

ТИРИСТОРЫ

Тиристор – это полупроводниковый прибор, основой которого служат три или более трех последовательно включенных $p-n$ -переходов. Область его применения – бесконтактное переключение и управление в электрических цепях различного назначения. Отличительной особенностью вольтамперных характеристик всех тиристоров является наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, на котором происходит быстрое переключение тиристора из закрытого состояния в открытое. В закрытом состоянии через тиристор протекает малый ток при значительном падении напряжения (от нескольких десятков до тысяч Вольт), в открытом состоянии при протекании больших токов падение напряжения на тиристоре невелико (не более единиц Вольт).

Существует множество разновидностей тиристоров. По числу выводов различают диодные, триодные и (редко) тетродные тиристоры. По виду вольтамперной характеристики различают тиристоры, не проводящие в обратном направлении, тиристоры с обратной проводимостью, симметричные тиристоры (симисторы), которые могут переключаться при обеих полярностях анодного напряжения.

ДИОДНЫЙ ТИРИСТОР (ДИНИСТОР)

Структура динистора – три последовательно включенных $p-n$ -перехода (рис. 1) с выводами от крайних областей. Вывод от p^+ -области называется анодом, вывод от n^+ -области – катодом. Крайние области называются также эмиттерными, средние – базовыми. Концентрация примесей в эмиттерных областях, как правило, значительно больше, чем в базовых. При подключении тиристора в электрическую цепь последовательно с ним обязательно включается балластный резистор R . При этом образуется делитель напряжения, позволяющий задать максимально возможный ток открытого тиристора и одновременно предохранить тиристор от выхода из строя, так как при отпирании тиристора большая часть напряжения падает на резисторе R . В результате на открытом тиристоре остается только небольшое прямое напряжение. Все тиристорные структуры изготавливаются на основе кремния.

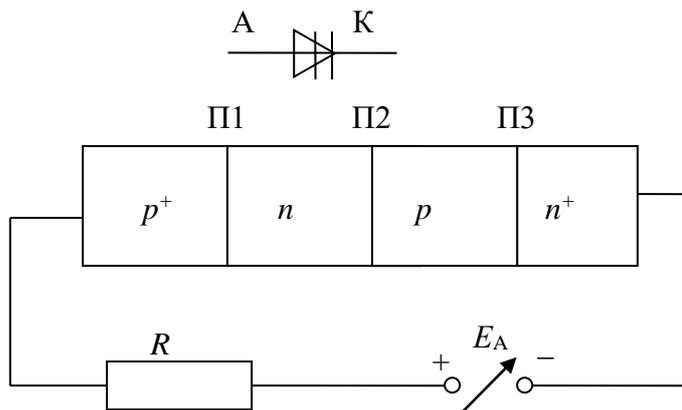


Рис. 1. Структура динистора, подключение к источнику напряжения и его условное графическое изображение. А – анод, К – катод. Указана рабочая полярность источника E_A

При включении источника питания E_A отрицательным полюсом к аноду оба крайних перехода П1 и П3 оказываются смещенными в обратном направлении, а переход П2 находится под небольшим прямым смещением. Вследствие этого через тиристор протекает малый обратный ток двух последовательно включенных переходов П1 и П3 (см. рис. 2 при $U_A < 0$). Такое состояние тиристора соответствует режиму обратного запирания.

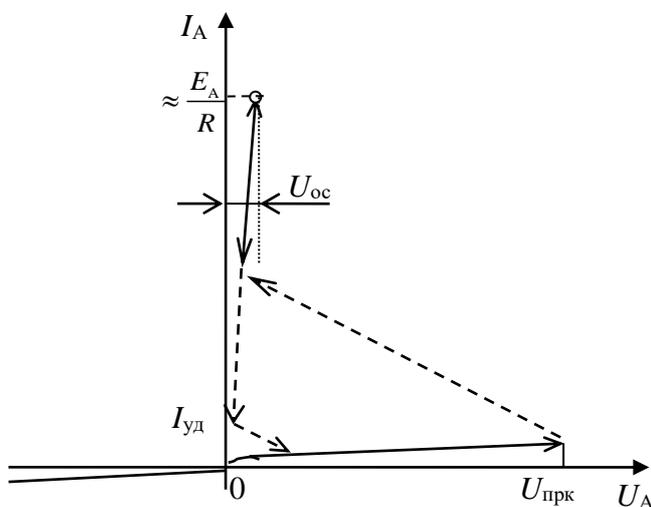


Рис. 2. Вольтамперная характеристика динистора. Стрелками показаны «траектории» при увеличении и уменьшении напряжения на динисторе.

При рабочей полярности источника питания в интервале анодных напряжений от нуля до напряжения переключения $U_{\text{прк}}$ средний переход П2 оказывается смещенным в обратном направлении, тогда как на переходах П1 и П3 существует очень малое прямое напряжение. В результате через тиристор опять протекает малый ток; в этом случае он обусловлен обратно смещенным переходом П2. Это состояние тиристора при рабочей полярности анодного напряжения соответствует режиму прямого запирания.

Переключение тиристора из закрытого в открытое состояние происходит при достижении напряжения переключения $U_{\text{прк}}$. Возникает резкий скачок анодного тока и уменьшение напряжения на тиристоре до величины $U_{\text{ос}}$ (см. рис. 2). Очевидно, что в этом случае все три перехода оказываются смещенными в прямом направлении, так как общее сопротивление тиристорной структуры становится небольшим.

.....ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАБОТУ ТИРИСТОРА

Рассмотрим физические явления, которые обуславливают переход тиристора из закрытого в открытое состояние и наоборот. При малых прямых анодных напряжениях ($0 < U_A < U_{\text{прк}}$) тиристор остается закрытым, несмотря на то, что полярность напряжения на крайних переходах соответствует их прямому смещению. Это объясняется тем, что основная часть приложенного прямого напряжения падает на сопротивлении закрытого перехода П2. При этом величина прямого напряжения на переходах П1 и П3 оказывается столь малой, что инжекция неосновных носителей в базы тиристора не наблюдается. В кремниевых переходах при таких напряжениях течет очень малый прямой ток рекомбинации, не приводящий к изменению состояния среднего перехода П2.

При достижении напряжения переключения $U_{\text{прк}}$ начинается инжекция неосновных носителей на крайних переходах, приводящая к перераспределению зарядов в тиристорной структуре. Энергетическая диаграмма, соответствующая состоянию при $U_A = U_{\text{прк}}$ (рис. 3) позволяет выяснить причины отпираания диодного тиристора.

Пусть первоначально началась инжекция электронов на переходе П3. Электроны, пройдя p -базу за счет диффузии, экстрагируются полем обратно смещенного перехода П2 в n -базу (см. стрелки, соответствующие движению электронов на рис. 3) и занимают в ней свободные энергетические уровни у дна зоны проводимости. Их дальнейшему движению в p^+ -область препятствует небольшой потенциальный порог перехода П1. В результате электроны остаются в n -базе, и ее потенциал становится более отрицательным.

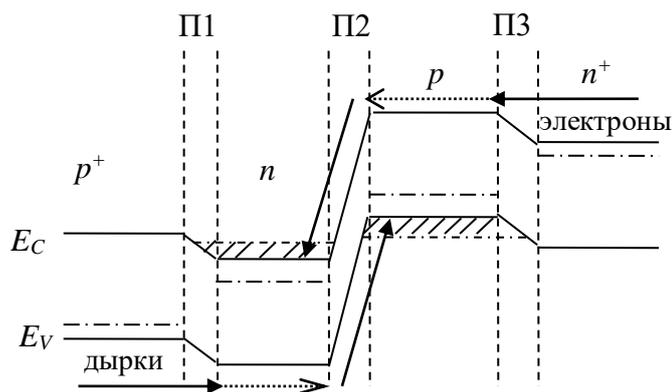


Рис. 3. Энергетическая диаграмма тиристорной структуры при анодном напряжении, равном напряжению переключения.

Понижение

потенциала n -базы вызывает дополнительное прямое смещение перехода П1. Это приводит к возрастанию уровня инжекции дырок из эмиттерной p^+ -области в n -базу и, в конечном счете, к их накоплению в p -базе, повышению ее потенциала (см. стрелки, соответствующие движению дырок на рис. 3) и увеличению уровня инжекции электронов на переходе П3. Таким образом, при достижении напряжения переключения в тиристоре возникает положительная обратная связь: увеличение тока перехода П1 вызывает дополнительный рост тока перехода П3, что в свою очередь приводит к росту тока перехода П1, и т.д. В результате происходит лавинообразное нарастание концентрации накопленных основных носителей в базах тиристора, разность потенциалов на среднем переходе П2 меняет знак, и он скачком открывается. Наблюдается резкий бросок анодного тока до значения, определяемого величиной сопротивления резистора R , с одновременным уменьшением падения напряжения U_A до U_{oc} – напряжения на тиристоре в открытом состоянии (см. рис. 2). Величина U_{oc} определяется суммой падений напряжений на переходах и объемных сопротивлениях полупроводниковых областей и обычно составляет 1,5-2 В.

Существует альтернативный механизм отпирания тиристора. Он возникает в случае, когда напряжение лавинного пробоя среднего перехода П2 меньше величины анодного напряжения, при котором начинается инжекция на крайних переходах. В этом случае электроны и дырки, образовавшиеся в переходе П2 за счет ударной генерации, переходят в соответствующие базовые области, где они являются

основными носителями. Обратное смещение среднего перехода скачком сменяется на прямое из-за лавинообразного нарастания концентраций основных носителей в базах, что приводит к переключению тиристора в открытое состояние. Возможен также вариант одновременного действия обоих механизмов включения, если напряжение лавинного пробоя среднего перехода очень близко к величине U_A , при которой возникает инжекция на переходах П1 и П3.

Очевидно, что структуру диодного тиристора можно представить в виде модели, в которой он заменяется двумя соединенными биполярными транзисторами (рис. 4). База каждого из транзисторов одновременно является коллектором другого. В этой модели отпирание тиристора соответствует одновременному переходу каждого из транзисторов из активного режима в режим насыщения.

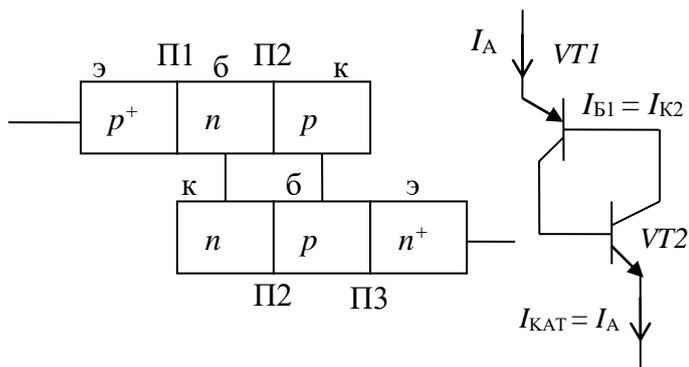


Рис. 4. Модель двух транзисторов для диодного тиристора

Используя данную модель, найдем зависимость анодного тока тиристора от параметров эквивалентных транзисторов. Ток базы первого (p^+-n-p) транзистора:

$$I_{Б1} = I_{Э1} - I_{К1} = I_A - (\alpha_1 I_A + I_{К01}),$$

где α – коэффициент передачи тока транзистора в схеме с общей базой, $I_{К0}$ – обратный ток коллектора.

Ток коллектора второго (n^+-p-n) транзистора:

$$I_{К2} = \alpha_2 I_{КАТ} + I_{К02} = \alpha_2 I_A + I_{К02}$$

Так как $I_{К2} = I_{Б1}$, получаем:

$$I_A - \alpha_1 I_A - I_{К01} = \alpha_2 I_A + I_{К02}, \text{ и окончательно: } I_A = \frac{I_{К01} + I_{К02}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Если $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$, анодный ток очень мал и определяется суммой обратных коллекторных токов эквивалентных транзисторов. Этот

случай соответствует участку прямого запираания вольтамперной характеристики. Приближение этой суммы к единице вызывает резкий рост тока, что соответствует отпиранию тиристора. В том случае, когда достигается напряжение лавинного пробоя перехода П2, выражение для анодного тока принимает следующий вид:

$$I_A = \frac{(I_{K01} + I_{K02})M}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad ()$$

где M – коэффициент размножения подвижных носителей, возрастающий с увеличением обратного напряжения на переходе.

Увеличение инжекции на крайних переходах приводит к росту коэффициентов передачи тока α_1 и α_2 , и при достижении напряжения переключения $U_{прк}$ $\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$. Если при увеличении U_A возникает лавинный пробой среднего перехода, то тогда сумма α_1 и α_2 не достигает единицы: в этом случае $M \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 1$.

Выражения (.....) можно считать формулами для вольтамперной характеристики динистора в интервале $0 < U_A < U_{прк}$, так как коэффициенты α_1 , α_2 и M непосредственно зависят от анодного напряжения.

Выключение динистора, т.е. переход в закрытое состояние, происходит при уменьшении анодного тока до критической величины, которая называется током удержания $I_{уд}$. Из рис. 2 видно, что «траектория» вольтамперной характеристики при увеличении и уменьшении анодного напряжения не одинакова. При возврате в закрытое состояние тиристор остается открытым при токе анода заметно меньшем, чем тот, к которому приходит характеристика в момент переключения. Таким образом ток удержания – это наименьший ток анода, при котором объемный заряд накопленных в базах подвижных носителей обеспечивает прямое смещение перехода П2.

ТРИОДНЫЙ ТИРИСТОР (ТРИНИСТОР).

Тринистор – это тиристор, у которого имеется третий вывод во внешнюю цепь – управляющий электрод. На него подается управляющее напряжение, которое смещает один из крайних переходов в прямом направлении.

Существуют две разновидности тристора: управляемый по катоду (вывод от p -базы) и управляемый по аноду (вывод от n -базы). На рис.5 показана электрическая схема подсоединения тристора, управляемого по катоду, к источникам напряжений.

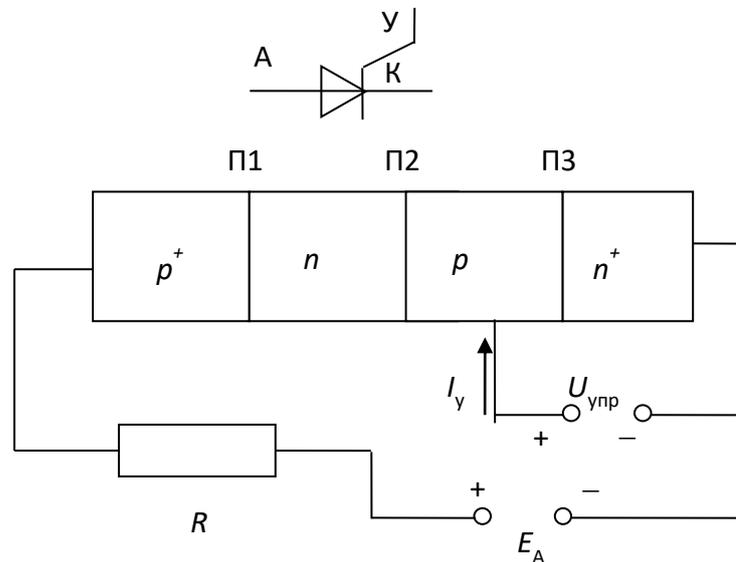


Рис. 5. Символ тиристора, управляемого по катоду, схема включения и рабочие полярности напряжений.

В случае динистора на переходы П1 и П3 внешние напряжения не подаются, и напряжение переключения для каждого прибора постоянно. При управлении по катоду источник $U_{упр}$ дополнительно смещает переход П3 в прямом направлении. Величина $U_{упр}$ должна быть достаточной для начала инжекции электронов из катода в p -базу. Это позволяет изменять напряжение переключения.

Установим такую величину напряжения источника анодного питания E_A , что при $U_{упр} = 0$ тристор будет находиться в режиме прямого запираения. При увеличении управляющего напряжения и, соответственно, управляющего тока I_y начинается инжекция электронов из катода в p -базу. При этом так же, как и в динисторе, начинается лавинообразное нарастание концентрации основных носителей в базах, и переход П2 переключается в прямое направление при меньшем значении $U_{прк}$, чем в случае отсутствия дополнительной инжекции на переходе П3.

Таким образом, увеличивая ток управления, можно переключать тристор при меньших анодных напряжениях при неизменной величине напряжения источника анодного питания E_A (рис. 6.)

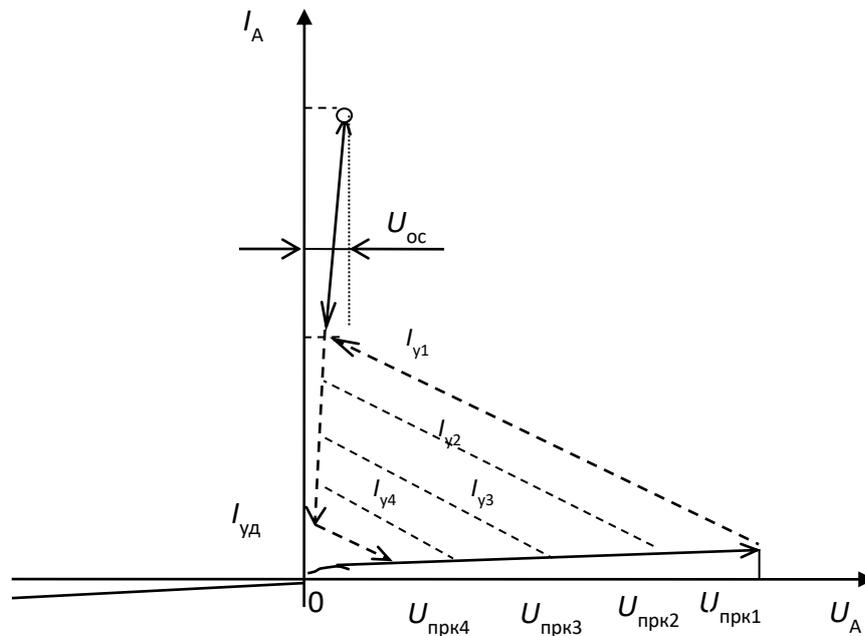


Рис. 6. Вольтамперная характеристика тристора при различных величинах управляющего тока. $E_A = \text{const}$, $I_{y1} < I_{y2} < I_{y3} < I_{y4}$

После включения тристора малый ток управления перестает влиять на его состояние, так как все переходы оказываются смещенными в прямом направлении и сквозной ток через тристор намного больше.

СИММЕТРИЧНЫЙ ТИРИСТОР (СИМИСТОР).

Название прибора отражает вид его вольтамперной характеристики: она симметрична относительно начала системы ее координат. Один из вариантов тиристорной структуры, позволяющий получить такую характеристику, показан на рис.7.

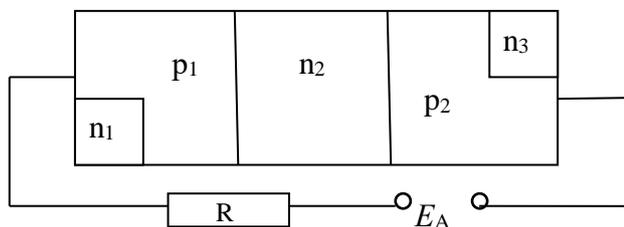


Рис.7. Вариант структуры симистора

Тиристор с такой структурой обладает симметричной вольтамперной характеристикой (рис. 8). При смене полярности источника напряжения E_A изменяется последовательность p - и n -областей.

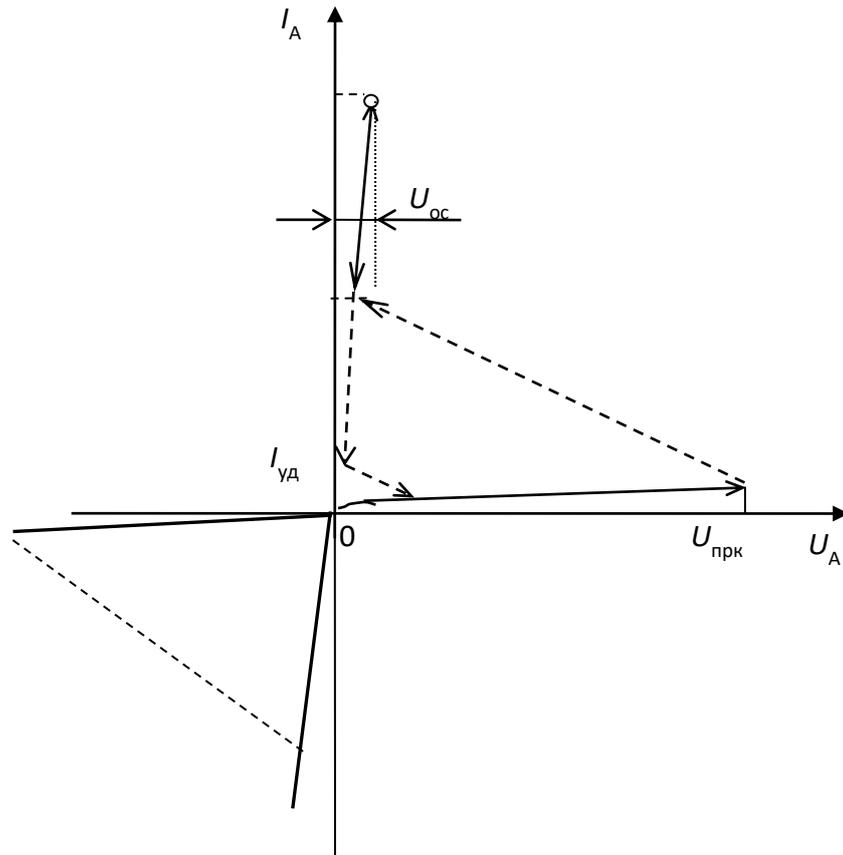


Рис. 8. Вольтамперная характеристика симистора.

Так, если плюс источника подан на левую сторону структуры, где имеются области n_1 и p_1 , то образуется последовательность $p_1n_2p_2n_3$, если полярность E_A противоположна, то возникает тиристор со структурой $p_2n_2p_1n_1$.

Рис.9 поясняет, каким образом получается тиристор $p_1n_2p_2n_3$.

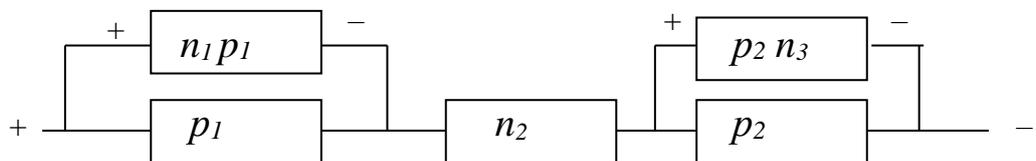


Рис. 9. Области и переходы симистора. Положительный полюс источника E_A подключен к областям n_1 и p_1 .

При такой полярности E_A падение напряжения на переходе n_1p_1 смещает его в обратном направлении. На правом конце ток течет через переход p_2n_3 , т.к. объемное сопротивление области p_2 очень велико по сравнению с сопротивлением прямо смещенного перехода. Получаем тиристор $p_1n_2p_2n_3$