

5. ТИРИСТОРЫ

5.1. Общие сведения о тиристорах

Тиристор – это полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три и более взаимодействующих выпрямляющих перехода, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. При работе в схеме тиристор может находиться в двух состояниях. В одном состоянии – закрытом – тиристор имеет высокое сопротивление и пропускает малый ток, в другом – открытом – сопротивление тиристора мало и через него протекает большой ток.

Структура тиристора состоит из четырёх областей полупроводника с чередующимся типом электропроводности (рис. 5.1, а).

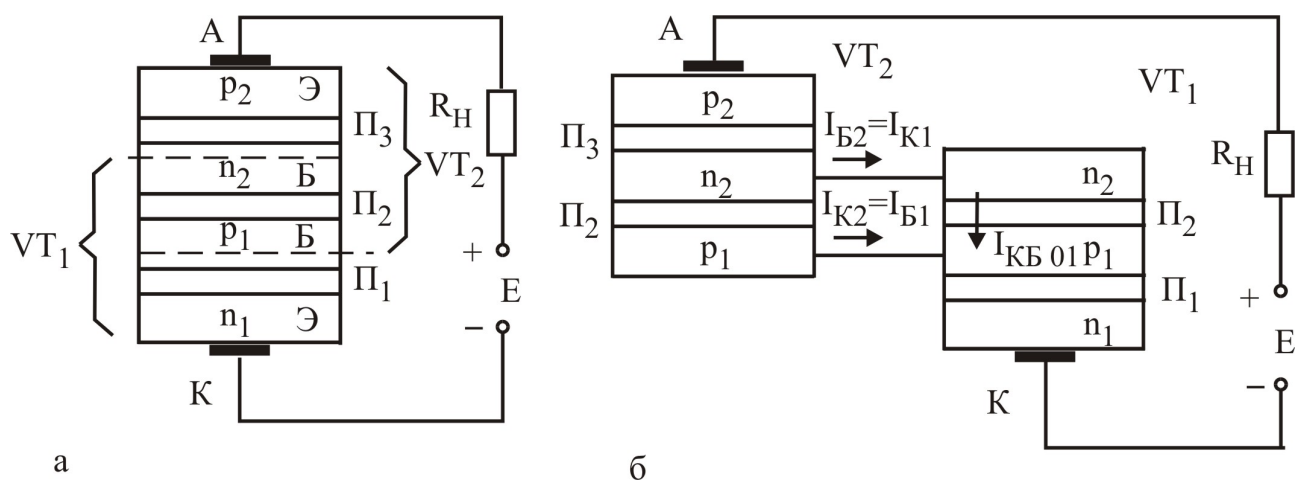


Рис. 5.1

Кроме трёх выпрямляющих переходов тиристор имеет два омических контакта. Контакт с внешним p-слоем называется анодом, а с внешним n-слоем – катодом.

В зависимости от числа выводов тиристоры делятся на диодные, триодные и тетродные. Тиристор, имеющий два вывода, называется динистором или диодным тиристором. Тиристоры, имеющие три и четыре вывода, называются триодными или тетродными. Помимо четырёхслойных структур некоторые виды тиристоров имеют большее число полупроводниковых областей. К таким приборам относится симметричный тиристор (симистор), который может включаться при различных полярностях приложенного напряжения.

На рис. 5.1, б p-n-p-n-структура тиристора представлена в виде двух транзисторов, соединённых между собой, каждый из которых находится в активном режиме.

В связи с таким представлением крайние области тиристорной структуры называют эмиттерами, а примыкающие к ним p-n-переходы – эмиттерными, центральный переход – коллекторным. Между переходами находятся базовые области.

Рассмотрим процессы в тиристорах при подаче внешнего напряжения.

Вольт-амперная характеристика диодного тиристора приведена на рис. 5.2. Пусть к аноду тиристора подано небольшое положительное напряжение. Эмиттерные переходы П1 и П3 (см. рис. 5.1, а) включены в прямом направ-

лении, а коллекторный переход Π_2 включен в обратном, поэтому почти всё приложенное напряжение падает на нём. Участок ОА вольт-амперной характеристики (см. рис. 5.2) аналогичен обратной ветви характеристики диода и характеризуется режимом прямого запираания.

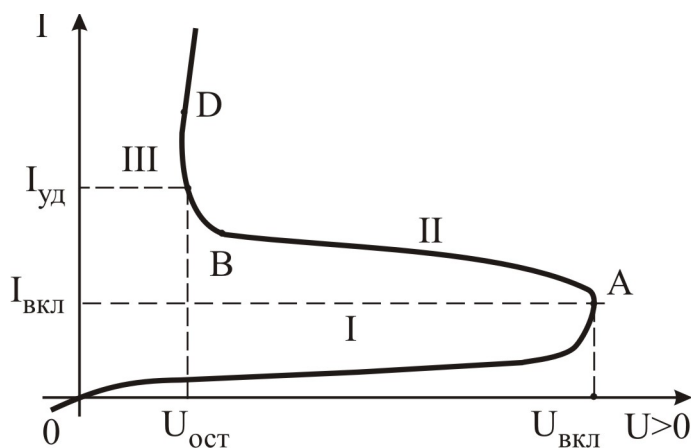


Рис. 5.2

При увеличении анодного напряжения эмиттеры инжектируют основные носители в области баз. Инжектированные электроны и дырки накапливаются в них, что равносильно дополнительной разности потенциалов на коллекторном переходе, которая стремится сместить его в прямом направлении. С увеличением тока через тиристор абсолютное значение суммарного напряжения на коллекторном

переходе начнёт уменьшаться. При этом ток будет ограничиваться только сопротивлением нагрузки и ЭДС источника питания. Высота коллекторного перехода уменьшается до значения, соответствующего включению этого перехода в прямом направлении. Из закрытого состояния (участок ОА) тиристор переходит на участок АВ, соответствующий отрицательному дифференциальному сопротивлению.

После этого все три перехода смещаются в прямом направлении. Этому открытому состоянию соответствует участок ВD. Итак, в закрытом состоянии тиристор характеризуется большим падением напряжения и малым током. В открытом состоянии падение напряжения на тиристоре мало (1...3 В), а ток, протекающий через структуру, велик.

Таким образом, в тиристоре существует положительная обратная связь по току — увеличение тока через один эмиттерный переход приводит к увеличению тока через другой эмиттерный переход.

Напряжение анода, при котором тиристор переходит из закрытого состояния (ОА) в режим, соответствующий отрицательному дифференциальному сопротивлению (АВ), называется напряжением включения $U_{вкл}$. Анодный ток тиристора в режиме включения называется током включения $I_{вкл}$.

Обозначив α_1 и α_2 как коэффициенты передачи тока первого и второго эмиттерных переходов, запишем ток коллектора в виде

$$I_K = \alpha_1 I_{\Pi 1} + \alpha_2 I_{\Pi 2} + I_{KB0},$$

где I_{KB0} — собственный обратный ток коллекторного перехода.

В двухэлектродной структуре диодного тиристора из-за необходимости выполнения баланса токов полные токи через все переходы должны быть равны между собой:

$$I_{\Pi 1} = I_{\Pi 2} = I_{\Pi 3} = I_A. \quad (5.1)$$

С учётом этого анодный ток тиристора

$$I_A = \frac{I_{KB0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (5.2)$$

Когда $\alpha_1 + \alpha_2$ стремится к единице, тиристор из закрытого состояния переходит в открытое. Ток через тиристор во время переключения должен ограничиваться сопротивлением нагрузки. Суммарное падение напряжения на включённом тиристоре составляет около 1 В. В открытом состоянии тиристор будет находиться до тех пор, пока коллекторный переход будет смещён в прямом направлении. Если же ток через тиристор уменьшить, то в результате рекомбинации и рассасывания уменьшится количество неравновесных носителей в базовых областях тиристора и коллекторный переход окажется смещённым в обратном направлении, уменьшится инжекция из эмиттерных областей и тиристор перейдёт в закрытое состояние. Минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии, является удерживающим током тиристора $I_{уд}$.

При обратном включении тиристора вольт-амперная характеристика аналогична обратной ветви вольт-амперной характеристики двух последовательно включённых диодов. Обратное напряжение в этом случае ограничивается напряжением пробоя.

Даже при малых напряжениях и токах в каждой из транзисторных структур коэффициенты передачи тока эмиттера могут быть близки к единице. Для уменьшения начального коэффициента передачи одну из базовых областей тиристора делают относительно толстой. Чтобы уменьшить коэффициент передачи тока другого транзистора, его эмиттерный переход шунтируют объёмным сопротивлением прилегающей базовой области.

Шунтирование позволяет создавать тиристоры с большими значениями напряжения включения. Кроме этого, тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом будет иметь так называемую жесткую характеристику переключения, т. е. переход из закрытого состояния в открытое будет осуществляться каждый раз при одном и том же напряжении включения.

5.2. Триодные тиристоры

Триодный тиристор (тринистор) отличается от диносторов наличием внешнего вывода от одной из баз, с помощью которого можно управлять включением тиристора (рис. 5.3).

В триодном тиристоре, имеющем управляющий электрод от одной из базовых областей, уровень инжекции через прилегающий к этой базе эмиттерный переход можно увеличивать путём подачи положительного по отношению к катоду напряжения на управляющий электрод. Поэтому триодный тиристор можно переключить из закрытого состояния в открытое даже при небольших анодных напряжениях (рис. 5.4).

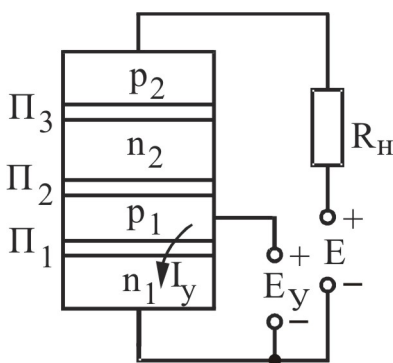


Рис. 5.3

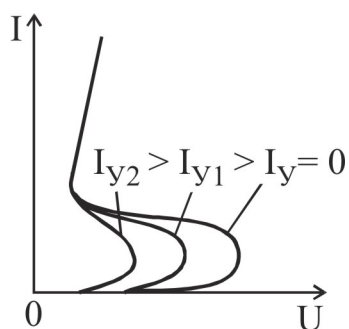


Рис. 5.4

Переключение триодного тиристора с помощью прямого напряжения на управляющем электроде или тока через этот электрод можно представить как переход транзисторной n-p-n-структуры в режим насыщения при большом токе базы. При этом коллекторный переход транзисторной структуры (он же и коллекторный переход тиристора) смещается в прямом направлении. Напряжение включения зависит от управляющего тока.

5.3. Симметричные тиристоры (симисторы)

Симметричный тиристор – это триодный тиристор, который при подаче сигнала на его управляющий электрод включается как в прямом, так и в обратном направлении.

Структура симметричного тиристора состоит из пяти областей с чередующимся типом электропроводности, которые образуют четыре p-n-перехода. Крайние переходы зашунтированы объёмными сопротивлениями прилегающих областей p-типа (рис. 5.5, а). Вольт-амперные характеристики симистора приведены на рис. 5.5, б.

Исходными материалами для тиристоров являются кремний, а также арсенид галлия, имеющие большую ширину запрещённой зоны. Тиристоры, изготовленные на основе широкозонных полупроводников, имеют большее значение максимальной рабочей температуры, а следовательно, и максимально допустимой плотности тока в открытом состоянии, кроме того, напряжение пробоя у них выше, что позволяет делать тиристоры с большими значениями напряжения включения и максимально допустимым обратным напряжением. Так как обратный ток невелик через p-n-переходы, смещённые в обратном направлении, рассеиваемая мощность в тиристоре значительно меньше при закрытом состоянии и обратном напряжении.

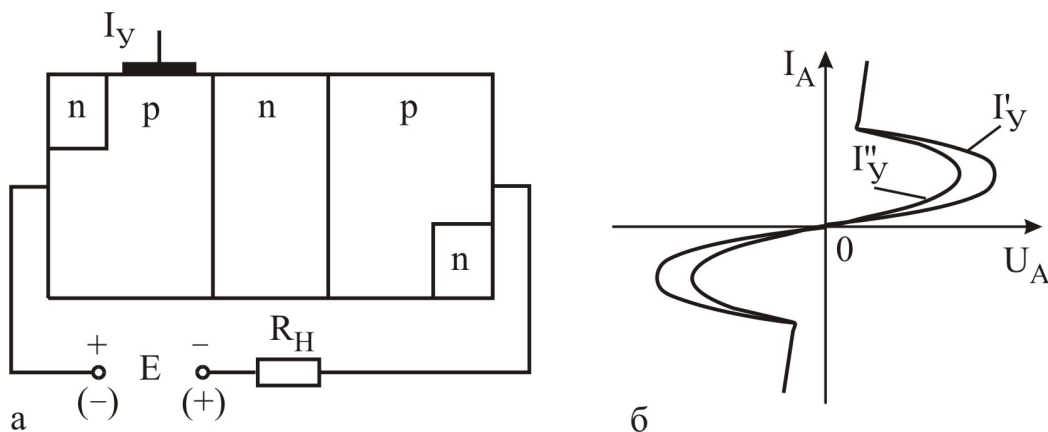


Рис. 5.5

Площадь p-n-переходов рассчитывают исходя из максимально допустимой плотности тока в статическом режиме через открытый тиристор 200 А/см^2 . Максимально допустимые токи в открытом состоянии для разных тиристоров имеют значения от 40 мА до 1000 А. Напряжение в открытом со-

стоянии не превосходит 2 В. Время включения тиристора определяется скоростью перераспределения объёмных зарядов в базах и переходах. За счёт влияния ёмкостей перехода напряжение включения при импульсном режиме оказывается ниже, чем в статическом. Скорость переключения определяется как и в транзисторах, накоплением и рассасыванием зарядов в базах и ёмкостях электронно-дырочных переходов. По быстродействию тиристоры уступают транзисторам.

Тиристоры отличаются высокой надёжностью, долговечностью и высокой экономичностью.

Достоинством тиристора является свойство памяти. При переключении в проводящее состояние он может оставаться в этом состоянии до тех пор, пока ток через него не станет меньше тока включения.

Тиристоры широко применяются в радиолокации, устройствах радиосвязи, автоматике как приборы с отрицательным сопротивлением, управляемые ключи, пороговые элементы, преобразователи энергии, триггеры. По сравнению с биполярными транзисторами они могут обеспечить большой коэффициент по току включения, иметь большой ток и одновременно высокое напряжение, что важно для получения хороших характеристик мощных устройств, позволяют получить высокий КПД преобразования энергии.

Диодные тиристоры в настоящее время имеют ограниченное применение.

Мощные высоковольтные и инверторные тиристорные блоки позволяют получить мощность в нагрузке до 100 МВт при напряжениях до 100 кВ и токах до 1000 А.

Разработаны также полевые тиристоры, которые работают при более высоких температурах, чем обычные тиристоры. Они используются в быстродействующих схемах, требующих малого времени включения и выключения.

5.4. Однопереходные транзисторы

Однопереходный транзистор – это трёхэлектродный полупроводниковый прибор с одним р-n-переходом и двумя выводами базовой области, предназначенный для переключения и генерирования электрических импульсов за счёт модуляции сопротивления базы в результате инжекции через р-n-переход неосновных носителей заряда.

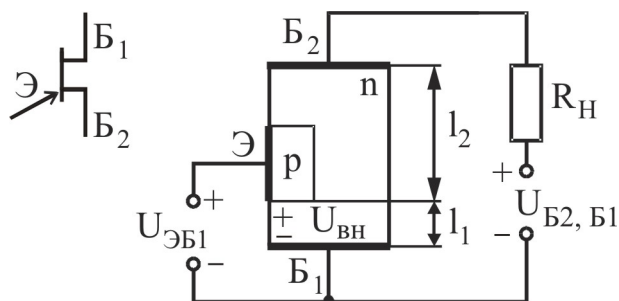


Рис. 5.6

Структура однопереходного транзистора и схема его включения приведены на рис. 5.6.

База однопереходного транзистора выполнена из полупроводника n-типа, эмиттерная область – из полупроводника p-типа. Эмиттерная область должна быть более низкоомной, чем базовая. В этом случае при прямом включении р-n-перехода прямой ток через него будет иметь в основном лишь дырочную составляющую. Дырки инжектируются в базу,

где они являются неосновными носителями. Для компенсации этого объёмного заряда через один из невыпрямляющих контактов в базу вводят основные носители.

При этом происходит уменьшение сопротивления базы и увеличение тока в цепи нагрузки. При подаче напряжения $U_{Б_2Б_1}$ на базовые выводы вдоль базы будет протекать ток $I_Б$, создающий продольное падение напряжения между базовыми выводами.

На участке базы l_1 будет существовать внутреннее падение напряжения $U_{вн} = I_Б R_{Б_1}$, которое смещает р-п-переход в обратном направлении. Поэтому при напряжении на эмиттере $U_{ЭБ_1} < U_{вн}$ р-п-переход смещается в обратном направлении и во входной цепи будет протекать небольшой обратный ток $I_{ЭБ0}$.

При подаче на эмиттер относительно базы $Б_1$ напряжения $U_{ЭБ_1} > U_{вн}$ р-п-переход открывается и неосновные носители – дырки – инжектируются в базу. Причём инжекция сначала происходит только через часть р-п-перехода, расположенную ближе к первому контакту базы $Б_1$, имеющей нулевой потенциал. В результате сопротивление $R_{Б_1}$ части базы протяжённостью l_1 уменьшается, что приведёт к ещё большему смещению р-п-перехода эмиттера в прямом направлении и к появлению на входной характеристике участка с отрицательным сопротивлением (рис. 5.7).

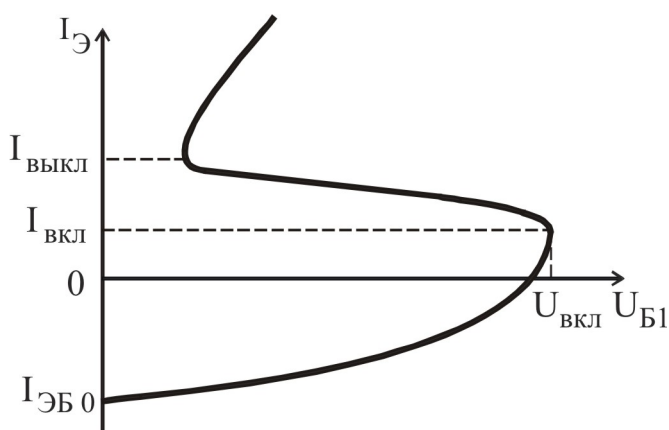


Рис. 5.7

Таким образом, однопереходный транзистор может находиться в двух устойчивых состояниях:

- закрытом, которое характеризуется большими сопротивлениями между различными выводами транзистора;
- открытом (состоянии насыщения), которое характеризуется малыми сопротивлениями между выводами транзистора.

В открытом состоянии однопереходный транзистор будет находиться до тех пор, пока в базе будет поддерживаться избыточный заряд основных и неосновных носителей заряда, т. е. до тех пор, пока ток эмиттера будет превышать значение тока выключения.

Однопереходный транзистор, имеющий две области – базы, называется двухбазовым диодом. Такие транзисторы применяются в схемах генераторов релаксационного типа (мультивибраторы, счетчики импульсов и др.). Однако малая скорость переключения и довольно большая потребляемая мощность ограничивают их широкое применение.