

ТИРИСТОРЫ

Тиристоры — полупроводниковые приборы с четырехслойной структурой.

Тиристор — это полупроводниковый прибор, основой которого является четырехслойная структура типа  $p-n-p-n$  (рис. 6.5, а).

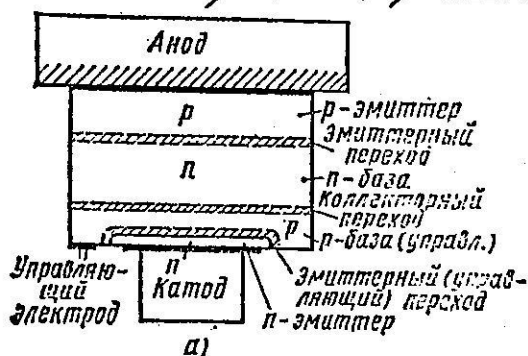
В связи с таким представлением крайние области тиристорной структуры называют эмиттерами ( $n$  и  $p$ ), примыкающие к ним  $p-n$ -переходы — эмиттерными, центральный переход — коллекторным. Между переходами находятся базовые области ( $n$  и  $p$ ). Электрод, обеспечивающий контакт с  $n$ -эмиттером, называют катодом, с  $p$ -эмиттером — анодом.

Существуют три разновидности тиристоров:

1) ~~диодный тиристор~~ — базы не имеют выводов;

2) ~~триодный тиристор~~ — имеется вывод от  $p$ -базы, называемый управляющим электродом;

3) ~~тетродный тиристор~~ — обе базы снабжены выводами, т. е. в приборе имеется два управляющих электрода.



Тиристоры относятся к приборам, характеристики которых обладают участком с дифференциальным отрицательным сопротивлением. Они имеют структуру  $p-n-p-n$  (или  $n-p-n-p$ ) и нашли

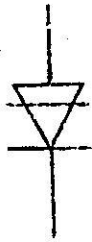
широкое применение в качестве переключательных приборов. Тиристоры выпускаются на широкий диапазон токов (от десятков миллиампер до сотен ампер) и напряжений (от десятков вольт до тысяч вольт). Тиристоры, рассчитанные на рабочее напряжение от десятков до сотен вольт и на токи от десятков миллиампер до нескольких ампер, относят к группе маломощных. Тиристоры же, изготовляемые на напряжение до 1000 В и более и на токи до 150 ÷ 200 А при воздушном охлаждении и до 350 А при водяном охлаждении, относят к группе мощных приборов. Маломощные тиристоры применяют, главным образом, в релейных системах и коммутационных устройствах, а приборы, коммутирующие большую мощность, — в преобразовательных.

Тиристоры классифицируют по числу электродов и способу управления. Тиристор, имеющий два вывода, называется *диодным тиристором* или *динистором*. Включение и выключение его осуществляется лишь путем изменения величины и полярности напряжения питания. Поэтому его называют еще *неуправляемым тиристором*. Тиристор, имеющий три вывода, называется *триодным тиристором* или *тринистором*. Он содержит третий управляющий электрод и может переводиться из закрытого состояния в открытое также с помощью тока управления. Такие тиристоры являются управляемыми.

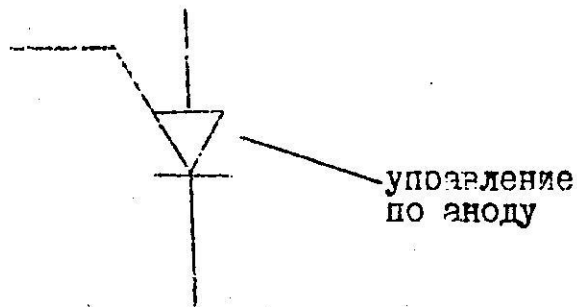


Таким образом, тиристор представляет собой ключевой прибор, имеющий два устойчивых состояния: «открыто» — режим 3 и «закрыто» — режим 1. Эта особенность тиристора подчеркнута в его названии («тира» — по-гречески «дверь»).

Неуправляемые тиристоры /диод — тиристор, денисторы/ имеют 2 электрода, неуправл. ВАХ.



Управляемые тиристоры имеют третий управл. электрод /триод тиристор, тренистор/.

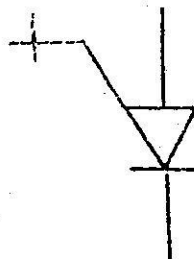
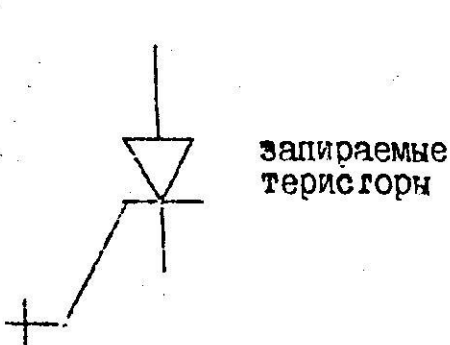


**Запираемые тиристоры.** В обычных триодных тиристорах обратный ток управляющего электрода, при котором происходит запираение прибора, соизмерим с анодным током. Такой режим выключения невыгоден и поэтому практически не применяется. В последние годы были разработаны триодные тиристоры, имеющие относительно небольшой запирающий ток управляющего электрода; такие приборы получили название *запираемых тиристоров*.

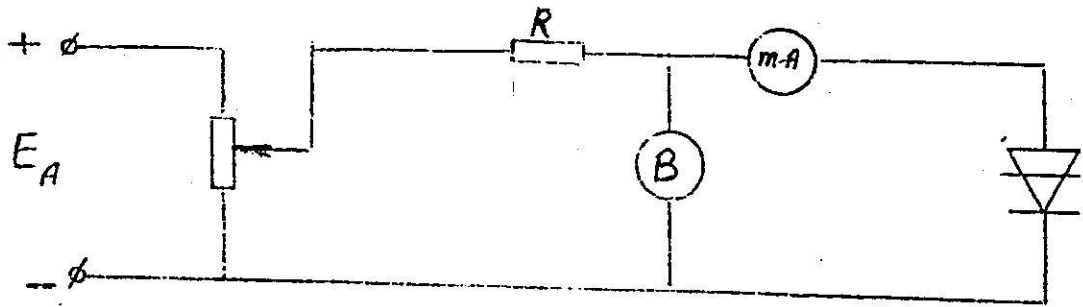
Триод тиристоры: запираемые и незапираемые.

Незапираемые тиристоры — включаются по цепи управл. электрода, выключаются по анодному току /токи 200 А/.

Запираемые тиристоры — включаются и выключаются по цепи управляющего электрода /токи 10 А/



Используется в переключающих устройствах, в выпрямителях.



Динистор изготавливают из кремния, в котором резко выражена термическая генерация и лавинное размножение носителей тока в  $p-n$ -переходе. В монокристалле кремния создаются четыре слоя с перемежающимся типом проводимости  $p-n-p-n$ , разделенные тремя переходами эмиттерным  $\mathcal{ЭП}_1$ , коллекторным  $\mathcal{КП}_2$  и эмиттерным  $\mathcal{ЭП}_3$  (рис. 2.94). Крайние слои называются эмиттерными  $\mathcal{Э}_1$  и

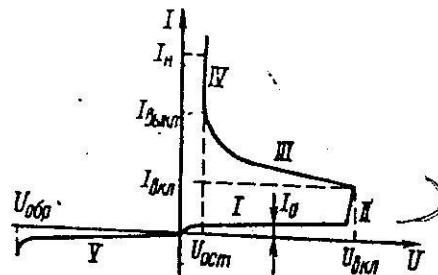
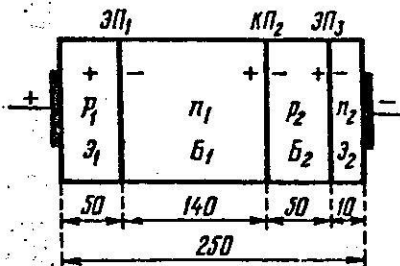


Рис. 2.94. Структурная схема диодного тиристора (динистора) и его вольтамперная характеристика. Концентрация носителей заряда:  $p_1=10^{17}$   $1/\text{см}^3$ ;  $n_1=10^{16}$   $1/\text{см}^3$ ;  $p_2=10^{17}$   $1/\text{см}^3$ ;  $n_2=10^{16}$   $1/\text{см}^3$

$\mathcal{Э}_2$  а средние — базовыми  $B_1$  и  $B_2$ . На рисунке указана толщина слоев в микронах для маломощных тиристорov. Слои создаются путем диффузии в исходный монокристалл  $n$ -проводимости вначале акцепторной примеси (алюминий, бор), образующей слои  $p_1$  и  $p_2$ , а затем донорной (фосфор), образующей наружный слой  $n_2$ . Слой  $n_1$  образован исходным монокристаллом.

При приложении к динистору положительного (прямого) напряжения (плюс на  $p_1$ , минус на  $n_2$ ) напряжение питания распределяется между тремя его переходами в полярности, указанной на рис. 2.94. Эмиттерные переходы  $\mathcal{ЭП}_1$  и  $\mathcal{ЭП}_3$  оказываются открытыми, а коллекторный переход  $\mathcal{КП}_2$  — закрытым. Поэтому на переходах  $\mathcal{ЭП}_1$  и  $\mathcal{ЭП}_3$  падает малая доля питающего напряжения, а на  $\mathcal{КП}_2$  — большая часть напряжения, приложенного к тиристорy.

На этом же рисунке представлена вольтамперная характеристика динистора. Ее можно разделить на следующие пять участков: I — участок большого сопротивления; II — участок лавинного пробоя; III — участок отрицательного сопротивления; IV — участок малого сопротивления; V — обратная ветвь характеристики. При приложении к динистору напряжения через него начнет протекать ток, составляющие которого указаны на рис. 2.95. Через эмиттерный переход  $\mathcal{ЭП}_1$  будет протекать ток инжекции, равный сумме дырочного и электронного токов:  $I_1 = I_{1p} + I_{1n}$ ; через эмиттерный переход  $\mathcal{ЭП}_3$  будет также протекать ток инжекции:

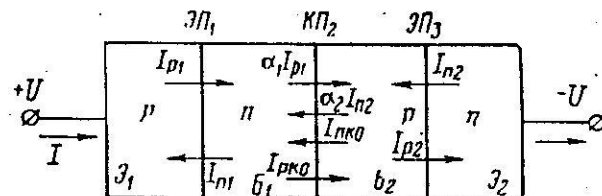


Рис. 2.95. Составляющие токов в структуре динистора

$I_2 = I_{2p} + I_{2n}$ , наконец, через коллекторный переход  $KП_2$  появятся, во-первых, токи экстракции: дырочный  $I_{3p} = I_{1p}\psi_1 = I_1\alpha_1$  и электронный  $I_{3n} = I_{2n}\psi_2 = I_2\alpha_2$  (здесь  $\psi_1$  и  $\psi_2$  — коэффициенты переноса инжектированных носителей соответственно через базы  $B_1$  и  $B_2$ , а  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты передачи тока соответственно для токов инжекции  $I_1$  и  $I_2$ ) и, во-вторых, начальный коллекторный ток  $I_{к0}$ , равный сумме дырочной и электронной составляющих:  $I_{к0} = I_{к0p} + I_{к0n}$ ; таким образом,  $I_3 = I_1\alpha_1 + I_2\alpha_2 + I_{к0}$ . Очевидно, что токи, протекающие через все три перехода, должны быть одинаковы, т. е.  $I_1 = I_2 = I_3 = I$ , и тогда  $I = I(\alpha_1 + \alpha_2) + I_{к0} = I_{к0}/[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]$ .

Первый участок характеристики имеет высокое дифференциальное сопротивление  $dU/dI$ . При небольших внешних напряжениях  $U$  величина прямого напряжения на эмиттерных переходах  $ЭП_1$  и  $ЭП_3$  весьма мала, вследствие чего высота энергетического барьера в этих переходах близка к определяемой контактной разностью потенциалов. Поэтому токи  $I_1$  и  $I_2$  инжектированные через эмиттерные переходы, вначале очень малы — порядка долей микроампер. Установлено, что в случае кремниевых приборов малым эмиттерным токам порядка долей микроампера соответствуют и малые (порядка сотых долей) значения коэффициентов передачи тока  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 2.96). Зависимость коэффициента  $\alpha$  от тока эмиттера можно объяснить влиянием рекомбинационных ловушек в базе, эффективных при малых токах эмиттера; с увеличением тока эмиттера ловушки насыщаются и становятся малоактивными, что приводит к увеличению времени жизни инжектированных носителей и,

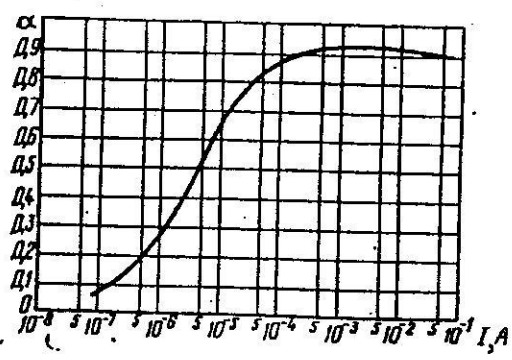


Рис. 2.96. Зависимость коэффициента передачи тока диристора от эмиттерных токов

следовательно, к увеличению коэффициента  $\alpha$ . Таким образом, на участке  $I$  характеристики при малых  $U$  ток через диристор в основном определяется начальным коллекторным током  $I_{к0}$ .

При увеличении напряжения  $U$  до величины, близкой к напряжению включения  $U_{вкл}$  в коллекторном переходе  $KП_2$  начинается процесс умножения числа носителей в результате ударной ионизации, что увеличивает ток основных носителей, поступающих в обе базы (электронный ток в базу  $B_2$ , дырочный — в базу  $B_1$ ). Скорость накопления носителей превышает скорость их удаления, и в базах образуется пространственный заряд (отрицательный в  $n$ -базе  $B_1$  и положительный в  $p$ -базе  $B_2$ ). Это снижает высоту энергетического барьера в обоих эмиттерных переходах  $ЭП_1$  и  $ЭП_3$ , в результате чего эмиттерные токи через переходы  $ЭП_1$  и  $ЭП_3$  увеличиваются. Эмиттерные токи, проходя через коллекторный переход  $KП_2$  усиливают в нем ударную ионизацию, а следовательно, и ток через диристор тиристора. Отсюда вытекает, что характерной особенностью  $p-p-p-p$ -структуры является обратная связь по току.



Статическими параметрами динистора являются:

— напряжение включения  $U_{вкл}$ , соответствующее точке перегиба вольтамперной характеристики. При подаче на динистор напряжения  $U > U_{вкл}$  он открывается;

— ток включения  $I_{вкл}$ , протекающий при напряжении  $U_{вкл}$ ;

— сопротивление запертого динистора по постоянному и переменному токам. Первое определяется так называемым током утечки  $I_y$  (порядка десятков микроампер) при  $U = 0,5 U_{вкл}$ , второе очень велико (десятки и сотни мегомов);

— ток выключения  $I_{выкл}$  — ток в точке перегиба характеристики от участка отрицательного сопротивления к участку низкого сопротивления. При уменьшении тока  $I$  до величины, меньшей  $I_{выкл}$ , динистор запирается;

— остаточное напряжение  $U_{ост}$ , определяемое при протекании через динистор максимально допустимого тока  $I_{макс}$ ; обычно  $U_{ост} = 0,5 \div 1$  В.

Характер реактивности динистора зависит от положения рабочей точки на вольтамперной характеристике. На участках I и V полное сопротивление носит емкостный характер, и величина емкости зависит от приложенного напряжения. На участках II и III, где действует обратная связь по току, реактивность принимает индуктивный характер.

Важными параметрами динистора, характеризующими его быстроедействие, являются также время включения и выключения. Время включения  $\tau_{вкл}$  — время, в течение которого прибор после подачи на него отпирающего напряжения  $U > U_{вкл}$  переключается в открытое состояние; время выключения  $\tau_{выкл}$  — время, в течение которого прибор после уменьшения тока до значения  $I < I_{выкл}$  переключается из открытого состояния в запертое. У малоомощных динисторов  $\tau_{вкл}$  порядка 0,1—0,5 мкс. Оно уменьшается с увеличением амплитуды переключающего импульса. Величина  $\tau_{выкл}$  составляет 5—10 мкс.

Динистор в основном применяется в качестве мощного переключателя; этим он выгодно отличается от туннельного диода, являющегося малоомощным прибором. Недостатком динистора является большая зависимость его параметров от температуры: величины  $U_{вкл}$ ,  $I_{вкл}$ ,  $I_{выкл}$  и  $U_{ост}$  уменьшаются с повышением температур, что обуславливает температурную нестабильность переключения. Кроме того, в отдельных случаях напряжение  $U_{вкл}$  по условиям применения может оказаться слишком большим.

**Тринистор.** Указанные выше недостатки динистора устраняются в тринисторе. Схематически тринистор изображен на рис. 2.97. В цепь базы  $B_2$  включается регулируемый источник питания, напря-

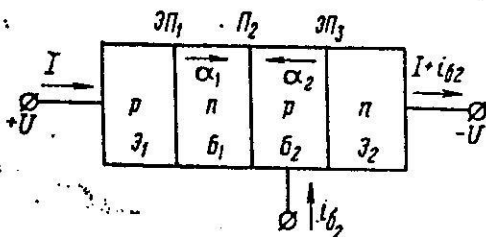


Рис. 2.97. Структурная схема тринистора

жение которого должно быть прямым по отношению к эмиттерному переходу  $ЭП_3$ . Как известно, условием отпираания динистора является следующее:  $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ . Каждый из этих коэффициентов зависит от силы эмиттерного тока через соответствующий переход. При помощи цепи управляющего электрода можно регулировать величину прямого то-

ка  $i_{Б2}$ , который протекает через  $ЭП_3$  и определяется прямой ветвью вольтамперной характеристики диода, состоящего из эмиттера  $Э_2$  и базы  $Б_2$ . Ток  $i_{Б2}$  складывается с током тринистора, что приводит к увеличению коэффициента  $\alpha_2$ . Поэтому условие отпираания тринистора будет выполняться при меньшем значении напряжения  $U_{вкл}$ , чем в динисторе.

15.10.99  
29.10.99  
2 ч 40 мин

На участке II характеристики дифференциальное сопротивление вначале падает до долей ома и далее до нуля:  $dU/dI=0$ . Вследствие умножения число носителей заряда нарастает лавинообразно, и характеристика при  $U > U_{\text{вкл}}$  перемещается на участок лавинного пробоя в переходе  $KП_2$ , при котором возрастание тока через диод до величины  $I_{\text{вкл}}$  ограничивается в основном сопротивлением внешней цепи. Напряжения на переходах перераспределяется: на эмиттерных переходах  $ЭП_1$  и  $ЭП_3$  несколько повышается, а на коллекторном  $KП_2$  уменьшается практически до нуля. В результате эмиттерные токи вновь возрастают, а сумма коэффициентов  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  увеличивается до единицы. Характеристика переходит на участок III, где дифференциальное сопротивление диода становится вновь большим, но отрицательным:  $dU/dI < 0$ . При этом прекращается лавинное умножение числа носителей в коллекторном переходе, так как энергетический барьер в коллекторном переходе  $KП_2$  исчезает.

Вследствие продолжающегося накопления носителей в обеих базовых областях на коллекторном переходе  $KП_2$  устанавливается прямое смещение, и все три перехода оказываются под прямым смещением. Рассмотренный выше процесс протекает почти мгновенно, и диод быстро переключается из запертого состояния (участок I) в открытое (участок IV). Его дифференциальное сопротивление вновь становится низким (не превышает единиц Ом) и положительным. На участке IV зависимость тока  $I$  от напряжения  $U$

такая же, как на прямой ветви обычного диода. При этом на диоде устанавливается напряжение менее 2В; остальное напряжение источника питания падает на сопротивление во внешней цепи. На участке IV в точке, где  $I = I_{\text{выкл}}$ , вновь выполняется условие  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ . Для обратного перевода диода из открытого состояния в запертое необходимо путем увеличения сопротивления во внешней цепи уменьшить его ток до значения  $I < I_{\text{выкл}}$  или временно снять напряжение. При этом процесс развивается в обратном направлении и сопротивление диода вновь становится высоким (участок I).

Итак, появление обратной связи в  $p-n-p-n$ -структуре обязано наличием внутренней обратной связи по току, действие которой начинается при нарушении нейтральности одной из баз. Нарастающее нарушение нейтральности баз становится возможным при условии, что коэффициенты передачи тока  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  увеличиваются с ростом тока, а в коллекторном переходе умножается число носителей из-за ударной ионизации, в результате чего возрастание тока сопровождается одновременным уменьшением напряжения на коллекторном переходе и, следовательно, на диоде.

При изменении полярности напряжения, приложенного к диоду, эмиттерные переходы  $ЭП_1$  и  $ЭП_3$  окажутся под обратным напряжением, и ток в основном будет определяться обратным током через тот переход, обратное сопротивление которого больше. Этот режим соответствует участку V на характеристике. Пробивное напряжение  $U_{\text{проб}}$  может быть больше или меньше  $U_{\text{вкл}}$ .

Нагрузку включают последовательно с диодом. Если диод заперт, его сопротивление будет больше сопротивления нагрузки и на последней окажется ничтожное напряжение. Если же диод открыт, его сопротивление мало и на нагрузке будет выделяться почти полное напряжение источника питания.

Зависимость  $U_{\text{вкл}}$  от  $i_b$  приведена на рис. 2.98а. На рис. 2.98б дано семейство выходных вольтамперных характеристик тринистора при различных значениях  $i_b$ . В открытом состоянии тринистор подобен тириатрону, так как он позволяет управлять большими мощностями в нагрузке при помощи небольшой управляющей мощности.

Для запираания тринистора нужно или снизить протекающий через него ток до значения, меньшего  $I_{\text{выкл}}$ , или подать на управляющий электрод импульс тока обратного направления. Таким образом, тринистор имеет преимущество перед динистором — он может быть заперт при помощи изменения напряжения тринистора и тока базы  $i_b$ . На рис. 2.98в приводится зависимость тока выключе-

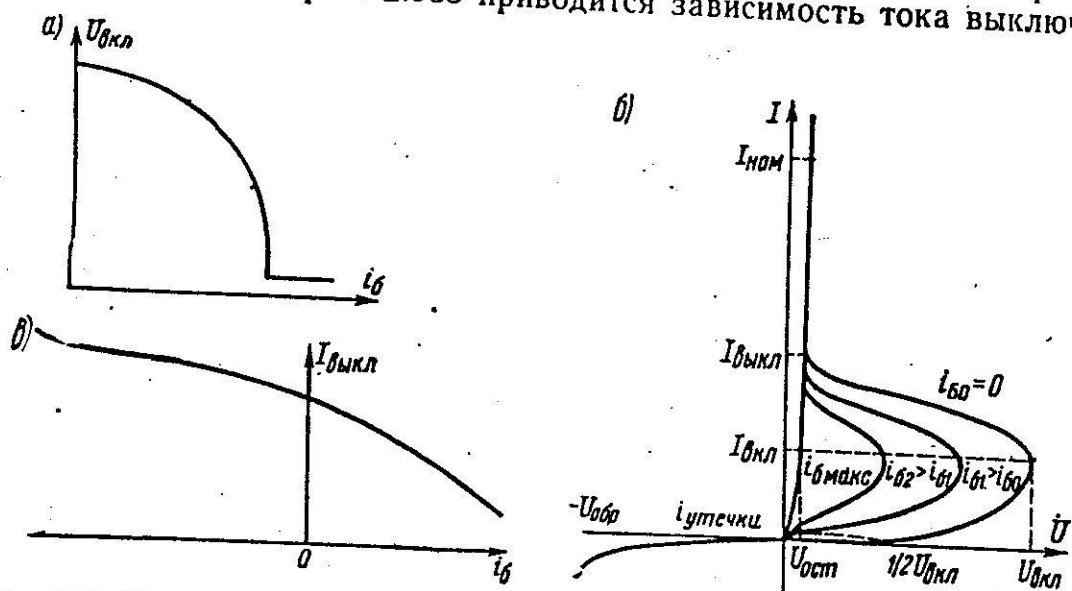


Рис. 2.98. К пояснению работы тринистора: а) зависимость напряжения включения от тока управляющего электрода; б) вольтамперная характеристика; в) зависимость тока выключения от тока управляющего электрода

ния  $I_{\text{выкл}}$  от управляющего тока  $i_b$ . Значения управляющего тока  $i_b$  и напряжения на управляющем электроде  $U_b$  зависят от температуры; совокупность этих значений, при которых включается тринистор, в заданном диапазоне температур называют характеристикой включения.

Параметрами тринистора, определяющими его быстродействие, являются время включения  $\tau_{\text{вкл}}$  и выключения  $\tau_{\text{выкл}}$ . Время включения уменьшается с увеличением амплитуды управляющего импульса и с ростом напряжения источника питания выходной цепи. Для тринисторов малой мощности (с максимальным средним током  $50 \div 100$  мА)  $\tau_{\text{вкл}}$  составляет десятые доли микросекунды, а для тринисторов большой мощности (при токе  $10 \div 12$  А) — несколько микросекунд. Время выключения  $\tau_{\text{выкл}}$  несколько больше; оно увеличивается с увеличением температуры и тока в выходной цепи.

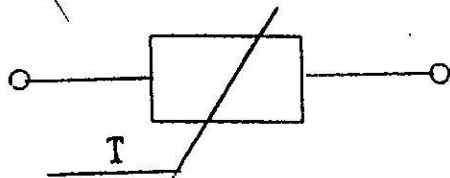
Возможно последовательное и параллельное включение тринисторов — они допускают перегрузки по току. Обычно тринисторы выполняют из кремниевой пластины со структурой *p-n-p*, полученной методом диффузии, а для образования *n*-области в одну из крайних *p*-областей вплавляют золото и сурьму; в среднюю *p*-область вплавляют алюминиевый управляющий электрод, создающий невыпрямляющий контакт.

Достоинства тринистора — большой коэффициент усиления по мощности до 250 000 и высокое быстродействие. Тринисторы применяют в автоматике, вычислительных машинах, в схемах модуляторов и т. д.

# ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ

/термосопротивления, термисторы, биометр/

(Тяжелый  
Сурьма)



Терморезистор — это резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры.

Термистор — это полупроводниковый терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Термистор косвенного подогрева — это термистор, имеющий дополнительный источник теплоты — подогреватель.

В термисторах прямого подогрева сопротивление изменяется или под влиянием теплоты, выделяющейся в них при прохождении электрического тока, или в результате изменения температуры термистора из-за изменения его теплового облучения (например, при изменении температуры окружающей среды).

Уменьшение сопротивления полупроводника с увеличением температуры (отрицательный температурный коэффициент сопротивления) может быть вызвано разными причинами — увеличением концентрации носителей заряда, увеличением интенсивности обмена электронами между ионами с переменной валентностью или фазовыми превращениями полупроводникового материала.

## Характеристики и параметры термисторов прямого подогрева

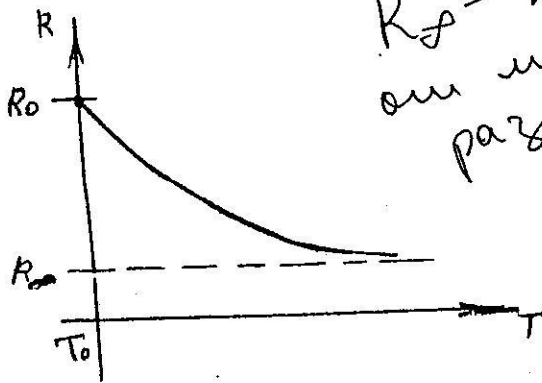
Температурная характеристика термистора — это зависимость его сопротивления от температуры. Пример температурной характеристики одного из термисторов приведен на рис. ~~...~~

~~$R = R_0 e^{\frac{B}{T - T_0}}$~~        $R = R_\infty e^{\frac{B}{T}}$

$R_0$  — (минимальное) — холодное сопротивление /при комнатной температуре/

$T_0 = 293^\circ \text{K}$

~~$R_0 = R_\infty e^{\frac{B}{T_0}}$~~



$R_\infty$  — коэф-т, зависящий от материала и размеров термистора



*Коэффициент температурной чувствительности*  $B$  — это коэффициент в показателе экспоненты температурной характеристики термистора (10.1). Значение этого коэффициента, зависящее от свойств материала термистора, практически постоянно для данного термистора в рабочем диапазоне температур и для различных типов термисторов находится в пределах от 700 до 15 000 К. Коэффициент температурной чувствительности может быть найден экспериментально путем измерения сопротивлений термистора при температурах  $T_0$  и  $T$  по формуле

$$B = \frac{\ln(R/R_0)}{1/T_0 - 1/T}$$

*Номинальное сопротивление термистора* — это его сопротивление при определенной температуре (обычно 20°C). Термисторы изготовляют с допустимым отклонением от номинального сопротивления  $\pm 20, 10$  и 5%. Номинальные сопротивления различных типов термисторов имеют значения от нескольких ом до нескольких сотен килоом.

*Температурный коэффициент сопротивления термистора* — это величина, определяемая отношением относительного изменения сопротивления термистора к изменению его температуры:

$$\text{TKR}|_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (10.4)$$

Температурный коэффициент сопротивления зависит от температуры, поэтому его необходимо записывать с индексом, указывающим температуру, при которой имеет место данное значение. Зависимость температурного коэффициента сопротивления от температуры можно получить, используя уравнения (10.4) и (10.1):

$$\text{TKR} = -B/T^2.$$

Значения температурного коэффициента сопротивления при комнатной температуре различных термисторов находятся в пределах  $-(0,8..6,0) \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

*Коэффициент рассеяния термистора*  $H$  численно равен мощности, рассеиваемой термистором при разности температур термистора и окружающей среды в 1 К, или, другими словами, численно равен мощности, которую надо выделить в термисторе, чтобы нагреть его на 1 К.

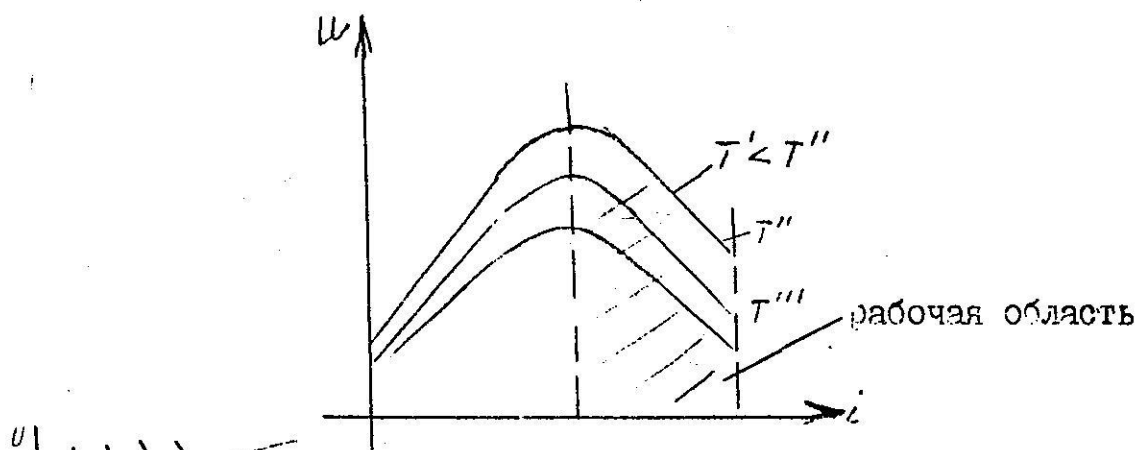


Рис. 10.2. Три типа статических ВАХ термисторов прямого подогрева (сплошные линии) и гиперболы равной мощности (штриховые линии)

Статическая вольт-амперная характеристика термистора — это зависимость падения напряжения на термисторе от проходящего через него тока в условиях теплового равновесия между термистором и окружающей средой.

На рис. 10.2 показаны статические ВАХ термисторов. Линейность характеристик при малых токах и напряжениях объясняется тем, что выделяемая в термисторе мощность недостаточна для существенного изменения его температуры. При увеличении тока, проходящего через термистор, выделяемая в нем мощность повышает его температуру. Таким образом, сопротивление термистора определяется суммарной температурой — температурой окружающей среды и температурой перегрева термистора. При этих токах сопротивление термистора уменьшается с увеличением тока и температуры в соответствии с (10.1), линейность статической ВАХ нарушается. При дальнейшем увеличении тока и большой температурной чувствительности термистора может наблюдаться падающий участок статической ВАХ, т. е. уменьшение напряжения на термисторе с увеличением проходящего через него тока.

Мощность, выделяющаяся в термисторе, непрерывно возрастает с увеличением проходящего через термистор тока, несмотря на уменьшение падающего на термисторе напряжения. В результате гиперболы равной мощности пересекают статическую ВАХ термистора только в одной точке (рис. 10.2).

Вид статической ВАХ термистора определяется коэффициентом рассеяния  $H$ , коэффициентом температурной чувствительности  $B$ , номинальным сопротивлением термистора и температурой окружающей среды. Так, при уменьшении коэффициента рассеяния  $H$  (например, при уменьшении давления воздуха, окружающего термистор) происходит более интенсивный разогрев термистора и, следовательно, те же температуры достигаются при меньших мощностях, выделяемых в термисторе при прохождении тока, т. е. статическая ВАХ смещается вниз (в область меньших напряжений).

При увеличении температуры окружающей среды уменьшается сопротивление термистора, снижается максимум статической ВАХ и уменьшается ее крутизна. Такую зависимость используют в системах автоматического контроля и регулирования температуры.

Увеличение коэффициента температурной чувствительности  $B$  приводит к смещению максимума статической ВАХ в сторону меньших мощностей, а крутизна падающего участка возрастает.

*Максимально допустимая температура термистора* — это температура, при которой еще не происходит необратимых изменений параметров и характеристик термистора. Максимально допустимая температура определяется не только свойствами исходных материалов термистора, но и его конструктивными особенностями.

*Максимально допустимая мощность рассеяния термистора* — это мощность, при которой термистор, находящийся в спокойном воздухе при температуре  $20^\circ\text{C}$ , разогревается при прохождении тока до максимально допустимой температуры. При уменьшении температуры окружающего воздуха, а также при работе термистора в средах, обеспечивающих лучший теплоотвод, мощность рассеяния может превышать максимально допустимое значение.

*Коэффициент энергетической чувствительности термистора  $G$*  численно равен мощности, которую необходимо подвести к термистору для уменьшения его сопротивления на 1%. Коэффициент энергетической чувствительности связан с коэффициентом рассеяния и температурным коэффициентом сопротивления соотношением

$$G = H/TKR.$$

Значение коэффициента энергетической чувствительности зависит от режима работы термистора, т. е. оно различно в каждой точке статической ВАХ.

*Постоянная времени термистора* — это время, в течение которого температура термистора уменьшится на 63% (в  $e$  раз) по отношению к разности температур термистора и окружающей среды (например, при переносе термистора из воздушной среды с температурой  $120^\circ\text{C}$  в воздушную среду с температурой  $20^\circ\text{C}$ ). Тепловая инерционность термистора, характеризуемая его постоянной времени, определяется конструкцией и размерами термистора и зависит от теплопроводности среды, в которой находится термистор. Для разных типов термисторов постоянная времени лежит в пределах от 0,5 до 140 с.

Назначение — подстройка температуры при работе в большом режиме.

Полупроводниковый болометр — это прибор, предназначенный для индикации и измерения теплового излучения (оптического или инфракрасного диапазона частот электромагнитного излучения).

Обычно болометр состоит из двух пленочных термисторов (толщиной до 10 мкм). Один из термисторов болометра является активным, т. е. непосредственно подвергается воздействию измеряемого излучения. Сопротивление этого термистора изменяется в результате нагрева при облучении электромагнитным излучением оптического или инфракрасного диапазона частот. Второй термистор — компенсационный — служит для компенсации возможных изменений температуры окружающей среды. Компенсационный термистор должен быть экранирован от измеряемого излучения. Активный и компенсационный термисторы помещают в один герметичный корпус.

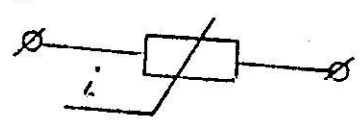
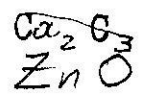
Полупроводниковые болометры применяют в различных системах ориентации, для бесконтактного и дистанционного измерения температур и т. д.

ВАРИСТОРЫ

(Талышнов  
Угуркин)

Варистор - нелинейное сопротивление.

Состав: зерна  $Ca_2SiO_3$  с оксидной пленкой /p-n - переход/.



Варистор — это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного напряжения.

Варисторы изготовляют методом керамической технологии, т. е. путем высокотемпературного обжига заготовок из порошкообразного карбида кремния со связкой, в качестве которой обычно используют глину. Конструктивное оформление варисторов может быть различным в зависимости от назначения и необходимых параметров. Чаще всего варисторы имеют форму стержней или дисков с электродами на противоположных концах или поверхностях, к которым припаяны выводы для присоединения к схеме.

Нелинейность ВАХ варисторов (рис. 11.1) обусловлена явлениями на точечных контактах между кристаллами карбида кремния. При малых напряжениях на варисторе может происходить туннелирование электронов сквозь тонкие потенциальные барьеры, существующие на поверхности кристаллов карбида кремния.

При больших напряжениях на варисторе и соответственно при больших токах, проходящих через него, плотность тока в точечных контактах оказывается очень большой. Все напряжение, приложенное к варистору, падает на точечных контактах. Поэтому удельная мощность (мощность в единице объема), выделяющаяся в точечных контактах, достигает таких значений, которые нельзя не учитывать. Разогрев точечных контактов приводит к уменьшению их сопротивления и к нелинейности ВАХ.

Сопротивление точечных контактов определяется сопротивлением растекания (см. § 3.21), т. е. сопротивлением малых актив-

ных областей полупроводника под точечными контактами. Из-за малости активных областей их разогрев практически не приводит к повышению температуры всего варистора. Кроме того, малые объемы активных областей обеспечивают малую инерционность тепловых процессов — разогрева и охлаждения этих областей. Теоретические расчеты показывают, что тепловая постоянная времени активных областей может составлять  $10^{-6} \dots 10^{-8}$  с.

Считая разогрев активных областей под точечными контактами одним из основных процессов, приводящих к нелинейности ВАХ в рабочем диапазоне напряжений и токов для варистора, можно получить ряд важных зависимостей и характеристик варисторов.



## ХАРАКТЕРИСТИКИ

Коэффициент нелинейности варистора — это отношение статического  $R$  и дифференциального  $r$  сопротивлений при заданном постоянном напряжении на варисторе:

$$\beta = \frac{R}{r} = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU}$$

Вольт-амперная характеристика варистора, как было отмечено, должна соответствовать уравнениям (11.5) и (11.6). Если ~~же~~ варистор работает в узком диапазоне изменений напряжений и токов, то коэффициент нелинейности в этом диапазоне можно считать постоянным:

$$\beta = U dI / (I dU) = \text{const.}$$

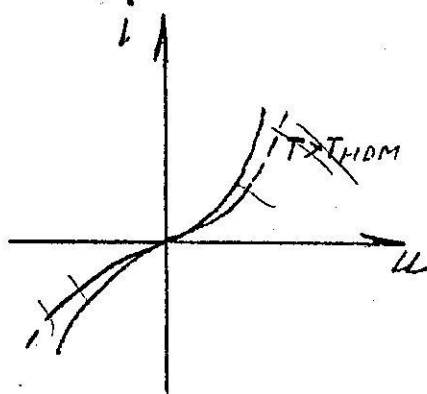
и ВАХ варистора будет соответствовать уравнению

$$I = AU^\beta, \quad (11.11)$$

где  $A$  — коэффициент, значение которого зависит от типа варистора и от температуры.

С увеличением тока увеличивается напряжение на переходе, растет его проводимость — увеличивается проводимость прибора.

~~От температуры окружающей среды сопротивление не зависит, только от тока.~~



ВАХ

$$I = AU^\beta$$

$$\beta = (3 + 7)$$

— коэффициент нелинейности

до 30!

Параметры:

$\beta$  :  $T_{min}$  ,  $T_{max}$  ,  $A$  — чувствительность

$$\alpha_T = \frac{\partial I}{\partial T} \cdot \frac{1}{I} , U_{max} , I_{max}$$

Температурные коэффициенты статического сопротивления, напряжения и тока. В связи с нелинейностью ВАХ следует различать температурные коэффициенты статического сопротивления варистора, измеренные при постоянных напряжении или токе, а также температурные коэффициенты напряжения и тока. Из уравнений (11.11) — (11.14) с учетом температурного изменения коэффициентов  $A$  и  $A_1$  получим:

$$\begin{aligned} \text{TKR}|_{U=\text{const}} &= \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \Big|_{U=\text{const}} = \\ &= \text{TKA}_1 \cdot \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \text{TK}|_{U=\text{const}}; \end{aligned} \quad (11.15)$$

$$\begin{aligned} \text{TKR}|_{I=\text{const}} &= \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \Big|_{I=\text{const}} = \\ &= \beta \text{TKA}_1 + (1 - \beta) \text{TKU}|_{I=\text{const}}; \end{aligned} \quad (11.16)$$

$$\text{TKI}|_{U=\text{const}} = \frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial T} \Big|_{U=\text{const}} = \beta \text{TKA}_1; \quad (11.17)$$

$$\text{TKU}|_{I=\text{const}} = \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial T} \Big|_{I=\text{const}} = \text{TKA}_1. \quad (11.18)$$

При малых напряжениях на варисторе, когда коэффициент нелинейности  $\beta \approx 1$ , т. е. на линейном участке ВАХ

$$\text{TKA}_1 = \frac{1}{A_1} \frac{dA_1}{dT} \approx \text{TKR}|_{U \approx 0} \approx -\frac{B}{T^2}. \quad (11.19)$$

Частотные свойства варисторов могут определяться либо инерционностью процессов, приводящих к нелинейности ВАХ, либо собственной емкостью варистора. Инерционность разогрева и охлаждения активных областей под точечными контактами между кристаллами очень мала. Поэтому частотные свойства варисторов определяются временем перезаряда их собственной емкости.