Тиристоры

Докладчики: студенты группы 21301

Гардер Александр

Стафеев Федор

Лебедев Константин

Начать просмотр

Карта презентации

Общие сведения

Зонные диаграммы и токи диодного тиристора в открытом состоянии

Зонная диаграмма динистора

Зависимость коэффициента пердачи α от тока эмиттера

ВАХ динистора

Зависимость коэффициента М от напряжения V_G. Умножение в коллекторном переходе

Тринистор

ВАХ тринистора

Общие сведения

- *Тиристор* – это полупроводниковый прибор с тремя и более *p-n* переходами, вольтамперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и который используется для переключения.
- Структура тиристора показана на рисунке 1. Тиристор представляет собой четырехслойный p_1-n_1-p_2-n_2 прибор, содержащий три последовательно соединенных *p-n* перехода ($П_1$, $П_2$ и $П_3$). Обе внешние области называют эмиттерами ($Э_1$,$Э_2$), а внутренние области – базами ($Б_1$, $Б_2$) тиристора (рис. 1а). Переходы $П_1$ и $П_2$ называются эмиттерными, переход $П_3$ – коллекторный переход.
- Управляющий электрод может быть подключен к любой из баз ($Б_1$, $Б_2$) тиристора, как показано на рисунке 1б.
- Прибор без управляющих электродов работает как двухполюсник и называется *диодным тиристором* (*динистором*). Прибор с управляющим электродом является трехполюсником и называется *триодным тиристором*.

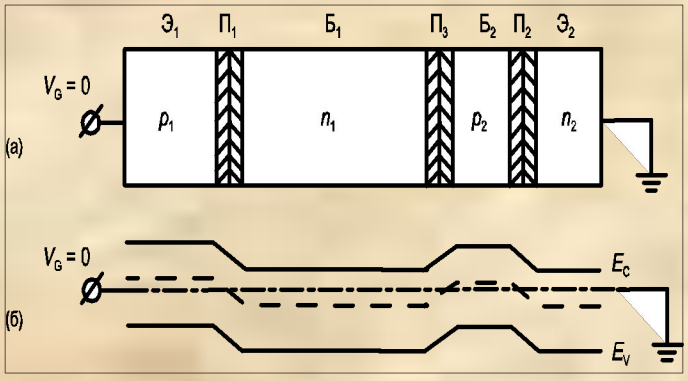


Рис. 1. Схема диодного тиристора
а) структура диодного тиристора; б) зонная диаграмма

- При создании тиристора в качестве исходного материала выбирается подложка *n*- или *p*-типа. Типичный профиль легирующей примеси в диффузионно-сплавном приборе показан на рисунке 3. В качестве исходного материала выбрана подложка *n*-типа. Диффузией с обеих сторон подложки одновременно создают слои p_1 и p_2. На заключительной стадии путем сплавления (или диффузии) с одной стороны подложки создают слой n_2. Структура полученного тиристора имеет вид p_1^+-n_1-p_2-n_2^+.

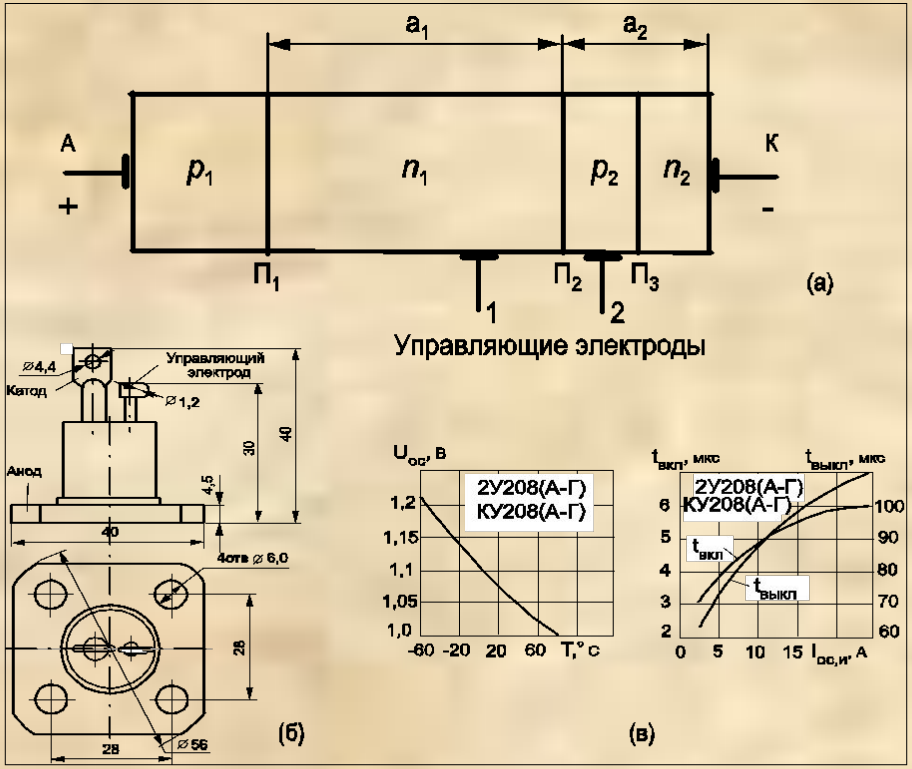


Рис. 2. Схема (а), приборная реализация (б) и характеристики (в) триодного тиристора

Профиль концентрации легирующей примеси (N_s) в эмиттерах и базах тиристора

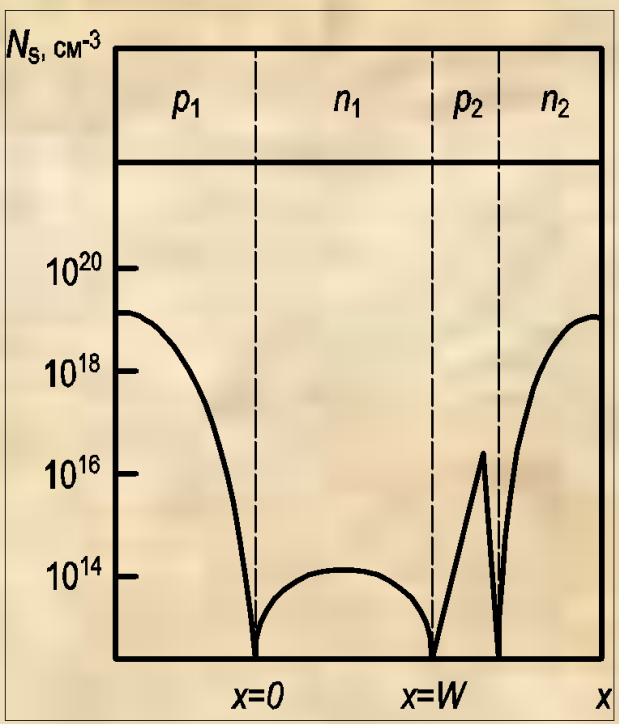


Рис 3. (Смотри заголовок).

Зонная диаграмма динистора на различных участках ВАХ

- Вольт-амперная характеристика диодного тиристора приведенная на рисунке 4, имеет несколько различных участков. Прямое смещение тиристора соответствует положительному напряжению V_G, подаваемому на первый p_1-эмиттер тиристора.
- Участок характеристики между точками 1 и 2 соответствует закрытому состоянию с высоким сопротивлением. В этом случае основная часть напряжения V_G падает на коллекторном переходе $П_2$, который в смещен в обратном направлении. Эмиттерные переходы $П_1$ и $П_2$ включены в прямом направлении. Первый участок ВАХ тиристора аналогичен обратной ветви ВАХ *p-n* перехода.
- При достижении напряжения V_G, называемого напряжением включения $U_{вкл}$, или тока J, называемого током включения $J_{вкл}$, ВАХ тиристора переходит на участок между точками 3 и 4, соответствующий открытому состоянию (низкое сопротивление). Между точками 2 и 3 находится переходный участок характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением, не наблюдаемый на статических ВАХ тиристора.

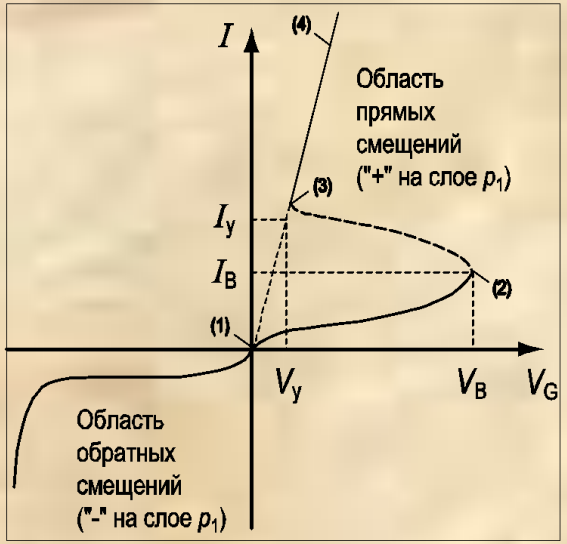


Рис. 4. ВАХ тиристора

V_G – напряжение между анодом и катодом; $I_у$, $V_у$ – минимальный удерживающий ток и напряжение включения

Вах динистора

В стационарном случае токи через переходы П1, П2, П3 равны, тогда

$$I = M(\alpha_1 I + \alpha_2 I + I_{\hat{E}0}),(4)$$

откуда

$$I = \frac{MI_{\hat{E}0}}{1-M\alpha}; \quad I = \frac{MI_{\hat{E}0}}{1-M(\alpha_1+\alpha_2)},(5)$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ – суммарный коэффициент передачи тока первого (p_1-n_1-p_2) и второго (n_2-p_2-n_1) транзисторов.

Выражение (5) в неявном виде описывает ВАХ диодного тиристора на закрытом участке, поскольку коэффициенты α и M зависят от V_G, приложенного напряжения. По мере роста $M(\alpha_1 + \alpha_2)$ с ростом I когда устремится к 1. Это условие и есть условие переключения тиристора из состояния «закрыто» в состояние «открыто».

Напряжение переключения $U_{перекл}$ тиристоров от 20-50 до 1000-2000 В, а ток переключения $I_{перекл}$ составляет у от долей микроампера до единиц миллиампера (в зависимости от площади).

Таким образом, в состоянии «закрыто» тиристор должен характеризоваться малыми значениями α и M, а в состоянии «открыто» – большими значениями коэффициентов α и M.

В закрытом состоянии (α – малы) все приложенное напряжение падает на коллекторном переходе П2 и ток тиристора – это ток обратно смещенного p-n перехода. Энергетическая диаграмма тиристора в состоянии равновесия приведена на рисунке 1, а в режиме прямого смещения («+» на слое p_1) в закрытом состоянии представлена на рисунке 6.

Если полярность напряжения между анодом и катодом сменить на обратную, то переходы П1 и П3 будут смещены в обратном направлении, а П2 – в прямом. ВАХ тиристора в этом случае будет обычная ВАХ двух обратно смещенных p-n переходов.

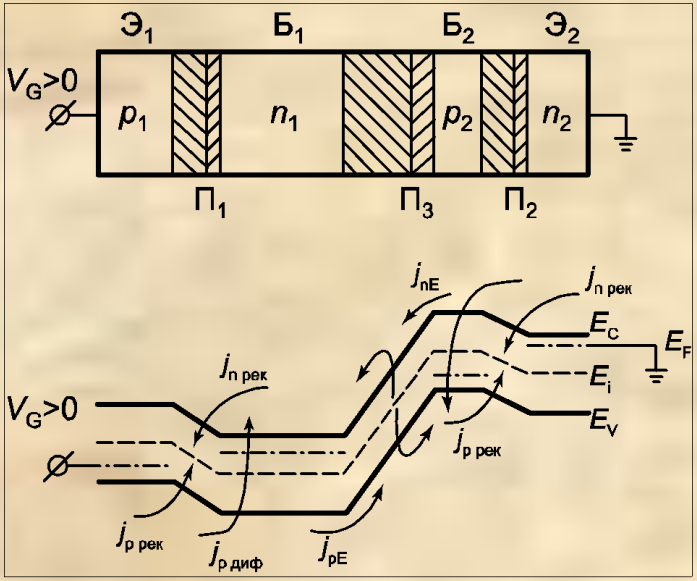


Рис. 6. Зонная диаграмма и токи в тиристоре в закрытом состоянии

Зонные диаграммы и токи диодного тиристора в открытом состоянии

- В открытом состоянии (α – велики) все три перехода смещены в прямом направлении. Это происходит вследствие накопления объемных зарядов в базах n_2, p_2 тиристора.
- Действительно, при больших значениях коэффициента передачи α_2 электроны, инжектированные из n_2-эмиттера в p_2-базу, диффундируют к p-n переходу коллектора $П_3$, проходят его и попадают в n_1-базу. Дальнейшему прохождению электронов по тиристорной структуре препятствует потенциальный барьер эмиттерного перехода $П_1$. Поэтому часть электронов, оказавшись в потенциальной яме n_1-базы, образует отрицательный избыточный заряд.
- Инжектированные дырки из эмиттера p_1 в базу n_1 диффундируют к p-n переходу коллектора $П_3$, проходят через него и попадают в базу p_2. Дальнейшему их продвижению препятствует потенциальный барьер эмиттерного перехода $П_2$. Следовательно, в базе p_2 происходит накопление избыточного положительного заряда.
- В результате накопления избыточного положительного заряда в базе p_2 и отрицательного заряда в базе n_1 переход $П_3$ смещается в прямом направлении, происходит резкое увеличение тока и одновременное уменьшение падения напряжения на тиристоре. На рисунке 7 приведена зонная диаграмма тиристора с накопленным объемным зарядом в обеих базах n_1 и p_2.

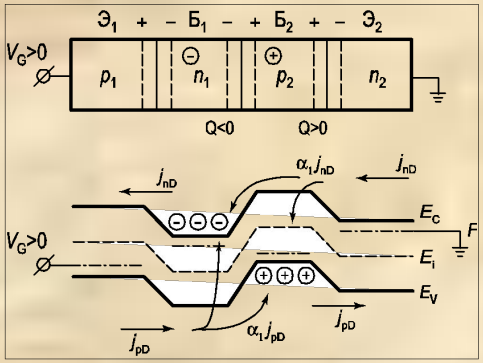


Рис. 7. Зонная диаграмма и токи тиристора в открытом состоянии (везде прямое смещение)

- Величина падения напряжения в прямом участке ВАХ составляет прямое напряжение на трех прямо смещенных *p-n* переходах и имеет величину порядка 1-2 вольт.
- Зонная диаграмма тиристора в открытом состоянии имеет следующий вид, когда на всех *p-n* переходах прямое смещение, на $П_1$ и $П_2$ за счет внешнего напряжения, и на $П_3$ за счет объемных зарядов в базах $Б_1$ и $Б_2$.
- Таким образом, тиристор имеет два устойчивых состояния: малый ток, большое напряжение, высокое сопротивление; и большой ток, малое напряжение, малое сопротивление. Переход тиристора из “закрытого” в “открытое” состояние связан с накоплением объемного заряда в базах $Б_1$ и $Б_2$ из-за роста значения коэффициента передачи эмиттерного тока α и коэффициента умножения M.
- То есть рост α, M с ростом тока J и напряжения V_G в тиристоре является причиной перехода тиристора из состояния “закрытого” в состояние “открытого”.
- В открытом состоянии тиристор находится до тех пор, пока за счет проходящего тока поддерживаются избыточные заряды в базах, необходимые для понижения высоты потенциального барьера коллекторного перехода до величины, соответствующей прямому его включению. Если же ток уменьшить до значения I_y, то в результате рекомбинации избыточные заряды в базах уменьшатся, *p-n* переход коллектора окажется включенным в обратном направлении, произойдет перераспределение падений напряжений на *p-n* переходах, уменьшатся коэффициенты передачи α и тиристор перейдет в закрытое состояние.
- Таким образом, тиристор в области прямых смещений (прямое включение) является бистабильным элементом, способным переключаться из закрытого состояния с высоким сопротивлением и малым током в открытое состояние с низким сопротивлением и большим током, и наоборот.

Зависимость коэффициента передачи α от тока эмиттера

- В области малых токов основная причина зависимости α от тока I связана с рекомбинацией в эмиттерном переходе. При наличии рекомбинационных центров в области пространственного заряда эмиттерного перехода прямой ток такого перехода в области малых прямых смещений – рекомбинационный $J_{рек}$. Зависимость этого тока от напряжения экспоненциальная, но показатель экспоненты в два раза меньше, чем для диффузионного тока J_{pD}.
- По мере роста прямого напряжения на *p-n* переходе диффузионная компонента тока J_{pD} начинает превалировать над рекомбинационной. В терминах эффективности эмиттера это эквивалентно возрастанию эффективности эмиттера, а следовательно, и увеличению коэффициента передач $\alpha = \gamma \cdot \chi$. На рисунке 6 показана зонная диаграмма эмиттерного перехода, которая иллюстрирует конкуренцию двух токов – рекомбинационного и диффузионного в токе эмиттера, а на рисунке 8 – типичная зависимость коэффициента передачи α от тока эмиттера $I_э$ при наличии рекомбинационных центров в ОПЗ *p-n* перехода.

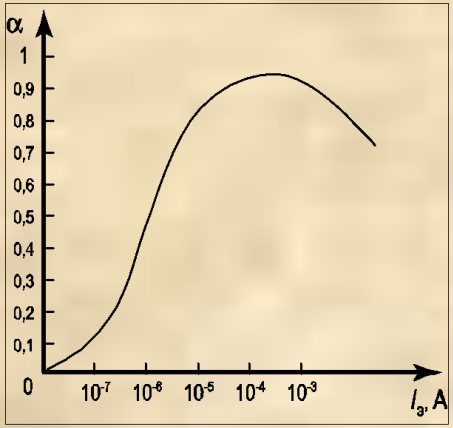


Рис. 8. Типичная зависимость коэффициента передачи α $I_э$ от тока эмиттера

p-n **еходов**

Зависимость коэффициента M от напряжения V_G. Умножение в коллекторном переходе

Другой физический механизм, приводящий к накоплению объемных зарядов в базах тиристора, связан с лавинным умножением в коллекторном переходе. При больших значениях обратного напряжения на p-n переходе величина электрического поля E в области пространственного заряда может приблизиться к значению, соответствующему напряжению лавинного пробоя. В этом случае на длине свободного пробега λ электрон или дырка набирают энергию $q\lambda E$, большую, чем ширина запрещенной зоны полупроводника $q\lambda E > E_g$, и вызывает генерацию новой электронно-дырочной пары. Это явление аналогично лавинному пробою в стабилитронах.

Если M – коэффициент ударной ионизации, определяемый как количество носителей, рожденных при лавинном умножении одной частицей, то M описывается эмпирической формулой:

$$M = \frac{I_{\text{âûõîäíé}}}{I_{\text{âõîäíé}}} = \frac{1}{1-\left(\frac{U}{U_{\text{ì}}}\right)^n}, \quad (6)$$

где U_M – напряжение лавинного пробоя, а значения коэффициента n для Ge, Si и GaAs равно 3.

Таким образом, умножение в коллекторе может служить причиной накопления объемных зарядов в базах тиристора. С формальной точки зрения, умножение в коллекторе эквивалентно росту коэффициента передачи и величине коллекторного тока.

Тринистор

- Как уже говорилось, чтобы перевести тиристор в открытое состояние, необходимо накопить избыточный отрицательный заряд в базе n_1 и положительный в базе p_2. Это осуществляется путем увеличения уровня инжекции через эмиттерные переходы $П_1$ и $П_3$ при увеличении напряжения на тиристоре до $U_{перекл}$. Накоплением объемных зарядов в базах $Б_1$ и $Б_2$ можно управлять, если у одной из баз имеется контакт, который называется управляющим электродом (см. рис. 1б).
- На управляющий электрод базы подается напряжение такой полярности, чтобы прилегающий к этой базе эмиттерный переход был включен в прямом направлении. Это приводит к росту тока через эмиттерный переход и снижению $U_{перекл}$. На рисунке 9 приведено семейство ВАХ тиристора при различных значениях управляющего тока.
- При достаточно больших значениях тока $I_{упр}$ ВАХ тиристора вырождается в прямую ветвь ВАХ диода. Критическое значение тока $I_{упр}$, при котором на ВАХ тиристора исчезает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и тринистор включается, минуя запертое состояние, называется током спрямления.
- Таким образом, наличие $I_{упр}$ принципиально не меняет существа процессов, определяющих вид ВАХ тиристора, но меняет значения параметров: напряжение переключения и ток переключения.

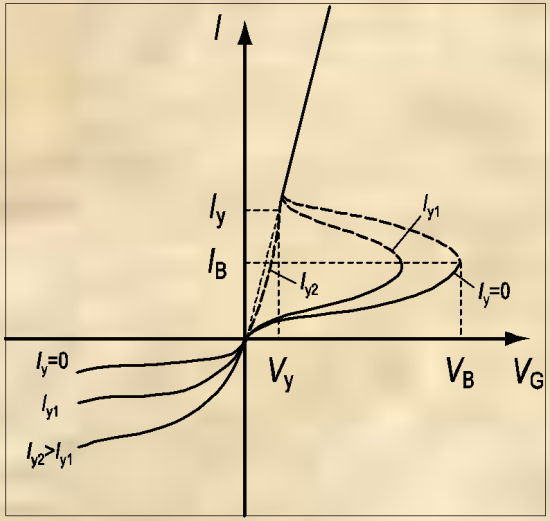
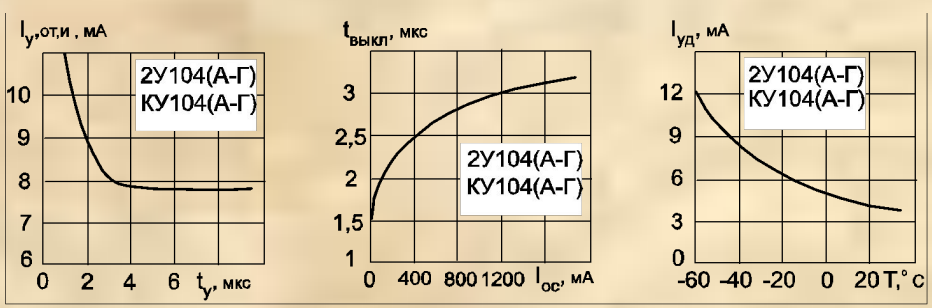


Рис. 9. ВАХ тринистора при различных значениях управляющего тока базы $I_{упр}$



тринисторов

ВАХ тринистора

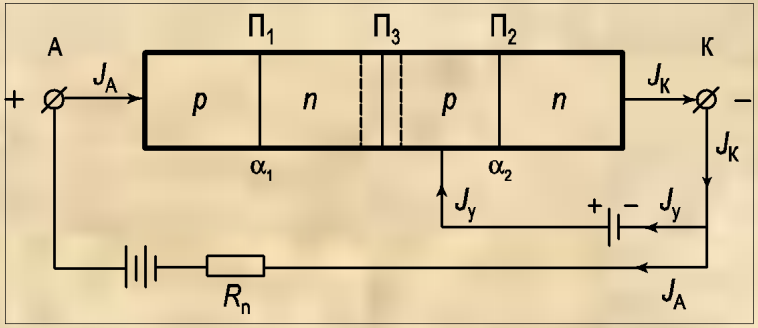


Рис. 11. Схема включения тринистора для расчета ВАХ

Аналогично как для динистора, при наличии управляющего тока I_y запишем систему уравнений для тока тиристора:

$$I_{\text{Т}1\to\text{Т}3} = \alpha_1 I_{\text{Т}1} = \alpha_1 I_{\text{э}}, \quad I_{\text{Т}2\to\text{Т}3} = \alpha_2 I_{\text{Т}2}; \quad I_{\text{Т}2} = I_{\text{э}} + I_{\text{у}}. \quad (7)$$

Сумма всех токов, протекающих через переход $П_3$, будет равна:

$$(I_{\text{э}} + I_{\text{у}})\alpha_2 + \alpha_1 I_{\text{э}} + I_{\text{ê}0} = I_{\text{э}}. \quad (8)$$

Сохраняя обозначение тока тиристора как и ранее через знак $I = I_{\text{э}}$, запишем:

$$I = \frac{I_{\text{ê}0} + \alpha_2 I_{\text{ó}}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (9)$$

При наличии лавинного умножения M в коллекторе $П_3$ ток через коллекторный переход будет равен:

$$\alpha_2 M(I_{\text{э}} + I_{\text{ó}}) + \alpha_1 M I_{\text{э}} + M I_{\text{ê}0} = I_{\text{э}}. \quad (10)$$

Отсюда ВАХ тиристора на закрытом участке равна:

$$I = \frac{M I_{\text{Ê}0} + M \alpha_2 I_{\text{Ó}}}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (11)$$

Уравнение (7.11) описывает ВАХ тиристора в закрытом состоянии, поскольку коэффициенты M, α_1 и α_2 зависят от напряжения V_G.

Аналогично динистору, в открытом состоянии тиристор находится до тех пор, пока за счет проходящего тока поддерживаются избыточные заряды в базах, необходимые для понижения высоты потенциального барьера коллекторного перехода до величины, соответствующей прямому его включению.

Если же ток уменьшить до критического значения I_y, то в результате рекомбинации и рассасывания избыточные заряды в базах уменьшатся, p-n переход коллектора окажется включенным в обратном направлении, произойдет перераспределение падений напряжения на p-n переходах, уменьшатся инжекции из эмиттеров и тиристор перейдет в закрытое состояние.