

**Министерство Образования Украины**  
**Донецкий национальный технический университет**

**Методические указания**  
к выполнению лабораторных работ  
по курсу “Электроника”

(для студентов специальности 6.090902  
“Научные, аналитические и экологические приборы и системы”)  
№ 6093

Розглянуто на засіданні кафедри  
“Електронна техніка”  
Протокол № 3 від 20.11.2006р.

Затверджено на засіданні навчально-видавничої ради ДонНТУ  
Протокол № 6 від 28.02.2007р.

**Донецк 2006**

## **УДК**

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электроника» для студентов специальности 6.090902 “Научные, аналитические и экологические приборы и системы” /Сост. О.Г. Ликов, В.П. Тарасюк, О.О. Довженко, - Донецк: ДоНТУ, 2006 – 30 с. – русский язык/

Приведены цели и задачи лабораторных работ, порядок их выполнения, требования к содержанию и оформлению отчетов, задания на лабораторные работы, методические указания к их выполнению, а также основные теоретические положения.

**Составили:** А.Г. Лыков, ассистент  
В.П. Тарасюк, канд. техн. наук, доцент  
О.А. Довженко, студент

**Ответственный за выпуск:** А.А.Зори, д.т.н., профессор

**Рецензент:** В.В. Червинский, к.т.н., доцент

## Содержание

	Стр.
Введение	4
Лабораторная работа № 1. Исследование выпрямительных диодов	5
Лабораторная работа № 2. Исследование стабилитронов	10
Лабораторная работа №3. Исследование биполярного транзистора	13
Лабораторная работа № 4. Исследование полевого транзистора с управляющим р-п переходом	19
Лабораторная работа № 5. Исследование полевых транзисторов с изолированным затвором	23
Лабораторная работа № 6. Исследование тиристорov	28
Рекомендуемая литература	32

## Введение

Настоящие методические указания предназначены для студентов специальности "Научные, аналитические и экологические приборы и системы" (6.090902) и являются руководством к выполнению лабораторных работ по курсу "Электроника". Цель этого курса – изучить физические принципы полупроводниковых приборов, их устройства, основные характеристики и параметры.

Лабораторные работы начинаются с краткого изучения теоретических основ работы устройства. Методики выполнения лабораторных работ и анализ полученных результатов, предусматривает решение студентом ряда задач, содержащих элементы НИРС.

Подготовка к лабораторным работам должна осуществляться по лекционному материалу и рекомендованной литературе. При подготовке к лабораторным занятиям студент должен твердо уяснить цель и порядок выполнения работы, теоретические основы изучаемого устройства, его назначение, характеристики и параметры.

Качество подготовки к лабораторным занятиям проверяется преподавателем путем опроса студентов перед лабораторными работами. В соответствии с приведенными в описании лабораторных работ требованиями каждый студент составляет отчеты по работам.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## Исследование выпрямительных диодов

**Цель работы:** изучить конструкцию и принцип действия полупроводниковых диодов, снять вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов и экспериментально определить их параметры.

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним электрическим p-n - переходом и двумя выводами.

По функциональному назначению диоды делят на выпрямительные, универсальные, импульсные, детекторные, переключающие, стабилитроны (опорные), туннельные, фотодиоды и др. В частности, выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в ток постоянного направления.

Выпрямительные диоды, как и большинство полупроводниковых диодов, выполняют на основе несимметричных p-n - переходов. Низкоомную область диодов называют эмиттером, а высокоомную - базой. Для создания переходов с вентильными свойствами используют p-n-, p-i-, n-i- переходы, а также переходы металл - полупроводник.

Идеализированная вольт-амперная характеристика диода при прямом включении описывается выражением:

$$I_{\text{пр}} = I'_T - I_T = I_T \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1)$$

где  $I_T$  - тепловой или обратный ток насыщения;

$I'_T = I_T \cdot e^{\frac{u}{\varphi_T}}$  - ток диффузии основных носителей заряда.  $I_T$  за счет снижения потенциального барьера увеличивается в  $e^{\frac{u}{\varphi_T}}$  раз и является функцией приложенного напряжения (рисунки 1.1).

При обратном включении диода потенциальный барьер p-n – перехода повышается. Тепловой ток, вызванный движением неосновных носителей заряда, остается неизменным, а ток, вызванный диффузией основных носителей заряда, уменьшается по экспоненциальному закону.

Результирующий ток p - n – перехода будет равен:

$$I_{\text{пр}} = I_T^{\text{с}} - I_T = I_T \cdot \left( e^{\frac{u}{\Phi_T}} - 1 \right)$$

В реальных диодах прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики отличаются от идеализированной. Это обусловлено тем, что тепловой ток  $I_T$  при обратном включении составляет лишь часть обратного тока диода. При прямом включении существенное влияние на ход вольт-амперной характеристики оказывает падение напряжения на сопротивлении базы диода (рисунок 1.1).

С учетом падения напряжения на базе диода уравнение прямой ветви вольт-амперной характеристики будет иметь вид:

$$I = I_T \cdot \left( e^{\frac{U - I \cdot r_b}{\Phi_T}} - 1 \right)$$

где  $r_b$  - омическое сопротивление базы диода.

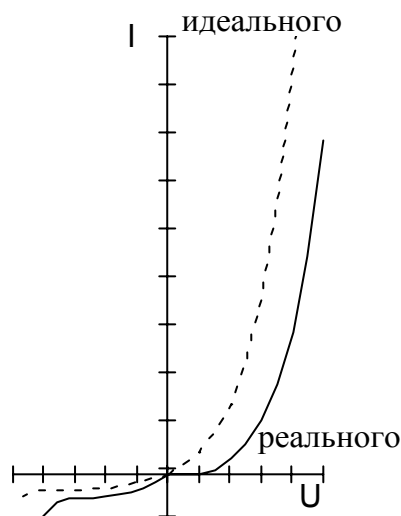


Рисунок 1.1 – Вольт-амперная характеристика идеального и реального диодов

Используя вольт-амперную характеристику диода можно построить его схему замещения. Для этого вольт-амперную характеристику аппроксимируют отрезками прямых линий (количество отрезков желательно выбирать не более двух) и для каждого участка аппроксимации составляют линейную электриче-

скую схему замещения. Для диода (рисунок 1.2) участки аппроксимации описываются уравнениями:

$$\text{Участок 1: } i = 0; \quad U \leq E_0;$$

$$\text{Участок 2: } U = E_0 + i \cdot R_d; \quad U \geq E_0,$$

где  $R_d$  - дифференциальное сопротивление диода.

Соответственно, схемы замещения имеют вид, показанный на рисунке 1.3.

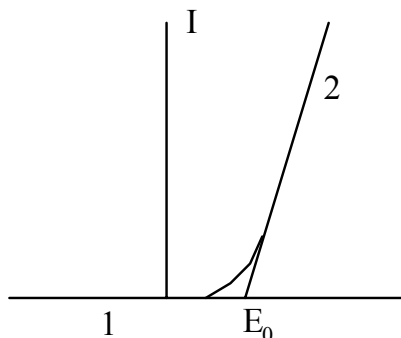


Рисунок 1.2 – Аппроксимация вольт-амперной характеристики диода

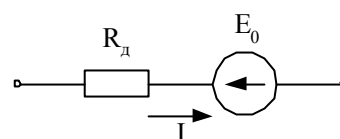


Рисунок 1.3 – Схема замещения диода

При увеличении обратного напряжения может произойти пробой р - n - перехода диода. Под пробоем р-п - перехода понимают значительное уменьшение обратного сопротивления, при этом возрастает обратный ток при увеличении обратного напряжения.

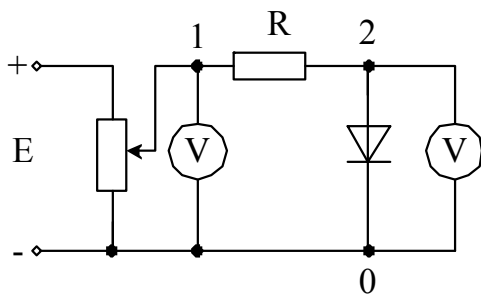
Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой.

В основе туннельного пробоя лежит туннельный эффект, т.е. "просачивание" электронов через потенциальный барьер, высота которого больше, чем энергия носителей заряда.

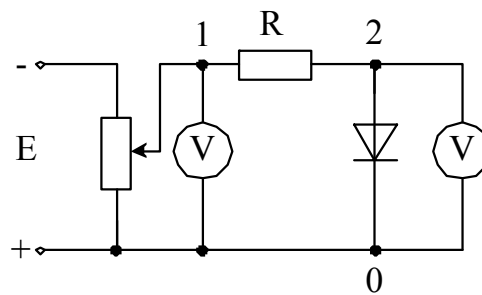
Тепловой пробой возникает в результате разогрева р-п -перехода, когда количество теплоты выделяемой током в р-п - переходе, больше количества теплоты, отводимой от него.

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, которая происходит тогда, когда напряженность электрического поля, вызванная обратным напряжением, достаточно велика. При лавинном пробое напряжение на р-п -переходе остается постоянным.

Тепловой пробой р-п - перехода необратимый и приводит к разрушению перехода. Туннельный и лавинный пробой являются обратимыми.



а) прямое включение



б) обратное включение

Рисунок 1.4 – Схемы для снятия вольт-амперной характеристики выпрямительных диодов

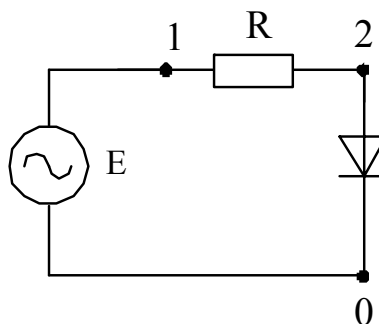


Рисунок 1.5 – Схема для исследования работы диода при действии на входе переменного синусоидального сигнала

### Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде собрать схему, представленную на рисунке 1.4а.
2. Изменяя напряжение  $E$  от 0 до 5 В снять и построить вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого выпрямительных диодов, включенных в прямом направлении. Определение тока производится косвенным методом:

$$I = \frac{U_{12}}{R} = \frac{U_{10} - U_{20}}{R}.$$

Величина сопротивления резистора  $R$  составляет 100 Ом.

Полученные результаты занести в таблицу 1.1.

3. На лабораторном стенде собрать схему, представленную на рисунке 1.4б.
4. Снять и построить вольт-амперную характеристику германиевого и кремниевого выпрямительных диодов, включенных в обратном направлении.



Таблица 1.1 – Данные для построения вольт-амперной характеристики выпрямительного диода

$U_{10}$						
$U_{20}$						
$I$						

5. Исследовать работу выпрямительного диода при действии на входе переменного синусоидального сигнала. Для этого собрать схему, представленную на рисунке 1.5.

6. Установить заданную амплитуду выходного напряжения генератора  $E_m$ . Снять осциллограммы напряжений на резисторе  $R$  и диоде. Измерить среднее и действующее значения напряжений на резисторе  $R$  и диоде.

#### Содержание отчета.

1. Схемы для снятия вольт-амперных характеристик, данные эксперимента, построенные вольт-амперные характеристики диодов.
2. Определенные по данным эксперимента параметры эквивалентных схем замещения выпрямительных диодов. Схемы замещения.
3. Осциллограммы напряжения и тока диода при действии на входе схемы переменного синусоидального сигнала, экспериментальные и теоретические значения напряжения и тока диода.
4. Выводы

#### Контрольные вопросы.

1. Как изменяются характеристики диодов при изменении температуры?
2. В чем отличие вольт-амперных характеристик диодов на основе кремния и германия?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Исследование стабилитронов

**Цель работы:** изучить конструкцию и принцип действия стабилитрона, снять вольт-амперные характеристики стабилитрона, экспериментально определить параметры.

Полупроводниковые стабилитроны, называемые иногда опорными диодами, предназначены для стабилизации напряжений. Их работа основана на использовании явления электрического пробоя р-п-перехода при включении диода в обратном направлении.

Механизм пробоя может быть туннельным, лавинным или смешанным. У низковольтных стабилитронов (с низким сопротивлением базы) более вероятен туннельный пробой. У стабилитронов с высокоомной базой пробой носит лавинный характер. Материалы, используемые для создания р-п-перехода стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. При этом напряженность электрического поля в р-п-переходе значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в р-п-переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой. В этом режиме нагрев диода не носит лавинообразного характера. Поэтому электрический пробой не переходит в тепловой.

На рисунке 2.1 приведена вольт-амперная характеристика стабилитрона.

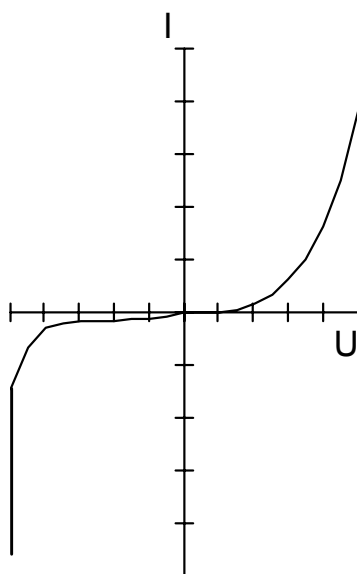


Рисунок 2.1 - Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Основными параметрами стабилитронов являются:

- напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ;
- минимальный  $I_{ст\ min}$  и максимальный  $I_{ст\ max}$  токи стабилизации;
- дифференциальное сопротивление  $r_{диф}$ :

$$r_{диф} = \left. \frac{\partial U_{ст}}{\partial I_{ст}} \right|_T$$

- температурный коэффициент напряжения стабилизации  $\alpha_{ст}$ :

$$\alpha_{ст} = \frac{1}{U_{ст}} \cdot \left. \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta T} \right|_{I_{ст}=\text{const}}$$

Пробойный режим не связан с инжекцией неосновных носителей. Поэтому в стабилитроне инерционные явления, связанные с накоплением и рассасыванием носителей, при переходе из области пробоя в область запираания и обратно практически отсутствуют. Это позволяет использовать их в импульсных схемах в качестве фиксаторов уровня и ограничителей.

Для уменьшения температурного коэффициента напряжения стабилизации последовательно со стабилитроном включается дополнительный диод.

Включение стабилитронов в схему стабилизации выходного напряжения показано на рисунке 2.2.

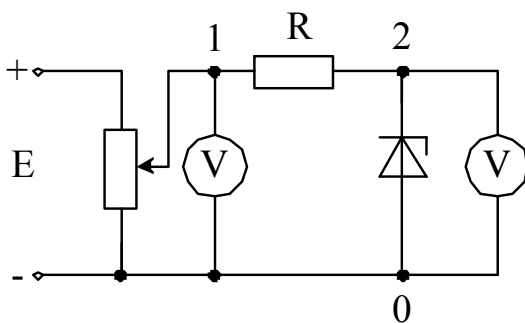


Рисунок 2.1 - Схема для снятия вольт-амперной характеристики стабилитрона

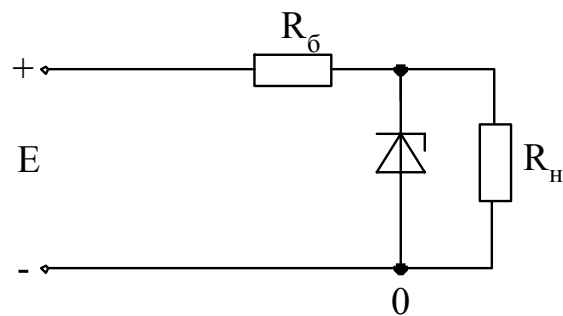


Рисунок 2.2 – Схема стабилизации выходного напряжения

### Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде собрать схему, представленную на рисунке 2.1.
2. Изменяя напряжение  $E$  от 0 до 9 В снять и построить вольт-амперную характеристику стабилитрона. Определение тока производится косвенным методом:

$$I = \frac{U_{12}}{R} = \frac{U_{10} - U_{20}}{R}.$$

Величина сопротивления резистора  $R$  составляет 100 Ом.

Полученные результаты занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Данные для построения вольт-амперной характеристики стабилитрона

$U_{10}$						
$U_{20}$						
$I$						

3. Снять и построить вольт-амперную характеристику стабилитрона, включенного в прямом направлении.
4. По вольт-амперной амперной характеристике определить основные параметры стабилитрона: напряжение стабилизации, минимальный и максимальный токи стабилизации, дифференциальное сопротивление.

### Содержание отчета

1. Схема эксперимента, данные эксперимента, построенная вольт-амперная характеристика стабилитрона.
2. Определенные по данным эксперимента параметры стабилитрона.
3. Для схемы стабилизации выходного напряжения (рисунок 2.2), используя полученные параметры стабилитрона, определить возможные пределы изменения входного напряжения (значения сопротивлений  $R_b$  и  $R_n$  задаются индивидуально).
4. Выводы

### Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы стабилитрона?
2. Назовите основные параметры стабилитрона.
3. Как изменяются характеристики стабилитрона при изменении температуры?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Исследование биполярного транзистора

**Цель работы:** познакомиться с конструкцией и принципом действия транзистора, экспериментально снять вольт-амперные характеристики и определить параметры схемы замещения транзистора.

Биполярный транзистор (БПТ) – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими электрическими p-n переходами и тремя выводами, усилительные свойства которых обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Они состоят из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводности различных типов. В зависимости от типа электропроводности наружных слоев различают транзисторы **p-n-p** и **n-p-n** типов (рисунок 3.1).

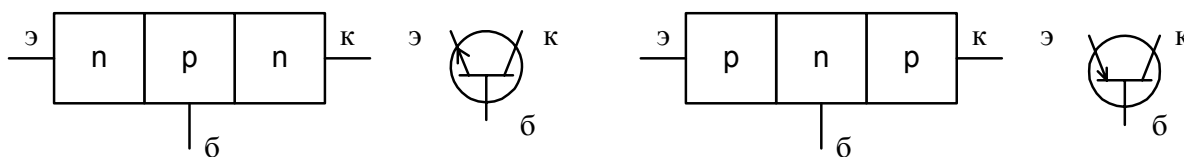


Рисунок 3.1 – Типы биполярных транзисторов

Одну из крайних областей монокристалла транзистора, предназначенную для инжектирования носителей в базу, называют эмиттером, а p-n – переход, прилегающий к нему – эмиттерным. Промежуточную область называют базой. Другую крайнюю область, предназначенную для экстрагирования неосновных носителей заряда из базы, называют коллектором, а переход, прилегающий к нему – коллекторным.

При изготовлении транзисторов эмиттер и коллектор выполняют низкоомными, а базу – относительно высокоомной. При этом удельное сопротивление области эмиттера несколько меньше, чем области коллектора. Ширина базы, находящейся между эмиттерным и коллекторным p-n – переходами, называют активной. Взаимодействие между двумя p-n - переходами будет существовать

только тогда, когда активная ширина базы будет много меньше диффузионной длины неосновных носителей. В этом случае основная часть носителей пролетает от эмиттера к коллектору.

Каждый из переходов транзистора может быть включен либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают следующие режимы работы биполярного транзистора:

- **активный режим** - режим, при котором один из переходов смещен в прямом направлении, а другой - в обратном направлении. Соответственно в нормальном активном режиме в прямом направлении смещен эмиттерный переход, в обратном направлении смещен коллекторный переход. Этот режим используется в большинстве усилительных и импульсных схем.

При инверсном включении эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный – в прямом. Данное включение биполярного транзистора практического применения не нашло.

- **режим отсечки** – режим, при котором оба перехода смещены в обратном направлении. В этом режиме транзистор находится в запертом состоянии, его сопротивление максимально, а токи электродов минимальны. Он широко используется в импульсных устройствах, где биполярный транзистор выполняет функции ключа.

- **режим насыщения** – режим, при котором оба перехода смещены в прямом направлении. При этом падение напряжения на транзисторе минимально, а токи, протекающие через него, достаточно большие.

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три основные схемы включения транзистора : с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК).

Для любой схемы включения транзистора справедливо следующее соотношение:

$$I_э = I_к + I_б$$

Таким образом, транзистор представляет собой управляемый прибор, его коллекторный ток зависит от тока эмиттера. Учитывая то, что мощность, затрачиваемая для создания эмиттерного тока, невелика, а мощность рассеиваемая в коллекторной цепи, значительна, вследствие большого сопротивления перехо-

да, транзистор может управлять значительной мощностью в коллекторной цепи с помощью небольших мощностей в эмиттерной цепи.

Рассматривая транзистор как четырехполюсник, его можно описать различными системами уравнений. Наибольшее распространение получили три системы:

- система z-параметров:

$$U_1 = z_{11} \cdot I_1 + z_{12} \cdot I_2$$

$$U_2 = z_{21} \cdot I_1 + z_{22} \cdot I_2$$

- система H-параметров:

$$U_1 = h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2$$

- система Y- параметров:

$$I_1 = y_{11} \cdot U_1 + y_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = y_{21} \cdot U_1 + y_{22} \cdot U_2$$

Наиболее часто применяются системы H - параметров, т.к. они легко определяются экспериментальным путём и имеют конкретный физический смысл:

$$h_{11} = \left. \frac{\partial U_1}{\partial i_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad \text{- входное сопротивление транзистора при коротком замыкании со стороны выхода;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \right|_{i_2 = \text{const}} \quad \text{- коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе со стороны входа;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad - \text{ коэффициент передачи по току при коротком замы-}$$

кании со стороны выхода;

$$h_{22} = \left. \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad - \text{ выходная проводимость транзистора при холостом хо-}$$

де со стороны входа.

Эквивалентная схема транзистора в H-параметрах представлена на рисунке 3.2.

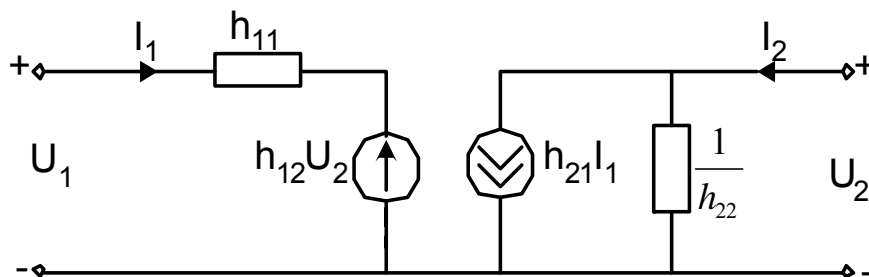


Рисунок 3.2 - Эквивалентная схема транзистора в H-параметрах

Значения H-параметров зависят от схемы включения транзистора.

Наряду со схемами замещения в Z, Y и H - параметрах широко применяется и физическая схема замещения, параметры которой непосредственно определить невозможно, поэтому их определяют путём пересчёта по известным. Между всеми параметрами можно установить взаимосвязь, используя эквивалентность четырёхполюсников моделирующих транзистор для различных схем включения.

Для каждой схемы включения транзистора выделяют два основных типа вольт-амперных характеристик (рисунки 3.3 и 3.4):

- входные  $I_1 = f(U_1)$  при  $U_2 = \text{const}$
- выходные  $I_2 = f(U_2)$  при  $I_1 = \text{const}$ .



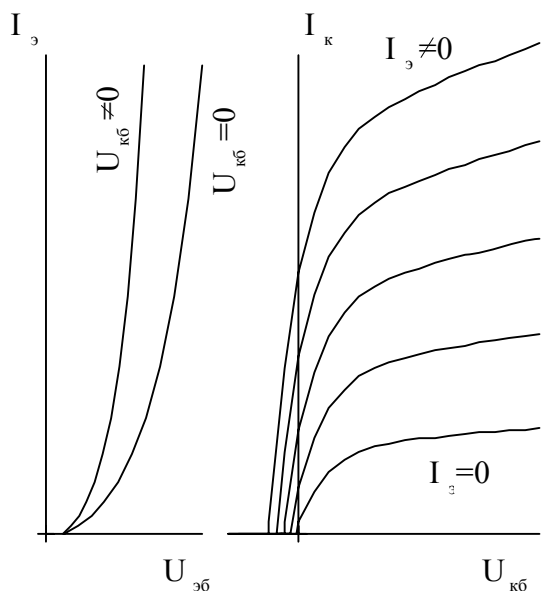


Рисунок 3.3 - Входные и выходные характеристики транзистора для схемы с ОБ.

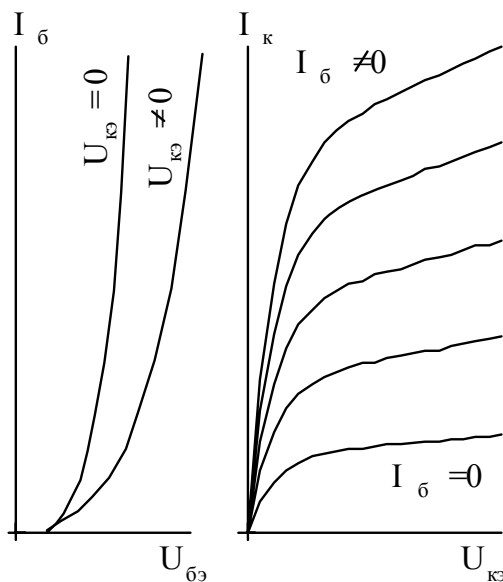


Рисунок 3.4 - Входные и выходные характеристики транзистора для схемы с ОЭ.

### Порядок выполнения работы.

1. На лабораторном стенде собрать схему для снятия вольт - амперных характеристик биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером (рисунок 3.5).

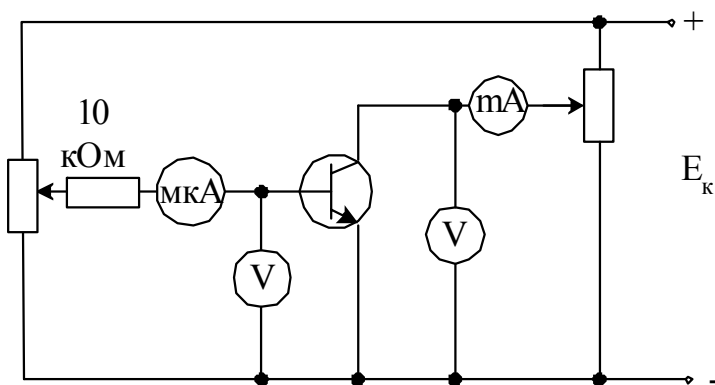


Рисунок 3.5 – Схема для снятия вольт-амперных характеристик биполярного транзистора

2. Снять семейство входных характеристик транзистора  $I_б = f(U_бэ)$  при  $U_кэ = 0В ; +2В ; +5В ; +10В$ ;

3. Снять семейство выходных характеристик транзистора  $I_k = f(U_{кэ})$  при  $I_b = 0 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200$  [мкА]
4. Экспериментальным путем определить Н-параметры транзистора в заданной точке покоя. Для этого установить заданные значения тока базы  $I_b$  и напряжения коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$ , измерить ток коллектора  $I_k$  и напряжение база-эмиттер  $U_{бэ}$ . Занести полученные значения в первую строку таблицы 3.1.

Таблица 2.1- Данные для определения h-параметров.

№	$I_b$	$U_{бэ}$	$U_{кэ}$	$I_k$
1				
2				
3				

5. Дать приращение  $E_k$ . Установить с помощью резистора  $R_b$  значение тока базы, полученное в п. 4, снять показания приборов, заполнить вторую строку таблицы 3.1.
6. Установить с помощью резистора  $R_k$  значение напряжения  $U_{кэ}$ , полученное в п. 4, а затем дать приращение току базы  $I_b$ . Снять показания приборов и заполнить третью строку таблицы 3.1.
7. Определить приращения  $\Delta I_b$ ,  $\Delta U_{бэ}$ ,  $\Delta U_{кэ}$ ,  $\Delta I_k$  и рассчитать h- параметры транзистора по результатам измерений в пунктах 4, 5, 6.

### Содержание отчёта

1. Представить условное обозначение, цоколёвку и параметры исследуемого транзистора, взятые из справочника.
2. Представить схему рисунок 3.5, результаты измерений п.п. 2, 3 и построенные по ним входные и выходные вольт-амперные характеристики биполярного транзистора.
3. Представить таблицу, заполненную результатами измерений в п.п. 4, 5, 6.
4. Определить h - параметры по результатам эксперимента.
5. По входным и выходным характеристикам в рабочей точке теоретически определить h - параметры.
6. Представить схему замещения транзистора в h - параметрах.

## Контрольные вопросы

1. Что такое транзистор и для чего он используется?
2. Назовите схемы включения транзистора и приведите общий вид входных и выходных характеристик для каждой из схем включения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Исследование полевого транзистора с управляющим р-п переходом

**Цель работы:** экспериментально снять статические характеристики полевого транзистора и определить параметры схемы замещения транзистора.

Полупроводниковые приборы, работа которых основана на модуляции сопротивления полупроводникового материала поперечным электрическим полем, называются полевыми транзисторами.

У полевых транзисторов в создании электрического тока участвуют носители заряда только одного типа: электроны или дырки.

Полевые ( униполярные ) транзисторы бывают двух типов :

- с управляющим р-п – переходом;
- со структурной металл-диэлектрик-полупроводник (МДП — транзисторы).

Основным отличием полевого транзистора от биполярного транзистора является то, что он управляется электрическим полем, создаваемым входным напряжением.

Полевой транзистор с управляющим р-п - переходом представляет собой пластину из полупроводникового материала, имеющего электропроводность типа n или p, от концов которого сделаны два вывода - электроды стока и истока. Вдоль пластины выполнен электрический переход р-п , от которого сделан третий вывод - затвор. Внешнее напряжение прикладывают между стоком и истоком так, чтобы проходил электрический ток, а напряжение, приложенное к затвору, смещает электрический переход в обратном направлении.

Область полупроводника, расположенная под переходом называется каналом, и её сопротивление зависит от напряжения на затворе. Размеры перехода увеличиваются с повышением приложенного к нему обратного напряжения, а увеличение области, обеднённой носителями заряда, приводит к повышению электрического сопротивления канала. Электрод, от которого начинают движе-

ние основные носители заряда в канале, называют истоком, а электрод, к которому движутся - стоком.

Канал полевого транзистора может быть выполнен из полупроводника с проводимостью типа n или p, соответственно и напряжение, приложенное к затвору, будет отрицательным или положительным.

Основными характеристиками полевого транзистора являются :

- стоковые вольт-амперные характеристики:  $I_C = f(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ} = \text{const}$ ;
- стокзатворные:  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = \text{const}$ .

Внешний вид вольт-амперных характеристик полевого транзистора с управляющим p-n - переходом представлен на рисунке 4.1.

Напряжение между затвором и стоком, при котором ток стока достигает заданного низкого значения ( $I_C \Rightarrow 0$ ) называют напряжением отсечки полевого транзистора  $U_{ЗИ \text{ отс}}$ . При малых напряжениях  $U_{СИ}$  и малом токе  $I_C$  транзистор ведёт себя как линейное сопротивление. По мере роста  $U_{СИ}$  характеристика  $I_C = f(U_{СИ})$  всё сильнее отклоняется от линейной, что связано с сужением канала у стокового конца. При определённом значении тока наступает режим насыщения, при котором  $I_C$  меняется незначительно с увеличением  $U_{СИ}$ . Напряжение, при котором наступает режим насыщения, называется напряжением насыщения.

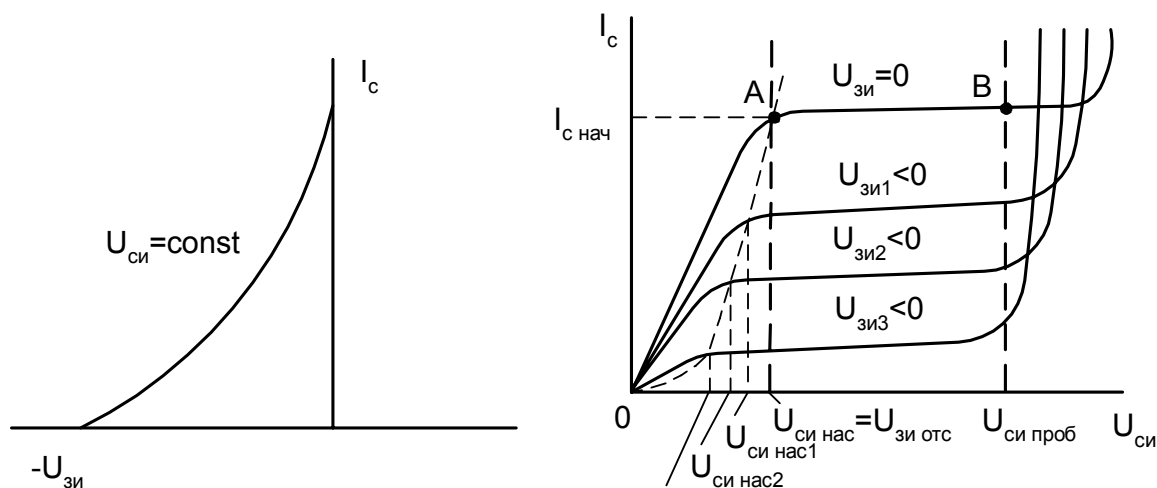


Рисунок 4.1 – Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с управляющим p-n - переходом

Так как управление полевым транзистором осуществляется напряжением на затворе, то для количественной оценки управляющего действия затвора используют крутизну характеристики:

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{СИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}$$

Усилительные свойства ПТ характеризуют коэффициентом усиления:

$$\mu = - \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_3 = \text{const}}$$

Также основным параметром полевого транзистора является дифференциальное внутреннее сопротивление:

$$R_i = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$$

Вышеуказанные параметры транзистора связаны между собой следующим соотношением:

$$\mu = S \cdot R_i$$

Эквивалентная схема замещения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом, учитывающая частотные свойства транзистора представлена на рисунке 4.2

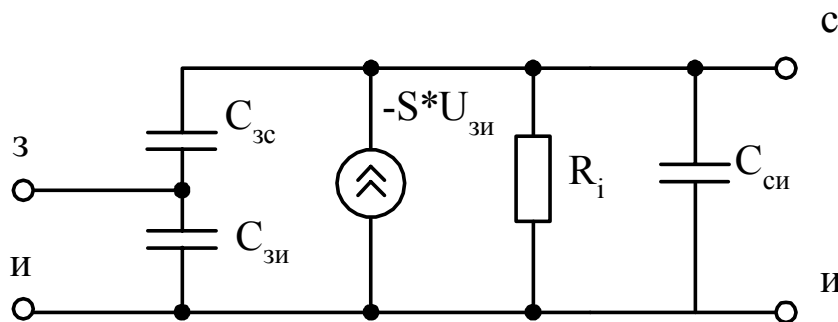


Рисунок 4.2 - Эквивалентная схема замещения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

### Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде собрать схему для снятия вольт - амперных характеристик полевого транзистора с управляющим р-п - переходом (рисунок 4.3).

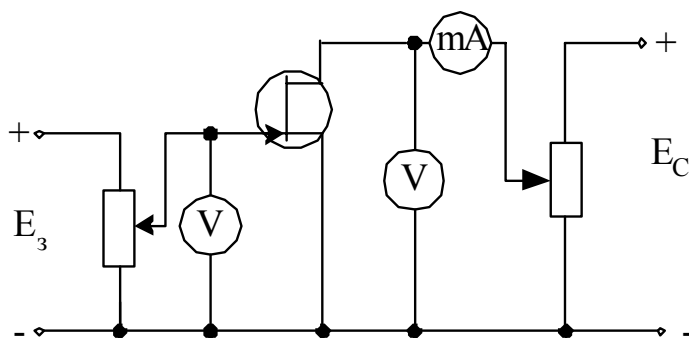


Рисунок 4.3 – Схема для снятия вольт-амперных характеристик полевого транзистора с управляющим р-п - переходом

2. Изменяя напряжение на стоке снять и построить стоковые ВАХ полевого транзистора с каналом n-типа при различных значениях  $U_{зи}$ . Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Данные для построения стоковых ВАХ

$U_{зи} =$		$U_{зи} =$		$U_{зи} =$		$U_{зи} =$	
$I_c$	$U_{си}$	$I_c$	$U_{си}$	$I_c$	$U_{си}$	$I_c$	$U_{си}$

3. Изменяя напряжение на затворе снять и построить стокзатворные ВАХ полевого транзистора при различных значениях  $U_{си}$ . Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Данные для построения стокзатворных характеристик

$U_{си} =$		$U_{си} =$		$U_{си} =$		$U_{си} =$	
$I_c$	$U_{зи}$	$I_c$	$U_{зи}$	$I_c$	$U_{зи}$	$I_c$	$U_{зи}$

4. Экспериментально определить основные параметры полевого транзистора. Результаты измерений занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Данные для определения параметров полевого транзистора

№	$U_{зи}$	$U_{си}$	$I_c$
1			
2			
3			

### Содержание отчёта

1. Справочные данные исследуемого транзистора и его цоколёвку.
2. Схема для снятия ВАХ транзисторов.
3. Таблицы и графики стоковых и стокзатворных ВАХ транзистора.
4. Значения основных параметров транзистора, определенные экспериментально и графоаналитически в заданной точке покоя
5. Схемы замещения полевого транзистора с управляющим p-n - переходом.
6. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. В чем отличие полевых транзисторов от биполярных?
2. На чем основан принцип работы полевого транзистора с управляющим p-n - переходом?
3. Перечислите основные параметры полевых транзисторов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### Исследование полевых транзисторов с изолированным затвором

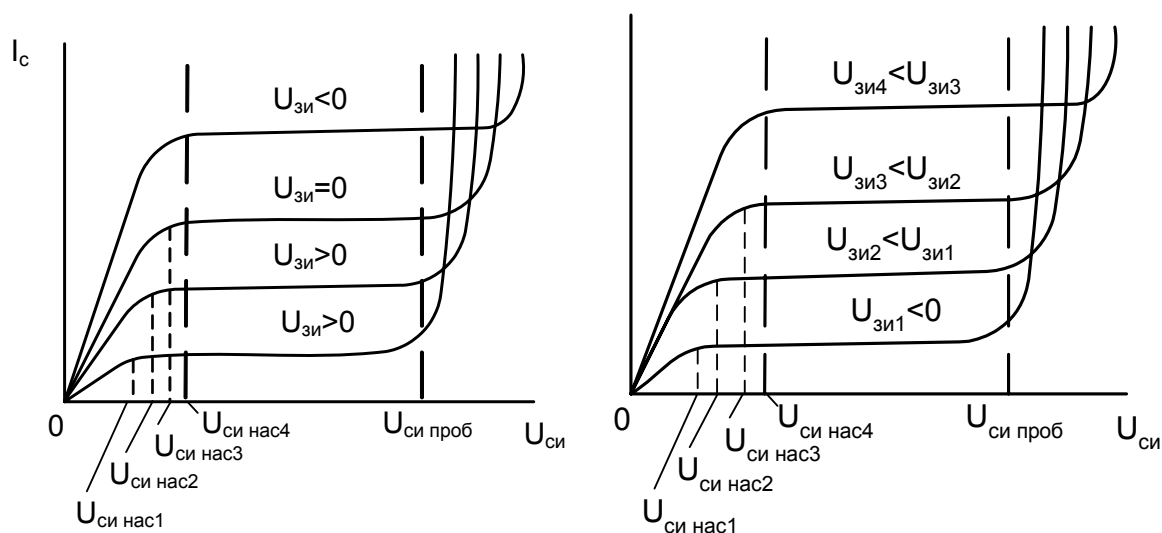
**Цель работы:** познакомиться с конструкцией и принципом действия полевого транзистора с изолированным затвором, экспериментально снять вольт-амперные характеристики и определить их основные параметры.

Полевые транзисторы с изолированным затвором ( МДП - транзисторы, МОП-транзисторы ) могут быть двух типов : транзисторы с встроенными каналами (канал создается при изготовлении) и транзисторы с индуцированными каналами ( канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам ).

У МДП-транзисторов в отличие от транзисторов с управляющим р-п- переходом металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод от кристалла, на котором выполнен прибор, называемый подложкой.

В МДП-транзисторах с встроенным каналом между истоком и стоком создан тонкий поверхностный канал, тип электропроводности которого совпадает с типом электропроводности областей истока и стока. При подключении источника питания в цепи нагрузки такого транзистора ток протекает даже при нулевом смещении на затворе. Семейство выходных вольт-амперных характеристик МДП-транзистора со встроенным каналом типа р- приведено на рисунке 5.1.

При подаче на затвор отрицательного относительно истока смещения в канале возрастает концентрация подвижных носителей заряда, повышается удельная электропроводность канала, а следовательно и ток стока. Такой режим работы МДП - транзистора называют режимом обогащения. Подача на затвор положительного смещения приводит к уменьшению концентрации подвижных носителей заряда и, следовательно к уменьшению тока. Такой режим работы МДП — транзистора называется режимом обеднения.



а) со встроенным каналом

б) с индуцированным каналом

Рисунок 5.1 - Выходные ВАХ МДП - транзистора

МДП - транзисторы могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения. Напряжение на затворе  $U_{зи}$  пор при котором прекращается протекание тока стока, носит название порогового напряжения, а напряжение



на стоке  $U_{СИ}$  начиная с которого прекращается возрастание тока стока, называют напряжением насыщения.

В МДП - транзисторах с индуцированным каналом при нулевой разности потенциалов исток-затвор отсутствует поверхностный слой, тип электропроводности которого совпадает с типом электропроводности областей истока и стока. При этом МДП - транзистор представляет собой два диода, включенные навстречу друг другу, и ток стока чрезвычайно мал. Если увеличить положительное смещение затвора ( подложка из полупроводника типа p ), то при некоторой величине смещения  $U_{з0}$  на поверхности полупроводника возникнет инверсный слой с электропроводностью типа n . Исток и сток окажутся соединёнными тонким токопроводящим слоем и между ними потечёт ток. Образовавшийся инверсный слой с проводимостью типа n называется каналом.

Путём изменения напряжения на затворе можно расширять или сужать канал и тем самым увеличивать или уменьшать ток стока.

Ширину канала можно изменить за счёт подачи на подложку дополнительного напряжения относительно электродов стока и истока транзистора. Следовательно, током стока можно управлять не только путём изменения напряжения на затворе, но и за счёт изменения напряжения на подложке.

Важным преимуществом МДП-транзисторов перед биполярными является малое падение напряжения на них при коммутации малых сигналов: если в биполярных транзисторах в режиме насыщения напряжение составляет несколько десятков-сотен мВ, то у МДП - транзисторов при малых  $I_c$ , когда транзистор работает в крутой области, напряжение определяется током  $I_c$  и сопротивлением канала:  $U_{СИ} = I_c \cdot R_{СИ}$ . При уменьшении  $I_c$  оно может быть сведено до значения стремящегося к нулю.

Полевой транзистор с изолированным затвором характеризуется теми же параметрами, что и полевой транзистор с управляющим p--n переходом :

- крутизна характеристики:

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{СИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}$$

- статический коэффициент усиления:

$$\mu = - \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_3 = \text{const}}$$

- внутреннее сопротивление:

$$R_i = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$$

Внутреннее уравнение транзистора

$$\mu = S \cdot R_i$$

### Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде собрать схему для снятия вольт - амперных характеристик полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом (рисунок 5.2).

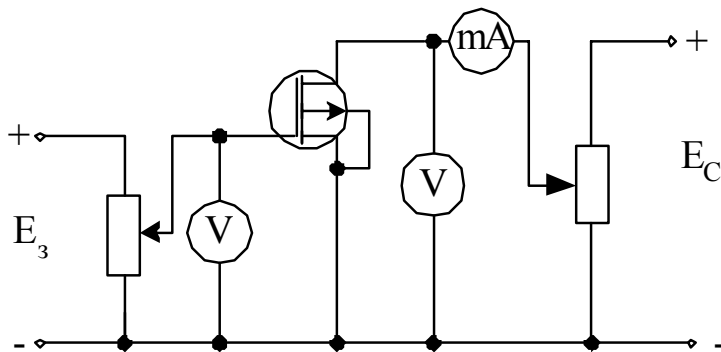


Рисунок 5.2 – Схема для снятия вольт-амперных характеристик полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом

2. Изменяя напряжение на стоке снять и построить стоковые ВАХ полевого транзистора с каналом n-типа при различных значениях  $U_{ЗИ}$ . Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Данные для построения стоковых ВАХ

$U_{ЗИ} =$		$U_{ЗИ} =$		$U_{ЗИ} =$		$U_{ЗИ} =$	
$I_c$	$U_{СИ}$	$I_c$	$U_{СИ}$	$I_c$	$U_{СИ}$	$I_c$	$U_{СИ}$

--	--	--	--	--	--	--	--

4. Изменяя напряжение на затворе снять и построить стокзатворные ВАХ полевого транзистора при различных значениях  $U_{си}$ . Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Данные для построения стокзатворных характеристик

$U_{си} =$		$U_{си} =$		$U_{си} =$		$U_{си} =$	
$I_c$	$U_{зи}$	$I_c$	$U_{зи}$	$I_c$	$U_{зи}$	$I_c$	$U_{зи}$

4. Экспериментально определить основные параметры полевого транзистора. Результаты измерений занести в таблицу 5.3.
5. Аналогичные опыты провести для полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом.

Таблица 5.3 - Данные для определения параметров полевого транзистора

№	$U_{зи}$	$U_{си}$	$I_c$
1			
2			
3			

### Содержание отчёта

1. Справочные данные исследуемых транзисторов и их цоколёвку.
2. Схемы для снятия ВАХ транзисторов.
3. Таблицы и графики стоковых и стокзатворных ВАХ транзисторов.
4. Значения основных параметров транзисторов, определенные экспериментально и графоаналитически в заданной точке покоя.
5. Схемы замещения полевого транзистора изолированным затвором.
6. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Чем отличается принцип работы полевого транзистора со встроенным каналом от полевого транзистора с индуцированным каналом?
2. Что значит пороговое напряжение на затворе?
3. От чего зависит ширина канала в транзисторах с изолированным затвором?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### Исследование тиристоров

**Цель работы:** познакомиться с конструкцией и принципом действия тиристора, экспериментально снять вольт-амперные характеристики.

Тиристорами называются полупроводниковые приборы с тремя (и более) р-п-переходами, предназначенные для использования в качестве электронных ключей в схемах переключения электрических токов.

В зависимости от конструктивных особенностей и свойств тиристоры делят на диодные и триодные.

В диодных тиристорах различают тиристоры запираемые в обратном направлении, проводящие в обратном направлении и симметричные.

Триодные тиристоры подразделяют на запираемые в обратном направлении с управлением по аноду или катоду, проводящие в обратном направлении с управлением по аноду или катоду, симметричные (двунаправленные).

Структура диодного тиристора (динистора) приведена на рисунке 6.1.

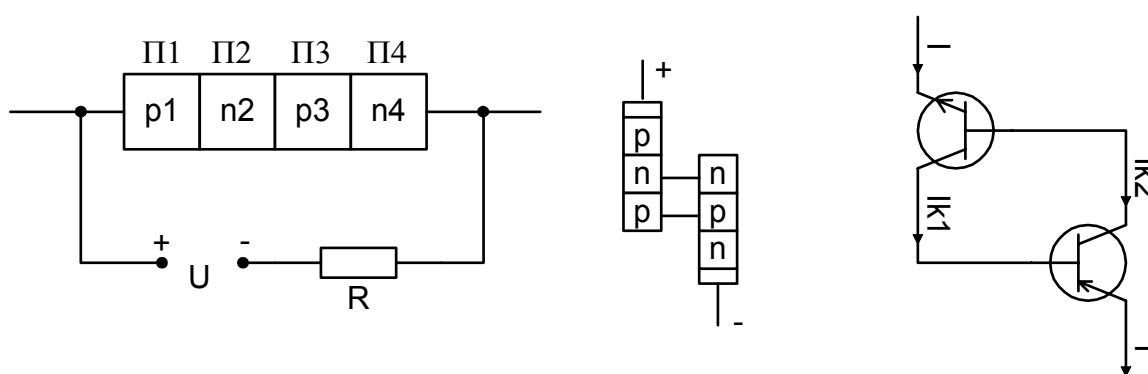


Рисунок 6.1- Структура диодного тиристора

Область p1, в которую попадает ток из внешней цепи называют анодом, область n4 — катодом, области n2, p3 — базами.

Если к аноду  $p_1$  подключить плюс источника напряжения, а к катоду  $n_4$  — минус, то переходы П1 и П3 будут включены в прямом направлении и будут открытыми, а П2 — закрытым.

Так как коллекторный переход П2 включен в обратном направлении, то до определённого значения напряжения почти всё приложенное напряжение падает на нём и ток во внешней цепи определяется обратным током коллекторного перехода. Этот ток однозначно зависит от потока дырок  $\alpha_1 I$  из эмиттера транзистора  $p-n-p$  и потока электронов  $\alpha_2 I$ , из эмиттера транзистора  $n-p-n$ , а также от обратного тока  $p-n$  перехода.

При малых значениях внешнего напряжения всё оно практически падает на коллекторном переходе П2. Поэтому к переходам П1 и П3, включенным в прямом направлении и имеющим малое сопротивление приложена малая разность потенциалов и инжекция носителей заряда невелика. При увеличении внешнего напряжения ток в цепи сначала меняется не значительно (рисунок 6.2) и равен  $I_{обр}$  (участок 1).

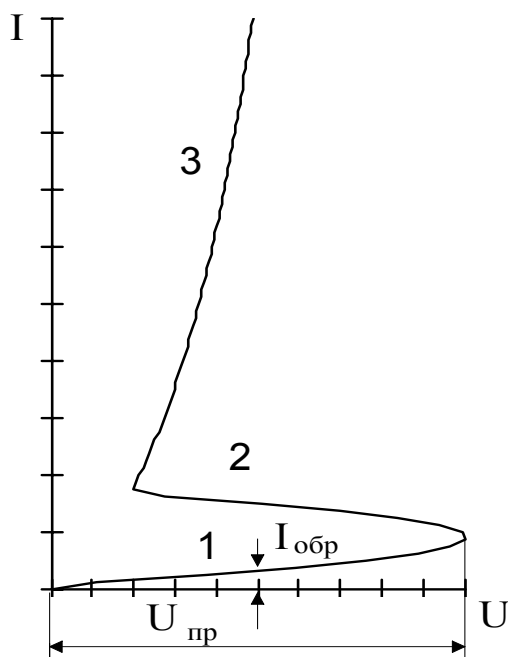


Рисунок 6.2 - Вольт-амперная характеристика динистора

При дальнейшем возрастании напряжения, по мере увеличения ширины перехода П2 всё большую роль начинают играть носители заряда, образовавшиеся вследствие ударной ионизации, вызывая лавинное размножение носителей заряда. Образовавшиеся при этом дырки под влиянием электрического поля пе-

переходят в область р3, а электроны — в область n2. Ток увеличивается через переход П2, а его сопротивление и падение напряжения на нём уменьшается. Это приводит к повышению напряжения, приложенного к переходам П1 и П2, и увеличению инжекции носителей зарядов через них. Процесс протекает лавинообразно и сопротивление перехода П2 становится малым. На вольт-амперной характеристике этому процессу соответствует участок 2 с отрицательным дифференциальным сопротивлением. После переключения вольт-амперная характеристика аналогична ветви характеристики диода, смещённого в прямом направлении.

Триодные тиристоры (рисунок 6.3) отличаются от диодных тем, что одна из баз имеет внешний вывод, который называют управляющим электродом.

При подаче в цепь управляющего электрода тока управления  $I_y$ , ток через р-п - переход П2 увеличивается. Дополнительная инжекция носителей заряда через р-п - переход приводит к увеличению тока  $I_k$ .

Таким образом изменяя ток управления можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора и тем самым управлять моментом его включения. Семейство вольт-амперных характеристик тиристора показано на рисунке 6.3.

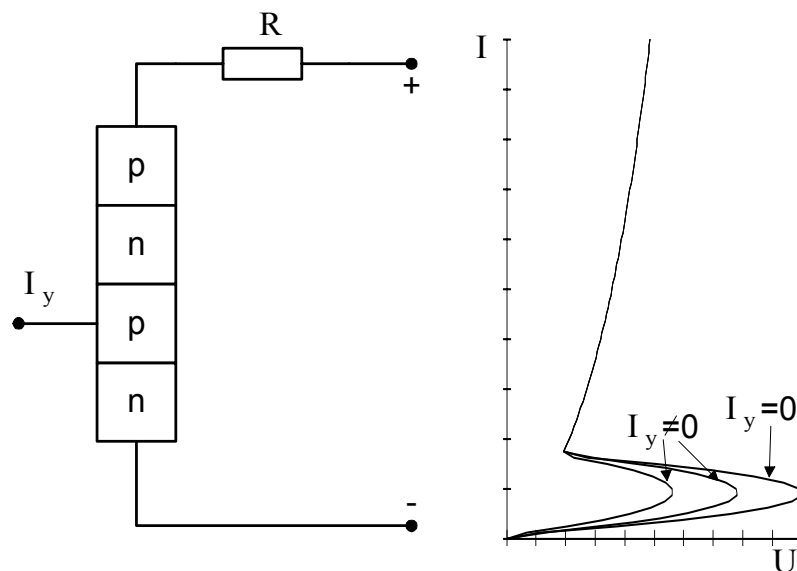


Рисунок 6.3 - Структура и ВАХ тиристора

### Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде собрать схему, представленную на рисунке 6.4.

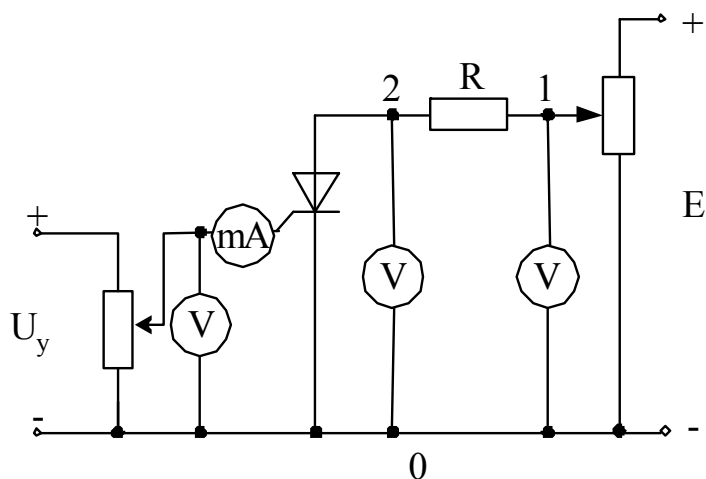


Рисунок 6.4 – Схема для снятия ВАХ тиристора

- 2 Задаваясь током управления (по указанию преподавателя) и изменяя напряжение  $E$  от 0 до 5 В снять и построить вольт-амперные характеристики тиристора. Определение тока производится косвенным методом:

$$I = \frac{U_{12}}{R} = \frac{U_{10} - U_{20}}{R}.$$

Величина сопротивления резистора  $R$  составляет 100 Ом.  
Полученные результаты занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Данные для построения вольт-амперной характеристики выпрямительного диода

$I_y =$			$I_y =$			$I_y =$			$I_y =$		
$U_{10}$	$U_{20}$	$I$	$U_{10}$	$U_{20}$	$I$	$U_{10}$	$U_{20}$	$I$	$U_{10}$	$U_{20}$	$I$

- 3 Построить графики вольт-амперных характеристик и определить основные параметры тиристора.

### Содержание отчёта

1. Справочные данные исследуемого тиристора и цоколёвку.

2. Принципиальная схема для снятия ВАХ тиристора.
3. Таблицы и графики соответствующих ВАХ тиристора.
4. Основные параметры тиристора определённые экспериментально.
5. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем определяется момент открытия динистора?
2. Что такое ток удержания?
3. Что характеризует время включения тиристора?

### **Рекомендуемая литература**

1. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. - К.: Либідь, 1993. - 432 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. - М.: Высшая школа, 1991. - 622 с.
3. Пасынков В.В., и др. Полупроводниковые приборы. - М.: Высшая школа, 1987. - 428 с.
4. Батушев В.А. Электронные приборы. - М.: Высшая школа, 1980. - 532 с.
5. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - М.: Энергия, 1967. - 616 с.
6. Скаржепа В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника. - К.: Вища школа, 1989. - 431 с.