

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа электропроводности полупроводников?
2. Каким образом создается примесная электронная или дырочная электропроводность?
3. Что происходит в  $p-n$ -переходе при действии внешнего напряжения?
4. Объяснить ход вольт-амперной характеристики диода.
5. Как вольт-амперная характеристика диода изменяется с температурой?
6. Какова точность приборов, используемых при измерениях?
7. В чем заключаются преимущества и недостатки изучаемых выпрямительных схем?
8. В чем заключаются особенности соединения полупроводниковых диодов последовательно и параллельно?
9. Каковы основные преимущества и недостатки полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными?

## Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 151—154, 159, 198, 203—205.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. М.: Наука, 1977, § 100, 102, 108.
3. Жеребцов И. П. Основы электроники. Л.: Энергия, 1974, с. 23—36, 46—85.

## Лабораторная работа 11

### ТИРИСТОР

Целью настоящей работы является ознакомление с полупроводниковым прибором — тиристором. Этот прибор относится к классу переключающих устройств. Он обладает способностью открываться при подаче на него управляющего сигнала, пропуская электрический ток, и закрываться, прекращая пропускать ток.

### УСТРОЙСТВО ТИРИСТОРА

Основу тиристора составляет кремниевая пластина, имеющая четырехслойную структуру, в которой чередуются слои с дырочной ( $p$ ) и электронной ( $n$ ) проводимостями (рис. 1). Эти четыре слоя образуют три  $p-n$ -перехода  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ . Крайнюю область  $p$ , к которой подключается положительный полюс источника, называют анодом; крайнюю область  $n$ , к которой подключен отрицательный полюс источника, — катодом.

Название «тиристор» относится ко всем переключающим устройствам с тремя и более  $p-n$ -переходами. Приборы, имеющие два вывода (анод и катод), называются диодными тиристорами или динисторами.

### Физические процессы в динисторе

Как видно из рис. 1,  $p-n$ -переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  включаются в прямом направлении, а переход  $\Pi_2$  — в обратном.

Пусть напряжение, приложенное к тиристор, мало. Тогда очевидно, что ток, протекающий через тиристор, будет определяться переходом  $\Pi_2$ : переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  открыты, их сопротивление мало, а сопротивление перехода  $\Pi_2$  — большое. Поэтому начальный участок  $OA_1$  вольт-амперной характеристики тиристора (рис. 2) подобен вольт-амперной характеристике  $p-n$ -перехода в обратном направлении.

Отметим, что ток через переход  $\Pi_2$  создан перемещением через него неосновных носителей в прилегающих областях: электроны являются неосновными носителями в средней  $p$ -области, а дырки — в средней  $n$ -области.

По мере увеличения напряжения, прикладываемого к тиристор, растут прямые токи через переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  — в соответствии с характеристикой  $p-n$ -перехода в прямом направлении. В результате в среднюю  $p$ -область через переход  $\Pi_1$  инжектируется все большее количество электронов, а в среднюю  $n$ -область — все большее количество дырок через переход  $\Pi_3$ . Таким образом, концентрация неосновных носителей в областях, прилегающих к переходу  $\Pi_2$ , возрастает. Следствием этого является уменьшение сопротивления перехода  $\Pi_2$ . В результате — это очень важный момент — происходит перераспределение падений напряжения между переходами  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ .

Если при малом напряжении, приложенном к тиристор, почти все оно падало на переходе  $\Pi_2$ , то по мере увеличения этого напряжения сопротивление перехода  $\Pi_2$ , как уже было сказано, уменьшается, а так как ток через все три перехода один и тот же по величине, то в соответствии с законом Ома на переходе  $\Pi_2$  падает все меньшая доля напряжения, действующего на тиристор. Это означает, что напряжение, действующее на переходах  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$ , возрастает еще больше.

Теперь обратим внимание на то, что вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода в прямом направлении нелинейна: по мере увеличения внешнего напряжения, прикладываемого к тиристор, токи через переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  растут все сильнее. В средней  $p$ - и  $n$ -области инжектируется все больше и больше неосновных носителей, сопротивление перехода  $\Pi_2$  падает все быстрее, что в свою очередь приводит к тому, что на переходах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  оказывается все большее и большее напряжение (точка  $A_2$  на рис. 2). А это вызывает дальнейшее возрастание тока через переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$ . Наконец, при некотором внешнем напряжении на тиристор  $U_2 = U_{вкл}$  этот процесс приобретает лавинообразный характер.



Рис. 1. Система  $p-n$ -переходов в тиристор

Ток резко, скачком, возрастает (участок  $A_3—A_4$  на характеристике). Его величина ограничивается сопротивлением нагрузки  $R_n$ , включенным последовательно с тиристором. При этом сопротивление перехода  $\Pi_2$  и тиристора в целом уменьшается настолько, что на самом тиристоре падает всего около одного вольта напряжения, а все остальное падает на резисторе  $R_n$ . Неосновных носителей в областях, прилегающих к переходу  $\Pi_2$ , теперь так много, что этот переход можно считать включенным в прямом

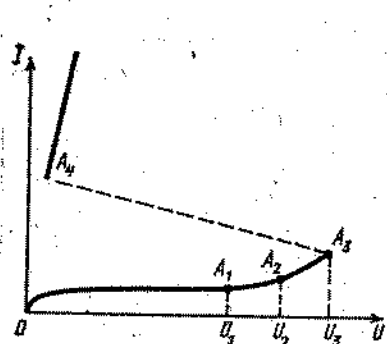


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика тиристора

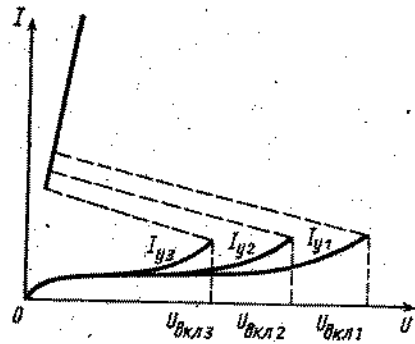


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тиристора при различных управляющих токах

направлении. Когда тиристор открыт, все три перехода включены в прямом направлении.

Таким образом, если при напряжении  $U$ , приложенном к тиристор, меньшем напряжения включения  $U_{вкл}$ , тиристор был заперт, т. е. практически не пропускал ток, то при  $U > U_{вкл}$  тиристор отпирается (включается) и ток через него ограничивается лишь величиной сопротивления нагрузки  $R_n$ .

### Тринистор

Если от одной из средних областей сделан вывод, то получается управляемый переключающий прибор, называемый триодным тиристором или тринистором. Подавая через этот вывод прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно регулировать величину  $U_{вкл}$ . Чем больше ток через такой управляющий переход  $I_{упр}$ , тем ниже будет  $U_{вкл}$ .

Это свойство тринистора наглядно показывают его вольт-амперные характеристики, изображенные на рис. 3 для различных значений управляющего тока  $I_{упр}$ . Чем больше управляющий ток, тем сильнее инжекция неосновных носителей к среднему переходу и тем меньшее напряжение на тиристоре требуется для того, чтобы произошло отпирание прибора. Наиболее высокое  $U_{вкл}$  получается при отсутствии управляющего тока, когда тринистор превращается в динистор. И наоборот, при значительной величине  $I_{упр}$

характеристика тринистора приближается к характеристике прямого тока обычного диода. Зависимость между  $I_{упр}$  и  $U_{вкл}$ , называемая пусковой характеристикой тиристора, изображена на рис. 4.

### Применение тиристорov

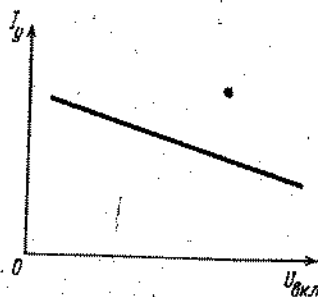


Рис. 4. Пусковая характеристика тиристора

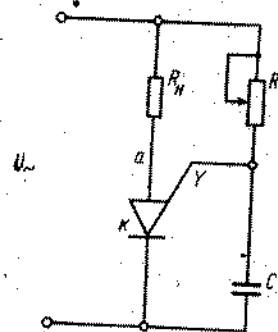


Рис. 5. Схема для иллюстрации фазового управления током с помощью тиристора

Тиристоры широко применяются в радио- и электротехнике как переключающие устройства. Они используются при конструировании генераторов импульсов различной формы, в схемах выпрямителей, для регулирования мощности переменного тока.

Рассмотрим фазовое управление током тиристора. Пусть переменное напряжение  $U$  приложено к последовательно соединенным тиристором и резистору нагрузки  $R_n$  (рис. 5), а к управляющему электроду напряжение  $U_{упр}$  подается с фазосдвигающей RC-цепочки. Изменяя величину сопротивления резистора  $R$ , можно менять фазовый сдвиг между напряжением на аноде тиристора  $U_a$  и на управляющем электроде  $U_{упр}$  (рис. 6). Напряжение  $U_{упр}$  вызывает соответствующий ток управляющего электрода  $I_{упр}$ .

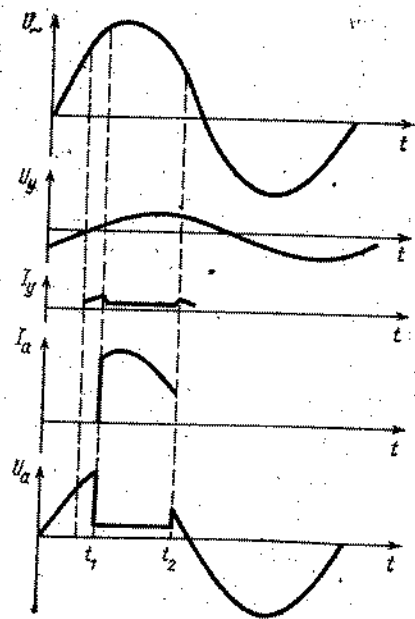


Рис. 6. Эпюры напряжений и токов в схеме фазового управления

Очевидно, что тиристор откроется в тот момент времени  $t_1$ , когда соотношение между  $U_a$  и  $U_{упр}$  будет соответствовать какой-либо точке на пусковой характеристике тиристора (см. рис. 4). В момент включения через тиристор и  $R_n$  потечет ток  $I_a$ , а величина тока управляющего электрода станет очень маленькой. Падение напряжения на открытом тиристоре тоже станет очень маленьким.

В некоторый момент времени  $t_2$  тиристор закроется. Изменяя фазовый сдвиг между напряжениями  $U_a$  и  $U_{упр}$ , можно сдвигать момент отпирания  $t_1$  тиристора и, таким образом, изменять продолжительность открытого состояния тиристора  $t_2 - t_1$ . Тем самым можно регулировать средний за период ток через резистор  $R_n$ .

### Описание экспериментальной установки

Ознакомление с тиристором, снятие его характеристик производится на установке, основным элементом которой является специальная монтажная панель. На этой панели расположен тиристор.

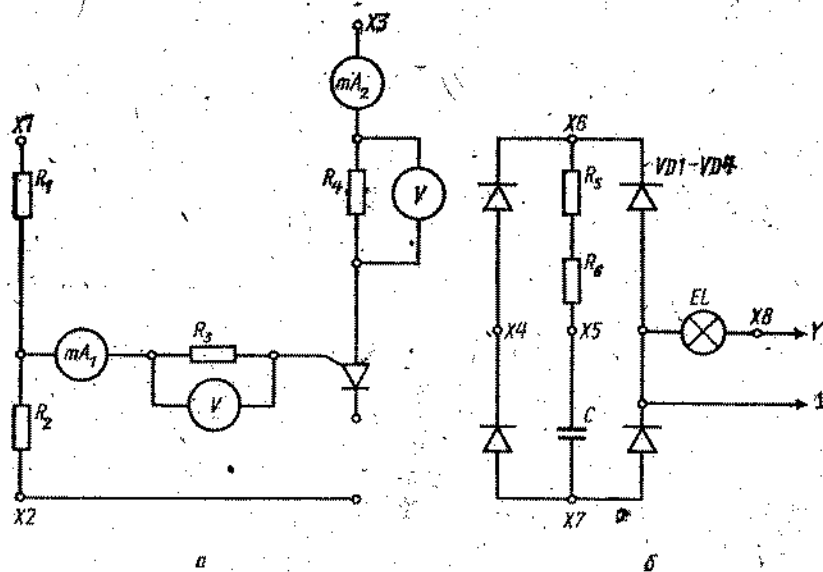


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

тор, некоторые вспомогательные элементы и гнезда для подключения приборов. Схема панели изображена на рис. 7. На схеме указаны также приборы, расположенные вне панели.

Для создания управляющего тока на гнезда X1, X2 подается напряжение, регулируемое в пределах  $0 \div 9$  В, с источника питания (ток  $< 100$  мА). Резисторы  $R_1, R_2$  образуют делитель напряжения, необходимый для более плавной регулировки тока управ-

ляющего электрода ( $y$ ) (в дополнение к регулировке в источнике питания). Миллиамперметр  $mA_1$  с пределом измерения 15 мА предназначен для измерения тока управляющего электрода тиристора.

При снятии характеристик тиристора ток управляющего электрода изменяется в весьма небольших пределах. Уловить эти изменения по стрелочному прибору  $mA_1$  практически невозможно. Поэтому в цепь этого тока включен дополнительный резистор  $R_3$ , падение напряжения на котором регистрируется цифровым электронным вольтметром  $V$ .

На анод тиристора (гнездо X3) подается либо переменное напряжение  $0 \div 60$  В от генератора, либо постоянное напряжение  $0 \div 100$  В от источника питания.

Миллиамперметр  $mA_2$  служит для измерения тока через тиристор.

Резистор  $R_4$  ограничивает ток через тиристор. Он может также использоваться для более точных измерений этого тока посредством измерения падения напряжения на нем цифровым вольтметром.

В правой части специальной панели расположена схема, предназначенная для демонстрации управления величиной тока с помощью тиристора. В этом случае переменное напряжение от генератора подключается к гнездам X1 и X2. Тиристор, будучи отключенным от элементов предыдущей схемы, подсоединяется следующим образом: анод — к гнезду X6, управляющий электрод — к гнезду X4, катод — к гнезду X7. Нагрузкой является лампочка накаливания  $EL$ , напряжение с которой подается на вход  $Y$  осциллографа. Сопротивления  $R_5$  и  $R_6$  вместе с конденсатором  $C$  образуют фазовращающую цепочку. Изменяя величину  $R_5$ , можно менять фазу напряжения, действующего на управляющем электроде тиристора, относительно напряжения на его аноде. При определенном соотношении между фазами этих напряжений управляющий ток и анодное напряжение тиристора оказываются такими, что тиристор открывается и остается открытым, пока с течением времени (в пределах полупериода) анодное напряжение не станет таким, что тиристор закроется. Меняя соотношение между фазами напряжений, действующих на управляющем электроде и на аноде тиристора, можно менять продолжительность открытого состояния тиристора, т. е. величину среднего тока, текущего через тиристор.

Мостиковая схема из диодов позволяет открывать тиристор и в положительный и в отрицательный полупериоды переменного напряжения, подаваемого на схему от генератора. При указанном включении нагрузки через нее течет ток, среднее значение которого можно изменять.

### Упражнение 1. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА НА ЭКРАНЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

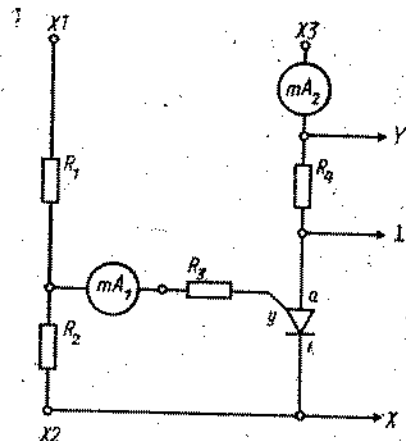


Рис. 8. Схема для наблюдения вольт-амперной характеристики тиристора на экране осциллографа

Собрать схему в соответствии с рис. 8. От генератора к гнездам X3 и X2 подать напряжение величиной  $40 \div 50$  В. В цепь управляющего электрода подать постоянное напряжение  $3 \div 9$  В. Величину управляющего тока с помощью регулировки на передней панели источника и переменного резистора  $R_1$  установить такой, чтобы тиристор открылся, — при этом на экране появится изображение его вольт-амперной характеристики. Меняя ток управляющего электрода, наблюдать изменение потенциала открывания тиристора, т. е. смещение крайней правой точки на характеристике. Зарисовать одну из характеристик.

### Упражнение 2. СНЯТИЕ ПУСКОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА

Эту характеристику, т. е. зависимость между потенциалом включения тиристора по аноду и током через управляющий электрод, будем снимать, подавая на анод переменное напряжение. Подключить к резистору  $R_3$  цифровой вольтметр  $V$  (см. рис. 7), установить переменное напряжение на аноде тиристора  $U_a$   $50 \div 60$  В (по прибору генератора). Если тиристор открыт — закрыть его, уменьшив управляющий ток. Затем, плавно его увеличивая, включить тиристор. О закрытии и открытии тиристора можно судить по осциллограмме или показаниям миллиамперметра  $mA_2$ . Момент включения тиристора зафиксировать, занеся в таблицу значения  $U_a$  и  $\Delta U_{R_3}$  — падение напряжения на резисторе  $R_3$  в момент включения тиристора. Затем установить следующее значение  $U_a$ , увеличивая управляющий ток, открыть тиристор, занести в таблицу новую пару значений  $U_a$  и  $\Delta U_{R_3}$  и т. д. Для каждой точки, в которой производились измерения, вычислить величину управляющего тока  $I_y = \Delta U_{R_3} / R_3$  и занести в таблицу.

Изобразить графически зависимость между  $U_{вкл}$  и  $I_y$ .

### Упражнение 3. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА

Эту характеристику снять на «постоянном токе», для чего вместо переменного напряжения подать на гнездо X3 постоянное напряжение с выхода « $20 \div 300$  В» источника (см. рис. 8). Цифровой вольтметр  $V$  переключить непосредственно на тиристор, между его выводами «анод» и «катод». Осциллограф отключить от схемы.

Установить одно из значений управляющего тока, при котором тиристор открывался в предыдущем упражнении. Изменяя ступенями напряжение, подаваемое на анод тиристора от источника, снять зависимость между  $U_a$  — напряжением на аноде тиристора, измеряемым цифровым вольтметром  $V$ , и током  $I_a$ , текущим через тиристор. Этот ток измеряется миллиамперметром  $mA_2$ . Результаты измерений занести в таблицу.

Аналогичные измерения сделать для какого-либо другого значения  $I_{упр}$ . Зависимость между  $U_a$  и  $I_a$  для обоих значений  $I_{упр}$  изобразить графически.

### Упражнение 4. ФАЗОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРА

Собрать схему в соответствии с рис. 7, б. Осциллограф поставить в режим внутренней развертки.

Подать на гнезда X4 и X8 от генератора напряжение величиной примерно 20 В. Вращая ручку переменного резистора  $R_5$ , наблюдать изменение осциллограммы тока, проходящего через лампу  $L$ . Сопоставить осциллограммы тока через лампочку для двух различных положений ручки переменного резистора  $R_5$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода?
2. Каково устройство тиристора?
3. Какие бывают тиристоры?
4. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика динистора?
5. Почему при некотором напряжении на динисторе происходит его включение?
6. Объяснить действие управляющего электрода тринистора.
7. Объяснить принцип фазового управления величиной переменного тока через нагрузку с помощью тиристора.

### Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 152, 153.
2. Жеребцов И. П. Основы электроники. М.: Энергия, 1974, § 2—9.