

ЛЕКЦИЯ

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРА, ТИРИСТОРЫ.

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.

Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, имеющий три электрода: исток, сток и затвор.

Между истоком и стоком в кристалле полупроводника, из которого выполнен полевой транзистор, расположен **канал**, через который течет ток транзистора. Канал выполняется из полупроводника одного типа — ***n*** или ***p***. Управление током, текущим через канал, осуществляется путем изменения проводимости канала, которая зависит от напряжения между затвором и истоком.

В отличие от биполярных транзисторов, в которых ток транзистора от эмиттера к коллектору течет последовательно через два перехода, в полевых транзисторах ток течет через канал, который образуется в полупроводнике одного типа проводимости, и через ***p-n*** переходы не течет.

Так как направление тока в полевом транзисторе — от истока — через канал — к стоку, а управление током осуществляется напряжением между затвором и истоком, то исток соответствует эмиттеру биполярного транзистора, сток — коллектору, а затвор — базе.

Изменение проводимости канала может осуществляться двумя способами. В зависимости от этого полевые транзисторы делятся на два основных вида: транзисторы *с управляющим ***p-n***-переходом* и транзисторы *с изолированным затвором*.

*Полевые транзисторы с управляющим ***p-n*** переходом.*

В полевых транзисторах с управляющим ***p-n***-переходом управление током транзистора достигается путем изменения сечения канала за счет изменения области, занимаемой этим переходом. Управляющий ***p-n***-переход образуется между каналом и затвором, которые выполняются из полупроводников противоположных типов проводимости. Так, если канал образован полупроводником ***n***-типа (на рис. 1.), то затвор — полупроводником ***p***-типа. Напряжение между затвором и истоком всегда подается обратной полярности, т.е. запирающей ***p-n***-переход. Напомним, что при подаче напряжения обратной полярности область, занимаемая ***p-n***-переходом, расширяется. При этом расширяется и область, обедненная носителями заряда, а, значит, сужается область канала, через которую может течь ток. Причем чем больше значение запирающего напряжения, тем шире область, занимаемая ***p-n***-переходом, и тем меньше сечение и проводимость канала. Условные обозначения транзисторов с разными каналами показаны на рис. 1 б, в.

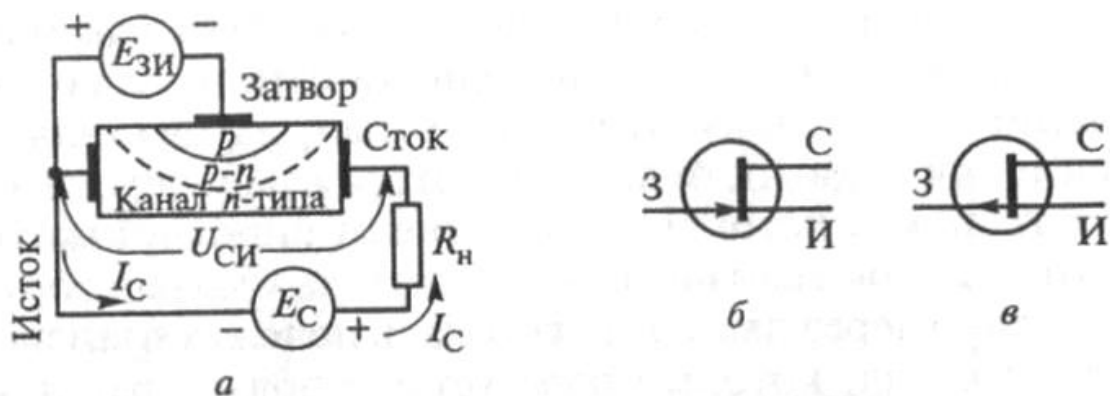


рис. 1 Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом (а); условное обозначение транзисторов с n-каналом (б) и р-каналом (в).

Так же как и для биполярных транзисторов, для описания работы полевых транзисторов используют выходные характеристики. Выходная характеристика полевого транзистора — это зависимость тока стока I_C от напряжения между стоком и истоком при фиксированном напряжении между затвором и истоком.

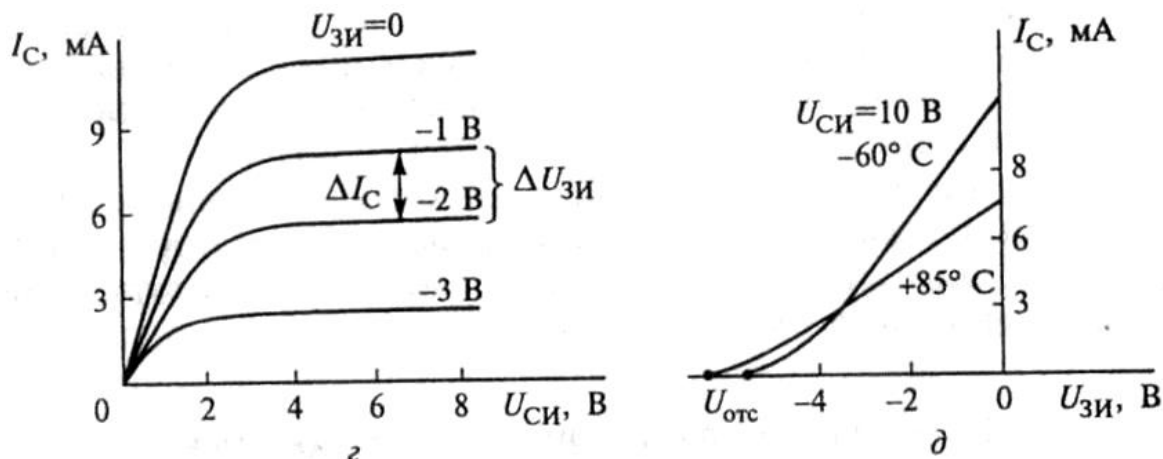


рис. 1 Полевые транзисторы, выходные характеристики (г); стокзатворные (передаточные) характеристики (д)

Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р-п переходом показаны на рис. 1 г. Как видно, они очень похожи на выходные характеристики биполярного транзистора. В отличие от биполярного, работа полевого транзистора может также описываться непосредственной зависимостью выходного параметра — тока стока от входного — управляющего напряжения между затвором и истоком. Эти характеристики называются передаточными или стокзатворными (рис. 1 д). В зависимости от температуры эти характеристики несколько изменяются. Напряжение U_m , при котором канал полностью перекрывается ($I_C = 0$), называется напряжением отсечки $U_{отс}$. Управляющее действие затвора характеризуют крутизной, которая может быть определена по выходным характеристикам (рис. 1 г)

Так как управляющий р-п-переход всегда заперт, у полевых транзисторов практически отсутствует входной ток. Благодаря этому они имеют очень высокое входное сопротивление и практически не потребляют мощности от источника управляющего сигнала. Это свойство относится не только к транзисторам с управляющим р-п-переходом, но и ко всем полевым транзисторам, что выгодно отличает их от биполярных.

Полевые транзисторы с изолированным затвором

Если в полевых транзисторах с управляющим р-п-переходом затвор имеет электрический контакт с каналом, то в полевых транзисторах с изолированным затвором такой контакт отсутствует. В этих транзисторах (рис. 2а) затвор представляет собой тонкую пленку металла, изолированного от полупроводника.

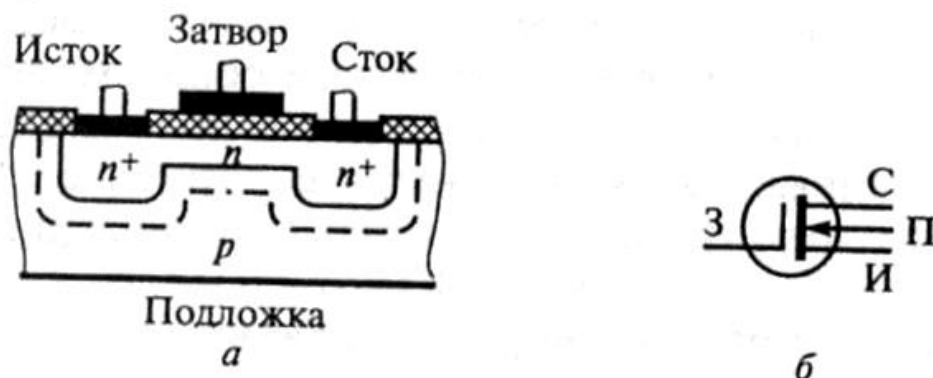


рис. 2 Полевые транзисторы с изолированным затвором и встроенным каналом(а); условное обозначение транзисторов с n-каналом (б).

В зависимости от вида изоляции различают МДП- и МОП- транзисторы.

Аббревиатура «МДП» расшифровывается как «металл — диэлектрик — полупроводник», а «МОП» — как «металл — оксид — полупроводник». В последнем случае под оксидом понимается оксид кремния, который является диэлектриком.

Исток и сток формируют в виде сильнолегированных областей полупроводника. За счет этого области истока и стока имеют высокую концентрацию носителей, что отмечено на рисунке знаком «+». Как МДП-, так и МОП-транзисторы могут быть выполнены с каналом р- и n-типов. Канал в этой группе транзисторов может быть встроенным (т.е. созданным при изготовлении) и индуцированным (т.е. наводящимся под влиянием напряжения, приложенного к затвору)

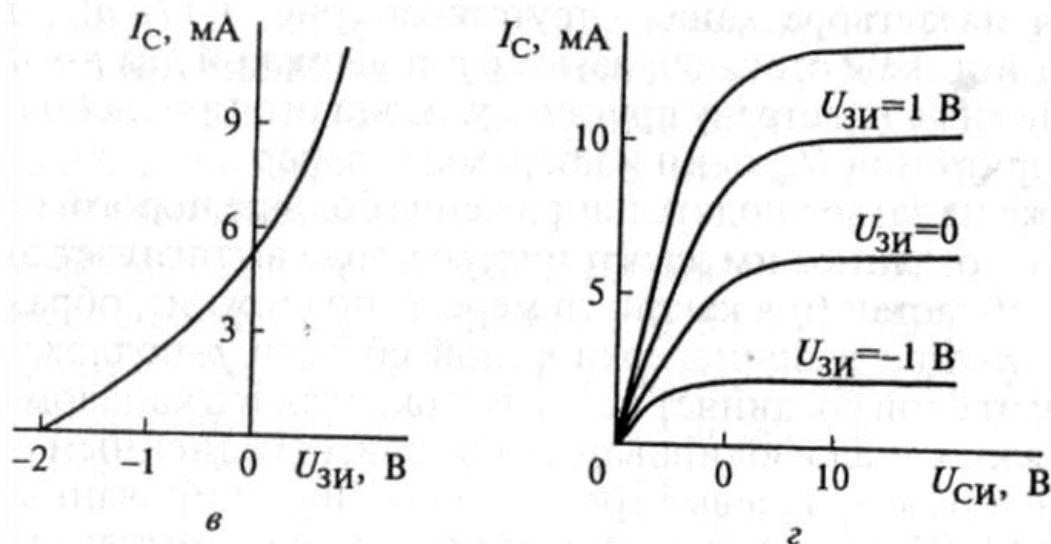


рис. 2 Полевые транзисторы с изолированным затвором и встроенным каналом, передаточные характеристики (а); выходные характеристики (б),

Исток и сток формируют в виде сильнолегированных областей полупроводника. За счет этого области истока и стока имеют высокую концентрацию носителей, что отмечено на рисунке знаком «+». Как МДП-, так и МОП-транзисторы могут быть выполнены с каналом *p*- и *n*-типов. Канал в этой группе транзисторов может быть **встроенным** (т.е. созданным при изготовлении) и **индуцированным** (т.е. наводящимся под влиянием напряжения, приложенного к затвору).

Полевой транзистор с встроенным каналом. На рис. 2а, изображен МДП-транзистор с встроенным каналом *n*-типа (тонким слоем полупроводника *n*-типа), соединяющим исток и сток (n^+ -области). Эти области образованы в подложке — полупроводнике *p*-типа. Если точно, в МДП- и МОП-транзисторах не три, а четыре электрода, включая подложку. Однако часто подложку электрически соединяют с истоком (или стоком), образуя три вывода.

В зависимости от полярности напряжения U_m , приложенного к затвору относительно истока, в канале может изменяться концентрация основных носителей (в рассматриваемом случае — электронов). При отрицательном напряжении на затворе U_m электроны выталкиваются из области канала в области *n*, канал обедняется носителями и ток I_c снижается. Положительное напряжение на затворе втягивает электроны из областей n^+ в канал и ток I_c через канал возрастает. Таким образом, в отличие от полевого транзистора с *p*-*n*-переходом в этом полевом транзисторе управляющее напряжение может быть как отрицательным, так и положительным, что отражено на его передаточной (рис.2 а) и выходных (рис. 2 б) характеристиках.

Полевой транзистор с индуцированным каналом.

Этот вид транзистора отличается от предыдущего тем, что при отсутствии напряжения на затворе канал отсутствует (рис. 3, а), так как *n*-области истока и стока образуют с *p*-подложкой два *p*-*n*-перехода, включенные навстречу друг другу, и, значит, при любой полярности напряжения $U_{си}$ один из переходов заперт.

Если же на затвор подать напряжение больше порогового $U_{зи} > U_{зипор}$, то

созданное им электрическое поле вытягивает электроны из n^+ -областей (и в какой-то мере из подложки), образуя тонкий слой n -типа в приповерхностной области p -подложки (рис. 3б). Этот слой соединяет исток и сток, являясь каналом n -типа. От подложки канал изолирован возникшим обедненным слоем.

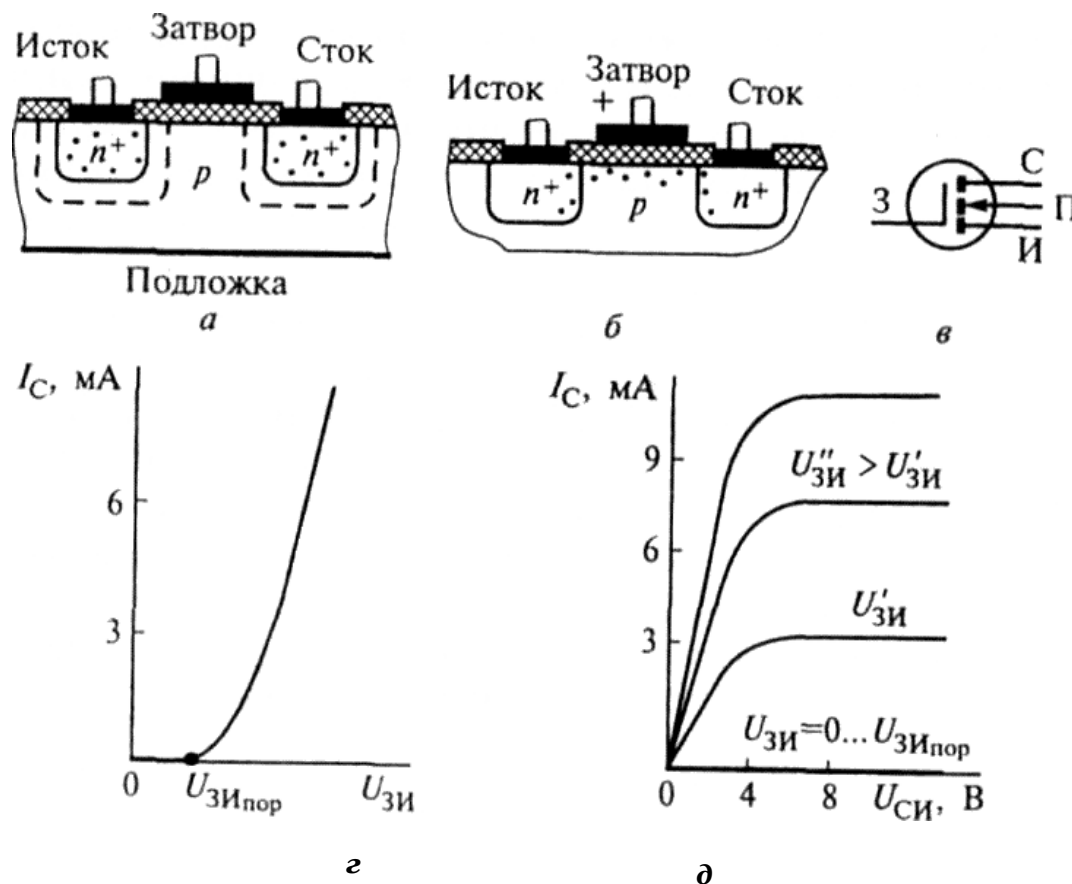


Рис. 3 Полевой транзистор с индуцированным каналом в исходном состоянии (а) и при приложенном напряжении на затворе (б); его условное обозначение (в); передаточная (г) и выходные (д) характеристики

Таким образом, полевые транзисторы с индуцированным n -каналом (N-МОП-транзисторы), в отличие от рассмотренных ранее полевых транзисторов, управляются только положительным сигналом $U_{ЗИ}$ (рис. 3, г). Значение порогового напряжения у них $0,2 \dots 0,1$ В.

Значительно больше пороговое напряжение у P-МОП-транзистора, принцип работы которого аналогичен N-МОП-транзистору. Но в связи с тем, что носителями в нем служат дырки, а не электроны, полярность всех напряжений у этого транзистора противоположна. Значение порогового напряжения этого типа транзисторов составляет $2 \dots 4$ В.

Как и биполярные, полевые транзисторы можно включать по схеме с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Как правило, используют схему с ОИ, так как она, подобно схеме с ОЭ биполярных транзисторов, позволяет получить значительные коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности одновременно.

Преимущества полевых транзисторов:

- 1) высокое входное сопротивление в схеме с ОИ;
- 2) малый уровень собственных шумов, так как перенос тока осуществляют только основные для канала носители и, следовательно, нет рекомбинационного шума;

- 3) высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- 4) высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных схем.

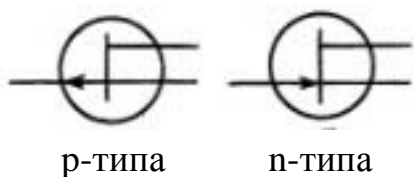
Особенность полевых транзисторов: в принципе исток и сток в транзисторах равноправны, т.е. в зависимости от приложенной полярности напряжения исток и сток могут меняться местами. На этом свойстве основано использование полевых транзисторов в качестве **электронных ключей** вместо обычных контактных переключателей.

Полевые транзисторы широко используются в усилителях, генераторах и другой радиоэлектронной аппаратуре, а МОП-транзисторы являются основой для разработки всех современных средств вычислительной техники, включая микропроцессоры, микроконтроллеры, полупроводниковую память.

Сравнивая условные обозначения транзисторов, подчеркнем, что стрелка в них **всегда направлена от *p*-области к *n*-области**, что позволяет легко установить, тип канала полевого транзистора.

Ниже приведены условно-графические обозначение полевых транзисторов.

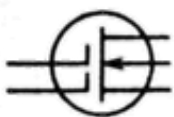
- 1) полевые транзистора с управляющим *p-n* переходом



- 2) полевые транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом

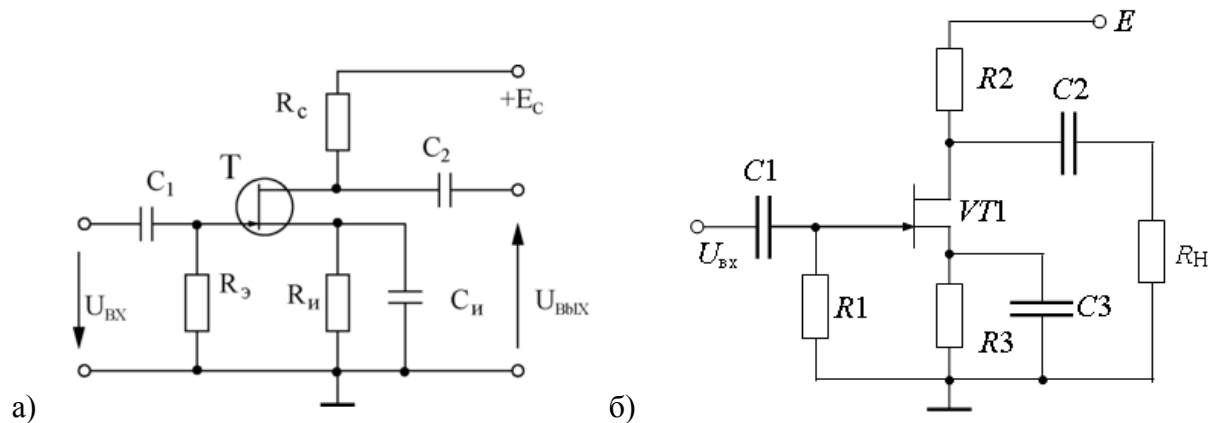


- 3) полевой транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом



В полевом транзисторе может быть несколько затворов. Изображают их в этом случае короткими черточками

Усилительный каскад, аналогичный эмиттерному повторителю может быть построен на полевом транзисторе, называется каскад истоковым повторителем (с общим стоком) схема на рис а. Усилительный каскад по схеме с общим истоком схема на рис б.



Маркировка транзисторов.

Условное обозначение состоит из 5 элементов.

$\frac{K}{1} \frac{T}{2} \frac{5}{3} \frac{40}{4} \frac{Б}{5}$

ПЕРВЫЙ элемент системы обозначает исходный материал, на основе которого изготовлен транзистор и его содержание не отличается от системы обозначения диодов:

- Г или 1 — германий или его соединения;
- К или 2 — кремний или его соединения;
- А или 3 — арсенид галлия;
- И или 4 — соединения индия.

ВТОРОЙ элемент указывает на тип транзистора:

- Т — биполярный;
- П — полевой.

ТРЕТИЙ элемент (цифра) указывает на функциональные возможности транзистора по допустимой рассеиваемой мощности и частотным свойствам.

Транзисторы малой мощности ($P_{max} < 0,3$ Вт):

- 1 — маломощный низкочастотный ($f_{гр} < 3$ МГц);
- 2 — маломощный среднечастотный ($3 < f_{гр} < 30$ МГц);
- 3 — маломощный высокочастотный ($30 < f_{гр} < 300$ МГц).

Транзисторы средней мощности ($0,3 < P_{max} < 1,5$ Вт):

- 4 — средней мощности низкочастотный;
- 5 — средней мощности среднечастотный;
- 6 — средней мощности высокочастотный.

Транзисторы большой мощности ($P_{\max} > 1,5 \text{ Вт}$):

7 — большой мощности низкочастотный;

8 — большой мощности среднечастотный;

9 — большой мощности высокочастотный и сверхвысокочастотный ($f_{\text{гр}} > 300 \text{ Гц}$).

ЧЕТВЕРТЫЙ элемент — цифры от 01 до 99, указывающие порядковый номер разработки.

ПЯТЫЙ элемент — одна из букв от А до Я, обозначающая деление технологического типа приборов на группы.

Например, транзистор КТ540Б, расшифровывается так: К — кремниевый транзистор, Т — биполярный, 5 — средней мощности среднечастотный, 40 — номер разработки, Б — группа.

Надо отметить особо когда на транзисторе нет рассмотренных выше маркировки. Заменяет надпись кодовая или цветная маркировка транзисторов.

Кодовая маркировка транзисторов

Транзисторы могут маркироваться или буквенно-цифровым кодом, или кодом, состоящим из геометрических фигур. По коду можно узнать тип транзистора, месяц и год изготовления.

Цветовая маркировка транзисторов

Транзисторы маркируют с помощью цветового кода. Цветовой код состоит из изображения геометрических фигур (треугольников, квадратов, прямоугольников и др.), цветных точек и латинских букв.

В этих случаях обращаемся к справочникам.

ТИРИСТОРЫ

Тиристоры — это полупроводниковые приборы с тремя или более *p-n*-переходами, которые имеют два устойчивых состояния и применяются как мощные электронные ключи.

Диодные тиристоры (динисторы) имеют два вывода от крайних чередующихся *p*- и *n*-областей (рис. 4, а).

Вывод, соединенный с крайней *p*-областью, называется **анодом**, а с крайней *n*-областью **катодом**. Внешнее напряжение U является прямым по отношению к переходам Π_1 и Π_3 и обратным для перехода Π_2 , поэтому переходы Π_1 и Π_3 открыты (подобно открытым диодам), а переход Π_2 , заперт. В результате напряжение U почти целиком приложено к Π_2 и через тиристор протекает небольшой ток, являющийся обратным током I_0 *p-n*-перехода.

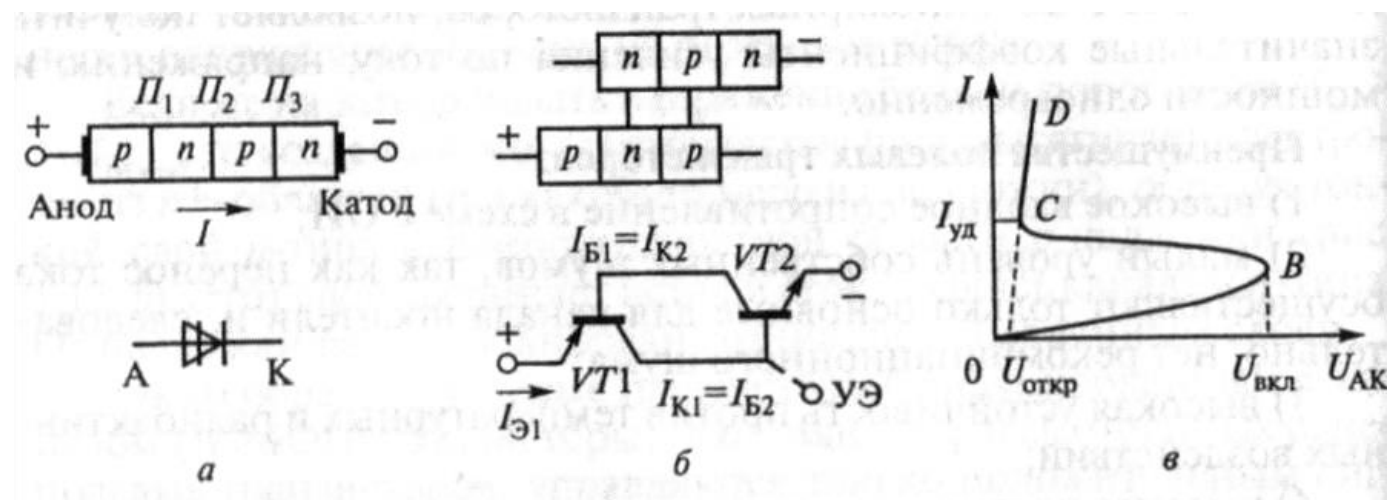


Рис. 4 Тиристор диодный и его обозначение (а) эквивалентная схема (б); вольт- амперная характеристика (в).

С увеличением напряжения ток через тиристор несколько возрастает (участок **OB** характеристики на рис. 4 в), а при достижении напряжением, приложенным между анодом и катодом, значения U_m лавинообразно увеличивается, ограничиваясь только сопротивлением нагрузки. Поясним этот процесс.

Тиристор можно представить как два биполярных транзистора **VT1** и **VT2** (рис. 4б). Небольшое приращение тока $I_{Э1}$ **VT1** вызывает (как в обычном транзисторе) приращение тока коллектора I_{K1} , который, поступая в базу транзистора **VT2**, вызывает приращение его коллекторного тока:

$$\Delta I_{K2} = \Delta I_{B2} \beta_2 = \Delta I_{K1} \beta_2,$$

где β_2 — коэффициент передачи тока **VT2**. Но ток коллектора второго транзистора, как показано по схеме, является базовым для первого транзистора ($I_{K2} = I_{B1}$), поэтому ток I_{K1} , в свою очередь, увеличивается:

$$\Delta I_{K1} = \Delta I_{B1} \beta_1 = \Delta I_{K2} \beta_1 = \Delta I_{K1} \beta_2 \beta_1 \text{ и т.д.}$$

Этот процесс соответствует участку **BC** вольт-амперной характеристики с отрицательным сопротивлением и переводит тиристор в открытое состояние, когда он ведет себя как диод в прямом направлении.

Чтобы запереть тиристор, необходимо каким-либо образом уменьшить ток I , протекающий через него, до значения, меньшего удерживающего $I_{уд}$. Если напряжение U , питающее схему, переменное, то тиристор запирается в отрицательный полупериод, когда ток I достигает нуля, если же оно постоянное, то для запираания тиристора применяют так называемые *схемы гашения*.

Перевод тиристора из запертого состояния в открытое можно вызвать не только повышением анодного напряжения, но и кратковременным увеличением тока базы в одном из транзисторов его эквивалентной схемы. Для этого от одной из баз делают вывод *управляющий электрод* (УЭ) (рис. 5 а). Подавая импульс тока управления I можно вызвать лавинообразное увеличение тока при $U < U_{вкл}$ (рис. 5, в). Такие тиристоры называют *триодными* (управляемыми) тиристорами.

Основные параметры тиристоров:

- наибольший прямой ток — до 2000 А;
- допустимое обратное напряжение — от 100 до 2400 В;
- допустимая частота переключений — до 2000 Гц.

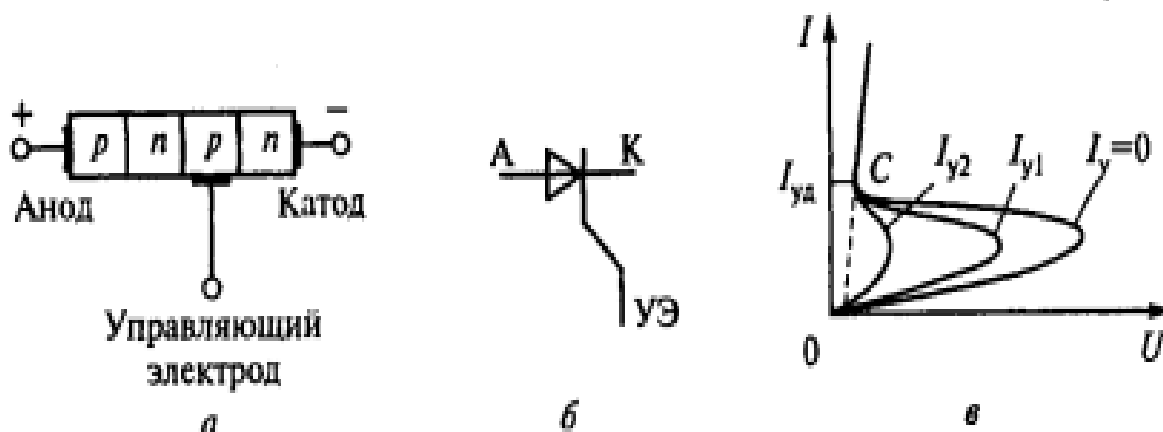
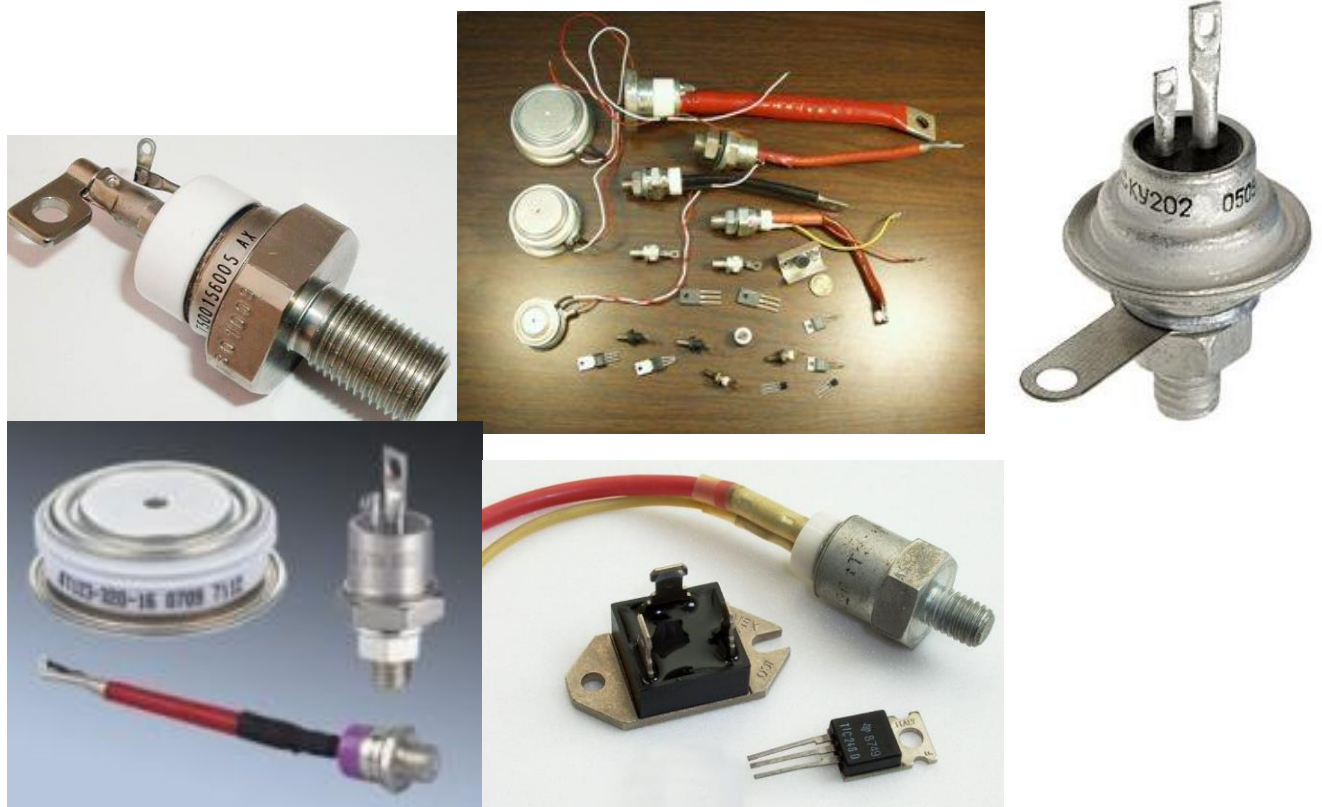


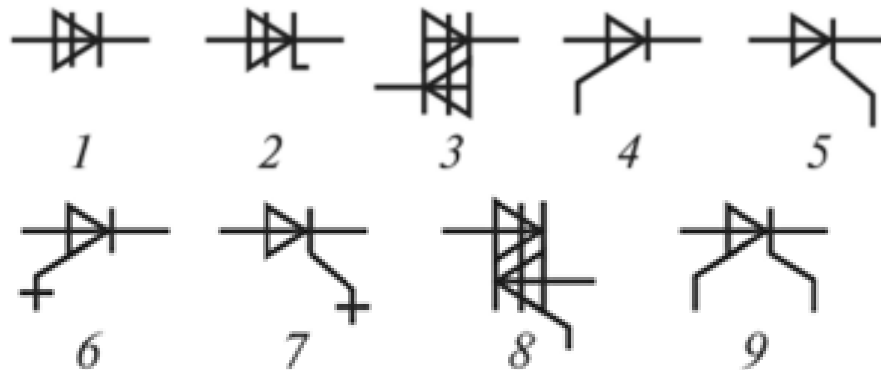
Рис.5 Триодный (управляемый) тиристор: а— структура; б— условное обозначение; в — вольт-амперные характеристики

Тиристоры нашли свое применение в силовой электронике и электротехнике — там, где требуется формирование мощных питающих напряжений постоянного или переменного тока, питающих напряжений с регулируемой частотой, специальной формы. В частности, на основе тириستоров разрабатываются устройства регулирования частотой вращения электродвигателей.

Ниже приведены наглядные фото некоторых тириستоров.



Условное графическое обозначение тиристоров приведены на рисунках ниже.



- 1 — диодный: неуправляемый, запираемый в обратном направлении (динистор);
- 2 — диодный, управляемый, проводящий (незапираемый) в обратном направлении (динистор) в режиме лавинного пробоя;
- 3 — диодный симметричный (диак) — симистор;
- 4 — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по аноду;
- 5 — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по катоду;
- 6 — триодный, управляемый, запираемый с управлением по аноду;
- 7 — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по катоду;
- 8 — триодный, симметричный (триак);
- 9 — тетродный, запираемый в обратном направлении.

