

Министерство образования и науки РФ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

В.Ф. Агафонников

Изучение характеристик тиристоров

Руководство к лабораторной работе
по курсу "Физика полупроводниковых структур"
для студентов радиоконструкторского факультета

Томск 2012

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработаны и выпускается большое количество различных тиристоров: управляемые тиристоры, лавинные и фототиристоры, мощные и маломощные, быстродействующие и т.д.

Изучению физических процессов, протекающих в тиристорах, и посвящена данная работа.

2. ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ

2.1. Цель работы: изучение вольтамперных характеристик (ВАХ) тиристоров (четырёхслойных структур типа р-п-р-п), а также их зависимости от температуры.

2.2. Рассмотрим физические процессы и закономерности, определяющие характер изменения тока I , протекающего через четырёхслойную структуру, в зависимости от приложенного к ней напряжения U . На рис. 2.1 показана структура (а) и вольтамперная характеристика (б) четырёхслойной структуры р-п-р-п типа.

Структура тиристора и ее вольтамперная характеристика

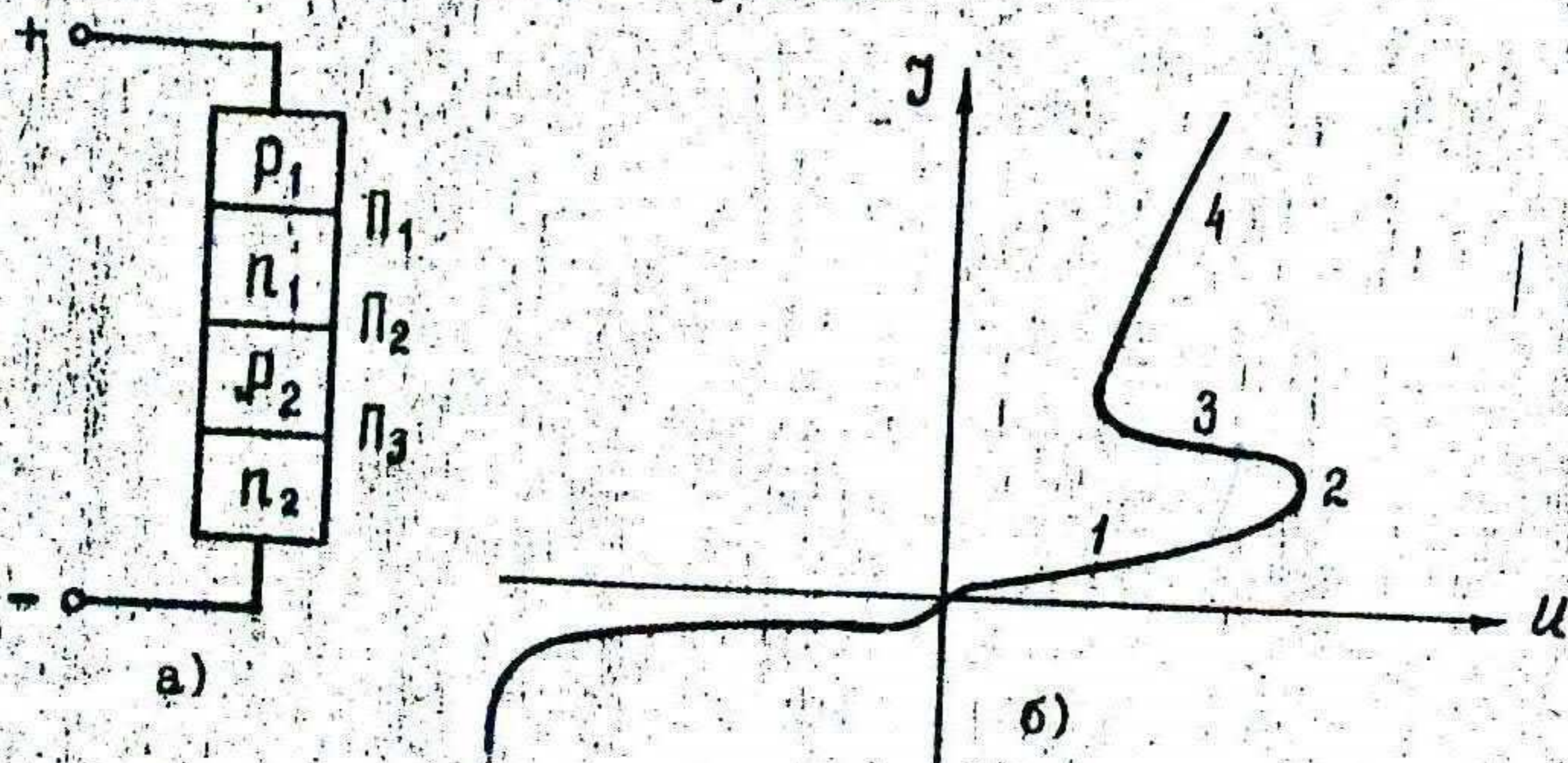


Рис. 2.1

Переходы Π_1 и Π_3 называются эмиттерными переходами, соответственно внешние р- и п-области, к ним примыкающие - эмиттерами. Центральный переход Π_2 называется коллекторным. Внутренние Π_1 и P_2 области называются базами. Пусть напряжение приложено к структуре $P_1-n_1-P_2-n_2$, как показано на рис. 2.1 а. При этом эмиттерные р-п переходы будут смещены в прямом направлении. Внешнее

напряжение U в этом случае считается положительным, при обратной полярности - отрицательным. Для большей наглядности представим $P_1-n_1-P_2-n_2$ структуру в виде комбинации двух транзисторов, соединенных между собой, как показано на рис. 2.2.

Тиристорная структура, представленная в виде комбинации двух транзисторов

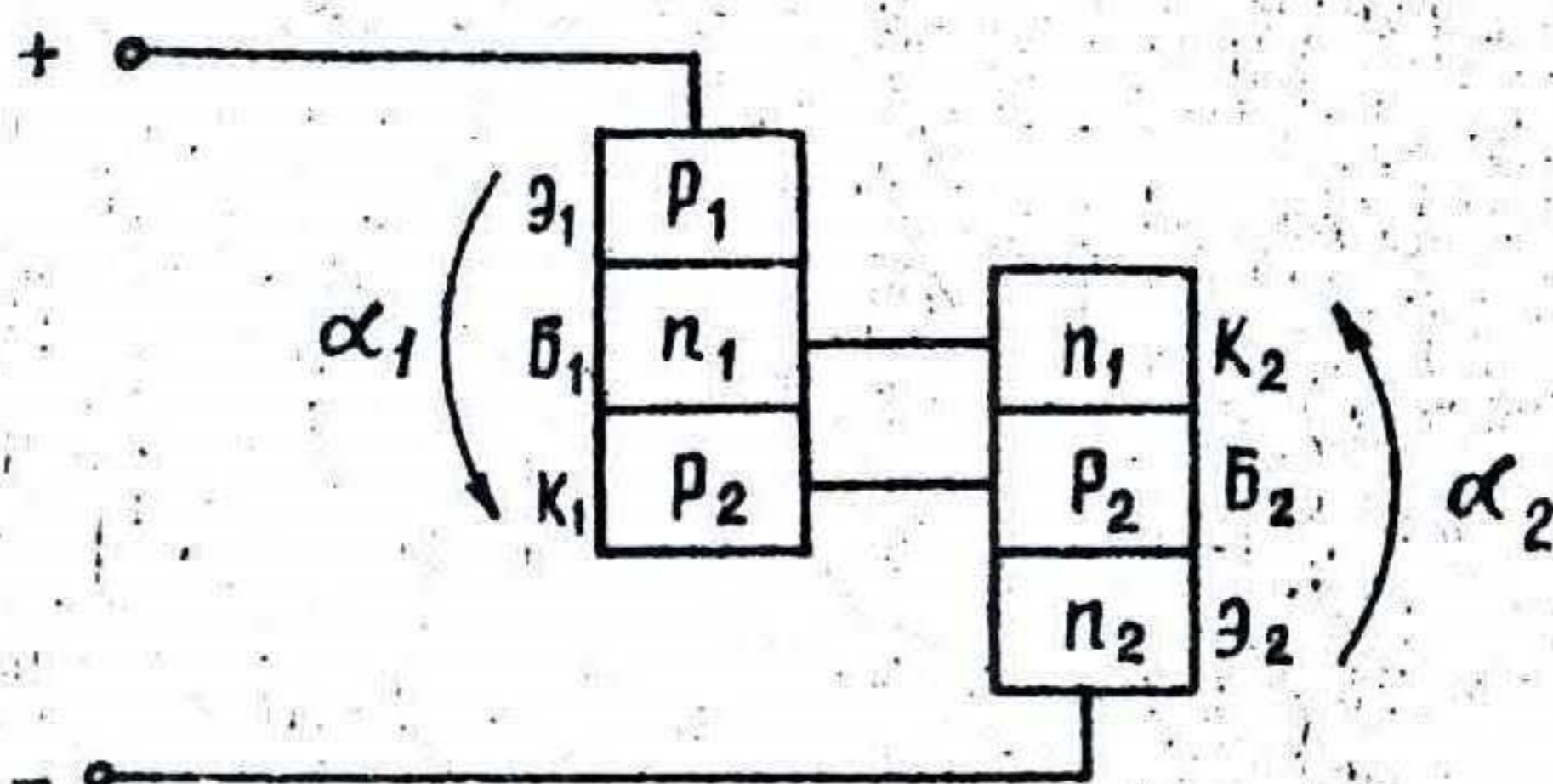


Рис. 2.2

При положительном смещении эмиттеры инжектируют неосновные носители: дырки - в области базы первого транзистора, электроны - в области базы второго транзистора. Через коллекторные переходы обоих транзисторов должны протекать токи:

$$J_1 = \alpha_1 J_{\varepsilon_1}, \quad J_2 = \alpha_2 J_{\varepsilon_2}, \quad (2.1)$$

где J_{ε_1} и J_{ε_2} - токи через эмиттерный переход P_1, P_2 .

В данном случае ток через коллекторные переходы, включенные параллельно, равен сумме токов J_1 и J_2 и токов насыщения и утечки через коллекторные переходы, которые также представим как некоторый суммарный ток J_{KO} . Очевидно, что

$$J_{\varepsilon_1} = J_{\varepsilon_2} = \alpha_1 J_{\varepsilon_1} + \alpha_2 J_{\varepsilon_2} + J_{KO} = J \quad (2.2)$$

Это же отношение должно иметь место для $p-n-p-n$ структуры при приложении к ней прямого смещения. Преобразовав выражение (2.2), найдем, что ток, протекающий через четырехслойную структуру, при прямом смещении на ней

$$J = \frac{J_{KO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{J_{KO}}{1 - \alpha}, \quad (2.3)$$

где под α понимается суммарный коэффициент передачи обоих транзисторов, образующих структуру $p_1-n_1-p_2-n_2$.

2.3. Известно, что при малых токах эмиттера, коэффициент передачи уменьшается с уменьшением тока, особенно в кремниевых транзисторах. В четырехслойной структуре на кремнии, где существенную роль может играть генерация и рекомбинация в запиорном слое, суммарный коэффициент передачи тока при малой плотности эмиттерного тока может быть много меньше единицы. При этом ток через структуру также будет мал (область I вольтамперной характеристики, рис.2.1 б). Однако с ростом напряжения ток $J_{ко}$ через коллекторный переход увеличивается.

Рост обратного тока коллекторного перехода обусловлен рядом причин, из которых рассмотрим наиболее существенные.

Прежде всего, всегда имеется некоторый ток утечки, пропорциональный напряжению на переходе. С увеличением напряжения расширяется запиорный слой, что вызывает при наличии генерации носителей в запиорном слое увеличение тока через переход. Наконец, при достаточно высоких напряжениях напряженность поля в переходе становится настолько большой, что электрон или дырка, попадающие в запиорный слой, могут приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации атомов решетки кристаллов. Возникает пара-электрон и дырка. Ток через переход растет. Коэффициент умножения M , т.е. отношение тока, протекающего через переход, при обратном смещении к току неосновных носителей, доходящих до перехода, может быть представлен в виде

$$M = \frac{1}{1 - (\mathcal{U} / \mathcal{U}_{пр})^n}, \quad (2.4)$$

где \mathcal{U} — приложенное к переходу напряжение;

$\mathcal{U}_{пр}$ — пробивное напряжение коллекторного перехода;

n — некоторый коэффициент, зависящий от материала и степени легирования р- и п-областей полупроводника.

2.4. Итак, с ростом напряжения на диоде ток через него возрастает, суммарный коэффициент α увеличивается. Как видно из уравнения (2.3), при $\alpha \rightarrow 1$, стремимся к единице, начинается значительный рост тока через диод (область 2 вольтамперной характеристики, рис.2.1 б). Увеличение тока в свою очередь приводит к дальнейшему росту α . Напряжение на четырехслойном диоде падает (область 3), и прибор из запиортого состояния переходит в открытое (область 4). В открытом состоянии четырехслойная структура имеет малое сопротивление и ток через него ограничивается внешним сопротивлением.

При отрицательном напряжении вольтамперная характеристика четырехслойной структуры аналогична обратной ветви вольтамперной характеристики двух диодов, включенных последовательно (см. рис. 2.1 б).

2.5. Основные параметры четырехслойной р-п-р-п структуры (рис. 2.3):

максимальное прямое напряжение на диоде, называемое напряжением включения $U_{вкл}$ и определяемое как напряжение, при котором $dU/dI = 0$;

ток включения $I_{вкл}$, определяемый как максимальный прямой ток через диод в закрытом состоянии при $dU/dI = 0$;

минимальное прямое напряжение на диоде в открытом состоянии, при котором $dU/dI = 0$, называемое напряжением выключения $U_{выкл}$;

Вольтамперная характеристика четырехслойной р-п-р-п структуры

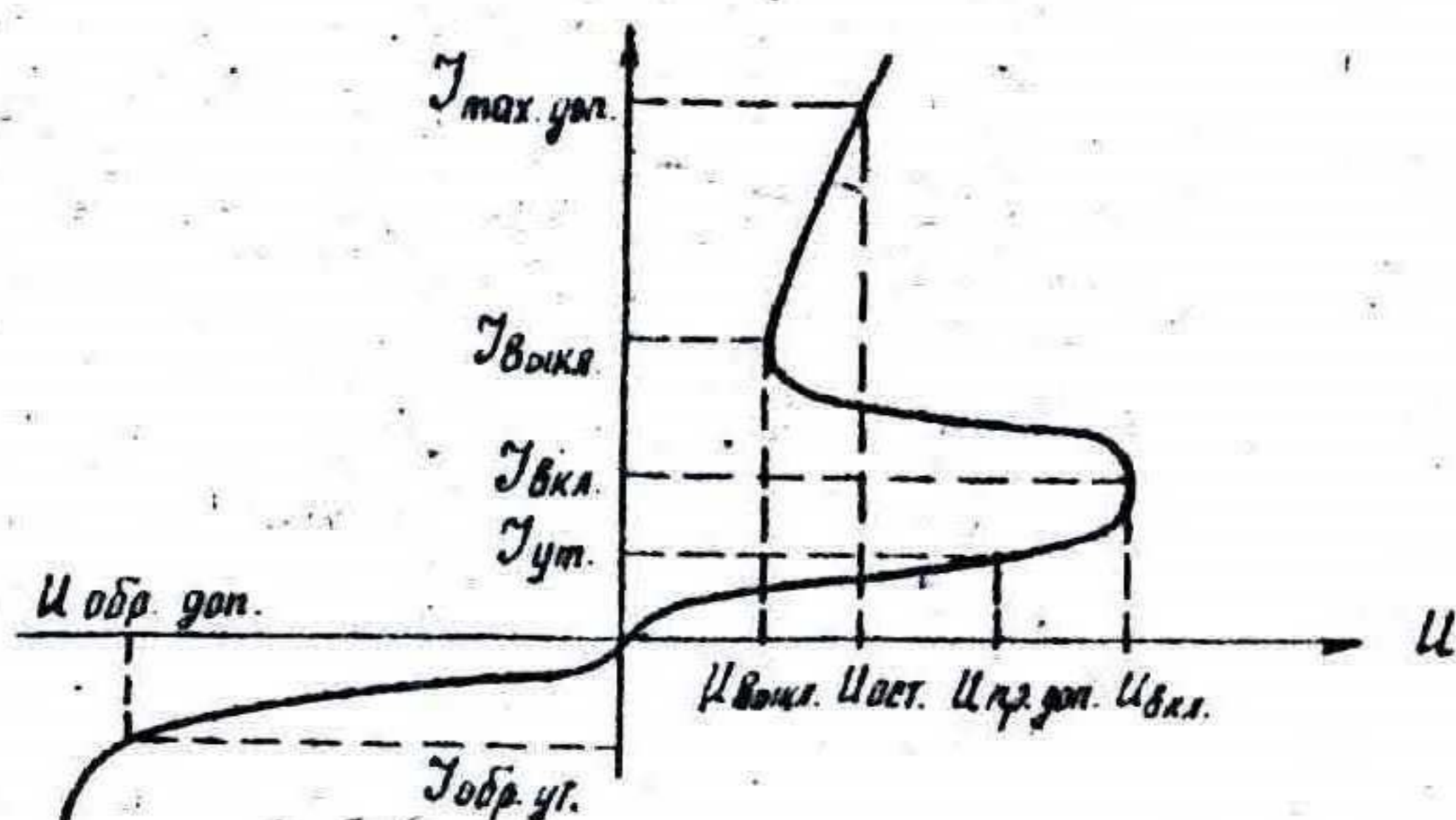


Рис. 2.3

ток выключения $I_{выкл}$, который характеризуется минимальным значением тока через диод, находящийся в открытом состоянии;

остаточное напряжение $U_{ост}$, т.е. падение напряжения на диоде в открытом состоянии при максимально допустимом токе через диод $I_{max. доп.}$;

ток утечки $I_{ут.}$, соответствующий прямому, предельно допустимому напряжению $U_{пр. доп.}$;

ток утечки в обратном направлении $I_{обр. ул.}$, соответствующий отрицательному предельно допустимому напряжению.

3. УПРАВЛЯЕМЫЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫЕ ДИОДЫ

Если осуществить невыпрямляющий контакт с одной из базовых областей четырехслойного диода, то, подавая небольшое положительное смещение на соответствующий эмиттерный переход, можно изменить ток, протекающий в одном из составляющих транзисторов, и тем самым, ток через диод и зависимость от общего тока. Это приведет к изменению напряжения включения и даст возможность управлять параметрами диода, меняя смещение на управляющем электроде. Для уменьшения величины управляющего тока, являющегося рекомбинационным током, необходимо повысить коэффициент переноса для соответствующей базы, т.е. сделать ее тонкой (ширина базы W_p должна быть много меньше диффузионной длины электронов L_n). На рис. 3.1 схематически показана такая четырехслойная структура с управляющим электродом.

Структура тиристора

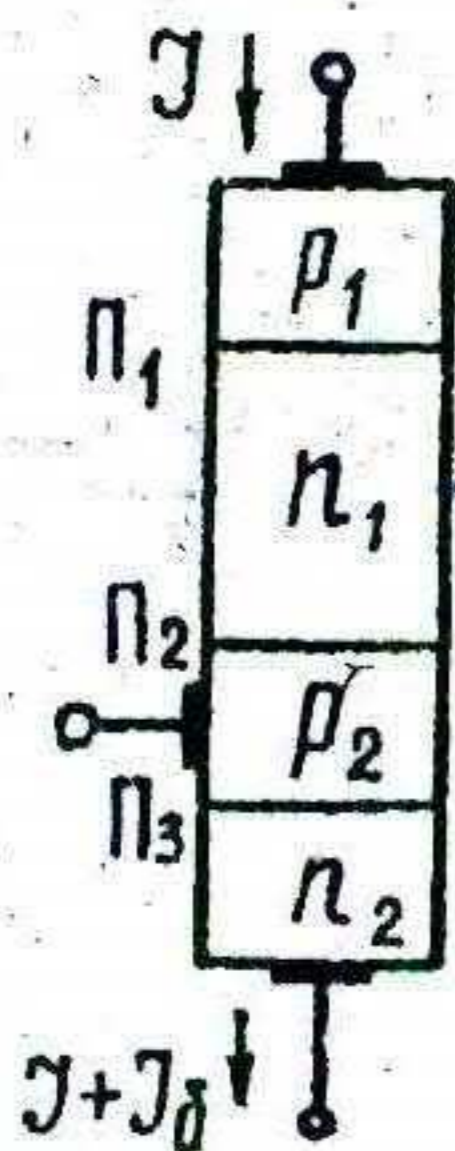


Рис. 3.1

Вольтамперная характеристика тиристора

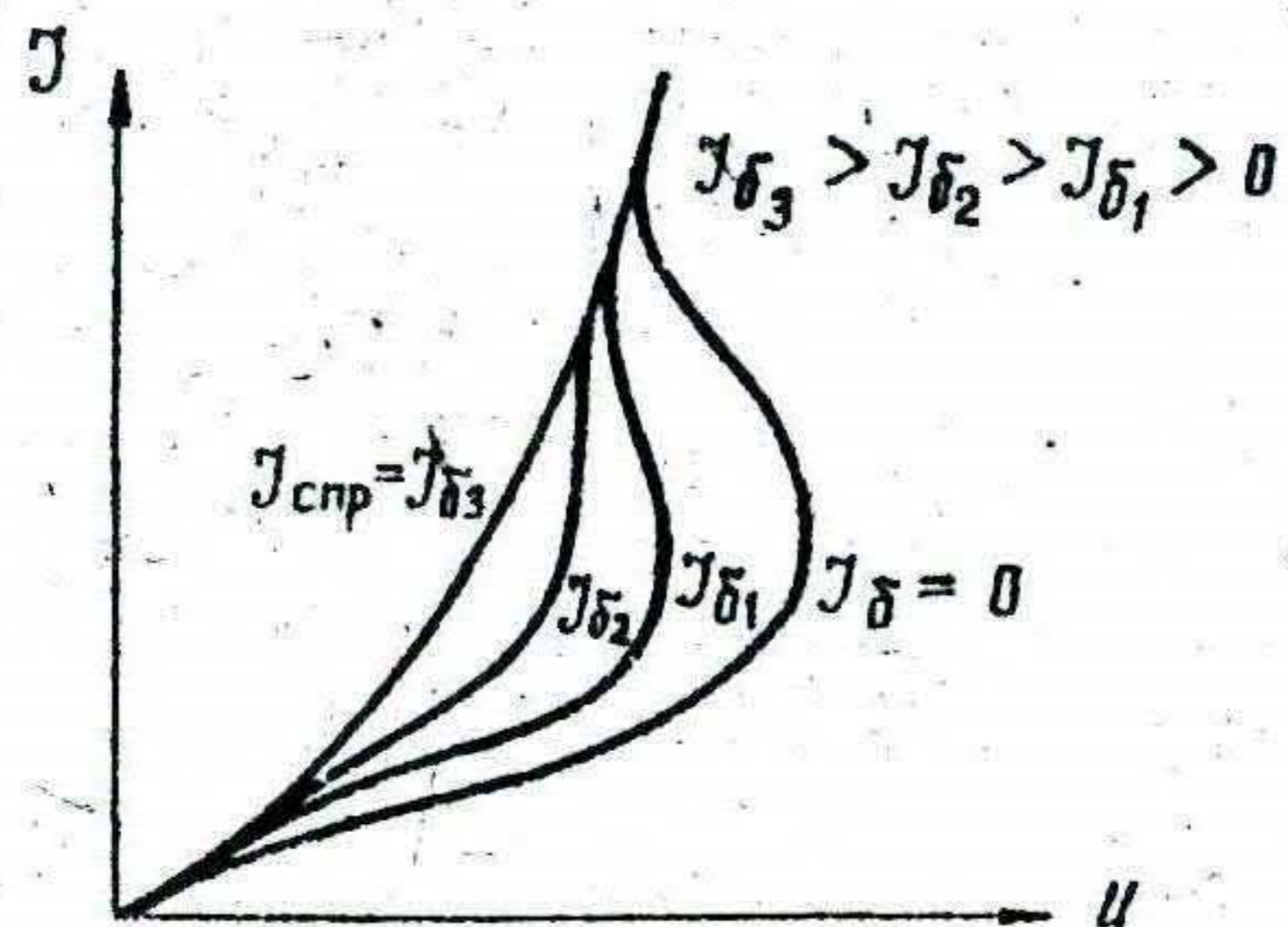


Рис. 3.2

Полагая в этом случае, что $\alpha_1 \ll 1$ (например, при $W_n > L_n$), а $\alpha_2 \approx 1$, можно записать, что ток через коллекторный переход Π_2

$$\alpha_1 J + J_{ko} + (J + J_\delta) \alpha_2 = J \quad (3.1)$$

Отсюда

$$J \approx \frac{J_{ko} + J_\delta}{1 - \alpha_2} \approx (J_{ko} + J_\delta) \beta_2, \quad (3.2)$$

где β_2 - значение коэффициента передачи тока структуры n-p-p при включении ее по схеме с общим эмиттером.

Полученное приближенное выражение указывает на быстрый рост тока через четырехслойный диод с ростом управляющего тока базы, поскольку величина коэффициента передачи тока сама является функцией тока и растет с его увеличением. Определяющим в этом случае является суммарное значение коэффициента передачи тока

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

Наличие тока базы I_B принципиально не меняет существа процессов, определяющих вид вольтамперной характеристики четырехслойного диода, но меняет значения параметров, характеризующих свойства прибора. При некотором критическом значении тока базы, называемое током спрямления $I_{спр}$, исчезает участок с отрицательным сопротивлением, прибор включается, минуя запертое состояние. В этом случае уже при малом общем токе через четырехслойный диод суммарное значение α достаточно велико.

4. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ТИРИСТОРА

Известно, что параметры полупроводниковых приборов, как правило, в значительной степени зависят от температуры. Аналогичная зависимость наблюдается в четырехслойных диодах. При использовании этих приборов в аппаратуре особенно существенное значение имеет зависимость от температуры напряжения включения, поскольку его уменьшение при изменении температуры может привести к самопроизвольному включению схемы.

Сложность явлений и взаимосвязь процессов приводят к существенному различию в характере температурной зависимости напряжения включения у различных образцов приборов. В большинстве случаев напряжение включения уменьшается с повышением температуры. Причиной этому является рост обратного тока через коллекторный переход и увеличение α . И то, и другое приводит к уменьшению напряжения включения. Однако у многих приборов напряжение включения возрастает с повышением температуры. Вероятно, в этом случае начальное значение суммарного коэффициента передачи мало и существенный рост α происходит, главным образом, за счет лавинного умножения в коллекторном переходе, то есть при напряжении на нем, близком к пробойному. С ростом температуры увеличивается рассеяние энергии на колебаниях решетки, вероятность ударной ионизации падает и пробивное напряжение возрастает.

Исследование температурной зависимости параметров является одним из методов анализа процессов, происходящих в полупроводниковых четырехслойных диодах. Здесь следует отметить, что и до настоящего времени нельзя считать достаточно полно изученными процессы и закономерности, определяющие свойства и параметры четырехслойных диодов. Такие исследования представляют собой интерес при разработке новых типов и выборе режимов их эксплуатации.

5. ЗАДАНИЕ

5.1. Снять семейство вольтамперных характеристик тиристор-ров на ПНХТ при различных значениях тока в базе I_B . Токи в базе устанавливаются по заданию преподавателя, ВАХ зарисовать с ПНХТ на кальку.

5.2. По полученному семейству ВАХ построить:

$$U_{вкл.} = f(I_B), \quad I_{вкл.} = f(I_B), \quad I_{выкл.} = f(I_B)$$

5.3. Снять зависимость $U_{вкл.} = f(T)$ тиристора при $I_B = const$ в интервале температур 20-60 °С.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Ознакомиться по описанию с ПНХТ-1 и методикой измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) диодов.

Для наблюдения ВАХ тиристора подключить электроды КАТОД АНОД тиристора к клеммам К и З ПНХТ, соответственно. На управляющий электрод напряжение подается от источника постоянного напряжения через нагрузочное сопротивление R_H . Величина базового тока регулируется с помощью потенциометра R_3 и измеряется миллиамперметром. Для более плавной регулировки базового тока можно использовать переменное сопротивление $R1$ и $R2$ (рис. 6.1).

Принципиальная схема установки для наблюдения
ВАХ тиристор

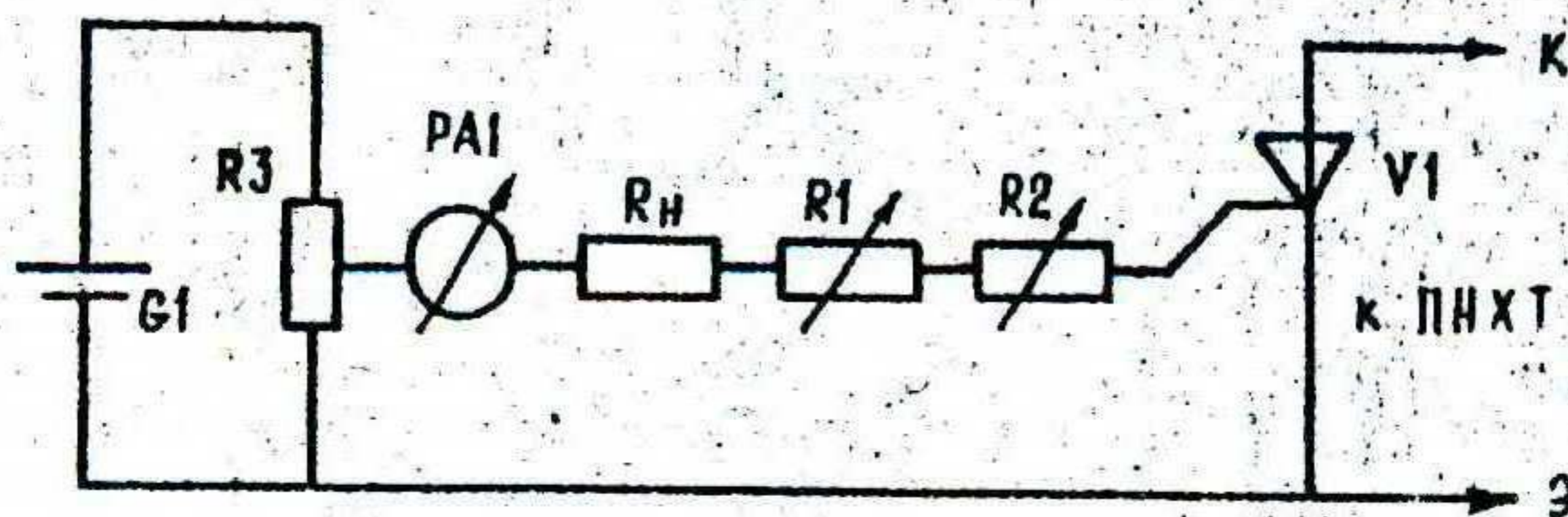


Рис. 6.1

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Пояснить принцип действия тиристора.
- 7.2. Почему управляющий ток в базе изменяет напряжение переключения тиристора?
- 7.3. Почему напряжение переключения зависит от температуры?
- 7.4. Перечислите основные параметры управляемого тиристора.

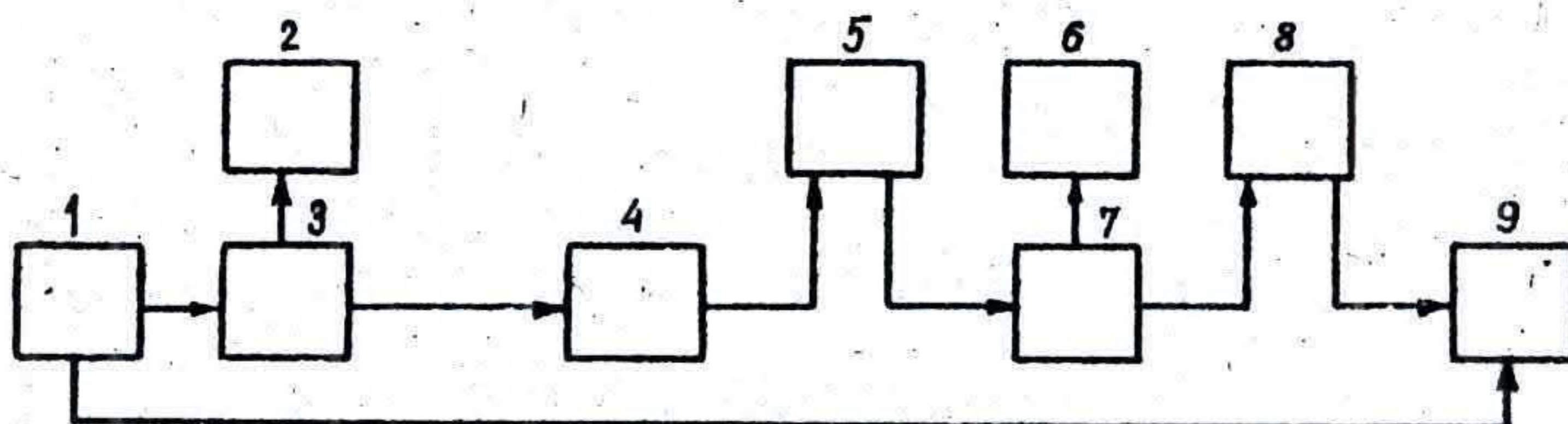
8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 8.1. Федотов А.Я. Основы физики полупроводниковых приборов. -М.: Сов.радио, 1969. -510с.
- 8.2. Викулин И.М., Стафеев В.Н. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов.радио, 1980. -197с.
- 8.3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. -М.: Высшая школа, 1973. -82с.

9. ДОПОЛНЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ "ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ"

При отсутствии ПНХТ собрать установку для снятия вольтамперных характеристик тиристоров согласно структурной и электрической схемам, изображенных соответственно на рис. 9.1 и 9.2.

Структурная схема установки для снятия вольтамперных характеристик тиристоров



- 1 - источник напряжения; 2 - вольтметр;
 3 - стабилизатор напряжения; 4 - генератор тока;
 5 - миллиамперметр; 6 - вольтметр; 7 - тиристор;
 8 - миллиамперметр; 9 - генератор тока.

Рис. 9.1

10. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

10.1. Собрать схему установки для снятия вольтамперных характеристик тиристоров согласно рис. 9.1 и 9.2.

10.2. Установить все потенциометры с помощью ручек в крайнее левое положение, вращая ручки до упора против часовой стрелки.

10.3. Включить тумблер B , должна загореться неоновая лампочка Н СЕТЬ.

10.4. Вращая ручку потенциометра $P15$ ГРУЕО по часовой стрелке, установить по миллиамперметру $PA2$ ток $I_y = 1,3$ мА.

10.5. Повернув ручку потенциометра $P10$ на несколько градусов и вращая ручку потенциометра $P5$ по часовой стрелке, установить по миллиамперметру $PA1$ ток $I_{тир} = 2$ мА.

10.6. Плавное вращение ручки потенциометра $P3$ по часовой стрелке, добиться максимального показания значения напряжения по вольтметру $PY2$, который показывает напряжение на тиристоре. В какой-то момент времени напряжение на тиристоре резко уменьшится,

Схема электрическая принципиальная установки для снятия вольт-амперных характеристик тиристоров

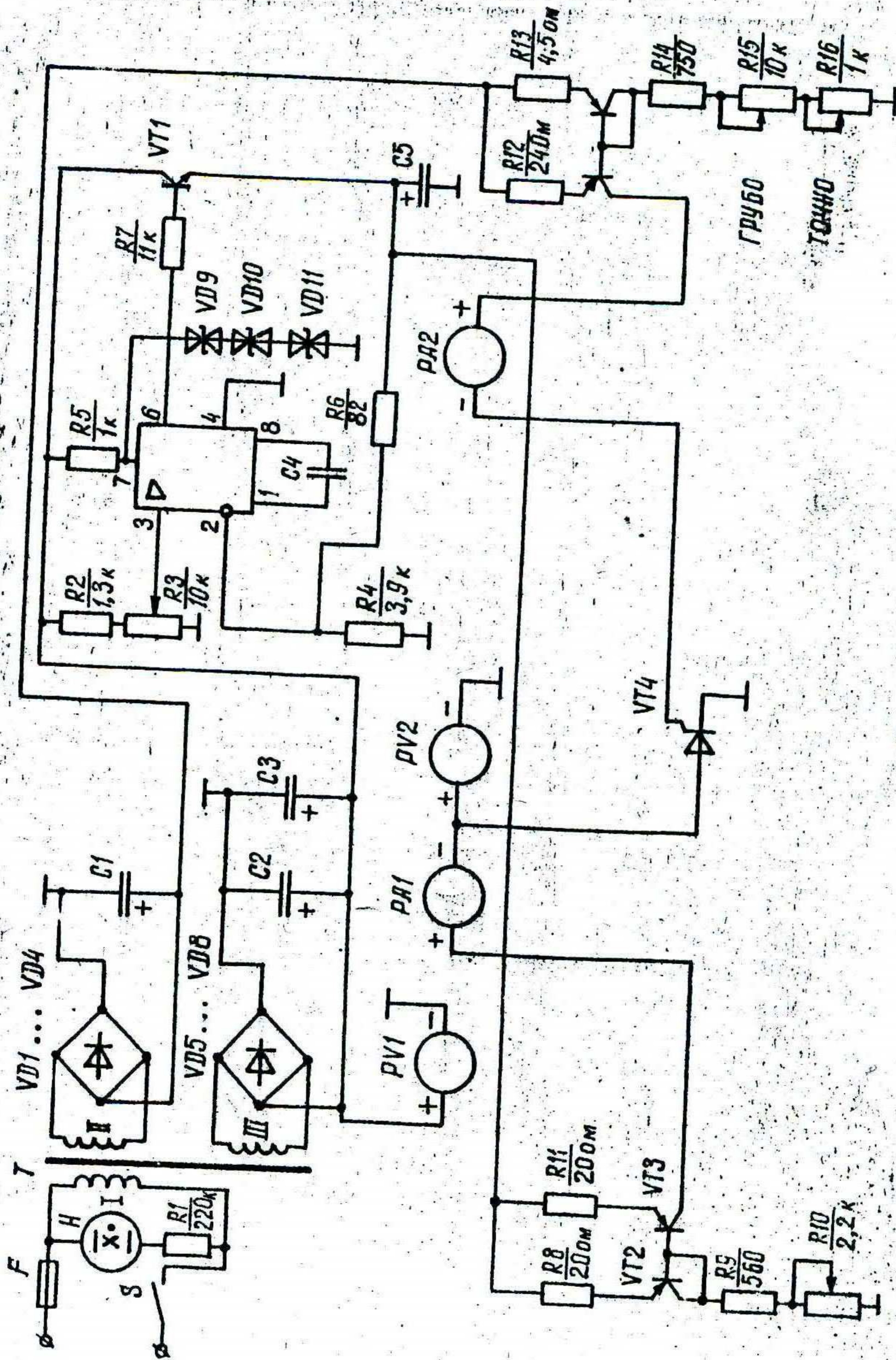


Рис. 9.2

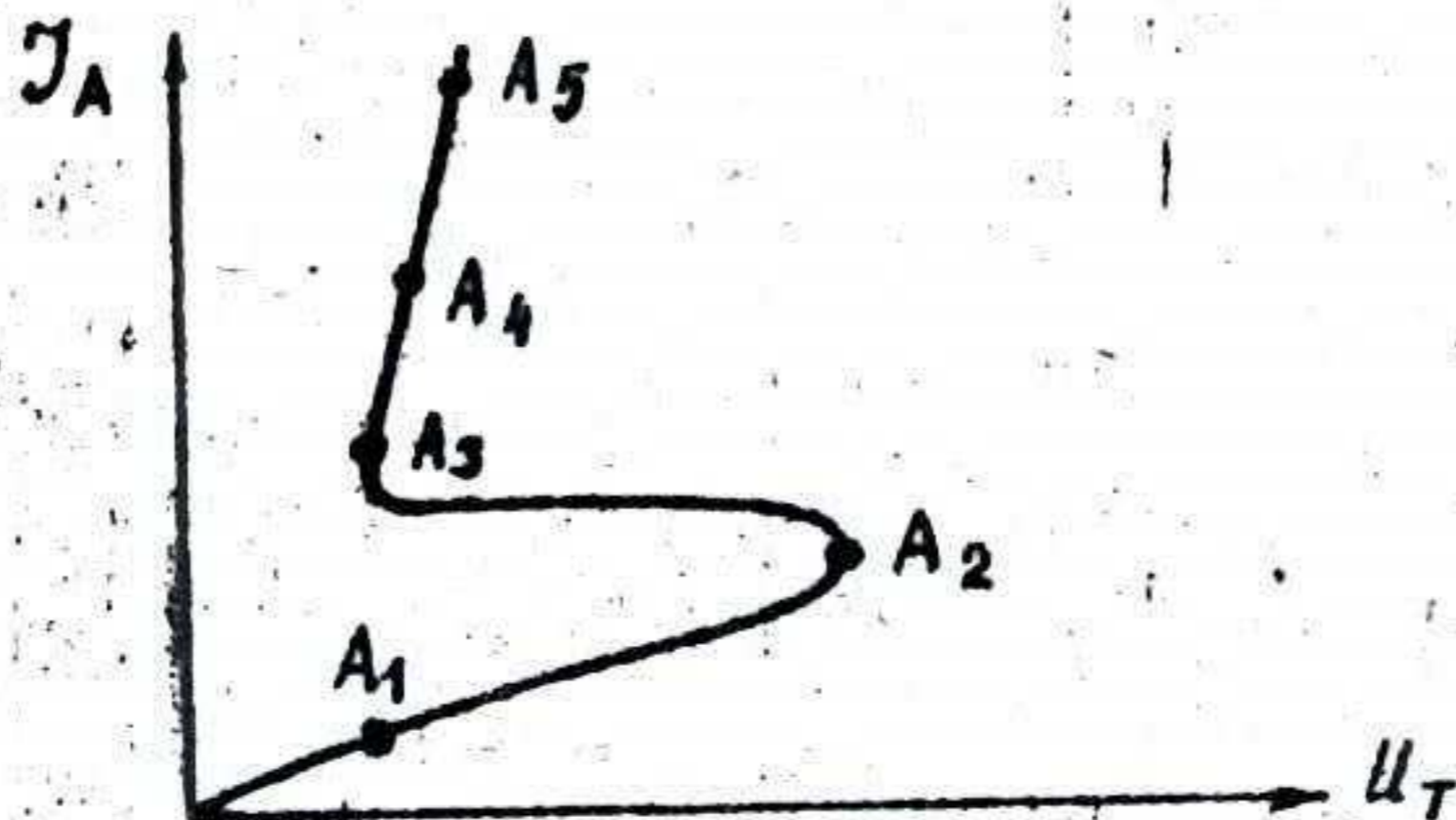
а ток незначительно увеличится. Записать значения величины тока и напряжения до их изменения и после.

10.7. Вращая ручку потенциометра P3 по часовой стрелке до упора, наблюдать увеличение тока по миллиамперметру PA1. Затем, вращая ручку потенциометра P10 по часовой стрелке, наблюдать по миллиамперметру PA1 и по вольтметру PY2 увеличение значений соответственно тока и напряжения.

10.8. Составить таблицу значений $U = f(I)$ при $I_y = 1,3$ мА.

Ток тиристора I_T , мА	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
Напряжение U_T , В	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6

10.9. Построить вольтамперную характеристику тиристора при $I_y = 1,3$ мА.



10.10. Задавая разные значения I_y с помощью потенциометров P15 и P16, построить семейство вольтамперных характеристик тиристора.

10.11. Выполнить задания по п.п. 5.2, 5.3 данной работы.

ВНИМАНИЕ!

После окончания работы вернуть все потенциометры в исходные состояния, повернув их ручки по часовой стрелке до упора.

При работе на установке руководствоваться правилами техники безопасности и правилами эксплуатации электроустановок до 1000 В.