

## **ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА В ЛАБОРАТОРИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

1. Студенты выполняют лабораторные работы в часы, предусмотренные расписанием, в строгом соответствии с графиком работы лаборатории.

2. Все лабораторные работы выполняются фронтально. Студенты группы разбиваются на рабочие бригады, в составе которых они выполняют все лабораторные работы.

3. Студенты обязаны бережно обращаться с оборудованием и измерительными приборами, применяемыми при выполнении лабораторных работ, и несут ответственность за порчу или выход из строя приборов и оборудования, происшедших по их вине.

4. Включать схему можно только с разрешения преподавателя. Включение неправильно собранной схемы может привести к несчастному случаю или порче дорогостоящих измерительных приборов.

5. Обо всех неисправностях схемы и приборов студенты обязаны немедленно сообщить преподавателю, предварительно отключив схему.

6. Во время выполнения лабораторной работы необходимо соблюдать тишину, не покидать рабочего места без разрешения преподавателя.

7. Студенты обязаны после окончания работы выключить аппаратуру, привести рабочее место в порядок.

8. Студенты обязаны строго соблюдать указания по технике безопасности для данной лаборатории.

### **Указания по технике безопасности**

К проведению лабораторных работ допускаются студенты, ознакомленные с данными указаниями и проинструктированные преподавателем по технике безопасности обращения с приборами, используемыми во время проводимой работы.

Установка рабочего макета и подключение измерительных приборов, а также сборка электрических схем производятся при отключенном питании лабораторного стола.

Сборка электрических схем разрешается проводами с проверенным изоляционным покрытием.

Включение собранной электрической схемы и работа с ней допускаются только после осмотра ее преподавателем и получения от него разрешения на продолжение работы. При включенной электрической схеме нельзя подключать к ней различные приборы и проводники. Для этого необходимо выключить питание лабораторного стола.

Во время работы студент обязан помнить, что прикасаться руками к открытым токоведущим клеммам и зажимам запрещается. При обнаружении ошибки в собранной схеме выключается общий рубильник лабораторного стола.

### **Первая помощь при поражении током**

Необходимо очень быстро освободить пострадавшего от тока, выключив источник питания или отделив пострадавшего от токоведущих частей. При этом (во избежание поражения электрическим током) ни в коем случае не следует брать за тело пострадавшего без резиновых диэлектрических перчаток. Если нельзя выключить ток нормальным путем, нужно разрезать (перерубить) провод или, заземлив его, отвести ток от пострадавшего. Инструмент, используемый для перерезания провода, должен иметь изолированные ручки. Предмет, набрасываемый на провод, предварительно заземляется. При отсутствии резиновых перчаток и обуви для изоляции может быть использована сухая доска, сухая одежда и т.п.

Если пораженный электрическим током находится высоко над поверхностью пола, необходимо предусмотреть, чтобы после освобождения от действия тока он не упал и не получил повреждений.

В случае потери пострадавшим сознания нужно срочно вызвать скорую помощь и попытаться самим привести его в сознание (брызгать в лицо водой, растирать и согревать его тело). При отсутствии дыхания немедленно начать делать искусственное дыхание и массаж сердца, не прекращая до прибытия врача. Следует твердо помнить, что первые секунды и минуты являются решающими для возможности вернуть человека к жизни, поэтому искусственное дыхание должны уметь делать все работники лаборатории.

Прежде чем начать делать искусственное дыхание, нужно обеспечить доступ свежего воздуха, освободить пострадавшего от стесняющей одежды, затем положить на спину или живот (в зависимости от выбранного способа искусственного дыхания) и принять меры к тому, чтобы обеспечить прохождение воздуха в легкие. Чтобы язык не западал в дыхательное горло и не закрывал доступ воздуха в легкие, его вытягивают и придерживают с помощью платка или марли.

*Существует несколько способов проведения искусственного дыхания:*

*первый способ* – пострадавшего положить на живот таким образом, чтобы обеспечить доступ воздуха к его дыхательным путям, встать на колени над его бедрами и попеременно сдавливать ладонями и опускать грудную клетку. Сдавливать грудную клетку нужно в течение трех секунд (по счету «раз, два, три»), постепенно усиливая нажим, подавшись для этого всем туловищем вперед. Затем быстро отнять руки, выждать около трех секунд и снова нажать;

*второй способ* – скатать из одежды валик и положить под спину пострадавшего, затем встать на колени у его изголовья, захватить обе руки ниже локтей и крепко прижать их на три секунды к бокам. Затем поднять руки пострадавшего и вытянуть их вдоль головы. Такие движения нужно повторять 12—15 раз в минуту;

*третий способ* – положить пострадавшего на спину, расстегнуть предвзрительно стесняющую его одежду, запрокинув его голову назад. При таком положении головы воздух свободно проходит в легкие. Надавив на подбородок, раскрыть рот пострадавшего, зажав ему нос рукой. Сделать глубокий вдох и, плотно обхватив своими губами открытый рот пострадавшего, с силой выдохнуть воздух ему в рот. После того как грудная клетка пострадавшего расширится, отстраниться от него. Выдох у него произойдет произвольно. Вдувание воздуха таким путем производится 16—20 раз в минуту, что соответствует нормальной частоте.

### **Методика проведения лабораторных работ**

При подготовке к работе студент должен:

1) ознакомиться с содержанием работы и изучить теоретические положения, на которых данная работа базируется;

2) продумать методику снятия зависимостей, указанных в описании. Следует внимательно проследить по схеме, каким образом будет изменяться исходная величина, как она регулируется и каким образом будет отсчитываться исследуемая величина;

3) ознакомиться с исследуемым полупроводниковым прибором, его паспортными данными.

При выполнении работы студент обязан:

1) ознакомиться с рабочим местом; установить наличие необходимой аппаратуры, соединительных проводов, источников питания и вспомогательных приборов;

2) выбрать соответствующую измерительную аппаратуру, определить пределы измерения, используя справочные данные и задание на исследование;

3) самостоятельно определить число отсчетов, необходимых для правильного воспроизведения исследуемой зависимости. На тех участках, где исследуемая величина резко изменяется или ее изменениям соответствуют особые точки (максимум, минимум, перегиб и т.п.), надо брать точки отсчета чаще, чем на тех участках, где исследуемая величина изменяется мало;

4) собрать электрическую схему исследования. В процессе выполнения лабораторной работы необходимо произвести записи, проанализировать их и представить на проверку преподавателю;

5) к следующей лабораторной работе необходимо представить отчет по предыдущей работе. Отчет по лабораторной работе оформляется на стандартных листах формата А4. Схемы вычерчиваются в соответствии с требованиями ЕСКД, графики выполняются на миллиметровой бумаге, на них наносятся экспериментальные точки, затем проводятся плавные кривые;

6) полученные зависимости необходимо сравнить со справочными и сделать необходимые выводы и расчеты по проделанной работе.

### **Содержание отчета по лабораторной работе**

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемых приборов.
3. Электрические схемы исследования.
4. Результаты измерений (оформляют в виде таблиц).
5. Графические зависимости и осциллограммы выполняются на миллиметровой бумаге.
6. Сопутствующие измерениям расчеты.
7. Краткие выводы по проделанной работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

#### Цель работы

1. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики при различных температурах окружающей среды.
2. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики при различных температурах окружающей среды.
3. Определить динамическое и статическое сопротивление диода при различных температурах окружающей среды.
4. Построить зависимость статического и динамического сопротивления от приложенного напряжения.
5. Определить коэффициент выпрямления для различных температур.

#### Краткие теоретические сведения

Полупроводниковым диодом называется двухэлектродный прибор, основу которого составляет  $p$ - $n$  переход (рис. 1.1).

Полупроводниковые диоды изготавливают на основе германия и кремния. Область с большей концентрацией примеси называется эмиттером, область с меньшей концентрацией примеси — базой. Электрические выводы при помощи омических контактов (базовый электрод и эмиттерный электрод) присоединяются к области базы и эмиттера.

Реальная и теоретическая характеристики полупроводникового прибора приведены на рис. 1.2.

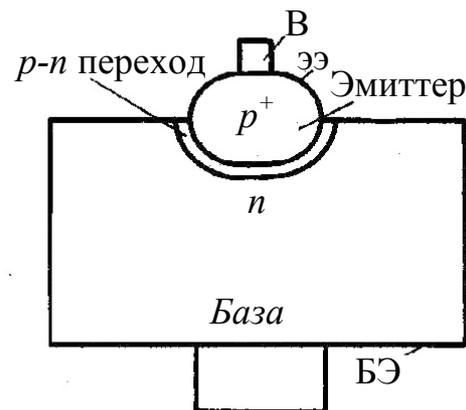


Рис 1.1

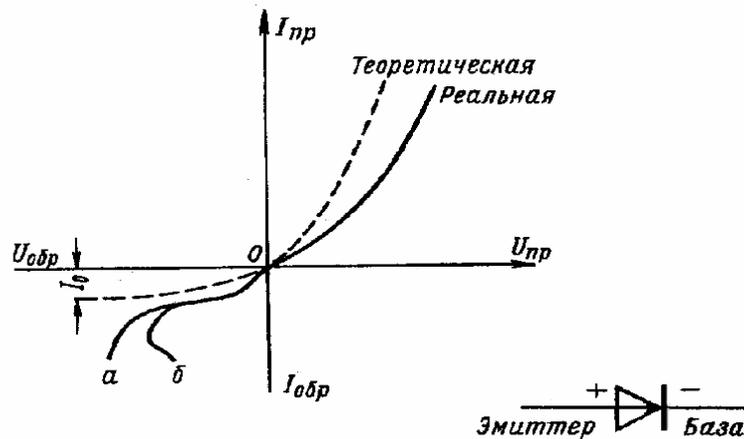


Рис. 1.2

Аналитическое выражение тока полупроводникового диода описывается следующим уравнением:

$$i = i_s \left( e^{\frac{qU_{\text{ВН}}}{kT}} - 1 \right);$$

$$i_s = I_s e^{\frac{\phi_0}{kT}}; \quad \phi_0 = kT \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2},$$

- где  $i_s$  – ток насыщения;  
 $q$  – заряд электрона;  
 $U_{\text{ВН}}$  – приложенное внешнее напряжение;  
 $\phi_0$  – высота потенциального барьера;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – абсолютная температура;  
 $p_p$  – концентрация основных носителей эмиттера;  
 $n_n$  – концентрация основных носителей базы.

В области малых прямых и обратных токов реальная и теоретическая характеристики совпадают. В области больших прямых токов (десяти миллиампер и больше) становится значительным падение напряжения на омическом распределенном сопротивлении базы и омических контактах, поэтому напряжение на  $p$ - $n$  переходе будет меньшим, чем приложенное внешнее напряжение. В результате этого реальная характеристика идет ниже теоретической, и уравнение тока будет иметь вид

$$i = i_s e^{\frac{q}{kT}(U_{\text{ВН}} - ir)},$$

где  $r$  – распределенное сопротивление базы.

При увеличении обратного напряжения ток насыщения  $i_s$  не остается величиной постоянной, и начинает расти. Причины роста этого тока следующие:

- термическая генерация носителей в переходе;
- увеличение тока за счет поверхностной проводимости. Кремниевые диоды имеют меньшую концентрацию неосновных носителей, поэтому прямой и обратный ток этих диодов меньше, чем у германиевых (рис. 1.3).

Статическое и динамическое сопротивления по вольтамперным характеристикам определяются следующим образом (рис. 1.4) :

$$R_{\text{пр}} = \frac{U'_{\text{пр}}}{I'_{\text{пр}}}; \quad r_{\text{пр}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} = \frac{U''_{\text{пр}} - U'_{\text{пр}}}{I''_{\text{пр}} - I'_{\text{пр}}};$$

$$R_{\text{обр}} = \frac{U'_{\text{обр}}}{I'_{\text{обр}}}; \quad r_{\text{обр}} = \frac{\Delta U_{\text{обр}}}{\Delta I_{\text{обр}}} = \frac{U''_{\text{обр}} - U'_{\text{обр}}}{I''_{\text{обр}} - I'_{\text{обр}}};$$

где  $R$  – статическое сопротивление;  
 $r$  – динамическое сопротивление.

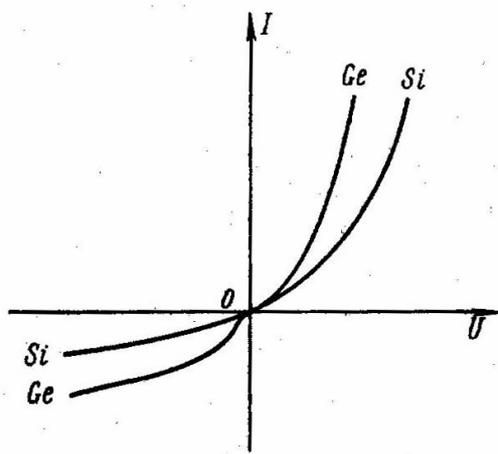


Рис. 1.3

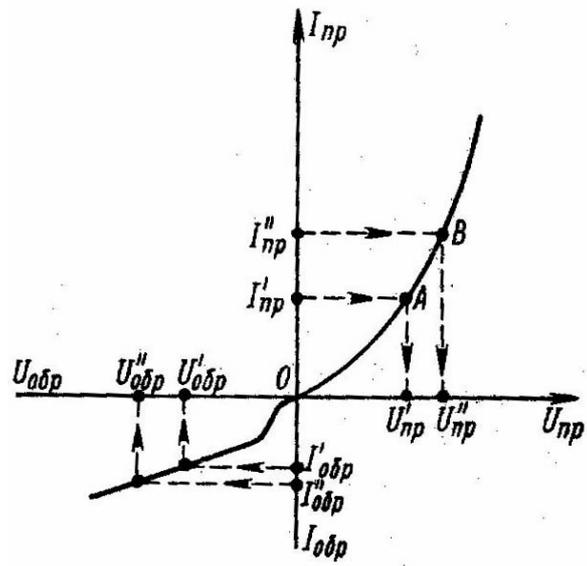


Рис. 1.4

Выпрямительные свойства диода определяются коэффициентом выпрямления  $B$ . Чем больше коэффициент выпрямления, тем лучшими выпрямительными свойствами обладает диод:

$$B = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}}$$

## 1. Методические указания

Для снятия прямых ветвей вольт-амперных характеристик (ВАХ)  $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$  диодов используется схема, приведенная на рис. 1.5. Исследуемые диоды включаются в прямом направлении. Содержащиеся в схеме вольтметр и миллиамперметр непосредственно измеряют прямое напряжение, приложенное к диоду, и величину прямого тока через диод.

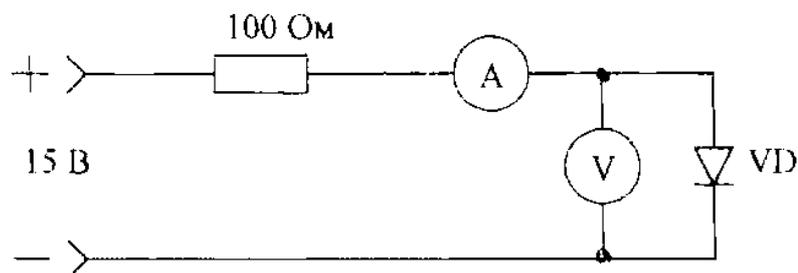


Рис. 1.5

Схема для снятия обратной ветви ВАХ выпрямительных диодов приведена на рис. 1.6.

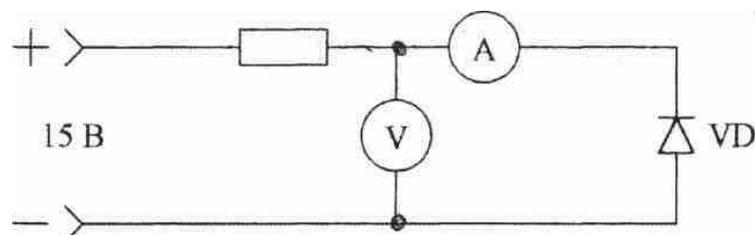


Рис. 1.6

## 2. Программа работы

1. Сборка и апробирование схем.
2. Снятие прямой и обратной ветвей ВАХ кремниевого и германиевого выпрямительных диодов при комнатной температуре.
3. Снятие ВАХ  $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$  и  $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$  при повышенной температуре ( $t = 40 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
4. Построение ВАХ диодов, обработка полученных результатов.

1. Сборка и апробирование схем для снятия вольт-амперных характеристик диодов.

Схемы собираются на основе монтажного шасси с использованием источников питания, измерительных приборов лабораторного стенда и комплекта соединительных проводов. Для нагревания диодов используется термостат.

Элементы схемы соединяются между собой в соответствии со схемами, изображенными на рис. 1.5, 1.6.

При снятии прямой и обратной ветвей ВАХ диода *подаваемые наибольшие величины прямого и обратного напряжений не должны превышать предельно допустимых для конкретного типа прибора.*

После сборки схем *с разрешения преподавателя* необходимо провести апробирование схем, т.е. при включенном питании убедиться в наличии токов через диоды, установить пределы измерений стрелочных измерительных приборов и определить цену деления шкал приборов.

2. Снятие прямой и обратной ветвей ВАХ выпрямительных диодов при комнатной температуре.

При снятии прямой ветви ВАХ  $I_{пр} = f(U_{пр})$  (см. рис. 1.5) прямое напряжение подается от источника питания 0 – 15 В, изменяется в интервале 0 – 0,5 В для германиевого диода, 0 – 1 В для кремниевого диода с помощью потенциометра.

Для снятия обратной ветви ВАХ  $I_{обр} = f(U_{обр})$  (рис. 1.6) схема питается от источника 0 – 300 В. Обратное напряжение изменяется в пределах, допустимых для данного типа диода с интервалом 5 В в начале характеристики и с интервалом 10 В на пологом участке характеристики.

3. Снятие ВАХ диодов при повышенной температуре.

Для снятия ВАХ при указанной преподавателем температуре исследуемые диоды помещаются в термостат. Температура нагрева контролируется термометром. Пределы измерения напряжений и интервалы между отсчетами остаются такими же, как в п. 2.

4. Построение ВАХ диодов, обработка полученных результатов.

По данным измерений строятся графики вольт-амперных характеристик диодов на одном рисунке.

### 3. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемых приборов.
3. Схема исследования.
4. Таблицы с данными измерений.
5. Графики снятых зависимостей и расчетные параметры.

6. Расчет и построение зависимостей динамического и статистического сопротивлений от приложенного напряжения:

$$r_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}}); \quad R_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}});$$

$$r_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}}); \quad R_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}});$$

7. Выводы по работе.

#### 4. Контрольные вопросы и задания

1. Что такое собственная, электронная и дырочная проводимости полупроводников?
2. Как на энергетических диаграммах полупроводников с собственной, электронной и дырочной проводимостями располагается уровень Ферми?
3. Как зависит положение уровня Ферми от концентрации примесей в примесных полупроводниках?
4. Нарисовать энергетическую диаграмму *p-n* перехода.
5. Что такое контактная разность потенциалов двух полупроводников и чем определяется ее величина?
6. Нарисовать энергетическую диаграмму *p-n* перехода при прямом и обратном включении.
7. Из каких составляющих состоит ток через *p-n* переход и как они зависят от внешнего напряжения?
8. Как зависит величина прямого и обратного тока *p-n* перехода от температуры и почему?
9. Что такое ширина *p-n* перехода и как она зависит от величины и полярности приложенного напряжения?
10. Что такое емкость *p-n* и как она зависит от приложенного напряжения?
11. Нарисовать устройство точечных и плоскостных диодов.
12. Чем различаются характеристики германиевых и кремниевых диодов?
13. Как влияет температура окружающей среды на характеристики диодов?
14. Назвать основные параметры точечных и плоскостных диодов.
15. Назвать преимущества и недостатки полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными и каковы основные области их применения.

#### *Полупроводниковый диод*

1. Что такое диффузия носителей в полупроводнике?
  - а) движение носителей за счет электрического поля;
  - б) хаотическое тепловое движение носителей;
  - в) движение за счет разности концентраций.

2. Что такое дрейф носителей в полупроводнике?

- а) хаотическое тепловое движение;
- б) движение носителей за счет электрического поля;
- в) движение за счет разности концентраций.

3. Какой материал чаще всего используется для изготовления выпрямительных диодов?

- а) кремний;                      в) арсенид галлия;
- б) селен;                        г) окись бария.

4. Чем объясняется скачок потенциала на границе двух областей с разным типом проводимости?

- а) разной концентрацией подвижных носителей;
- б) наличием внешнего источника напряжения;
- в) наличием двойного электрического слоя, образующегося за счет некомпенсированного объемного заряда по обе стороны *p-n* перехода;
- г) инжекцией подвижных носителей сквозь *p-n* переход.

5. При каких значениях прямого напряжения обычно работают германиевые выпрямительные диоды?

- а) 0,01 – 0,08 В;    в) 0,2 – 0,8 В;
- б) 0,08 – 0,2 В;    г) 0,8 – 1,5 В.

6. При каких значениях прямого напряжения обычно работают кремниевые выпрямительные диоды?

- а) 0,01 – 0,1 В;    в) 0,7 – 2 В;
- б) 0,1 – 0,7 В;    г) 2 – 3,5 В.

7. Какова величина допустимого обратного напряжения у кремниевых плоскостных выпрямительных диодов?

- а) 5 – 30 В;    б) 100 – 1500 В;    в) 1500 – 2500 В;

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2  
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КРЕМНИЕВОГО  
СТАБИЛИТРОНА

**Цель работы**

1. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики.
2. Исследовать работу простейшего стабилизатора напряжения.

**Краткие теоретические сведения**

Кремниевым стабилитроном, или опорным диодом, называется такой полупроводниковый диод, у которого на рабочем участке вольтамперной характеристики незначительные изменения напряжения приводят к резкому изменению тока. Такой участок находится на обратной ветви вольтамперной характеристики и обусловлен лавинным пробоем. Вольтамперная характеристика показана на рис. 2.1.

Напряжение стабилизации зависит от ширины  $p-n$  перехода. Большим удельным сопротивлениям соответствует большее напряжение стабилизации. У стабилитрона на основе низкоомного сильно легированного кремния  $p-n$  переход узкий и напряжение стабилизации (напряжение пробоя) низкое. В таких  $p-n$  переходах наблюдается туннельный пробой. В широких  $p-n$  переходах, полученных на основе высокоомного кремния, наблюдается лавинный пробой и напряжение стабилизации высокое. Подбором удельного сопротивления кремния получают требуемые величины напряжения стабилизации.

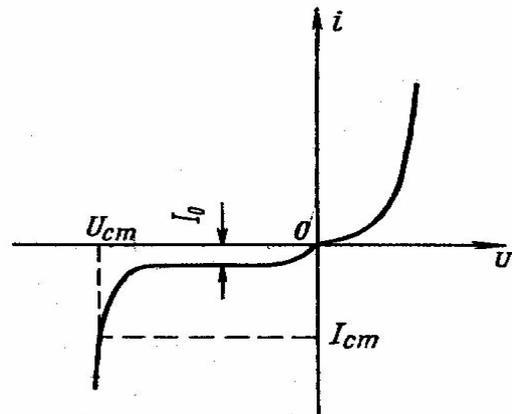


Рис. 2.1

Основные параметры кремниевых стабилитронов следующие:

- $U_{ст}$  – напряжение стабилизации;
- $I_{ст}$  – допустимый ток стабилизации;
- $R_d$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона;
- $R_{ст}$  – статическое сопротивление стабилитрона;
- $Q$  – коэффициент качества стабилитрона

$$Q = \frac{R_d}{R_{ст}};$$

ТКН — температурный коэффициент напряжения. На рис. 2.2 приведена принципиальная схема для исследования и снятия прямой вольтамперной характеристики опорного диода.

### 1. Методические указания

Для снятия обратной ветви ВАХ кремниевых стабилитронов используется схема, приведенная на рис. 2.2.

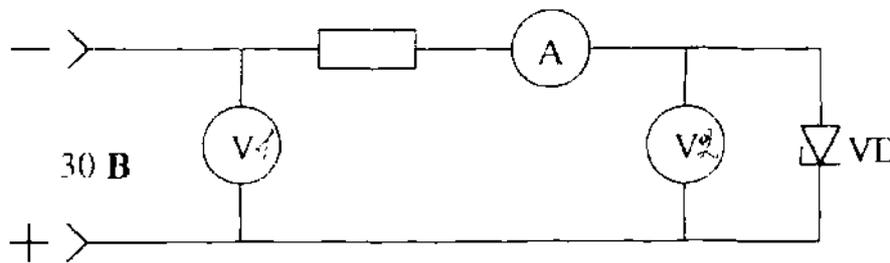


Рис. 2.2

### 2. Программа работы

1. Сборка и апробирование схем.
2. Снятие обратной ветви ВАХ кремниевого стабилитрона при комнатной температуре.
3. Снятие обратной ветви ВАХ кремниевого стабилитрона при  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

1. Сборка и апробирование схем для снятия вольт – амперных характеристик кремниевых стабилитронов.

Схемы собираются на основе монтажного шасси с подключением источников питания, измерительных приборов лабораторного стенда и комплекта соединительных проводов. Для нагревания стабилитронов используется термостат.

Элементы схемы соединяются между собой в соответствии со схемой, изображенной на рис. 2.2.

При снятии ВАХ стабилитрона *подаваемые наибольшие величины обратного напряжения не должны превышать предельно допустимых для конкретного типа прибора.*

После сборки схем с разрешения преподавателя необходимо провести апробирование схем, т.е. при включенном питании убедиться в наличии токов через стабилитроны, установить пределы измерений стрелочных измерительных приборов и определить цену деления шкал приборов.

2. Снятие обратной ветви ВАХ кремниевого стабилитрона при комнатной температуре.

При снятии обратной ветви характеристики кремниевого стабилитрона  $U_{ст} = f(I_{ст})$  (рис. 2.3.) обратное напряжение подается от источника питания 0 – 15 В. Отсчеты берутся через интервалы измерения 0,1 – 1 В (малые интервалы выбираются на участке электрического пробоя диода).

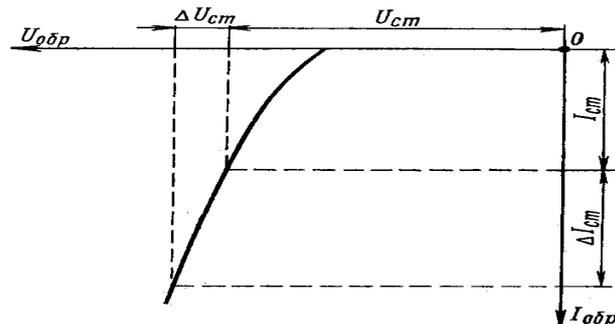


Рис. 2.3

3. Снятие обратной ветви ВАХ кремниевого стабилитрона при  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  осуществляется аналогично п. 2.

### 3. Содержание отчета

1. Паспортные данные исследуемого стабилитрона.
2. Электрическая схема.
3. Результаты измерений.
4. Графики вольтамперной характеристики при комнатной температуре, при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
5. На графиках отметить область стабилизации.
5. Произвести расчет ТКН (температурного коэффициента напряжения) по снятым при разной температуре обратным характеристикам опорного диода. Расчет выполняется по формуле

$$\text{ТКН} = \frac{U(T_2) - U(T_1)}{U(T_1)(T_2 - T_1)} \cdot 100\% / \text{град},$$

где  $U(T_2)$  — напряжение, соответствующее заданному току при  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 $U(T_1)$  — напряжение, соответствующее заданному току при комнатной температуре.

7. По обратным характеристикам диода и по изменениям напряжения источника питания подсчитать коэффициент стабилизации  $k$  по формуле

$$k = \frac{\Delta U_{\text{вх}} \cdot U_{\text{ст}}}{\Delta U_{\text{ст}} \cdot U_{\text{вх}}},$$

где  $\Delta U_{\text{вх}}$  — изменение напряжения источника питания, измеряемого вольтметром  $V1$  (рис. 2.2);

$\Delta U_{\text{ст}}$  — изменение напряжения опорного диода, измеряемого вольтметром  $V2$  (рис. 2.2);

$U_{\text{ст}}$  — напряжение стабилизации опорного диода.

8. Построить зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ .

9. Подсчитать для каждого случая  $R_{\text{д}}$ ,  $R_{\text{ст}}$  и  $Q$ .

## VI. Контрольные вопросы и задания

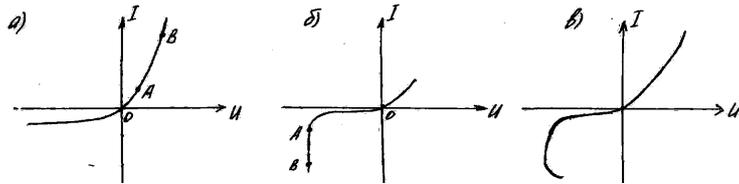
1. Назовите основные виды пробоя.
2. Какие виды пробоя используются в стабилитронах?
3. Как влияет проводимость исходных материалов на величину напряжения пробоя  $p$ - $n$  перехода стабилитронов?
4. Нарисуйте характеристику стабилитрона. Расскажите, какие основные
5. Назовите основные параметры стабилитрона.
6. Почему в качестве материала для стабилитронов выбран кремний, а не германий?
7. Какой основной параметр характеризует работу стабилитрона при различных температурах?
8. Что такое ТКН и как он определяется?
9. Чем ограничена величина наибольшего тока стабилизации?
10. Что такое коэффициент стабилизации?
11. Назовите типы стабилитронов, выпускаемых промышленностью, и приведите численные значения их основных параметров.
12. Где применяются стабилитроны?

## II. Стабилитрон

1. Какой материал чаще всего используется для изготовления стабилитронов?

- а) германий;
- б) селен;
- в) кремний;
- г) арсенид галлия;

2. Укажите характеристику стабилитрона, а также ее рабочую область (АВ).



3. При какой полярности напряжения работают стабилитроны?

- а) при прямом напряжении;
- б) при обратном напряжении;
- в) при любой полярности.

4. Каков порядок величины дифференциального сопротивления стабилитрона в рабочей области?

- а) несколько МОм;
- б) несколько кОм;
- в) несколько Ом;
- г) доли Ом;
- д) правильного ответа нет.

5. Чем определяется максимальное значение рабочего тока стабилитрона?

- а) наступлением теплового пробоя;
- б) устойчивостью лавинного пробоя;
- в) величиной рабочего напряжения.

6. Чем определяется минимальное значение рабочего тока стабилитрона?

- а) мощностью, рассеиваемой диодом;
- б) устойчивостью лавинного пробоя;
- в) величиной рабочего напряжения.

7. Как влияет повышение температуры на возникновение лавинного пробоя в кремниевом диоде?

- а) не влияет;
- б) облегчает развитие пробоя;
- в) затрудняет развитие пробоя.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

#### Цель работы

1. Снять вольт-амперную характеристику туннельного диода при различных согласующих сопротивлениях (3, 6, 10 Ом).
2. Отметить на вольт-амперной характеристике по осциллографу участки отрицательного динамического сопротивления.

#### Краткие теоретические сведения

В обычных полупроводниках атомы примеси произвольно расположены в исходном материале, достаточно удалены друг от друга, так что между собой не взаимодействуют.

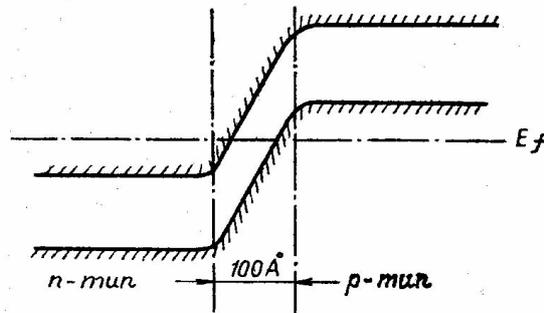


Рис. 3.1

По мере увеличения концентрации примесей расстояние между их атомами уменьшается, что увеличивает взаимодействие между ними. Это приводит к расщеплению примесных уровней в примесную зону, которая может слиться с основной зоной. Такое слияние зон происходит при концентрациях примесей, превышающих некоторое критическое значение. Так, для германия значение этой концентрации составляет около  $2 \cdot 10^{19} \text{ 1/см}^3$ , а для кремния  $6 \cdot 10^{19} \text{ 1/см}^3$ . Такие сильно легированные полупроводники относятся к типу вырожденных, отличительной чертой которых является то, что уровень Ферми находится внутри либо зоны проводимости, либо в валентной зоне (рис.3.1).

Ширина  $p-n$  перехода, образованного вырожденными полупроводниками, порядка  $100 \text{ \AA}$ . Такая ширина  $p-n$  перехода дает возможность электронам переходить через  $p-n$  переход, не поднимаясь над потенциальным барьером.

При отсутствии внешнего смещения на  $p-n$  переходе уровень Ферми имеет одинаковое энергетическое положение в  $p$  и  $n$  областях. Распределение электронов выше и ниже уровня Ферми в обеих областях перекрываю-

шихся частей зон будет аналогичное, что определяет одинаковые вероятности для туннелирования электронов слева направо и справа налево. Результирующий ток равен нулю (рис. 3.2), на вольт-амперной характеристике точка 0.

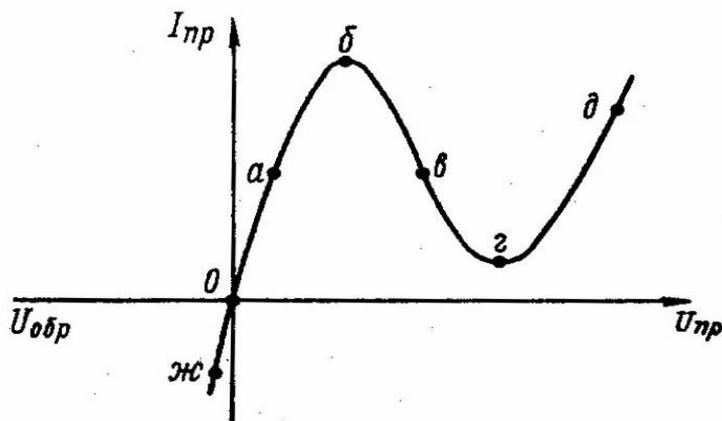


Рис. 3.2

При подаче на  $p$ - $n$  переход прямого смещения, уменьшающего перекрытие зон, энергетическое распределение электронов смещается относительно друг друга совместно с уровнем Ферми. Это приводит к преобладанию электронов в  $n$  области над электронами одной и той же энергии в  $p$  области и количества свободных уровней в  $p$  области над незанятыми уровнями в  $n$  области на одинаковых уровнях в месте перекрытия зон. Вследствие этого поток электронов из  $n$  области в  $p$  область будет преобладать над обратным потоком, и во внешней цепи появится ток, что соответствует точке  $a$  на вольтамперной характеристике (см. рис. 3.2).

По мере роста прямого смещения результирующий ток через переход будет увеличиваться до тех пор, пока не начнет сказываться уменьшение перекрытия зон в точке  $b$ . Это будет соответствовать максимуму туннельного тока. При дальнейшем увеличении напряжения в результате уменьшения величины перекрытия зон туннельный ток начнет уменьшаться и спадет до нуля (точки  $в$  и  $г$ ) в момент, когда границы дна зоны проводимости и потолка валентной зоны совпадут. Однако ток через переход не будет равен нулю вследствие наличия диффузионного тока, как в обычном  $p$ - $n$  переходе (носители проходят над потенциальным барьером). При дальнейшем увеличении напряжения ток через переход возрастает по тому же закону, как и в обычном  $p$ - $n$  переходе (точка  $d$ ).

При подаче на переход обратного смещения перекрытие зон увеличивается. Это приводит к появлению результирующего потока электронов справа налево, и ток во внешней цепи будет обратным. Таким образом, туннельный механизм обратного тока обеспечивает малое обратное сопротивление туннельного диода.

Большинство параметров туннельного диода определяется по вольт-амперной характеристике (рис. 3.3):

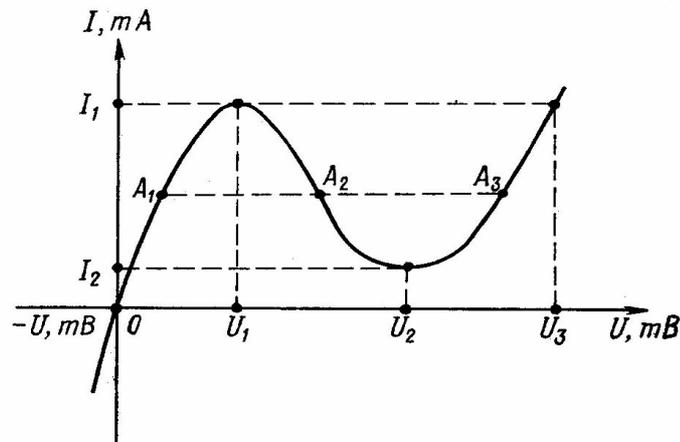


Рис. 3.3

$I_1$  — максимальный туннельный ток;

$I_2$  — минимальный туннельный ток;

$U_1$  — напряжение, соответствующее максимальному току;

$U_2$  — напряжение, соответствующее минимальному току;

$U_3$  — напряжение, соответствующее диффузионному току, равному максимальному туннельному току;

$\frac{I_1}{I_2}$  — отношение токов;

$|R_{-}| = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$  — среднее отрицательное сопротивление на падающем участке вольт-амперной характеристики;

$|R_{\text{диф}}| = \frac{du}{di}$  — дифференциальное отрицательное сопротивление.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода однозначна при заданном напряжении и неоднозначна при заданном токе, поэтому источник напряжения, задающий снимаемую точку вольт-амперной характеристики, должен иметь малое выходное сопротивление. Выходное сопротивление источника должно быть меньше, чем минимальное дифференциальное сопротивление туннельного диода на падающем участке. В противном случае окажутся возможными три состояния туннельного диода, причем состояния, соответствующие рабочим точкам  $A_1$  и  $A_3$ , расположенным на участках положительного дифференциального сопротивления, устойчивы, а состояние, соответствующее рабочей точке  $A_2$ , неустойчиво и не может быть зафиксировано при измерениях.

Если сопротивление источника меньше дифференциального отрицательного сопротивления диода, подобного положения не возникает.

## I. Методические указания

1. Записать паспортные данные исследуемого диода.
2. Зарисовать электрическую схему (рис. 3.4).

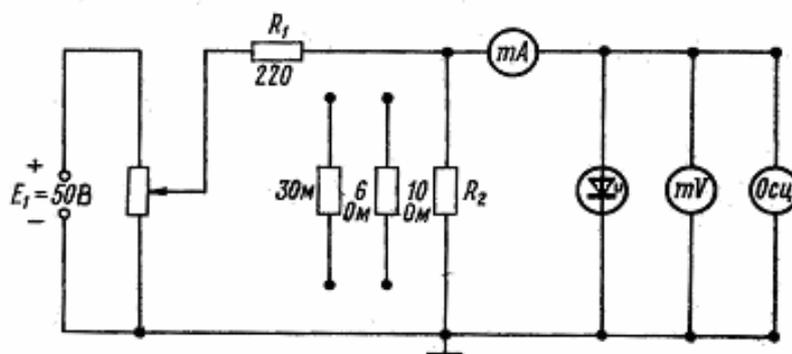


Рис. 3.4

## II. Программа работы

1. Собрать схему (рис. 3.4) для снятия вольтамперной характеристики туннельного диода ГИ305Б.
2. Включить ветви питания и радиоизмерительные приборы.
3. Снять зависимость  $I_{np} = f(U_{np})$  при различных значениях согласующего сопротивления ( $R = 3; 6; 10$  Ом) при комнатной температуре.
4. Установить  $R = 3$  Ом и снять  $I_{np} = f(U_{np})$  при  $t = 0^\circ C$ ;  $t = 50^\circ C$ .
5. С помощью осциллографа С1-5 убедиться, что на отрицательном участке вольтамперной характеристики возможна генерация, и определить область генерации. Начало генерации соответствует напряжению  $U_1$ , а конец —  $U_2$ .
6. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$U_{np}$ , мВ	0	20	40	60	.....	460	480	500
$R_2$ , 3 Ом								
$R_2$ , 6 Ом								
$R_2$ , 10 Ом								

По данным измерений строятся графики вольт-амперных характеристик.

## III. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.

2. Паспортные данные исследуемого диода.
3. Электрическая схема испытания.
4. Результаты измерений.
5. Вольтамперные характеристики, снятые при различных температурах и сопротивлениях.
6. Расчеты:

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{1}{CR} \sqrt{\frac{R}{r} - 1} \quad \text{— предельной частоты генерации диода;}$$

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{CR} \sqrt{\frac{C}{L} R^2 - 1} \quad \text{— собственной резонансной частоты;}$$

$$L = \left( r - \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \right) + j \left( \omega L - \frac{\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \right) \quad \text{— входного сопротивления диода на предельной частоте.}$$

7. Графики зависимостей  $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$  при различных температурах окружающей среды и разных согласующих сопротивлениях.

#### IV. Контрольные вопросы и задания

1. Принцип действия туннельного диода.
2. Туннельный эффект.
3. Определение вырожденного полупроводника и его энергетическая диаграмма.
4. Построение вольтамперной характеристики туннельного диода.
5. Энергетические диаграммы различных точек вольтамперной характеристики.
6. Основные параметры туннельного диода.
7. Отличие вольтамперной характеристики туннельного диода от обыкновенного.
8. Применение туннельного диода.
9. Эквивалентная схема туннельного диода.

#### III. Туннельный диод

1. Какой материал чаще всего используется для изготовления туннельных диодов?

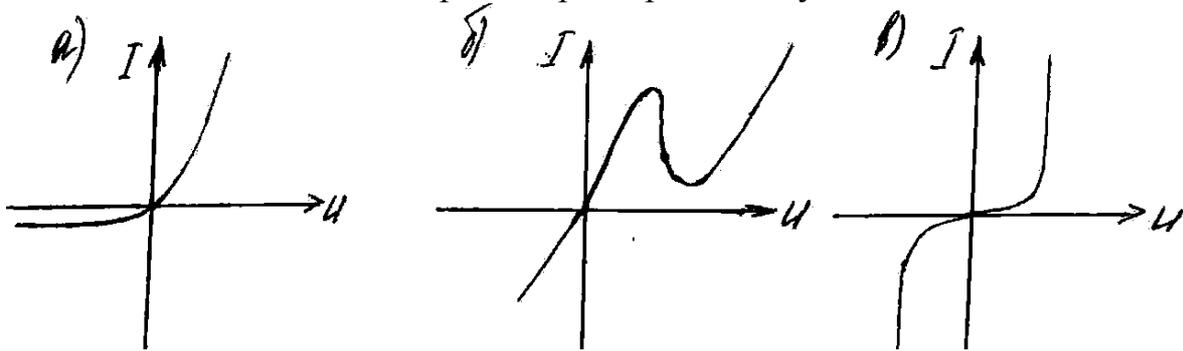
- а) германий;
- б) кремний;
- в) арсенид галлия.

2. Какова, примерно, концентрация подвижных носителей в туннельном диоде?

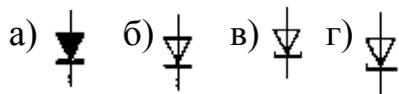
- а)  $10^{10}$  1/см<sup>3</sup>;
- б)  $10^{19}$  1/см<sup>3</sup>;

в)  $10^8$   $1/\text{см}^3$ .

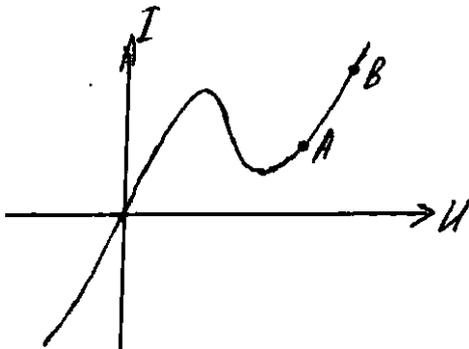
3. Какова вольт-амперная характеристика туннельного диода?



4. Как обозначаются на схемах туннельные диоды?



5. Какой ток течет на участке АВ?



- а) туннельный;
- б) диффузионный;
- в) дрейфовый.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ «ОБЩАЯ БАЗА»

#### Цель работы

1. Исследование характеристик биполярных транзисторов при включении с общей базой.

#### Краткие теоретические сведения

Транзистором называется полупроводниковый прибор, имеющий два  $p-n$  перехода (рис. 4.1). В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают два вида транзисторов:  $p-n-p$  и  $n-p-n$  (рис. 4.2).

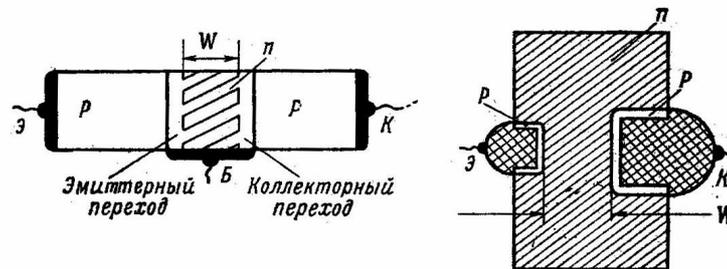


Рис. 4.1

Область, имеющая максимальную концентрацию примесей, называется эмиттером. Эта область является источником носителей тока, которые инжектируются в среднюю область. Эта область имеет минимальную концентрацию примесей и называется базой.

Третий электрод носит функцию собирания и называется коллектором. Концентрация примесей в коллекторе несколько ниже эмиттера. Характер движения инжектированных носителей в базе заключается в сочетании диффузии и дрейфа. Электрическое поле, в котором происходит дрейф, может быть за счет высокого уровня инжекции или результатом неоднородности слоев.

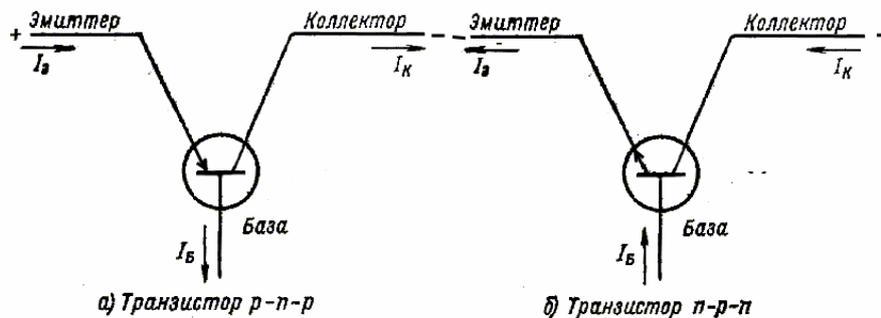


Рис. 4.2

Транзисторы без собственного поля в базе называются бездрейфовыми, а с собственным полем – дрейфовыми. По виду включения переходов различают четыре режима работы транзистора:

- активный режим – эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- режим насыщения – оба перехода включены в прямом направлении;
- режим отсечки – оба перехода включены в обратном направлении;
- инверсный режим – эмиттерный переход включен в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

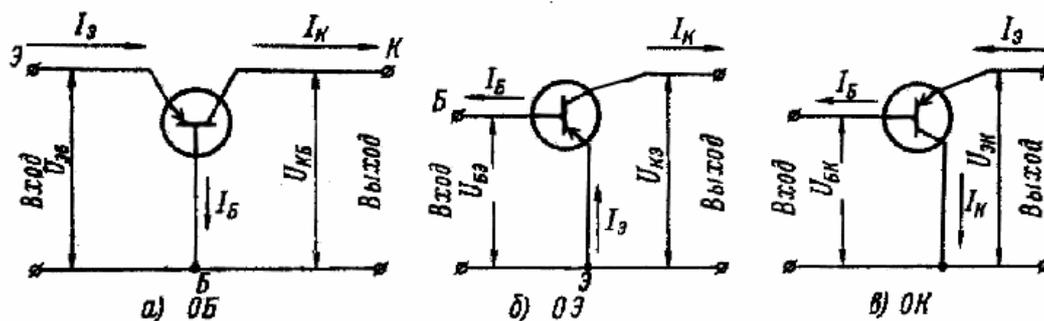


Рис. 4.3

В зависимости от того, какой электрод у транзистора принят за основной, т. е. общий для входной и выходной цепи, различают три схемы включения транзистора. На рис. 4.3 приведены три схемы включения транзистора: по схеме «общая база» (ОБ), по схеме «общий эмиттер» (ОЭ), по схеме «общий коллектор» (ОК). В данной работе исследуется транзистор по схеме ОБ. Входные и выходные характеристики приведены на рис. 4.4.

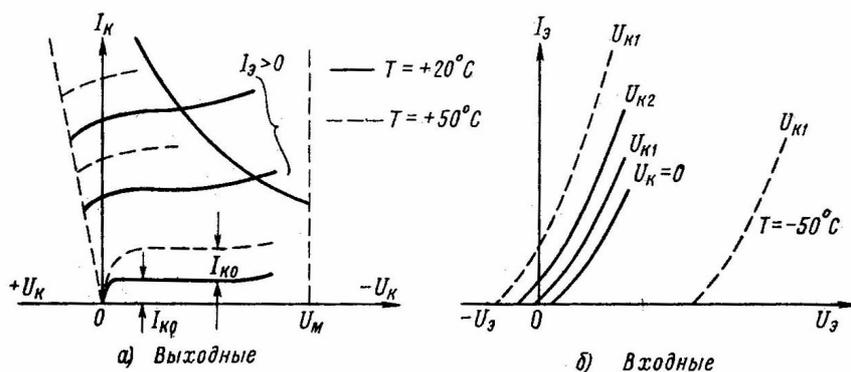


Рис. 4.4

Семейством выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме ОБ, называются зависимости тока коллектора от напряжения между коллектором и базой, снятые при различных значениях тока эмиттера:

$$I_{к} = f(U_{кб}) \text{ при } I_{э} = const.$$

Семейством входных статических характеристик транзистора, включенного по схеме ОБ, называются зависимости тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой, снятые при различных значениях напряжения на коллекторе:

$$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \text{ при } U_{\text{КБ}} = \text{const.}$$

### I. Методические указания

В работе исследуются характеристики маломощных транзисторов *p-n-p* – и *n-p-n* – типа. Для этих целей используется макет (рис. 4.5.), принципиальная схема которого приведена на рис. 4.6. В схеме предусмотрено коммутирование полярности подключаемых источников питания с помощью переключателя  $S_1$ . Исследуемая схема (ОБ или ОЭ) выбирается переключателем  $S_3$ . Выбор типа транзистора производится переключателем  $S_4$ : положение 1 соответствует типу *p-n-p*, положение 2, 3 – *n-p-n*. Для снятия характеристик транзисторов в режиме с нагрузкой в схему включены резисторы  $R_3$  и  $R_4$ , которые коммутируются переключателем  $S_2$ . Напряжения на выходе и входе плавно изменяются потенциометрами  $R_{\text{ВЫХ}}$  и  $R_{\text{ВХ}}$  соответственно.

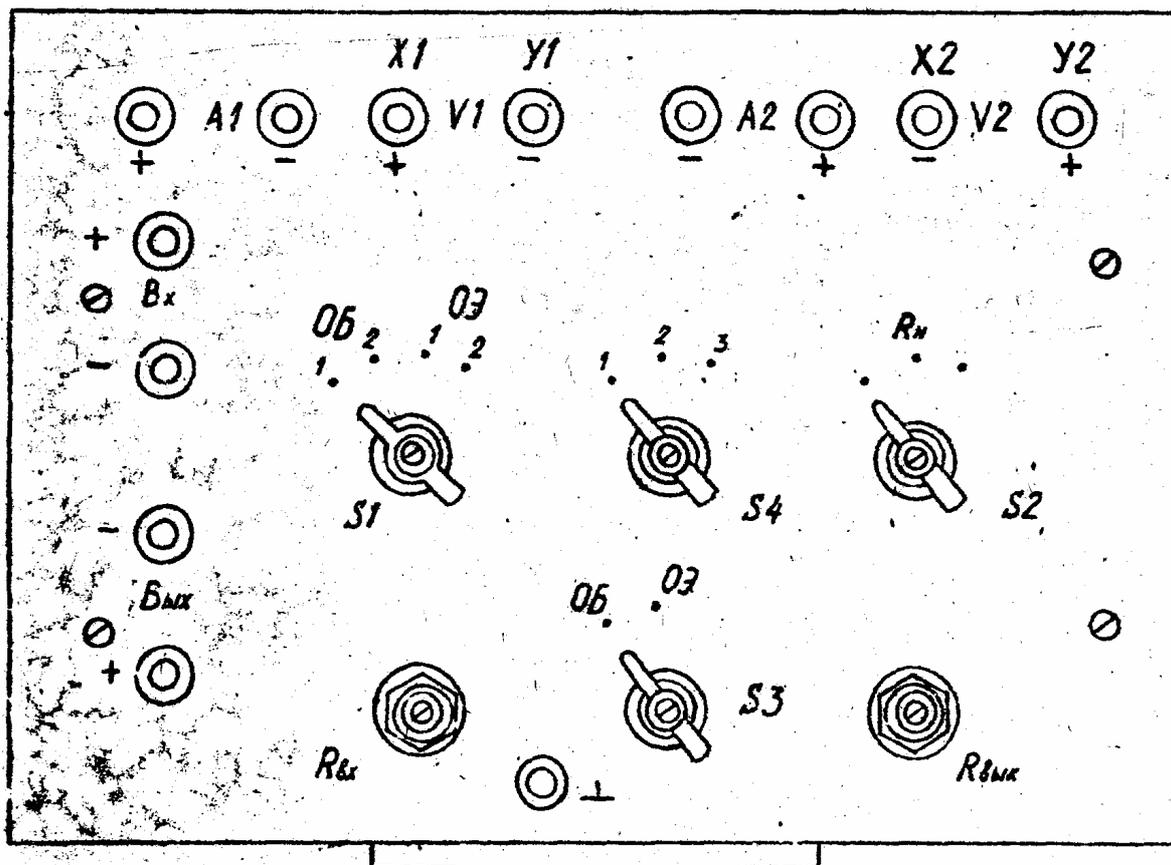


Рис. 4.5.

В работе используются два регулируемых источника питания (0 – 15 В).

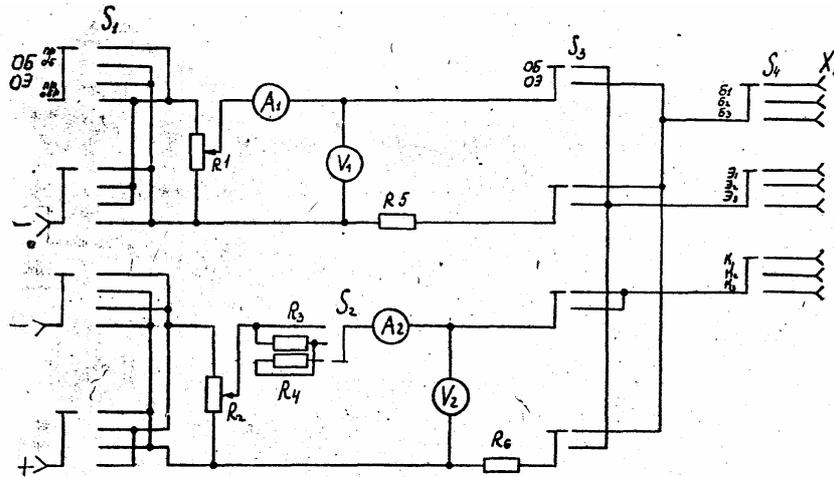


Рис. 4.6.

## II. Программа работы

1. Сборка и апробирование схемы исследования.
  2. Снятие семейства статических входных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.
  3. Снятие семейства статических выходных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.
  4. Снятие семейства статических входных и выходных характеристик при температуре  $t = 50^\circ C$ .
  5. Повторить пп. 1 – 4 для транзистора  $n-p-n$  – типа.
  6. Построение графиков снятых характеристик.
1. Сборка и апробирование схемы исследования.

Транзисторы укреплены на отдельной плате, которая присоединена разъемом к лабораторному макету. Для исследования транзисторов собрать схему (рис. 4.7.), используя монтажные провода для подключения источников питания, измерительных приборов к макету, соблюдая при этом правильную полярность.

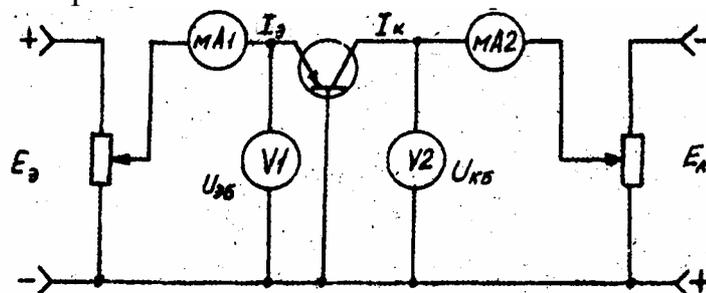


Рис. 4.7.

С разрешения преподавателя включить схему, убедиться в наличии напряжений и токов, установить нужные пределы измерений приборов и определить цену деления шкалы. При измерении не превышать предельно допустимых значений напряжений.

2. Снятие семейства статических входных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.

Снимаются зависимости  $I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}})$  при  $U_{\text{кб}} = \text{const}$ .

3. Снятие семейства статических выходных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.

Снимаются зависимости  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}})$  при  $I_{\text{э}} = \text{const}$ .

4. Снятие семейства статических входных и выходных характеристик при температуре  $t = 50^{\circ}\text{C}$ .

Плата с транзисторами помещается в термостат, характеристики снимаются при  $t = 50^{\circ}\text{C}$  в соответствии с указаниями пп. 2 и 3.

5. Повторить пп. 1 – 4 для транзистора  $n-p-n$  – типа.

При сборке схемы учесть полярность включения измерительных приборов.

6. Построение графиков снятых характеристик.

По данным измерений строятся входные и выходные характеристики транзисторов в схеме с общей базой при комнатной температуре и температуре  $50^{\circ}\text{C}$ .

Для напряжения на коллекторе, указанного преподавателем, и при комнатной температуре построить характеристику прямой передачи тока.

По построенным характеристикам определить  $h$  – параметры транзисторов.

### III. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемых транзисторов.
3. Схему измерения характеристик транзисторов.
4. Таблицы измерений характеристик и параметров транзисторов.
5. Графики семейств входных и выходных характеристик транзисторов.
6. Значения  $h$  – параметров транзисторов, рассчитанные по снятым характеристикам.

### IV. Контрольные вопросы и задания

1. Нарисовать схематическое изображение транзистора типа  $p-n-p$  и  $n-p-n$ .

2. Физика работы транзистора.
3. Нарисовать энергетическую диаграмму транзистора для активного режима.
4. Нарисовать энергетическую диаграмму транзистора для равновесного состояния.
5. Назвать основные режимы работы транзистора.
6. Что такое эффективность эмиттера  $\gamma$ ?
7. Что такое коэффициент переноса  $\beta$ ?
8. Что такое коэффициент передачи  $\alpha$ ?
9. Каковы меры повышения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ ?
10. Нарисовать схему включения транзистора по схеме ОБ.
11. Что такое коэффициент усиления по току схемы ОБ  $k_i$ ?
12. Что такое коэффициент усиления по напряжению схемы ОБ  $k_u$ ?
13. Что такое коэффициент усиления по мощности схемы ОБ  $k_p$ ?
14. Как вычисляются  $k_i$ ,  $k_u$ ,  $k_p$  по статическим характеристикам?
15. Назвать достоинства схемы ОБ.
16. Назвать недостатки схемы ОБ.
17. В чем состоит отличие управления током коллектора транзистора от управления анодным током электронной лампы?
18. Какую зависимость транзистора определяет его входная характеристика?
19. Какую зависимость транзистора определяет ее выходная характеристика?
20. Чем объяснить отсутствие усиления по току в схеме с общей базой?
21. Охарактеризуйте каждый из  $h$  – параметров транзистора для схемы с общей базой. Укажите размерность  $h$  – параметров, поясните их физический смысл.
22. Каким образом можно определить  $h$  – параметры по статистическим характеристикам транзистора (для схемы с ОБ)?
23. Нарисуйте энергетические диаграммы  $p-n-p$  - ( $n-p-n$ ) – транзистора.
24. Что такое коэффициент инжекции? Почему он должен быть близок к единице?
25. Какие процессы в базе характеризует коэффициент переноса?
26. Из каких компонентов состоит ток базы?
27. Что такое  $I_{к0}$  и каковы причины его возникновения?
28. Устройство плоскостных транзисторов.

#### **IV. Транзистор с общей базой (ОБ)**

1. Какое явление в транзисторе называется инжекцией?
- а) поступление основных носителей в область базы;
  - б) поступление неосновных носителей в область базы;
  - в) поступление неосновных носителей в область коллектора;
2. С какой целью обычно делают площадь коллекторного перехода существенно больше площади эмиттерного перехода?
- а) с целью уменьшения диффузионного сопротивления базы;
  - б) с целью уменьшения сопротивления коллекторного перехода;
  - в) с целью уменьшения рекомбинации неосновных носителей в базе.
3. Чем объясняется изменение коэффициента передачи тока эмиттера при изменении коллекторного напряжения?
- а) увеличением инжекции носителей в базу;
  - б) уменьшением противотока носителей из коллектора в базу;
  - в) изменением в основном ширины коллекторного перехода и соответственно изменением толщины базы.
4. Будет ли в цепи коллектора транзистора протекать ток, если  $I_3 = 0$ , а  $U_{кб} \neq 0$ ?
- а) не будет из-за отсутствия инжекции дырок в базу;
  - б) будет из-за наличия тока неосновных носителей базы и коллектора через коллекторный переход.
5. Зависят ли токи эмиттера и коллектора от толщины базы транзистора?
- а) не зависят;
  - б) зависят, причем значения токов возрастают с уменьшением толщины базы;
  - в) зависят, причем с ростом толщины базы токи возрастают.
6. Какая коллекторная емкость – барьерная или диффузионная – сильнее влияет на высокочастотные свойства транзистора?
- а) барьерная емкость;
  - б) диффузионная емкость;
  - в) барьерная и диффузионная емкости влияют одинаково.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

### СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПО СХЕМЕ «ОБЩИЙ ЭМИТТЕР»

#### Цель работы

1. Исследование характеристик биполярных транзисторов  $p-n-p$ ,  $n-p-n$  типа при различных температурах, определение основных параметров при включении с общим эмиттером.

#### Краткие теоретические сведения

При включении транзистора по схеме «общий эмиттер» входным током является ток базы (рис. 5.1).

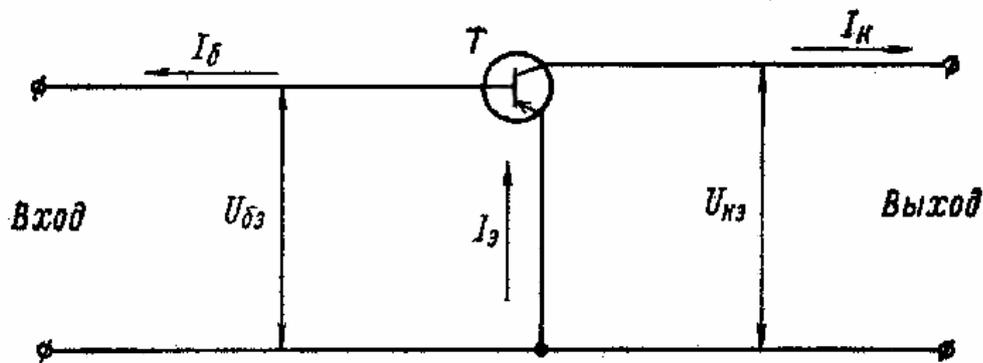


Рис. 5.1

На рис. 5.2 приводятся входные и выходные характеристики этой схемы.

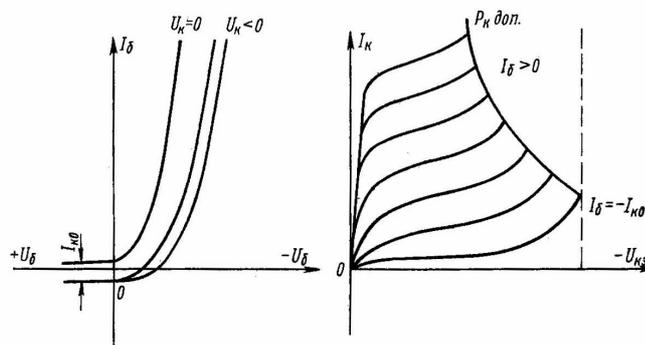


Рис. 5.2

Выходные характеристики, или характеристики коллекторного семейства, не пересекают ось ординат и полностью расположены в I квадранте, так как напряжение между коллектором и эмиттером складывается из двух величин

$$|U_{кэ}| = |U_{кб}| + |U_{эб}|.$$

Отсюда видно, что выходные характеристики схемы ОЭ получаются путем сдвига выходных характеристик схемы ОБ на величину  $U_{эб}$ , которая тем больше, чем больше ток  $I_э$ .

Схема ОЭ имеет большие нелинейные искажения по сравнению со схемой ОБ, поэтому кривые коллекторного семейства менее регулярны, т. е. они имеют неодинаковый наклон и заметно сгущаются при больших токах. Ток при оборванной базе ( $I_б = 0$ ) намного больше тока  $I_б$ , при оборванном эмиттере и зависит от выходного напряжения. Входной ток  $I_б$  может иметь не только положительную величину, но и небольшую отрицательную величину, т. е. может втекать в базу.

Входные характеристики, или базовое семейство характеристик, имеют другой масштаб по сравнению с эмиттерными характеристиками. С увеличением напряжения  $U_{кэ}$  кривые сдвигаются вправо.

По выходным характеристикам можно вычислять следующие параметры транзистора:

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta U_б} \text{ при } U_{кэ} = const;$$

$$g_{\text{вых}} = \frac{\Delta I_к}{\Delta U_к} \text{ при } I_б = const,$$

где  $\beta$  — коэффициент усиления по току;

$g_{\text{вых}}$  — выходная проводимость.

По входным характеристикам определяется входное сопротивление транзистора и коэффициент обратной связи по напряжению:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \text{ при } U_{кэ} = const;$$

$$k_{\text{ос}} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_к} \text{ при } I_б = const.$$

## I. Методические указания

В работе исследуются характеристики маломощных транзисторов  $p-n-p$  – и  $n-p-n$  – типа, включенные по схеме с общим эмиттером. Для этих целей используется макет, описание которого приведено в работе № 4.

## II. Программа работы

1. Сборка и апробирование схемы исследования.
2. Снятие семейства статических входных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.
3. Снятие семейства статических выходных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.

4. Снятие семейства статических входных и выходных характеристик при температуре  $t = 50^\circ \text{C}$ .
  5. Повторить пп. 1 – 4 для транзистора  $n-p-n$  – типа.
  6. Построение графиков снятых характеристик.
1. Сборка и апробирование схемы исследования.

Для исследования транзисторов собрать схему (рис. 5.3.), используя монтажные провода для подключения источников питания, измерительных приборов к макету, соблюдая правильную полярность. С разрешения преподавателя включить схему, убедиться в наличии напряжений и токов, установить нужные пределы измерений приборов и определить цену деления шкалы. При измерении не превышать предельно допустимых значений напряжений.

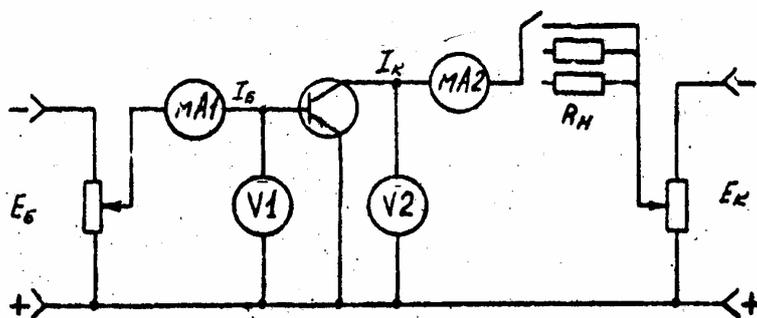


Рис. 5.3.

2. Снятие семейства статических входных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.

Снимаются зависимости  $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$  при  $U_{\text{кэ}} = \text{const}$ .

3. Снятие семейства статических выходных характеристик транзистора  $p-n-p$  – типа при комнатной температуре.

Снимаются зависимости  $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$  при  $I_{\text{б}} = \text{const}$ .

4. Снятие семейства статических входных и выходных характеристик при температуре  $t = 50^\circ \text{C}$ .

Плата с транзисторами помещается в термостат, характеристики снимаются при температуре  $t = 50^\circ \text{C}$  в соответствии с указаниями по пп. 2 и 3.

5. Повторить пп. 1 – 4 для транзистора  $n-p-n$  – типа.

При сборке схемы учесть полярность включения измерительных приборов.

6. Построение графиков снятых характеристик.

На основании результатов измерений в прямоугольной системе координат строятся графики семейств входных и выходных характеристик транзистора. На графиках выходных характеристик отрицательные значения  $U_{кэ}$  откладываются вправо от начала координат.

По построенным характеристикам определить  $h$  – параметры транзисторов.

### III. Содержание отчета

1. Паспортные данные исследуемого транзистора.
2. Электрическая схема.
3. Таблицы результатов испытания.
4. Вычисление, входного сопротивления транзистора  $R_{вх}$ , выходной проводимости  $g_{вых}$  и коэффициента передачи тока  $\beta$ .
5. Вычисление параметров  $T$ -образной эквивалентной схемы.
6. Графики снятых зависимостей, построенные на миллиметровой бумаге.
7. Выводы по проделанной работе.

### IV. Контрольные вопросы и задания

1. Какую зависимость транзистора, включенного по схеме ОЭ, определяет его входная характеристика?
2. Какую зависимость транзистора, включенного по схеме ОЭ, определяет его выходная характеристика?
3. Что характеризует коэффициент  $\beta$ ?
4. Охарактеризуйте каждый из  $h$  – параметров транзистора для схемы ОЭ. Указать размерность  $h$  – параметров, поясните их физический смысл.
5. Нарисуйте энергетические диаграммы  $p-n-p$  – транзисторов.
6. Покажите, какие изменения происходят на энергетической диаграмме  $p-n-p$  – и  $n-p-n$  – транзистора при включении эмиттерного и коллекторного переходов в прямом и обратном направлениях соответственно.
7. Из каких компонентов состоит ток через эмиттерный переход?
8. Почему изменяется ширина базы при изменении коллекторного напряжения и к каким следствиям приводит этот процесс?
9. Из каких компонентов состоит ток через коллекторный переход?
10. Объясните особенности характеристики передачи тока транзистора при включении с общим эмиттером для  $U_{кэ} = 0$ .
11. Назовите параметры транзисторов в различных системах и дайте их физическое определение.
12. Каковы основные преимущества и недостатки транзисторов по сравнению с электронными лампами.

## V. Транзистор с общим эмиттером (ОЭ)

1. Почему коэффициент передачи тока базы больше единицы?

- а) потому, что приращение тока коллектора больше приращения тока эмиттера;
- б) потому, что коллекторный переход открыт положительным смещением;
- в) потому, что изменение тока базы составляет малую часть изменения тока эмиттера, определяющего приращение коллекторного тока.

2. Чем ограничены значения коллекторного напряжения?

- а) пробоем коллекторного перехода;
- б) ширина коллекторного перехода в области коллектора становится слишком большой;
- в) коэффициент переноса становится слишком большим.

3. В какой схеме включения с ОБ или ОЭ коэффициент прямой передачи тока сильнее зависит от частоты?

- а) в схеме с ОЭ;
- б) в схеме с ОБ;
- в) в обеих схемах одинаково.

4. В какой схеме включения транзистора можно получить усиление тока?

- а) в схеме с ОБ;
- б) в схемах с ОЭ и ОК;
- в) в схемах с ОЭ и ОБ.

5. Как связаны входные сопротивления транзистора  $h_{11Э}$  в схеме с ОЭ и  $h_{11К}$  в схеме с ОБ?

- а)  $h_{11Э} \approx \frac{h_{11Б}}{1 + h_{21Б}}$ ;
- б)  $h_{11Э} \approx h_{11Б}$ ;
- в)  $h_{11Э} \approx \frac{h_{11Б}}{1 - h_{21Б}}$ ;

6. Какова связь между коэффициентами передачи тока в схемах с ОЭ  $h_{21Э}$  и ОБ  $h_{21Б}$ ?

- а)  $h_{21Э} \approx -\frac{h_{21Б}}{1 + h_{21Б}}$ ;
- б)  $h_{21Э} \approx \frac{h_{21Б}}{1 + h_{21Б}}$ ;
- в)  $h_{21Э} \approx h_{21Б}(1 + h_{21Б})$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВОГО (КАНАЛЬНОГО) ТРАНЗИСТОРА

#### Цель работы

1. Изучение принципа действия, снятие статистических характеристик и определение основных параметров полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$  – переходом и с изолированным затвором.

#### Краткие теоретические сведения

Полевым, или канальным, транзистором называется такой полупроводниковый прибор, у которого ток создается основными носителями под действием продольного электрического поля. Этот прибор, как и электровакуумная лампа, имеет высокий коэффициент усиления и высокое входное сопротивление.

Простейший полевой транзистор представляет собой тонкую германиевую пластинку с высоким удельным сопротивлением, в центральной части которой методом сплавления получается  $p$ - $n$  переход. По краям пластины имеются два невыпрямляющих контакта.

Схематическое изображение полевого транзистора представлено на рис. 6.1.

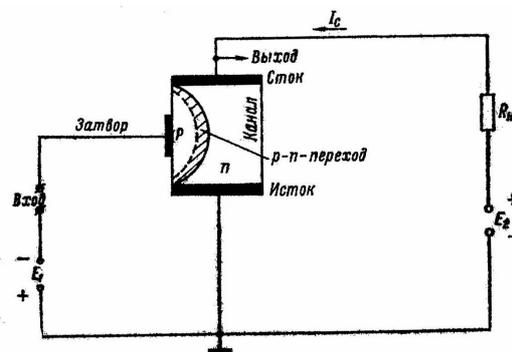


Рис. 6.1

Действие полевого транзистора основано на зависимости толщины  $p$ - $n$  перехода от приложенного к нему напряжения.

Область  $p$ - $n$  перехода обеднена основными носителями, поэтому ее проводимость практически равна 0. В пластине полупроводника образуется токопроводящий канал, сечение которого зависит от толщины  $p$ - $n$  перехода. Если включить источник питания между двумя невыпрямляющими контактами пластины (см. рис. 6.1), то по цепи потечёт ток, величину которого можно определить по формуле

$$I_C = \frac{E_2}{R + R_H}.$$

Область пластины, от которой начинается движение основных носителей, называется истоком, а область, к которой они движутся, называется стоком. Область  $p-n$  перехода, при помощи которого происходит управление током, называется затвором. К каждой из областей присоединяют выводы, которые соответственно называют истоком, стоком и затвором.

Изменение отрицательного напряжения на затворе приводит к изменению ширины  $p-n$  перехода, причем  $p-n$  переход расширяется в сторону большего удельного сопротивления — в сторону пластины.

Увеличение толщины  $p-n$  перехода приводит к уменьшению сечения канала. С уменьшением сечения канала происходит, увеличение его сопротивления между стоком и источником и снижается величина тока. Уменьшение напряжения на затворе приводит к уменьшению сопротивления канала и увеличению тока  $I_c$ . Следовательно, изменяя на затворе напряжение, можно изменять ток в цепи нагрузки.

Семейство вольтамперных характеристик полевого транзистора приведено на рис. 6.2.

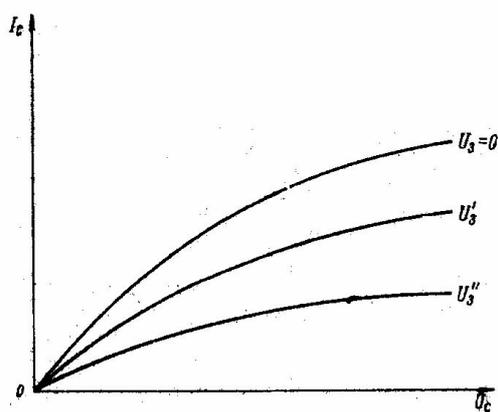


Рис. 6.2

Основные параметры полевого транзистора следующие:

$U_{\text{нас}}$  — напряжение, при котором наступает режим насыщения, т.е.  $I_c$  перестает увеличиваться;

$U_0$  — напряжение отсечки, при котором  $p-n$  переход практически перекрывает весь канал;

$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_з}$  при  $U_c = \text{const}$  — крутизна выходной характеристики;

$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_з}{\Delta I_з}$  — входное сопротивление;

$R_{\text{вых}} = R_i = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c}$  — выходное сопротивление;

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi R_K C_O} \text{ — максимальная частота;}$$

$R_K$  — среднее значение сопротивления канала;

$C_O$  — полная емкость между затвором и каналом при заземленных истоке, стоке и подложке;

$I_{C_{\text{нас}}}$  — ток насыщения при  $U_3 = 0$ ;

$R_{C_{\text{откр}}}$  — статическое сопротивление между стоком и истоком;

$I_{CO}$  — остаточный ток в стоковой цепи в режиме отсечки, зависящий от тока утечки и теплового тока.

### I. Методические указания

На рис. 6.3. представлена схема для исследования полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом (КП-103Е, канал  $p$ -типа).

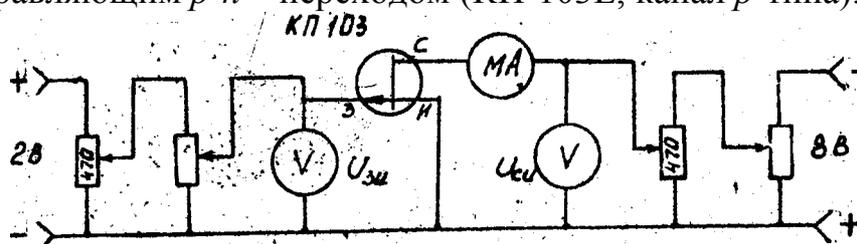


Рис. 6.3.

Схема для исследования транзистора с изолированным затвором (МДП) приведена на рис. 6.4. В схему включены источники питания, исследуемые транзисторы, измерительные приборы. При включении приборов и источников питания в схему строго соблюдать полярность.

### II. Программа работы

1. Сборка и апробирование схемы.
2. Снятие семейства статических характеристик прямой передачи полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 20^\circ C$ .
3. Измерение семейства статических выходных характеристик полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 20^\circ C$ .
4. Снятие семейства статических характеристик прямой передачи полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 50^\circ C$ .
5. Снятие семейства статических выходных характеристик полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 50^\circ C$ .
6. Снятие семейства статических выходных характеристик МДП транзи-

стора при температуре 20 и 50° С.

- Построение графиков семейства снятых характеристик при разных температурах и определение статических малосигнальных параметров ( $S, R_i, \mu$ ).

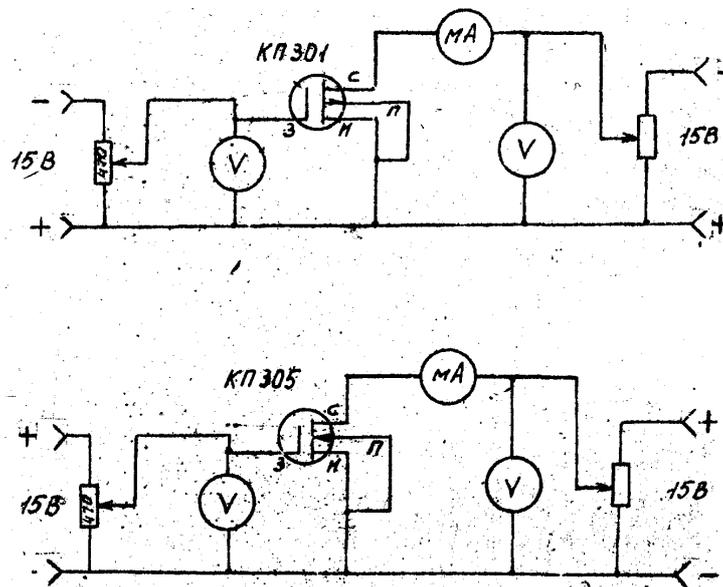


Рис. 6.4. 1 – с каналом  $p$ -типа, 2 – с каналом  $n$ -типа

- Сборка и апробирование схемы.

Схема собирается на основе монтажного шасси и комплекта соединительных проводов. Исследуемые транзисторы вынесены на отдельные платы для помещения их в термостат. Напряжение входное ( $U_{зи}$  нужной полярности) подается от источника питания (0 – 15 В) через потенциометр 470 Ом. Напряжение  $U_{си}$  подается от источника 0 – 15 В.

С разрешения преподавателя включить схему, убедиться в наличии напряжений и токов, установить пределы измерений приборов и определить цену деления. Во избежании выхода полевого транзистора из строя соблюдать строго полярность включения его в схему; не работать с отключенным затвором, не подавать отрицательное напряжение на затвор.

- Снятие семейства статических характеристик прямой передачи полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$  – переходом при температуре  $t = 20^\circ \text{C}$ .

Снимается зависимость  $I_c = f(U_{зи})$  при  $U_c = const$ . Напряжение на затворе изменяется в пределах от 0 до +2,0 В. Отсчеты берутся через интервалы, равные 0,2 В. Измерения провести для четырех постоянных значений напряжений  $U_{си}$ : -8,0; -4,0; -2,0; -1,0 В. Данные измерений заносятся в таблицу. По результатам строится график семейства  $I_c = f(U_{зи})$ .

3. Измерение семейства статистических выходных характеристик полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 20^\circ C$ .

Снимается зависимость  $I_C = f(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$ . Величина  $U_{си}$  изменяется от 0 до  $-8,0$  В. Отсчеты берутся через интервалы  $\Delta U_{си} = 1,0$  В. Измерения проводятся для трех значений напряжения на затворе  $U_{зи}$ : 0;  $+0,5$ ;  $+1,0$  В. Данные измерений заносятся в таблицу и по результатам строится график семейства  $I_C = f(U_{си})$ .

4. Снятие семейства статических характеристик прямой передачи полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 50^\circ C$ .

Повторить п. 2 для  $t = 50^\circ C$ .

5. Снятие семейства статистических выходных характеристик полевого транзистора с управляющим  $p-n$  – переходом при температуре  $t = 50^\circ C$ .

Повторить п. 3 для  $t = 50^\circ C$ .

6. Снятие семейства статических выходных характеристик МДП транзистора при температуре  $20$  и  $50^\circ C$ .

Снять и построить семейство выходных  $I_C = f(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$  характеристик МДП-транзистора при напряжениях на затворе:

$$U_3 = (U_{30} + 0,5);$$

$$U_3 = (U_{30} + 1);$$

$$U_3 = (U_{30} + 2);$$

где  $U_{30}$  – напряжение на затворе, при котором отпирается транзистор. Для каждой разновидности МДП-транзистора значения  $U_{си}$ ,  $U_{зи}$  указаны в таблице.

Напряжение между подложкой и истоком равно нулю.

Определить статические малосигнальные параметры МДП-транзистора ( $S, R_i, \mu$ ).

7. Построение графиков семейства снятых характеристик при разных температурах и определение статических малосигнальных параметров ( $S, R_i, \mu$ ).

Поместить транзистор в термостат и снять стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора при температуре  $t = 50^\circ C$ .

#### IV. Оформление отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследуемых транзисторов.
3. Схемы исследования.
4. Таблицы измерений.
5. Графики семейств снятых зависимостей при  $t = 20^\circ\text{C}$  и  $t = 50^\circ\text{C}$ .
6. Рассчитанные статические малосигнальные параметры.
7. Выводы.

Таблица 6.1.

Тип транзистора	Канал, тип	$S$ , мА/В	$C_{\text{вх}}$ , пФ	$C_{\text{пр}}$ , пФ	$U_{\text{зи}}$ , В	$U_{\text{си}}$ , В	$I_{\text{с}}$ , мА	$P$ , мВт	$t^\circ$
КП103Е	$p$ - $n$ ; $p$ -типа	0,4 - 2,4	20	8	15	10	0,3 - 2,5		-55 +85
КП301Б	МДП $p$ -типа	1,0	3,5	1	-20	20	15	200	-40 +70
КП305Д	МДП с изолированным затвором и встроенным каналом $n$ -типа	5,2 - 10,5	5	0,8	-1 - +2	15	15	150	-60 +125
КП305Е	-----	4 - 8	5	0,8	-1 - +2	15	15	150	---
КП305Ж	-----	5,2 - 10,5	5	0,8	-1 - +2	15	15	150	---
КП305И	-----	4 - 10,5	5	0,8	-3,5 - 0	15	15	150	---

#### V. Контрольные вопросы и задания

1. Принцип действия полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$  - переходом.
2. Принцип работы МДП – транзистора с индуцированным каналом.
3. Отличие в управлении выходным током биполярного и полевого транзисторов.
4. Параметры полевых транзисторов.
5. Энергетическая диаграмма металла и  $n$  – полупроводника.
6. Энергетическая диаграмма металла и  $p$  – полупроводника.
7. Выходные характеристики полевых транзисторов, их отличие от выходных характеристик биполярных транзисторов.
8. Влияние полярности напряжения  $U_{\text{зи}}$  на режим работы МДП – транзистора со встроенным каналом.
9. Характеристика прямой передачи полевого транзистора.
10. Характеристика прямой передачи МДП – транзистора со встроенным каналом.
11. Принцип работы МДП – транзистора со встроенным каналом.
12. Влияние подложки на работу МДП – транзистора.

## VI. Полевые транзисторы

1. На чем основано управление током в полевом транзисторе?

- а) на изменении ширины перехода и сечения канала при изменении входного напряжения;
- б) на изменении сопротивления канала вследствие изменения концентрации инжектированных носителей;
- в) на изменение емкости перехода.

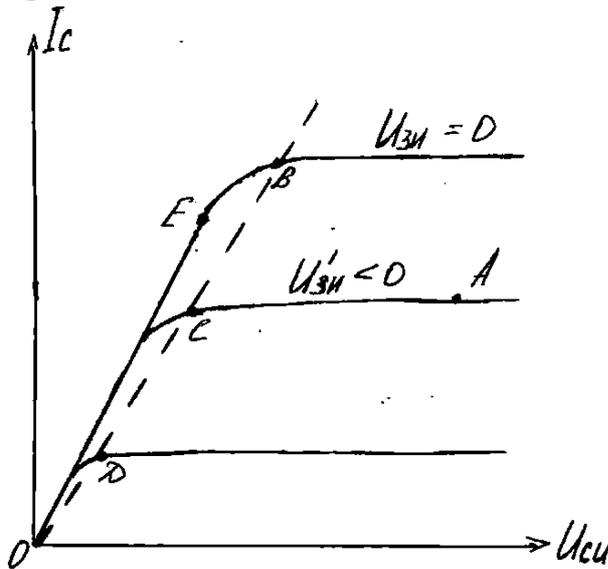
2. Какой из выводов транзистора называется “затвором”?

- а) один из выводов, расположенный со стороны широкой части канала;
- б) вывод от перехода транзистора;
- в) один из выводов, расположенный со стороны узкого канала.

3. При каком напряжении затвор-исток транзистора ток становится равным нулю?

- а) при  $U_{зи} = 0$ ;
- б) при  $U_{зи} = U_{сз}$ ;
- в) при  $U_{зи}$  отрицательном, равном по абсолютной величине напряжению насыщения.

4. Напряжение какой точки выходных характеристик называется напряжением насыщения?



- а) А;
- б) В;
- в) С;
- г) Д;
- д) В, С, Д.

5. Почему при напряжениях  $U_{си}$  транзистора, больших напряжения насыщения, ток транзистора практически не изменяется?

- а) при больших напряжениях  $U_{си}$  прекращается инжекция носителей из перехода;
- б) из-за образования запирающего слоя около истока;
- в) из-за резкого уменьшения сечения канала в области стока.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОМОЩНЫХ ТИРИСТОРОВ

#### Цель работы

1. Изучение принципа действия, снятие вольт-амперных характеристик тиристора.

#### Краткие теоретические сведения.

Тиристоры - это приборы, называемые также четырёхслойными  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структурами, состоят из двух слоёв полупроводников с  $n$ -проводимостью и двух слоёв с  $p$ -проводимостью и трёх электронно-дырочных переходов, крайние из которых называются эмиттерными, средний переход - коллекторным. Внутренние области структуры, лежащие между переходами, называются базами. Электрод, обеспечивающий электрическую связь с внешней  $n$ -областью, называется катодом, а с внешней  $p$ -областью анодом.

В простейшем случае напряжение от внешней батареи подводится лишь к катоду и аноду. Такой прибор - неуправляемый переключатель - называют диод-тиристор (динистор). Управляемый по анодному из средних электродов (управляющему электроду) прибор называют триод-тиристором (тринистор) (рис. 7.1).

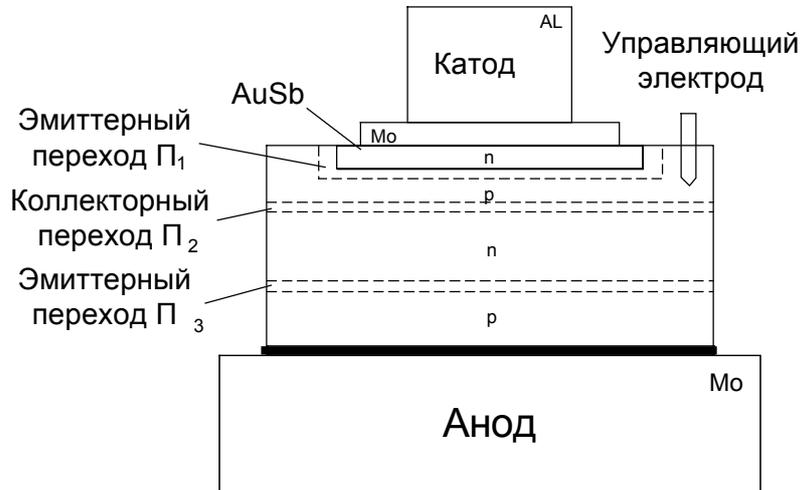


Рис. 7.1

И, наконец, прибор с выводами от всех четырех электродов, управляемые за счет подачи напряжения на оба средних электрода, называют тетрод-тиристором. Изготавливают тиристорные структуры из кремния.

На рис. 7.2 показаны вольт-амперные характеристики тиристора. На них можно отметить четыре основные области:

область 1, где на анод подаётся прямое напряжение, величина которого может достигать в некоторых типах приборов тысячи и более Вольт. Ток прибора очень мал, порядка микроампер;

область 2, где тиристор обладает отрицательным сопротивлением;

область 3, где напряжение анода положительно и величина его не превосходит 1-2 вольт, ток же может достигать сотен ампер;

область 4, где напряжение анода отрицательно и может достигать в некоторых типах приборов тысячи вольт, ток при этом мал, порядка микроампер;

при дальнейшем повышении напряжения наступает пробой.

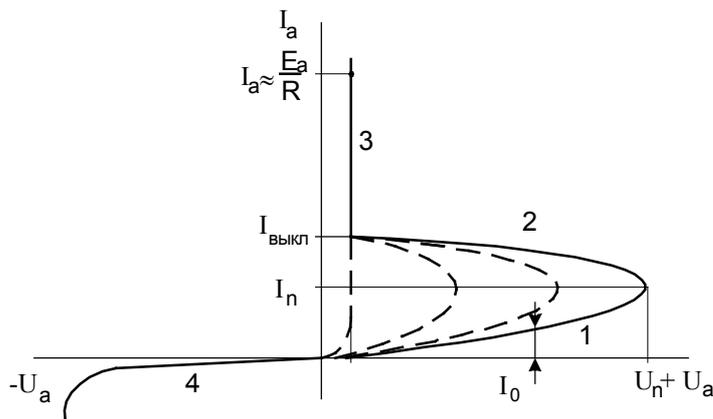


Рис. 7.2

Напряжение  $U_n$ , при котором тиристор переходит из режима 1 в режим 2, называется напряжением переключения. Оно зависит от тока управляющего электрода  $I_y$ : чем больше  $I_y$ , тем ниже напряжение переключения.

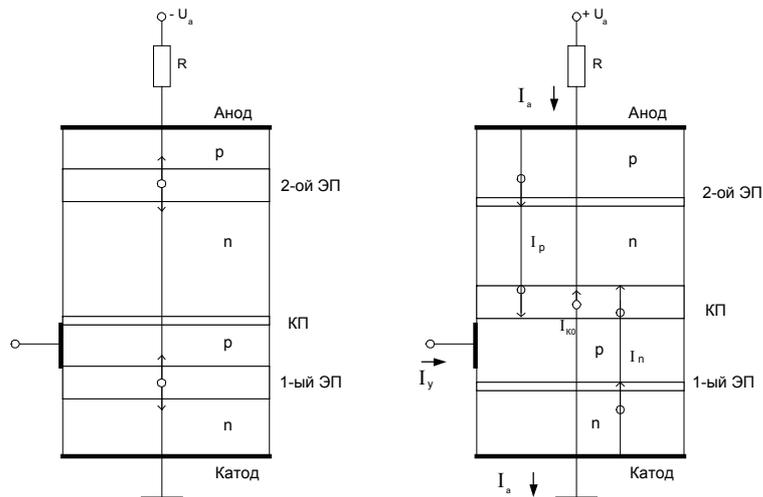


Рис. 7.3

Своеобразный вид вольт-амперных характеристик тиристора определяется процессами токопрохождения в  $p-n-p-n$  — структуре. При подаче

обратного напряжения на анод тиристора коллекторный переход оказывается смещённым в прямом направлении, а оба эмиттерных перехода смещается в обратном направлении (рис. 3а).

Вольт-амперная характеристика тиристора в этом режиме (см. область 4 на рис. 7.2) является по существу характеристикой двух последовательно соединённых электронно-дырочных переходов, включённых в обратном направлении. Ток тиристора в этом режиме представляет собой ток экстракции и термогенерации не основных носителей эмиттерных переходов и величина не значительна. При некоторой величине обратного напряжения происходит пробой эмиттерных переходов, ток тиристора резко растёт.

При подаче на анод тиристора прямого напряжения коллекторный переход  $\Pi_2$  оказывается включённым в обратном направлении, а эмиттерные переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  - в прямом (рис. 7.3 б). Почти всё внешнее напряжение падает на коллекторном переходе. Через прибор течёт ток, равный  $I_{\text{ко}}$  запертого коллекторного перехода. Величина этого тока очень мало растёт с увеличением напряжения (участок 1 на рис. 7.2). В этом режиме концентрация основных носителей в базах с увеличением напряжения меняется очень мало. Приток дырок в  $n$ -базу из  $p$ -эмиттера (процесс инжекции) примерно равен дальнейшему переходу дырок через коллекторный переход в  $p$ -базу.

Избыточные дырки в  $p$ -базе уходят через эмиттерный переход  $\Pi_3$  в  $n$ -эмиттер и частично компенсируются встречным потоком электронов из эмиттера. Условие движения этих электронов подобно только что описанному для дырок. При увеличении внешнего напряжения до значения  $U_{\text{п}}$  рассмотренный процесс нарушается чаще всего вследствие того, что обратное напряжение на коллекторном переходе достигает величины, соответствующей развитию ударной ионизации.

Электроны, движущиеся из  $p$ -базы в  $n$ -базу, и дырки, перемещающиеся в обратном направлении, под влиянием электрического поля в коллекторе приобретают энергию, достаточную для ударного разрушения валентных связей. В области перехода  $\Pi_2$  образуются новые пары подвижных носителей заряда. Вновь образовавшиеся электроны выбрасываются полем коллекторного перехода в  $n$ -базу, а дырки – в  $p$ -базу. В результате концентрации основных носителей в обеих базах начинает увеличиваться. Дырки в  $p$ -базе, подходя к переходу  $\Pi_3$ , нейтрализуют там отрицательный заряд неподвижных ионов, что, естественно приводит к снижению потенциального барьера. Поток электронов из  $n$ -эмиттера в  $p$ -базу увеличивается, растёт плотность потока электронов через коллекторный переход, а с ним и число вновь образуемых пар зарядов.

Подобный процесс наблюдается и в эмиттерном переходе  $\Pi_1$ , потенциальный барьер которого снижается за счёт увеличения электронов в базе.

Процесс развивается лавинообразно, коллекторный переход насыщается инжектированными носителями, ток через него, а значит, и через прибор резко увеличивается (участок 2 рис. 7.2). Дальнейший рост тока сопровождается неизбежным падением напряжения на переходе  $\Pi_2$  из-за увеличения в его области числа подвижных носителей (участки 2, 3 рис. 7.2).

Таким образом, ВАХ прибора содержит участок 2, характеризующийся отрицательным сопротивлением.

### Основные параметры тиристора.

В качестве параметров этого прибора используют токи и напряжения, соответствующие характерным токам зависимости  $I(U)$  (рис. 7.2.), а также временные интервалы перехода из одного режима работы в другой:

- ток  $I_0$ ;
- напряжение переключения  $U_{\Pi}$ ;
- ток  $I_{\text{вкл}}$ ;
- напряжение  $U_{\text{выкл}}$ ;
- время включения  $\tau_{\text{вкл}}$ ;
- дифференциальное сопротивление  $r$ .

### I. Методические указания

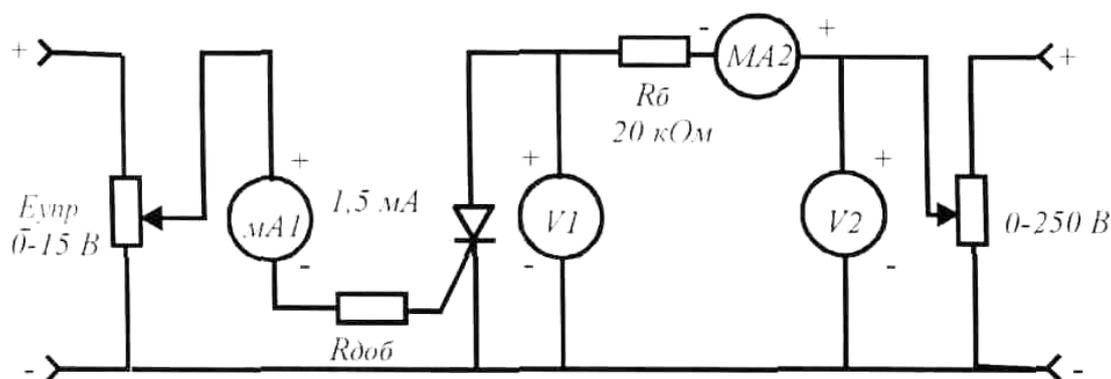


Рис. 7.4.

Для снятия вольт-амперных характеристик тиристора используется схема, приведенная на рисунке. Схема содержит источник питания  $E_{\text{пит}}$  и источник управляющего напряжения  $E_{\text{упр}}$ . Напряжение на тиристоре и ток тиристора измеряются приборами  $V1$  и  $mA2$ . Величина управляющего тока измеряется прибором  $mA1$ . Вольтметр  $V2$  служит для контроля величины выходного напряжения источника питания.

## II. Программа работы.

1. Сборка и апробирование схемы.
2. Снятие прямых ветвей вольт-амперных характеристик тиристора КУ101И для различных значений тока управляющего электрода.
3. Построение графиков вольт-амперных характеристик.

1. Сборка и апробирование схемы.

Схема собирается на основе монтажного шасси и комплекта соединительных проводов. Собранная схема включается с разрешения преподавателя, проверяется наличие напряжений и токов, устанавливаются пределы измерения приборов, и определяется цена делений.

2. Снятие прямых ветвей вольт-амперных характеристик тиристора  $I = f(U)$  при  $I_{упр} = const$ .

Значение  $I_{упр}$  задается преподавателем. При  $I_{упр} = 0$  источник управляющего напряжения отключается. Увеличивая напряжение питания тиристора ( $V2$ ), фиксируют напряжение на тиристоре и значение тока, протекающего через него, отмечая напряжение включения. После включения тиристора напряжение скачкообразно уменьшается до величины  $U$ . Дальнейшее увеличение напряжения источника питания практически не изменяет напряжение на тиристоре, а лишь увеличивает ток. Данные измерений заносят в таблицу.

При снятии вольт-амперных характеристик тиристора для заданного преподавателем значения управляющего напряжения, и процесс измерений, описанный выше, повторяется.

3. Построение графиков вольт-амперных характеристик.

По результатам измерений строятся графики вольт-амперных характеристик тиристора  $I = f(U)$ .

## III. Содержание отчета

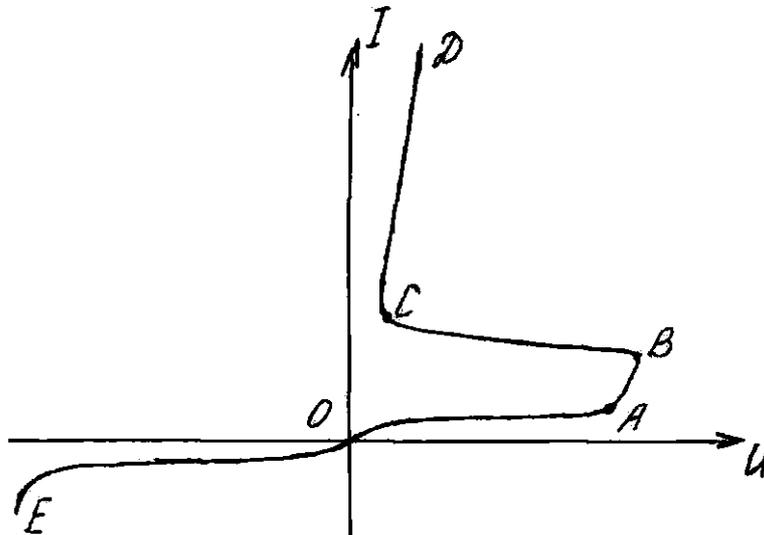
1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого тиристора.
3. Схему исследования тиристора.
4. Таблицы измерений.
5. Графики снятых вольт-амперных характеристик тиристора.
6. Построенный по результатам измерений график зависимости напряжения от величины управления током.

#### IV. Контрольные вопросы и задания

1. Принцип работы тиристора.
2. Энергетическая диаграмма тиристора.
3. Объясните характерные участки вольт-амперной характеристики тиристора.
4. Как влияет  $I_{упр}$  на вольт-амперную характеристику тиристора.
5. Нарисовать схему включения триодного тиристора.
6. Параметры тиристорov.
7. Как влияет температура на характеристики тиристора?
8. Динамические характеристики тиристора.
9. Где находят применение тиристоры.
10. Объясните назначения электродов тиристора.
11. Что является причиной появления на характеристике тиристора участка с отрицательным внутренним сопротивлением?
12. Поясните основные физические процессы, протекающие в тиристоре.

#### VII. Тиристор

1. Чем объяснить малое значение тока тиристора на участке OA его характеристики?



- а) закрыты крайние переходы структуры;
- б) закрыт средний переход структуры;
- в) отсутствует инжекция неосновных носителей в базовой области тиристора.

2. Чем объяснить малое значение тока на участке OE характеристики?

- а) закрыт средний переход;

- б) закрыты оба эмиттерных перехода;
- в) недостаточно велико напряжение на сопротивлениях объема базовых областей тиристора.

3. Как смещены переходы тиристора в режиме, соответствующем участку СД?

- а) крайние переходы открыты, а средний переход открыт;
- б) все переходы открыты;
- в) все переходы закрыты.

4. Можно ли перевести тиристор (тринистор) в закрытое состояние управляющим током?

- а) нельзя;
- б) можно, если понизить управляющий ток до нуля;
- в) можно, если подать отрицательный импульс управляющего тока.

5. Каково время включения тринистора?

- а) порядка долей микросекунды и единиц микросекунды;
- б) порядка десятков микросекунд;
- в) порядка единиц миллисекунд.