

## Лекция 11

### Тема лекции: Тиристоры

#### Цель лекции:

Изучить устройство, физические принципы работы и характеристики тиристоров, рассмотреть разновидности тиристорных приборов, особенности их коммутационных свойств и области применения в импульсной, силовой и регулируемой электронике.

#### Основные вопросы:

1. Понятие и назначение тиристора (тринистора).
2. Конструкция и  $p-n-p-n$  структура тиристора.
3. Принцип действия и физические процессы при включении и выключении.
4. Вольтамперная характеристика тиристора и её основные участки.
5. Эквивалентная транзисторная схема тиристора и условие включения.
6. Режимы работы тиристора: запертое, переходное и проводящее состояния.
7. Основные параметры: ток удержания, ток срабатывания, напряжение включения.
8. Типы тиристоров (SCR, триак, диак, оптоотиристор) и их особенности

#### Краткие тезисы:

**Тиристор** – это полупроводниковый прибор с тремя и более  $p-n$  переходами, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и который используется для переключения.

Структура тиристора показана на рисунке 7.1. 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 (см. рис. 7.1а). Переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  называются эмиттерными, переход  $\Pi_3$  – коллекторный переход.

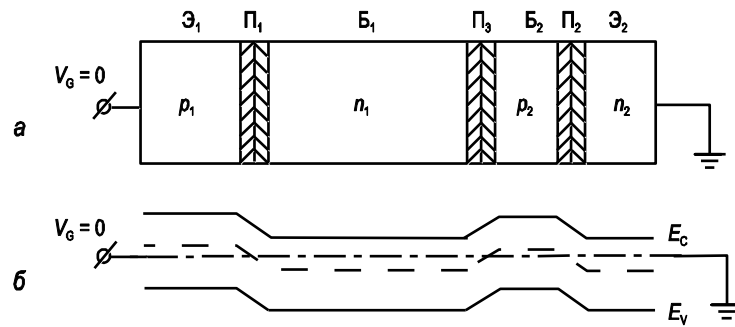


Рис. 7.1. - Схема диодного тиристора:

а) структура диодного тиристора; б) зонная диаграмма

Прибор без управляющих электродов работает как двухполюсник и называется **диодным тиристором (динистором)**. Прибор с управляющим электродом является трехполюсником и называется **триодным тиристором**.

На рисунке 7.2 показана схема триодного тиристора с управляющими электродами при его приборной реализации и характеристики тиристора. Управляющий электрод может быть подключен к любой из баз ( $\text{Б}_1$ ,  $\text{Б}_2$ ) тиристора, как показано на рисунке 7.2а.

Управляющие тиристоры используются для коммутирования высоких значений токов, напряжений и мощностей. Поэтому корпуса тиристоров как правило являются достаточно массивными и в ряде случаев снабжены радиаторами для улучшения теплоотвода. На рисунке 7.2б приведена топология корпуса тиристора малой мощности. Для коммутации мощностей важными параметрами являются время включения и выключения тиристора. Характерные значения этих времен для тиристорov лежат в микросекундном диапазоне. На рисунке 7.2в в качестве примера приведены такие характеристики для триодного тиристора КУ208.

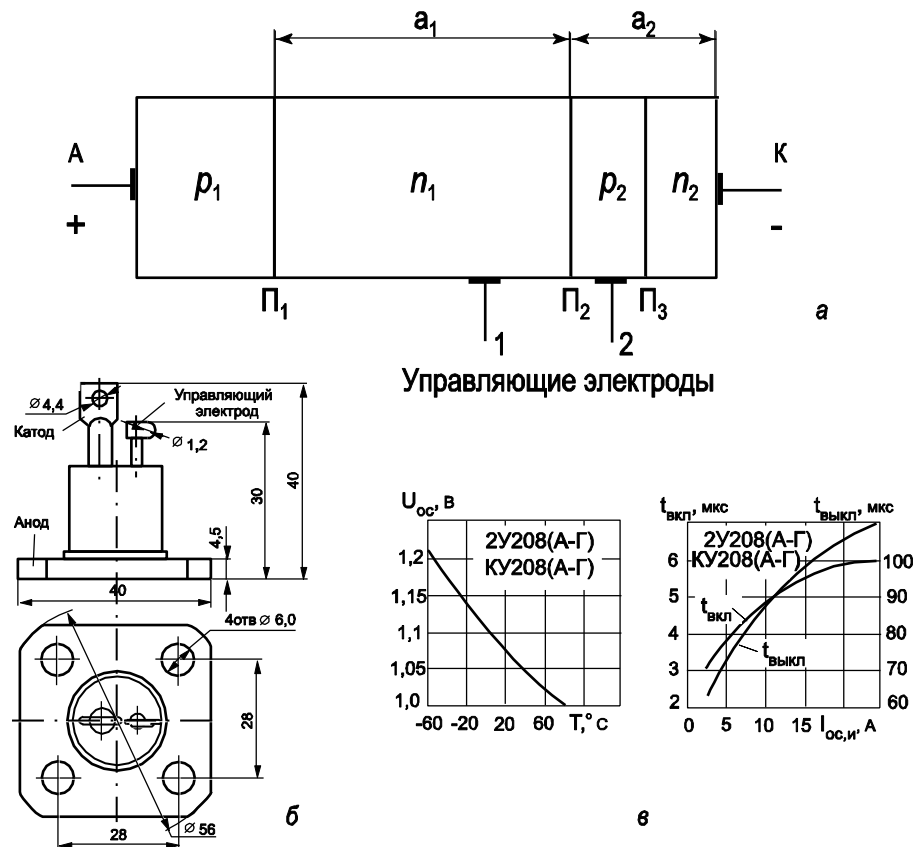


Рис. 7.2.- Схема (а), приборная реализация (б) и характеристики (в) триодного тиристора [23]

При создании тиристора в качестве исходного материала выбирается подложка  $n$ - или  $p$ -типа. Типичный профиль легирующей примеси в диффузионно-сплавном приборе показан на рисунке 7.3. 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  $p_1^+-n_1-p_2-n_2^+$ .

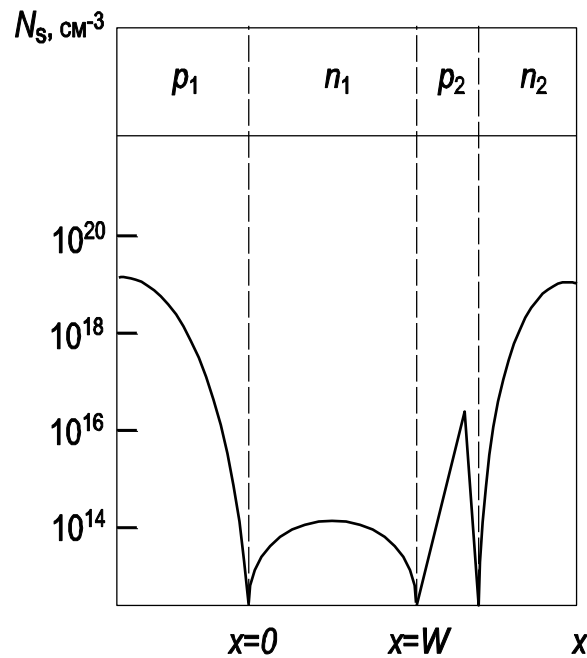


Рис. 7.3.- Профиль концентрации легирующей примеси ( $N_s$ ) в эмиттерах и базах тиристора

### Вольт-амперная характеристика тиристора.

Вольт-амперная характеристика диодного тиристора, приведенная на рисунке 7.4, 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  $\Pi_2$ , который смещен в обратном направлении. Эмиттерные переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  включены в прямом направлении. Первый участок ВАХ тиристора аналогичен обратной ветви ВАХ  $p$ - $n$  перехода.

При достижении напряжения  $V_G$ , называемого напряжением включения  $U_{\text{вкл}}$ , или тока  $J$ , называемого током включения  $J_{\text{вкл}}$ , 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.

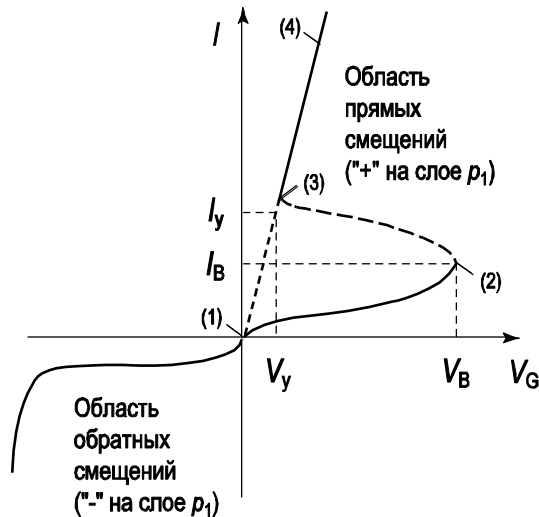


Рис. 7.4. -ВАХ тиристора:

$V_G$  – напряжение между анодом и катодом;  $I_y$ ,  $V_y$  – минимальный удерживающий ток и напряжение;  $I_B$ ,  $V_B$  – ток и напряжение включения

### Феноменологическое описание ВАХ динистора.

Для объяснения ВАХ динистора используют двухтранзисторную модель. Из рисунка 7.5 следует, что тиристор можно рассматривать как соединение  $p$ - $n$ - $p$  транзистора с  $n$ - $p$ - $n$  транзистором, причем коллектор каждого из них соединен с базой другого. Центральный переход действует как коллектор дырок, инжектируемых переходом  $\Pi_1$ , и как коллектор электронов, инжектируемых переходом  $\Pi_2$ .

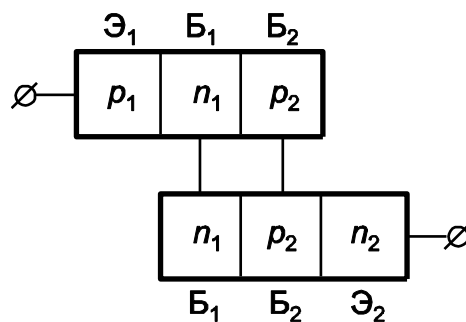


Рис. 7.5. - Двухтранзисторная модель диодного тиристора

Взаимосвязь между токами эмиттера  $I_3$ , коллектора  $I_K$  и статическим коэффициентом усиления по току  $\alpha_1$   $p_1$ - $n_1$ - $p_2$  транзистора и  $\alpha_2$   $n_2$ - $p_1$ - $n_1$  транзистора следующая. Представляя динистор как два транзистора, запишем следующие соотношения.

Пусть  $I_{i_1}$  – ток через переход  $\Pi_1$ . Тогда часть тока  $I_{i_1}$ , дошедшая до коллекторного перехода  $\Pi_3$   $I_{i_1 \rightarrow i_3}$ , будет равна:

$$I_{\bar{1} \rightarrow \bar{1} 3} = \alpha_1 I_{\bar{1} 1}. \quad (7.1)$$

Если  $I_{\bar{1} 3}$  – ток через переход  $\Pi_2$ , аналогично:

$$I_{\bar{1} 2 \rightarrow \bar{1} 3} = \alpha_2 I_{\bar{1} 2}. \quad (7.2)$$

Учтем еще один фактор – лавинное умножение в переходе  $\Pi_3$  через коэффициент лавинного умножения  $M$ . Тогда суммарный ток  $I_{\bar{1} 3}$  через переход  $\Pi_3$  будет равен:

$$I_{\bar{1} 3} = M(\alpha_1 I_{\bar{1} 1} + \alpha_2 I_{\bar{1} 2} + I_{\bar{e}0}), \quad (7.3)$$

где  $I_{K0}$  – обратный ток перехода  $\Pi_3$  (генерационный и тепловой).

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

$$I = M(\alpha_1 I + \alpha_2 I + I_{\bar{e}0}), \quad (7.4)$$

откуда

$$I = \frac{MI_{\bar{e}0}}{1 - M\alpha}; \quad I = \frac{MI_{\bar{e}0}}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (7.5)$$

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 (7.5) в неявном виде описывает ВАХ диодного тиристора на «закрытом» участке, поскольку коэффициенты  $M$  и  $\alpha$  зависят от приложенного напряжения  $V_G$ . По мере роста  $\alpha$  и  $M$  с ростом  $V_G$ , когда значение  $M(\alpha_1 + \alpha_2)$  станет равно 1, из уравнения (7.5) следует, что ток  $I$  устремится к  $\infty$ . Это условие и есть условие переключения тиристора из состояния «закрыто» в состояние «открыто».

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

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

В закрытом состоянии ( $\alpha$  – малы) все приложенное напряжение падает на коллекторном переходе  $\Pi_3$  и ток тиристора – это ток обратного смещенного  $p$ - $n$  перехода. Энергетическая диаграмма тиристора в состоянии равновесия приведена ранее на рисунке 7.1, а в режиме прямого смещения («+» на слое  $p_1$ ) в закрытом состоянии представлена на рисунке 7.6.

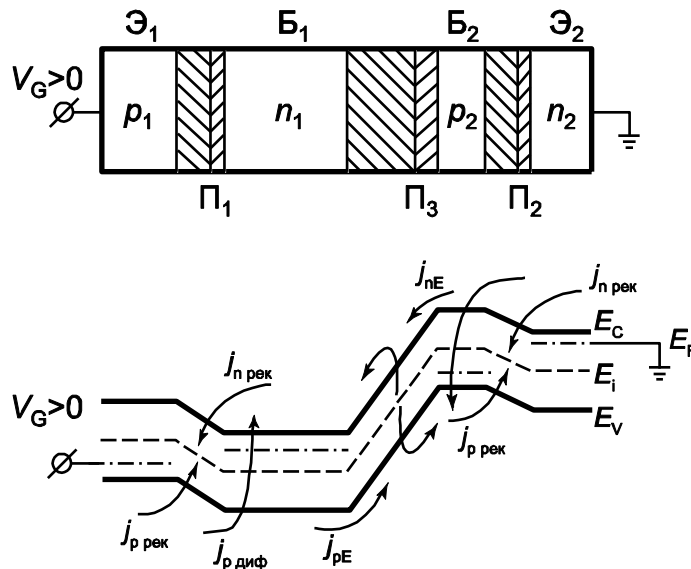


Рис. 7.6. - Зонная диаграмма и токи в тиристоре в закрытом состоянии [5]

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 тиристора в этом случае будет обычная ВАХ двух обратносмещенных  $p$ - $n$  переходов.

#### **Зонная диаграмма 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 7.7 приведена зонная диаграмма тиристора с накопленным объемным зарядом в обеих базах  $n_1$  и  $p_2$ .

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 вид, приведенный на рисунке 7.7, 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  $B_2$ .

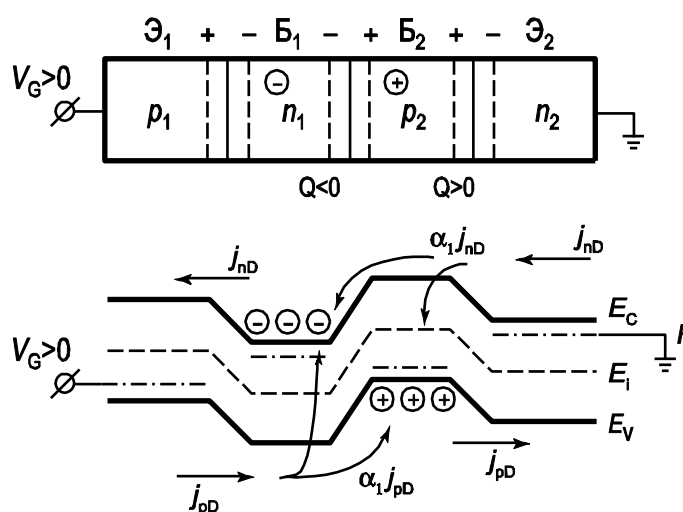


Рис. 7.7. - Зонная диаграмма и токи тиристора в открытом состоянии (везде прямое смещение)

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  $I$  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.

#### **Вопросы для контроля изучаемого материала:**

1. Что называется тиристором и какова его структура?
2. Чем тиристор отличается от диода и транзистора?
3. Как работает тиристор в запертом и открытом состоянии?
4. Объясните условие включения  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$
5. Какие параметры определяют вольтамперную характеристику тиристора?
6. Что называют током удержания и током срабатывания?
7. Какие существуют типы тиристоров и чем они различаются?
8. Где применяются тиристоры в современной электронике?

#### **Список литературных источников:**

1. Соколов В. И. Физика и технология полупроводников. — М.: МИФИ, 2018.
2. Трифонов Е. Н. Электронные процессы в твёрдых телах. — М.: Наука, 2015.
3. Millman, J., Halkias, C. Electronic Devices and Circuits. — McGraw-Hill, 2010.
4. Streetman, B. G., Banerjee, S. Solid State Electronic Devices. — Prentice Hall, 2016.

5. Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Wiley, 2007.
6. Boylestad, R., Nashelsky, L. Electronic Devices and Circuit Theory. — Pearson, 2019.
7. Sedra, A., Smith, K. Microelectronic Circuits. — Oxford University Press, 2015.