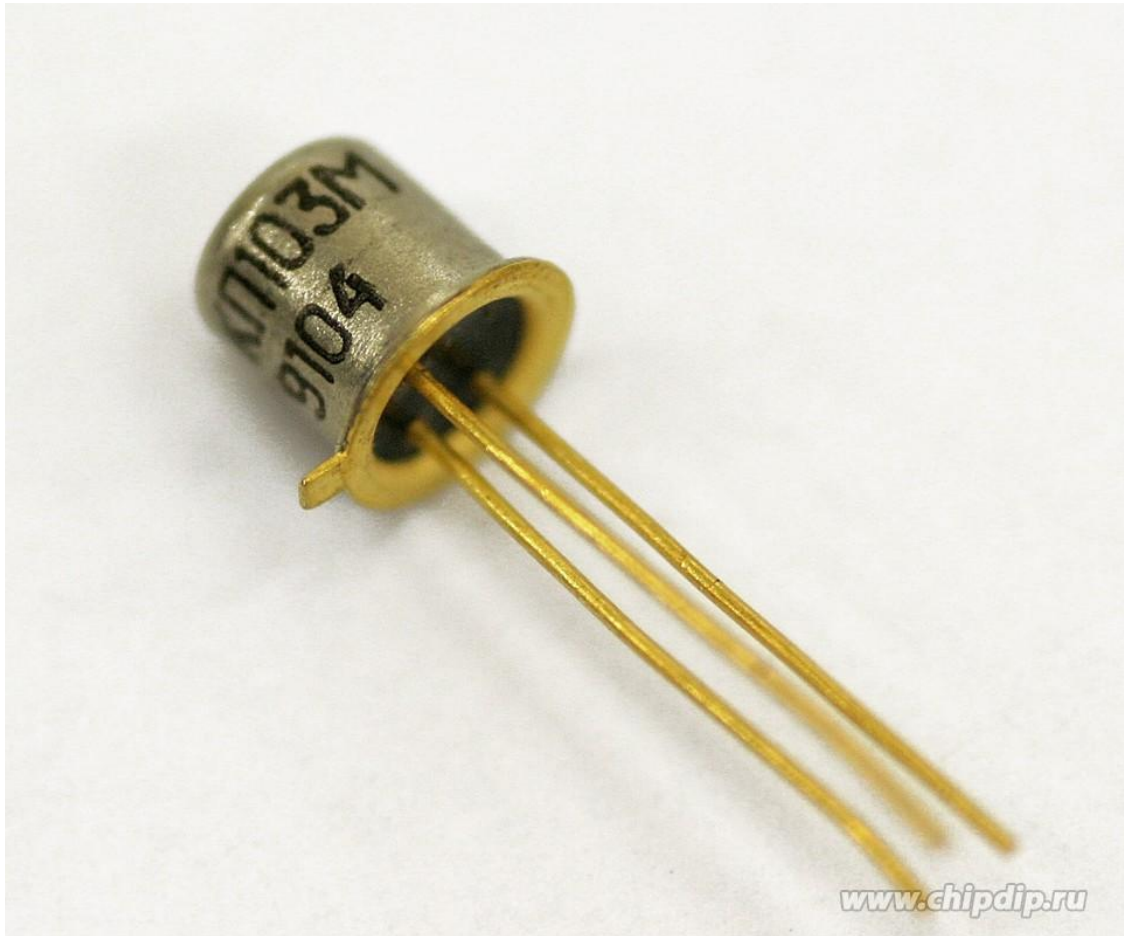


Рис. 13

Температура оказывает существенное влияние на параметры и характеристики транзистора. Наиболее сильно она влияет на тепловой ток коллекторного перехода, который с повышением температуры значительно увеличивается.

3.6 Полевые транзисторы



Полевой транзистор – полупроводниковый усилительный прибор, управляемый напряжением (электрическим полем, отсюда и название – полевой), осуществляющим изменение площади поперечного сечения проводящего канала, в результате чего изменяется выходной ток транзистора. Управление электрическим полем предполагает отсутствие статического входного тока, что позволяет уменьшить мощность, требуемую для управления транзистором. Полевой транзистор можно сравнить с переменным сопротивлением, управляемым напряжением.

Управляющим электродом у полевых транзисторов является затвор. Напряжение, приложенное к нему, позволяет управлять величиной сопротивления между истоком и стоком. Большинство полевых транзисторов имеет симметричную структуру, что позволяет менять местами сток и исток.

3.7 Устройство и принцип работы полевого транзистора

Транзистор состоит из слаболегированного полупроводника n -типа, выполненного в виде тонкой пластинки или стержня (рис. 14). На каждую из боковых граней канала наносится полупроводник p -типа, представляющий собой затвор. Торцы пластины n -типа снабжены электродами. Один из выводов (каналов) – исток (соединяется с общей точкой схемы), а другой – сток. На сток подают напряжение такой полярности, чтобы основные носители канала двигались к стоку, т.е. в n -канальном – «+», а в p -канальном – «-». Между затвором p^+ и каналом n образуется p - n -переход, в основном располагающийся в области каналов, поскольку он слабо легирован. На затвор относительно истока подают управляющее напряжение такой полярности, чтобы p - n -переход был смещен в обратном направлении. При изменении направления в затворе изменяется ширина p - n -перехода области, объединенной носителями зарядов, а вместе с этим и ширина проводящей части канала. В результате изменяется сопротивление «сток-исток», а следовательно, и ток стока.

В полевом транзисторе с объемным каналом площадь поперечного сечения канала меняется за счет изменения площади обедненного слоя обратно включенного $p-n$ -перехода.

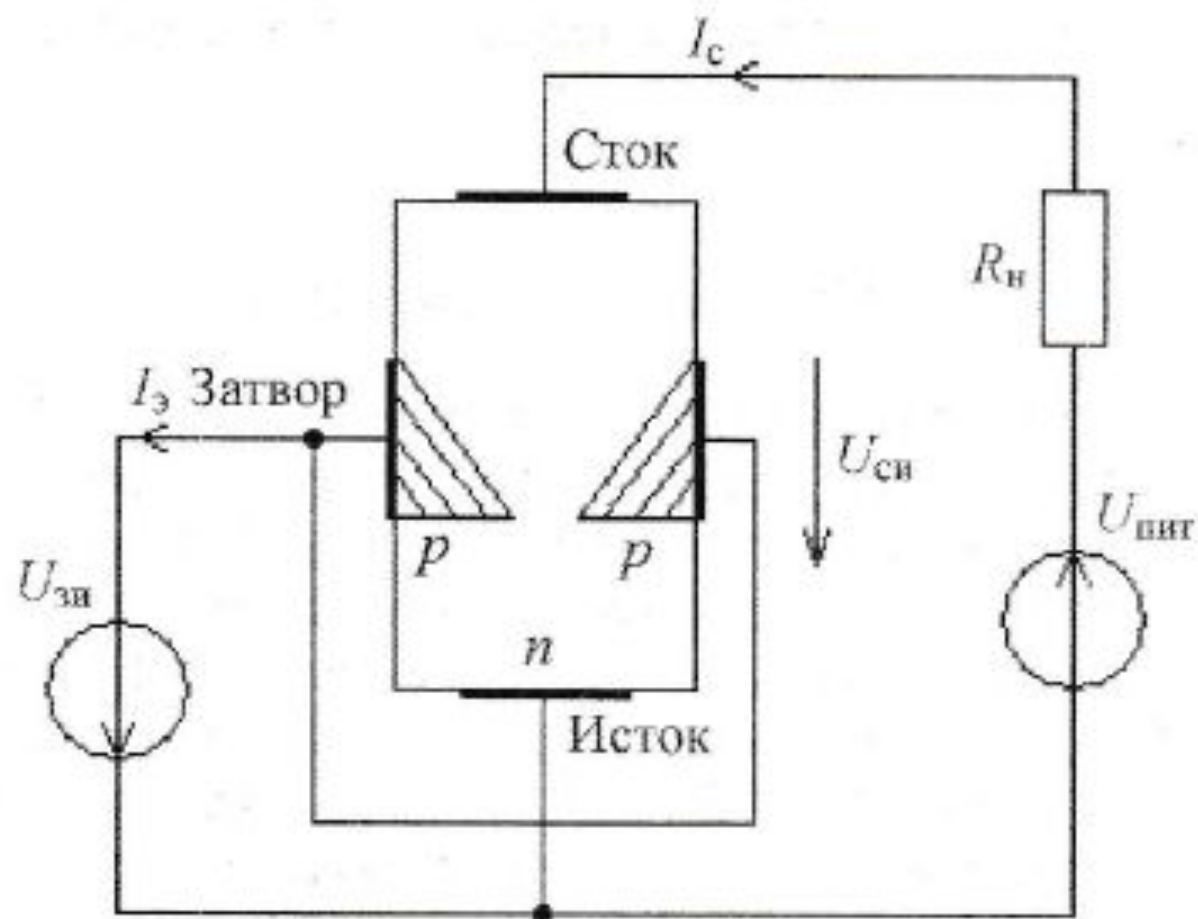


Рис. 14

На $p-n$ -переход (затвор–исток) подается обратное напряжение $U_{зи}$. При его уменьшении глубина обедненного слоя (заштрихованная область) возрастает, а токопроводящее сечение канала сужается. При этом увеличивается сопротивление канала, и, следовательно, снижается выходной ток I_c транзистора.

Статические ВАХ n -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом представлены на рисунке 15.

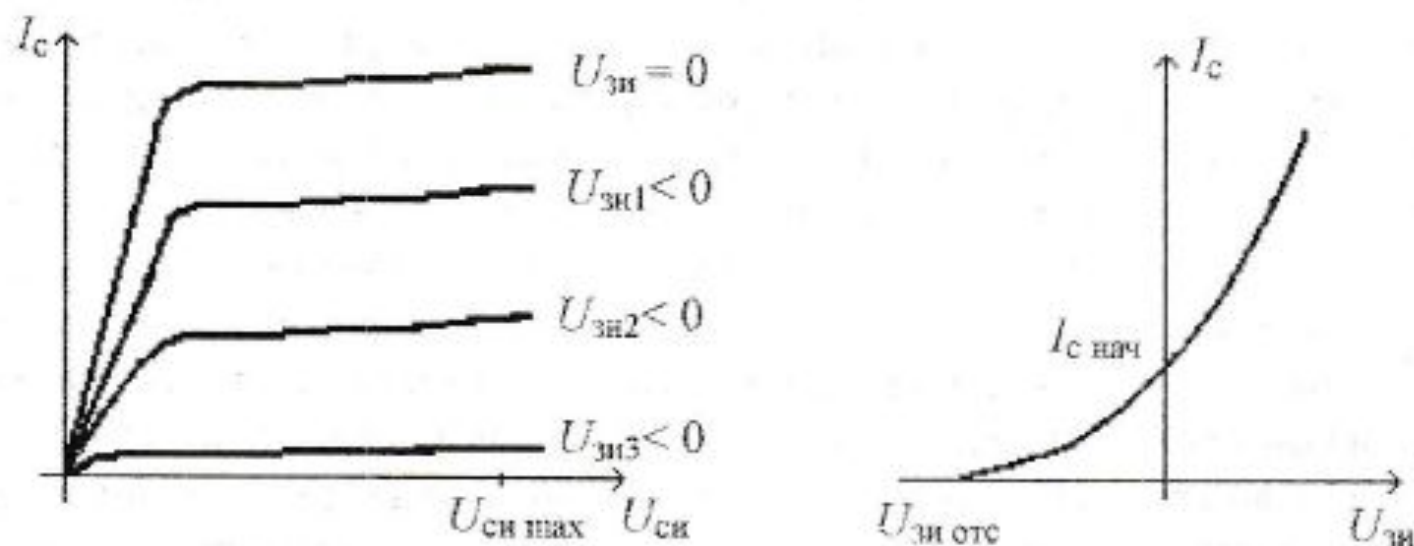


Рис. 15

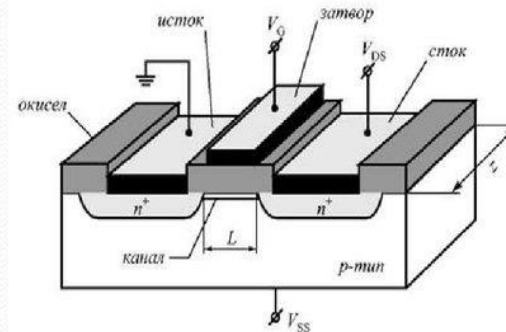
$I_c = f(U_{си})|_{U_{зи} = \text{const}}$ – выходная ВАХ, $I_c = f(U_{зи})|_{U_{си} = \text{const}}$ – передаточная.

Выходную ВАХ полевого транзистора иногда называют стоковой. Передаточная характеристика характеризует процесс управления током стока при помощи входного напряжения.

3.8 Полевые транзисторы с изолированным затвором

МДП-транзистор

Физической основой работы МДП-транзистора является эффект поля, который состоит в изменении концентрации свободных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего электрического поля. В структурах МДП внешнее поле обусловлено приложенным напряжением на металлический электрод (затвор) относительно полупроводниковой подложки.



В полевых транзисторах с изолированным затвором (МДП-транзисторах) металлический затвор изолирован от токопроводящего канала, образованного при поверхностном слое полупроводника, слоем диэлектрика. Принцип действия МДП-транзистора основан на управлении пространственным зарядом канала через слой диэлектрика. При изготовлении такого транзистора канал не создается, т.е. области стока и истока отделены друг от друга. Однако при подаче на затвор положительного напряжения под действием поля в приповерхностной области затвора появляется канал за счет электронов, втягиваемых в эту область из объема подложки и областей стока и истока, т.е. канал индуцируется электрическим полем.

В зависимости от способа создания канала МДП-транзисторы бывают двух видов:

1. МДП-транзисторы с встроенным каналом. В них канал создается при изготовлении транзистора.
2. МДП-транзистор с индуцированным каналом.

Основными параметрами, характеризующими полевой транзистор как нелинейный элемент, являются:

- Коэффициент усиления по напряжению:

$$k_u = \mu = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}.$$

- Крутизна (определяется по передаточной характеристике):

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}.$$

Крутизна S передаточной характеристики отражает степень влияния входного напряжения на выходной ток, т.е. эффективность управляющего действия затвора, и составляет 1...5 мА/В.

- Дифференциальное выходное (внутреннее R_i) сопротивление:

$$R_{вых} = R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_c \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

- Дифференциальное сопротивление участка затвор–сток:

$$R_{зс} = \Delta U_{зс} / \Delta I_c.$$

Дифференциальное сопротивление учитывает обратную связь между выходом и входом полевого транзистора.

Основными преимуществами полевого транзистора являются его большое входное сопротивление по постоянному току, большая температурная стабильность характеристик и высокая технологичность.

Условные графические обозначения полевых транзисторов приведены на рисунке 16.

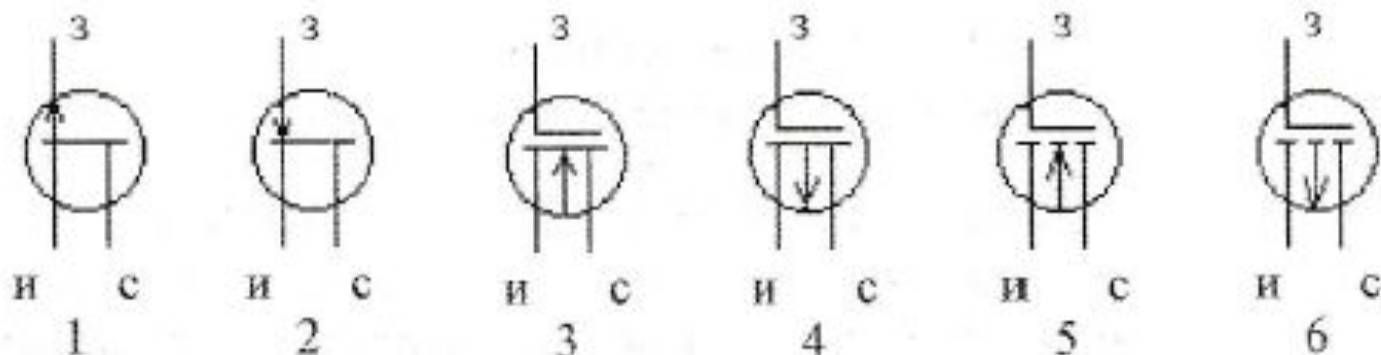


Рис. 16: 1 – полевой транзистор с управляющим p - n -переходом и n -каналом; 2 – полевой транзистор с управляющим p - n -переходом и p -каналом; 3 – МДП-транзистор с встроенным n -каналом; 4 – полевой транзистор с встроенным p -каналом; 5 – МДП-транзистор с индуцированным n -каналом; 6 – МДП-транзистор с индуцированным p -каналом

Полевые транзисторы обладают рядом существенных преимуществ над биполярными:

1) имеют высокое входное сопротивление ($10^6 \div 10^8$ Ом для транзисторов с управляющим *p-n*-переходом, $10^{10} \div 10^{12}$ Ом – для МДП-транзисторов);

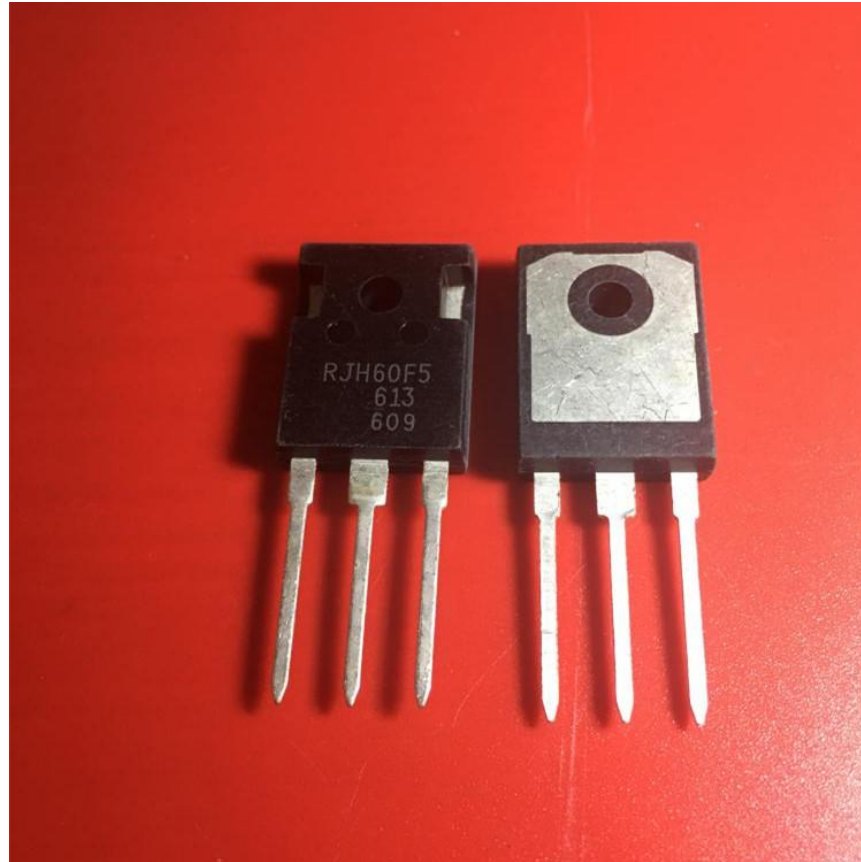
2) устойчивы к воздействию ионизирующего излучения;

3) способны работать при низких и высоких температурах;

4) обладают малым уровнем собственного шума;

5) имеют малую площадь, занимаемую на поверхности полупроводника, что позволяет на их основе изготавливать интегральные схемы с высокой степенью интеграции.

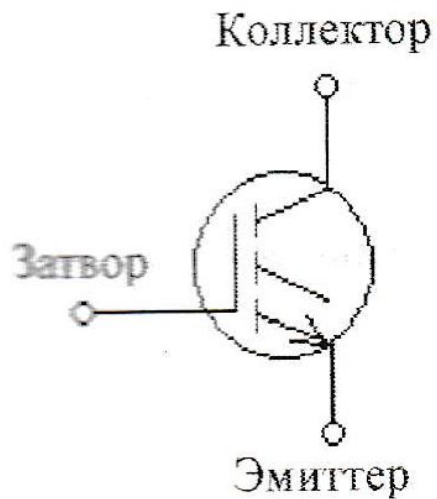
3.9 Биполярные транзисторы с изолированным затвором



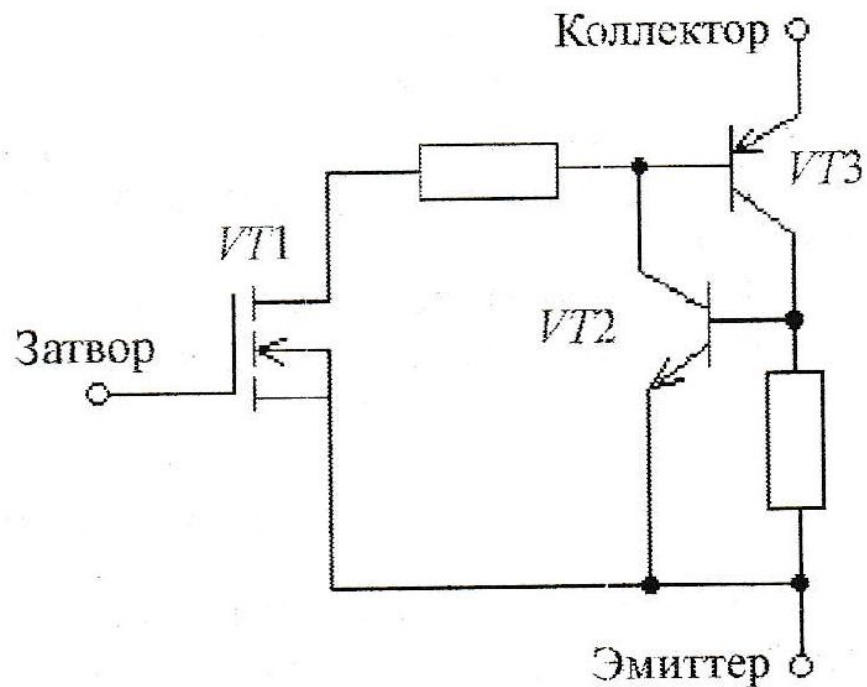
Биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*-транзисторы, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) являются гибридными полупроводниковыми приборами. В таких транзисторах совмещены два способа управления электрическим током: управление электрическим полем (характерно для полевых транзисторов) и управление инжекцией носителей заряда (характерно для биполярных транзисторов).

Условное графическое обозначение *IGBT*-транзистора приведено на рисунке 17,а, а его эквивалентная схема – на рисунке 17,б.

IGBT-транзистор можно представить как соединение трех транзисторов: полевого транзистора *VT1* с изолированным затвором и индуцированным каналом *n*-типа, мощного биполярного транзистора *p-n-p* структуры *VT3* и паразитного транзистора *n-p-n* структуры *VT2*, появляющегося в полупроводниковой структуре при изготовлении транзистора. Из-за наличия транзистора *VT2* при больших токах иногда возникает «триггерный эффект», при котором транзистор *VT3* находится во включенном состоянии и перестает управляться транзистором *VT1*.



а)



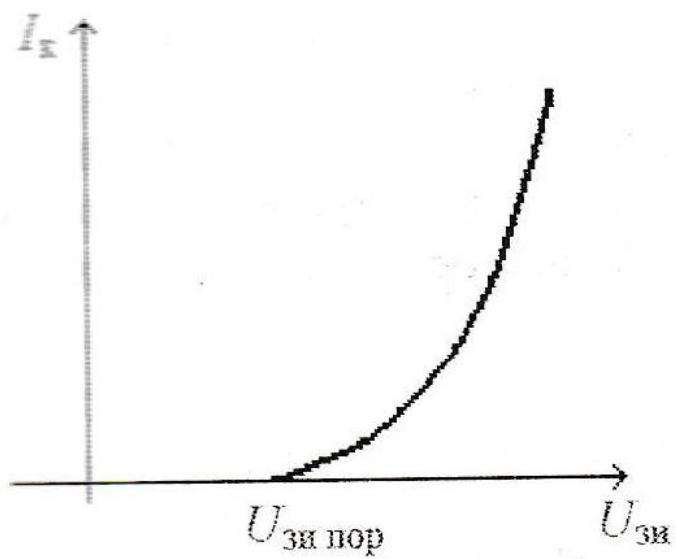
б)

Рис. 17

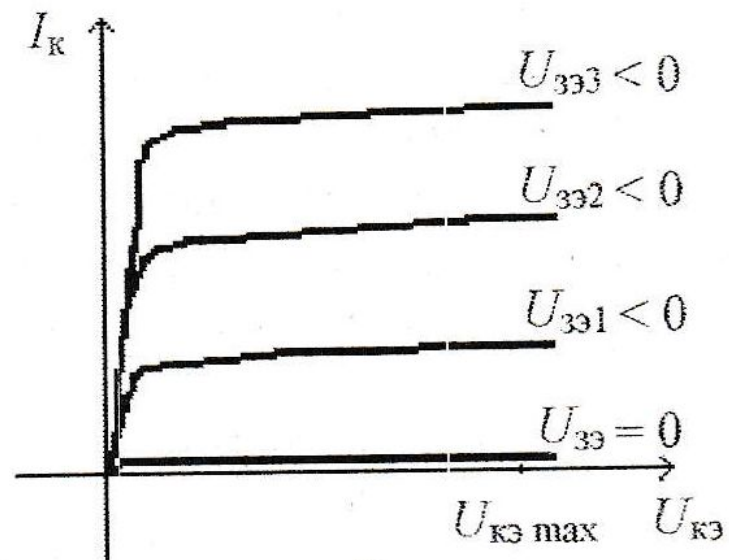
Это преимущество особенно заметно при напряжениях питания более 500 В, где мощные полевые транзисторы имеют достаточно большое сопротивление цепи сток–исток в открытом состоянии.

Передачная ВАХ *IGBT*-транзистора приведена на рисунке 18,а, а выходная ВАХ – на рисунке 18,б.

Преимущество *IGBT*-транзисторов перед мощными полевыми транзисторами состоит в существенно меньшем напряжении на коллекторно-эмиттерном переходе в открытом состоянии, т.к. снижение напряжения приводит к пропорциональному снижению мощности, рассеиваемой транзистором.



а)



б)

Рис. 18

3.10 Маркировка транзисторов

Обозначение транзистора состоит из шести символов:

К Т 5 0 3 А
1 2 3 4 5 6

- 1 – характеризует материал (Г – Ge, К – Si);
- 2 – функциональное назначение (Т – биполярный транзистор, П – полевой транзистор);
- 3 – цифра, связанная с мощностью рассеивания и его частотными свойствами;
- 4 и 5 – порядковый номер разработки;
- 6 – цифра, характеризующая деление по параметрическим группам.

Значение третьего символа в обозначении транзистора

для транзисторов малой мощности (максимальная мощность, рассеиваемая транзистором, не более 0,3 Вт):

- 1 — с граничной частотой коэффициента передачи тока или максимальной рабочей частотой (далее граничной частотой) не более 3 МГц;
- 2 — с граничной частотой 3...30 МГц;
- 3 — с граничной частотой более 30 МГц;

для транзисторов средней мощности (0,3...1,5 Вт):

- 4 — с граничной частотой не более 3 МГц;
- 5 — с граничной частотой 3...30 МГц;
- 6 — с граничной частотой более 30 МГц;

для транзисторов большой мощности (более 1,5 Вт):

- 7 — с граничной частотой не более 3 МГц;
- 8 — с граничной частотой 3...30 МГц;
- 9 — с граничной частотой более 30 МГц.

3.11 Тиристоры

Тиристоры – это полупроводниковые приборы с тремя и более *p-n*-переходами, которые предназначены для использования в качестве электрических ключей в схемах коммутации больших по величине токов при сравнительно невысоком быстродействии. В зависимости от числа выводов и способов управления тиристоры делятся на следующие группы:

1. Динисторы

1. **Динистор** – «диодный тиристор». Является неуправляемым прибором, и при малом напряжении между анодом и катодом ($U_{ак}$) он находится в закрытом состоянии. При достижении $U_{ак} = U_{вкл}$ переключается в открытое состояние. Условное графическое обозначение динистора приведено на рисунке 19,а.



2. Тригисторы

2. Тригистор – «триодный тиристор». Не проводит ток в обратном направлении. Включается при прямом напряжении на аноде при подаче импульса тока в цепь управляющего электрода. Условное графическое обозначение тригистора приведено на рисунке 19,б.



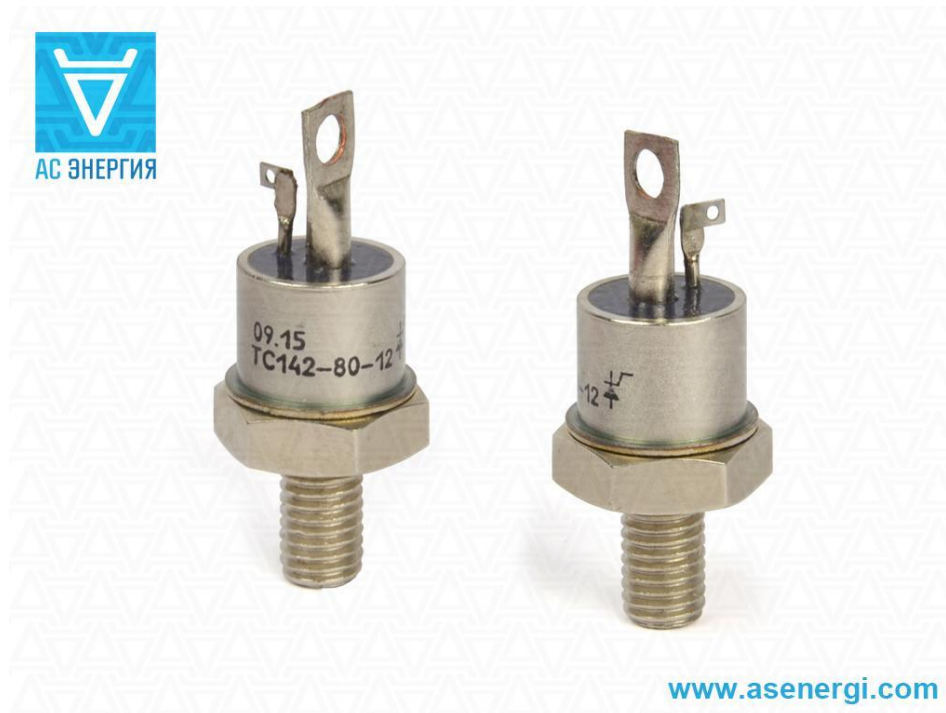
3. Запираемый тиристор

3. **Запираемый тиристор.** Включается при прямом напряжении на аноде, при подаче импульса тока в цепь управляющего электрода. Запирается при подаче импульса тока на управляющий электрод. Условное графическое обозначение запираемого тиристора приведено на рисунке 19,в.



4. Симистор

4. Симистор – симметричный тиристор. Является эквивалентом двух встречно-параллельно соединенных тиристоров. Пропускает ток как в прямом, так и в обратном направлениях. Условное графическое обозначение симистора приведено на рисунке 19,г.



Условно-графическое обозначение тиристоров

- а. динистор
- б. тринистор
- в. запираемый тиристор
- г. симистор

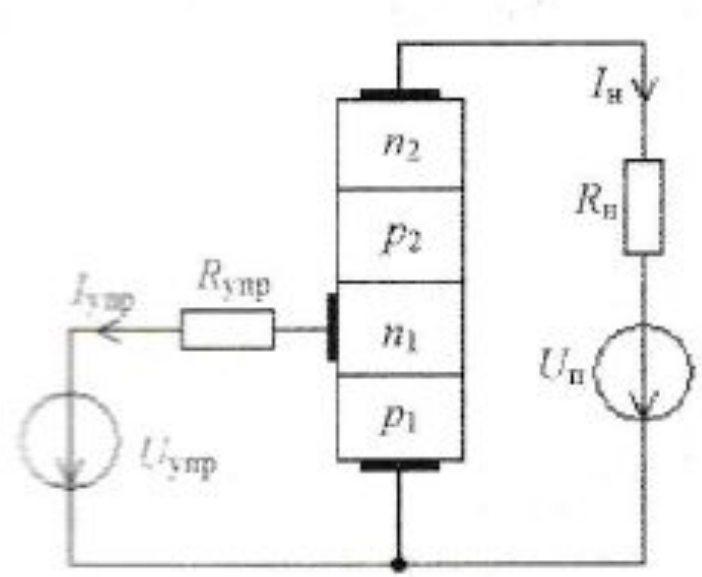


Рис. 19

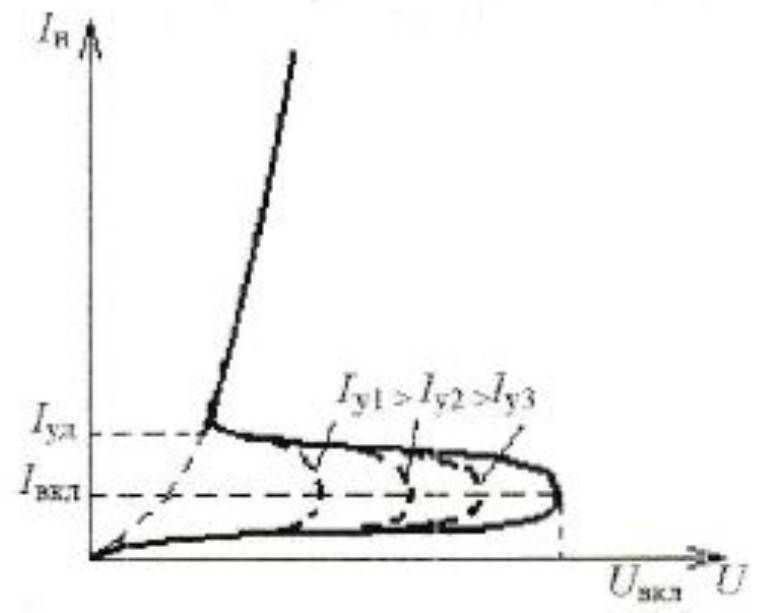
3.12 Принцип работы и ВАХ тринистора

Тринистор представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру, в которой одна из базовых областей сделана управляющей. В зависимости от того, база какого условного транзистора сделана управляющей, различают тринисторы с анодным и катодным управлением. Базовый вывод дает возможность управлять током близлежащего эмиттера. Для этого на управляющий электрод необходимо подать напряжение такой полярности, которая обеспечит отпирание соответствующего эмиттерного перехода.

На рисунке 20,а приведена структура тринистора, а на рисунке 20,б — его вольт-амперная характеристика.



а)



б)

Рис. 20

3.13 Основные параметры тринисторов

- $U_{\text{вкл}}$ – напряжение включения;
- $U_{\text{ост}}$ – величина напряжения на тринисторе, находящемся во включенном состоянии.
- $I_{\text{уд}}$ – ток удержания; при протекании через тринистор тока меньше этой величины тиристор выключается;
- I_{max} – максимально возможный ток, протекаемый через тринистор;
- $U_{\text{обр max}}$ – максимальное обратное напряжение, приложенное к тринистору;
- $I_{\text{обр}}(U_{\text{обр}})$ – обратный ток при максимальном обратном напряжении;
- $I_{\text{упр max}}$ – максимально допустимый ток управляющего электрода;
- $t_{\text{вкл}}$ $t_{\text{выкл}}$ – время включения и время выключения тринистора.

Маркировка тринисторов состоит из шести элементов. Отличие от маркировки транзисторов заключается во втором элементе, который указывает на функциональное назначение полупроводникового прибора: Н – динистор, У – тринистор, симистор, например: КН102А, КУ202Н.

Динисторы часто используют в импульсных генераторах для формирования импульсов напряжения и в схемах управления мощными тринисторами и симисторами. Тринисторы и симисторы обычно используются в регуляторах мощности в цепях переменного тока.