

# 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 передачи  $\alpha$  от тока эмиттера

ВАХ динистора

Зависимость коэффициента  $M$  от напряжения  $V_{G^2}$   
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 ( $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ ). Обе внешние области называют эмиттерами ( $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ ), а внутренние области – базами ( $\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2$ ) тиристора (рис. 1а). Переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  называются эмиттерными, переход  $\Pi_3$  – коллекторный переход.
- Управляющий электрод может быть подключен к любой из баз ( $\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2$ ) 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*.

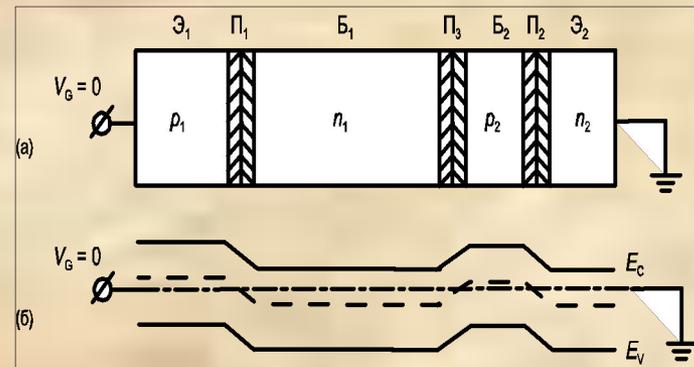
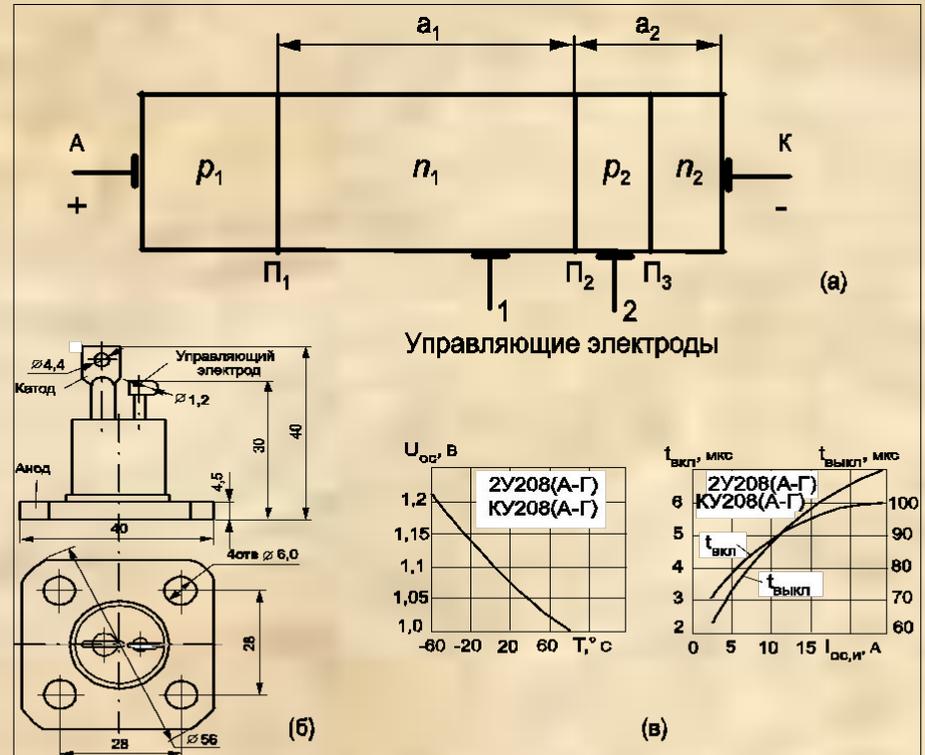


Рис. 1. Схема диодного тиристора  
а) структура диодного тиристора; б) зонная диаграмма

- 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

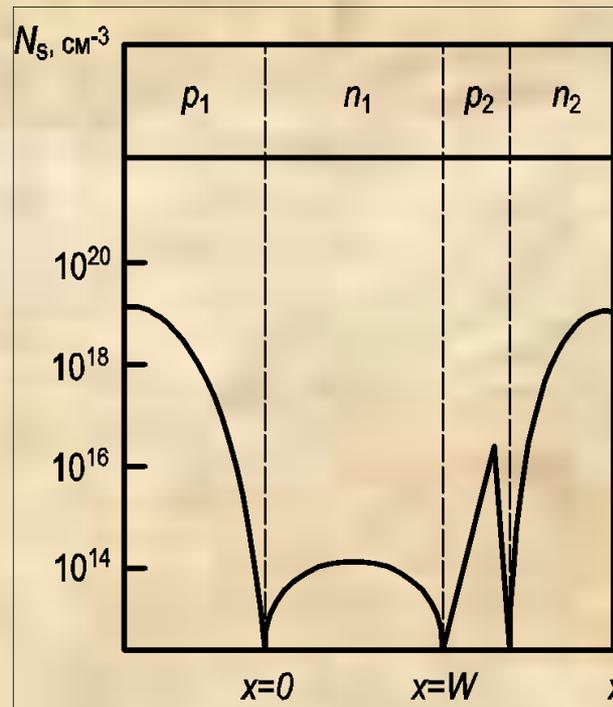


Рис 3. (Смотри заголовок).



# 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  $P_2$ , который в смещен в обратном направлении. Эмиттерные переходы  $P_1$  и  $P_2$  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.

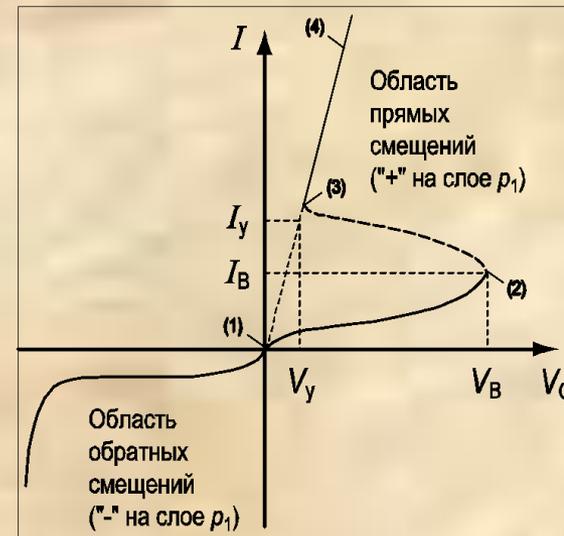


Рис. 4. ВАХ тиристора

$V_G$  — напряжение между анодом и катодом;  $I_y, V_y$  — минимальный удерживающий ток и напряжение



# Вах динистора

В стационарном случае токи через переходы  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  равны, тогда

$$I = M(\alpha_1 I_{\Pi_1} + \alpha_2 I_{\Pi_2} + I_{E0}), (4)$$

откуда

$$I = \frac{MI_{E0}}{1 - M\alpha}; \quad I = \frac{MI_{E0}}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)}, (5)$$

где  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{M(n_2 - p_2)}{p_1 - n_1 - p_2}$  – суммарный коэффициент передачи тока первого

и второго транзистора. Выражение (5) в первом приближении описывает ВАХ диодного тиристора на «закрытом» участке.

По мере роста значения  $M(\alpha_1 + \alpha_2)$  значение  $\alpha$  устремится к 1. Это соответствует состоянию «закрыто» в состоянии «открыто».

Напряжение переключения  $U_{перекл}$  тиристора от 20-50 В до 1000-2000 В.

Для тиристора (в зависимости от площади) ток в состоянии «закрыто» должен характеризоваться малыми значениями  $\alpha$  и  $M$ , значениями коэффициентов  $\alpha$  и  $M$  в состоянии «открыто» – большими.

В закрытом состоянии ( $\alpha = 0$ ) коллекторном переходе ( $\Pi_2$ ) в диодном направлении  $p-n$  перехода и ток тиристора в состоянии равновесия приложенная энергия не вызывает смещения («+» на слое  $p_1$ ) в закрытом состоянии представлена на рисунке 6.

Если полярность напряжения между анодом и катодом сменить на обратную, то переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  будут смещены в обратном направлении, а  $\Pi_2$  – в прямом. ВАХ обратносмещенных  $p-n$  переходов.

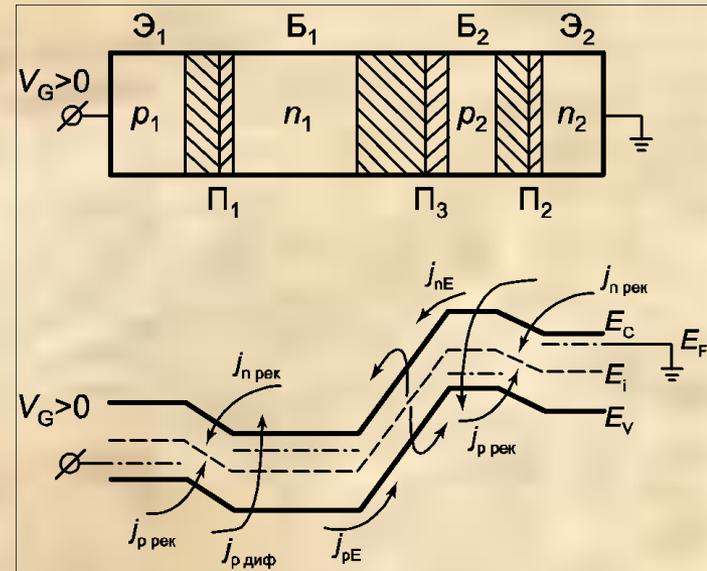


Рис. 6. Зонная диаграмма и токи в тиристор в закрытом состоянии



# Зонные диаграммы и токи диодного тиристора в открытом состоянии

- В открытом состоянии ( $\alpha$  – 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  $\alpha_2$  электроны, инжектированные из  $n_2$ -эмиттера в  $p_2$ -базу, диффундируют к  $p$ - $n$  переходу коллектора  $\Pi_3$ , проходят его и попадают в  $n_1$ -базу. Дальнейшему прохождению электронов по тиристорной структуре препятствует потенциальный барьер эмиттерного перехода  $\Pi_1$ . 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  $\Pi_3$ , проходят через него и попадают в базу  $p_2$ . Дальнейшему их продвижению препятствует потенциальный барьер эмиттерного перехода  $\Pi_2$ . 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  $\Pi_3$  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  $p_2$ .

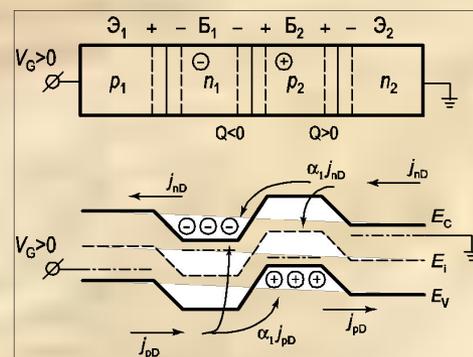


Рис. 7. Зонная диаграмма и токи тиристора в открытом состоянии (везде прямое смещение)

- 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  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  за счет внешнего напряжения, и на  $\Pi_3$  за счет объемных зарядов в базах  $B_1$  и  $B_2$ .
- 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  $B_1$  и  $B_2$  из-за роста значения коэффициента передачи эмиттерного тока  $\alpha$  и коэффициента умножения  $M$ .
- То есть рост  $\alpha$ ,  $M$  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  $\alpha$  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 $\alpha$ от тока эмиттера

- В области малых токов основная причина зависимости  $\alpha$  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  $J_{\text{рек}}$ . Зависимость этого тока от напряжения экспоненциальная, но показатель экспоненты в два раза меньше, чем для диффузионного тока  $J_{\text{рД}}$ .
- По мере роста прямого напряжения на  $p-n$  переходе диффузионная компонента тока  $J_{\text{рД}}$  начинает превалировать над рекомбинационной. В терминах эффективности эмиттера это эквивалентно возрастанию эффективности эмиттера, а следовательно, и увеличению коэффициента передач  $\alpha = \gamma\chi$ . 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  $\alpha$  от тока эмиттера  $I_3$  при наличии рекомбинационных центров в ОПЗ  $p-n$  перехода.

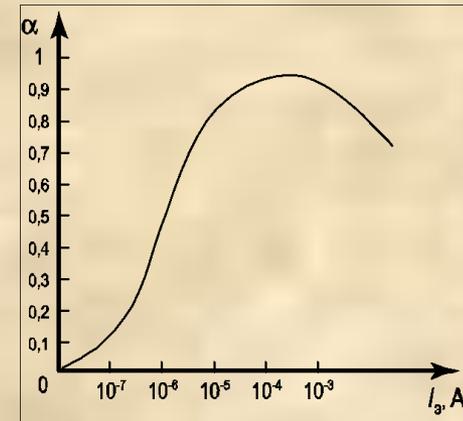


Рис. 8. Типичная зависимость коэффициента передачи  $\alpha$  от тока эмиттера  $I_3$

при наличии рекомбинационных центров в ОПЗ  $p-n$  переходов



# 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  $E$  значению, соответствующему напряжению лавинного пробоя. В области пространственного заряда, где свободные носители электрон или дырка набирают энергию  $q \lambda E$ , большую, чем ширина запрещенной зоны полупроводника  $q \lambda E_g$ , происходит генерацию новой электронно-дырочной пары. Это явление аналогично лавинному пробое в стабилитронах.

Если  $M$  – коэффициент умножения, определяемый как количество носителей, рожденных при лавинном умножении одной парой, то  $M$  описывается эмпирической формулой:

$$M = \frac{I_{\text{авт}}}{I_{\text{авт}}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_1}\right)^n}, \quad (6)$$

где  $U_M$  – напряжение лавинного пробоя, а  $n$  – коэффициент, зависящий от материала базы. Для Ge, Si  $n$  равно 3.

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



# Тригистор

- 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  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  при увеличении напряжения на тиристоре до  $U_{\text{перекл}}$ . Накоплением объемных зарядов в базах  $B_1$  и  $B_2$  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  $U_{\text{перекл}}$ . На рисунке 9 приведено семейство ВАХ тиристора при различных значениях управляющего тока.
- При достаточно больших значениях тока  $I_{\text{упр}}$  ВАХ тиристора вырождается в прямую ветвь ВАХ диода. Критическое значение тока  $I_{\text{упр}}$ , при котором на ВАХ тиристора исчезает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и тиристор включается, минуя запертое состояние, называется током спрямления.
- Таким образом, наличие  $I_{\text{упр}}$  принципиально не меняет существа процессов, определяющих вид ВАХ тиристора, но меняет значения параметров: напряжение переключения и ток переключения.

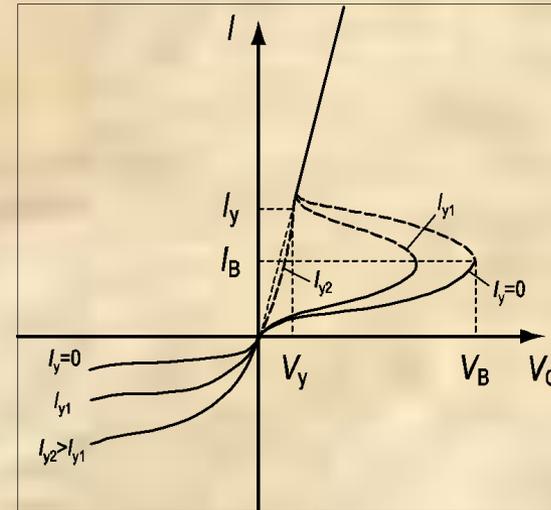
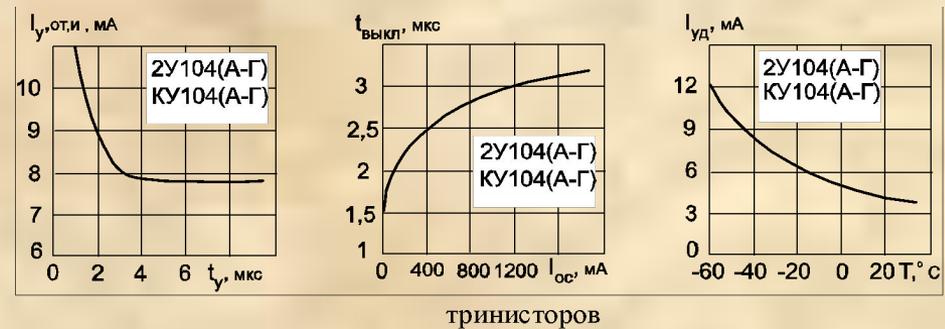


Рис. 9. ВАХ тиристора при различных значениях управляющего тока базы  $I_{\text{упр}}$



тригисторов



# ВАХ тринистора

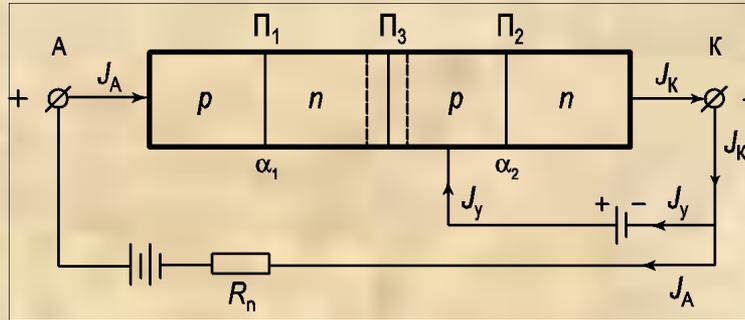


Рис. 11. Схема включения тринистора для расчета ВАХ

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

$$I_{1 \rightarrow 3} = \alpha_1 I_{12} = \alpha_1 I_y, \quad I_{2 \rightarrow 1} = \alpha_2 I_{21}; \quad I_{12} = I_y + I_y. \quad (7)$$

Сумма всех токов, протекающих через переход  $\Pi_3$ , будет равна:

$$(I_y + I_y)\alpha_2 + \alpha_1 I_y + I_{\epsilon 0} = I_y. \quad (8)$$

Сохраняя обозначение тока тиристора как и ранее через знак  $I = I_y$ , запишем:

$$I = \frac{I_{\epsilon 0} + \alpha_2 I_{\epsilon 0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (9) \quad M \text{ в коллекторе } \Pi_3 \text{ ток через коллекторный}$$

переход будет равен:  $\alpha_2 M(I_y + I_{\epsilon 0}) + \alpha_1 M I_y + M I_{\epsilon 0} = I_y. \quad (10)$

Отсюда ВАХ тиристора на закрытом участке равна:

$$I = \frac{I_{\epsilon 0} + \alpha_2 I_{\epsilon 0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (11)$$

Уравнение (7.11) описывает ВАХ тиристора в закрытом состоянии, поскольку коэффициенты  $M$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  зависят от напряжения  $V_G$ .

Аналогично диоду, 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  $I_y$ , избыточные заряды в базах уменьшатся,  $p-n$  то в результате рекомбинации и рассасывания в направлении, произойдет перераспределение зарядов и тиристор перейдет в закрытое состояние. инжекции в переходах, уменьшатся