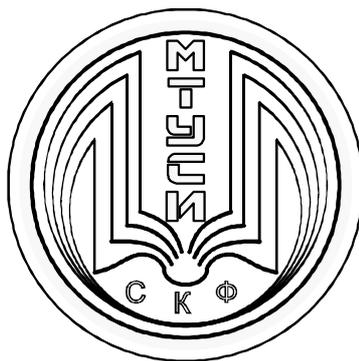


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФИЛИАЛ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И  
ИНФОРМАТИКИ»**



**КАФЕДРА ОБЩЕНАУЧНОЙ ПОДГОТОВКИ**

Бородин А.В.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Методическое пособие  
для проведения лабораторных работ  
(направление подготовки 11.03.02)**

Ростов-на-Дону

2019 г.

**Бородин А.В.** «Физические основы электроники». Методическое пособие для проведения лабораторных работ; Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ. 2019.

**Составитель:** доцент кафедры ОНП Бородин А.В.

**Рецензент:** Зав. кафедрой ИТСС СКФ МТУСИ, к.т.н. доц. Юхнов В.И.

Издание рассмотрено и утверждено  
на заседании кафедры ОНП  
26.08.2019 года (протокол № 1)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Физические основы электроники» изучается студентами направления 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Прохождение лабораторного практикума ставит своей задачей проверку на практике полученных теоретических знаний. Предлагаемое пособие содержит краткое изложение основных сведений из теории физических основ полупроводниковой электроники и порядок выполнения лабораторных работ на лабораторном стенде «Электронные приборы». Сборник предназначен для подготовки студентов к лабораторным занятиям и является руководством при выполнении лабораторных работ.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

*Цель:* исследование свойств электронно-дырочного перехода при прямом и обратном включении.

### 1. Подготовка к лабораторной работе

Изучить литературу [1], [2], конспект лекций по данной теме.

Обратить внимание на то, что в лабораторной работе для исследований выпрямляющего электрического  $p^+ - n$  - перехода используются кремниевый и германиевый диоды (полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами).

Область диода с малой концентрацией примесей ( $n$ -область) называют *базой*, а область с большой концентрацией ( $p^+$ - область) – *эмиттером*.

Паспортные данные некоторых диодов:

Тип диода	Структура	$I_{пр доп}$ , мА	$U_{обр доп}$ , В	$f_{max}$ , кГц	$\tau_{восст}$ , мкс
D7D	Ge, сплавной	100	200	2,4	
D226D	Si, сплавной	300	200	1,0	
D312	Ge, диффузионный	50	75		0,7

В процессе измерений **НЕДОПУСТИМО** превышать предельно-допустимых значений токов и напряжений. Рекомендуется, чтобы величины максимальных значений токов через диод и напряжения не превышали 70 - 80% от паспортных данных.

### 2. Порядок выполнения лабораторной работы

2.1 На лабораторной установке «Электронные приборы» собрать схему, соответствующую прямому подключению источника постоянного напряжения к электронно-дырочному переходу:

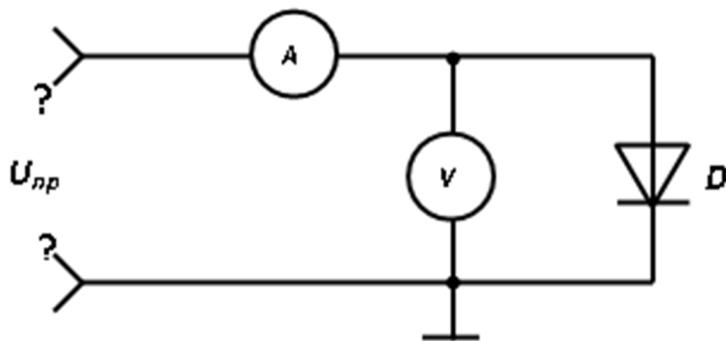


Рис 1. Прямое подключение диода.

Обратить при этом внимание на полярность подключения эмиттера и базы диода! Она должна соответствовать прямому току через переход!

2.2 Задавая смещения на диод (электронно-дырочный переход) низковольтным источником, фиксировать напряжения и соответствующие им значения прямого тока. Результаты занести в таблицу 1. При это необходимо помнить о предельных значениях прямого тока для данного типа диода и соответствующих им положительных напряжениях. Это поможет верно выбрать предельное прямое напряжение источника постоянного питания на испытательном стенде.

Диод \_\_\_\_\_

Таблица 1

$U_{пр}, \text{---}$							
$I_{пр}, \text{---}$							

2.3 Заменить в схеме диод (германиевый на кремниевый или наоборот).

Повторить действия пункта 2.2. Результаты занести в таблицу 2.

Диод \_\_\_\_\_

Таблица 2

$U_{пр}, \text{---}$							
$I_{пр}, \text{---}$							

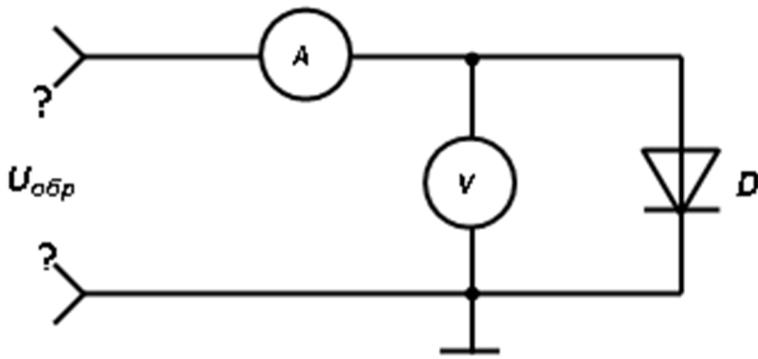


Рис 2. Обратное подключение полупроводникового диода.

2.4 На лабораторной установке «Электронные приборы» собрать схему, соответствующую обратному подключению источника постоянного напряжения к электронно-дырочному переходу.

Обратить при этом внимание на полярность подключения эмиттера и базы диода! Она должна соответствовать отрицательному току через переход!

2.5 Задавая смещения на диод (электронно-дырочный переход) низковольтным источником, фиксировать напряжения и соответствующие им значения обратного тока. Результаты занести в таблицу 3. При этом необходимо помнить о предельных значениях обратного тока\* для данного типа диода и соответствующих им отрицательных напряжениях. Это поможет верно выбрать предельное обратное напряжение источника постоянного питания на испытательном стенде.

\*Рекомендуется использовать высоковольтный источник постоянного напряжения E2.

Диод \_\_\_\_\_

Таблица 3

$U_{обр}, \text{---}$							
$I_{обр}, \text{---}$							

2.6 Заменить в схеме диод (германиевый на кремниевый или наоборот). Повторить действия пункта 2.5. Результаты занести в таблицу 4.

Диод \_\_\_\_\_

Таблица 4

$U_{обр}, \text{_____}$							
$I_{обр}, \text{_____}$							

### 3. Обработка результатов измерений

3.1 По результатам измерений (таблицы 1, 2) построить графики зависимостей  $I_{пр} = f(U_{пр})$  на одном графике.

3.2 По результатам измерений (таблицы 3, 4) построить графики зависимостей  $I_{обр} = f(U_{обр})$  на одном графике.

3.3 Рассчитать теоретическую (3) вольт-амперную характеристику (ВАХ) кремниевого и германиевого электронно-дырочных переходов при температуре  $T = 300\text{K}$ .

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

где  $I_0$  - ток насыщения перехода или обратный тепловой ток.

$$I_0 = I_{00} \exp\left(\frac{\varphi_{зз}}{\varphi_T}\right) \quad (2)$$

—  $I_{00}$  - начальный ток;

$\varphi_{зз}$  - ширина запрещенной зоны в полупроводнике (для германия  $\varphi_{зз}=0,66$  эВ; для кремния  $\varphi_{зз}=1,107$  эВ);

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} - \text{температурный потенциал;}$$

$q$  - заряд электрона;

$k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура.

3.4 Сделать выводы о соответствии результатов исследований ВАХ реального диода теории.

#### 4. Содержание отчета

Отчет может быть представлен в электронном варианте. Он должен содержать:

- наименование и цель работы;
- паспортные данные исследуемых диодов;
- схемы измерений;
- таблицы наблюдений;
- вольт-амперные характеристики диодов;
- рассчитанные значения идеальных прямых и обратных токов при температуре  $T = 300\text{K}$ ;
- рассчитанные значения токов насыщения и объемного сопротивления базы диодов;
- выводы о соответствии полученных данных теории по каждой из поставленных целей к лабораторному исследованию

#### 5. Контрольные вопросы

1 Объясните механизмы изменения сопротивления металлов и полупроводников при повышении температуры.

2 Как возникает электронно-дырочный переход при контакте полупроводников с различным типом проводимости?

3 В каком соотношении находятся токи дрейфа и диффузии через переход при прямом и обратном напряжениях на  $n-p$ -переходе.

4 Объясните, почему при увеличении прямого напряжения ток диода возрастает?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТАБИЛИТРОНА

*Цель:* Изучение полупроводникового стабилизатора путём снятия прямой и обратной ветви статических вольтамперных характеристик (ВАХ).  
Исследование простейшего стабилизатора напряжения.

#### 1. Экспериментальная часть

##### 1.1 Снятие вольтамперной характеристики стабилизатора при прямом включении

При прямом включении стабилизатора на его анод подается положительное напряжение. В схеме измерений, изображенной на рис.1, положительное смещение подается с регулируемого источника  $E1$ . Ток, протекающий через исследуемый стабилизатор, измеряется амперметром  $PA1$ . Напряжение на стабилизаторе измеряется вольтметром  $PV1$ . Ограничительное сопротивление  $R_{огр}$  предохраняет исследуемый стабилизатор от пробоя.

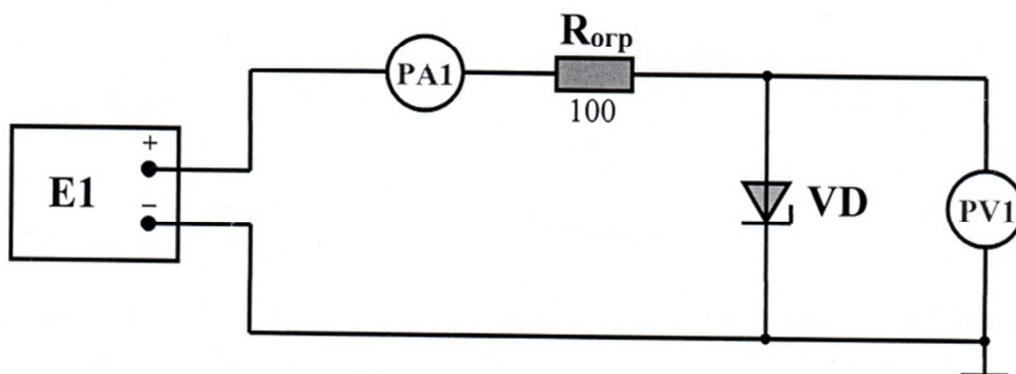


Рис.1 Схема измерения при снятии прямой ветви ВАХ

При снятии характеристики, регулируя напряжение источника  $E1$ , устанавливается напряжение на стабилизаторе в соответствии с табл.1 и записывается значение тока через стабилизатор, измеренное амперметром  $PA1$ .

## Порядок измерений

Установите пределы измерений амперметра – 20 мА, вольтметра – 2 В, тумблеры переключения режимов работы вольтметра (PV1) и амперметра (PA1) установите в положение измерения постоянных величин (=). Ручки управления выходным напряжением источника E1 поверните против часовой стрелки до упора. Собранную схему покажите преподавателю. После проверки преподавателем собранной схемы включите установку.

Проведите измерения. Результат измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

U, В	0	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
I, А										

### 1.2 Снятие вольтамперной характеристики стабилитрона при обратном включении

При обратном включении стабилитрона на его катод подается положительное напряжение. В схеме измерений, изображенной на рис.2, положительное смещение подается с регулируемого источника E2. Ток, протекающий через исследуемый стабилитрон, измеряется амперметром PA2. Напряжение на стабилитроне измеряется вольтметром PV2. Ограничительное сопротивление  $R_{огр}$  предохраняет исследуемый стабилитрон от пробоя при неправильном включении.

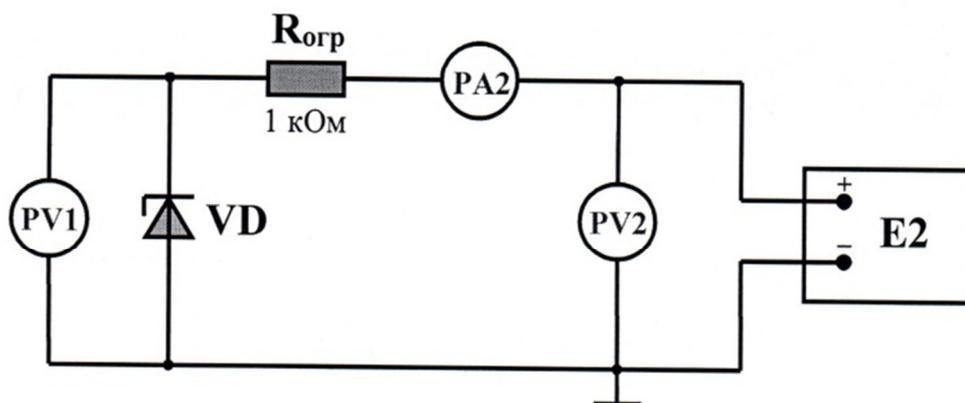


Рис 2. Схема измерений при снятии обратной ветви ВАХ

### Порядок измерений

Установите пределы измерений амперметра PA2 – 20 мА, вольтметров PV1 и PV2 – 20 В, тумблеры переключения режимов работы вольтметров и амперметра установите в положение измерения постоянных величин (=). Ручки управления выходным напряжением источника E2 поверните против часовой стрелки до упора. Собранную схему покажите преподавателю. После проверки преподавателем собранной схемы включите установку.

Проведите измерения. Результат измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

E2, В (PV2)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
U <sub>ст</sub> , В (PV1)											
I <sub>ст</sub> , мА (PA2)											

### 1.3 Исследование простейшего стабилизатора напряжения

Схема для исследования простейшего стабилизатора напряжения,

изображена на рис 3. Схема питается от источника E2 и отличается от предыдущей схемы наличием сопротивления нагрузки  $R_H$ , подключенного параллельно стабилитрону, и амперметром PA1, включенного последовательно с сопротивлением нагрузки.

Исследование производится при 4 различных сопротивлениях нагрузки:  $R_H = \infty$ ,  $R_H = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_H = 3,3 \text{ кОм}$  и  $R_H = 1 \text{ кОм}$  и при 2-х значениях напряжения источника E2:

$U_{E2} = 12 \text{ В}$  и  $U_{E2} = 20 \text{ В}$ .

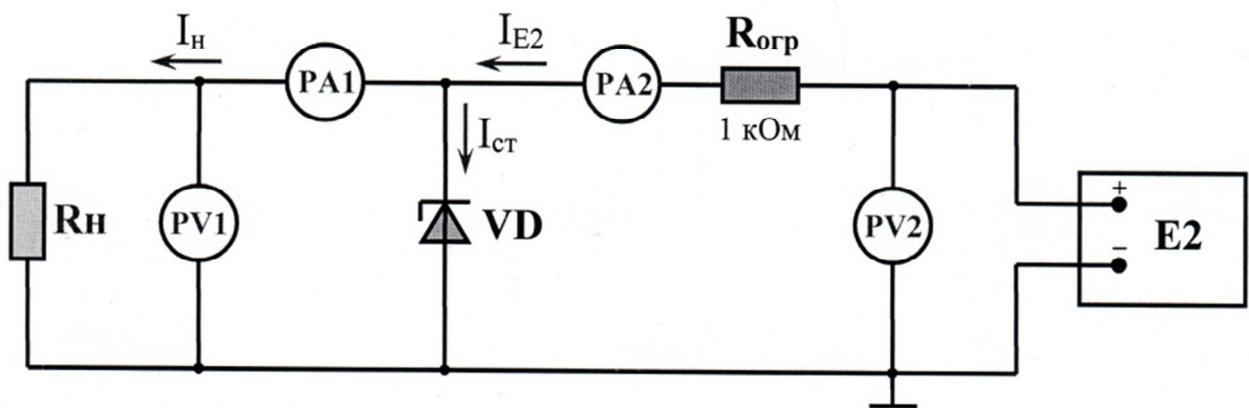


Рис 3. Схема измерений при исследовании простейшего стабилизатора напряжения

### Порядок измерений

Установите пределы измерений амперметров – 20 мА, вольтметров – 20 В, тумблеры переключения режимов работы вольтметров и амперметра установите в положение измерения постоянных величин (=). Ручки управления выходным напряжением источника E2 поверните против часовой стрелки до упора. Собранный схему покажите преподавателю. После проверки преподавателем собранной схемы включите установку.

Установите напряжение источника  $E2 = 12 \text{ В}$ . Изменяя сопротивление нагрузки, путем замены резисторов 10 кОм, 3,3 кОм и 1 кОм, произвести измерения. Результаты запишите в таблицу 3.

**E2=12 В**

Таблица 3

	$R_H=\infty$	$R_H=10 \text{ кОм}$	$R_H=3,3 \text{ кОм}$	$R_H=1 \text{ кОм}$
PA1, мА				
PA2, мА				
PV1, мА				

Установите напряжение источника  $E2=20 \text{ В}$  и повторите измерения, результаты запишите в таблицу 4.

**E2=20 В**

Таблица 4

	$R_H=\infty$	$R_H=10 \text{ кОм}$	$R_H=3,3 \text{ кОм}$	$R_H=1 \text{ кОм}$
PA1, мА				
PA2, мА				
PV1, мА				

Подключите сопротивление нагрузки  $R_H=1 \text{ кОм}$ , снять зависимость  $U_H=f(U_{BX})$ ,  $I_H=f(U_{BX})$  и  $I_{CT}=f(U_{BX})$ .

Таблица 5

E2, В (PV2)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_H$ , В (PV1)											
$I_H$ , мА (PA1)											
$I_{CT}$ , мА (PA2)											

Рассчитайте коэффициент стабилизации –  $K_{ст}$

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}}} = \frac{\Delta E}{E} \times \frac{U_{ст}}{\Delta U_{ст}}$$

## 2. Содержание отчета

1. По данным таблиц постройте ВАХ стабилитрона при прямом и обратном включении.

2. На линейном участке прямой ветви ВАХ построить характеристические треугольники (см. рис. 4) и определите крутизну  $S$ , мА/В стабилитрона:

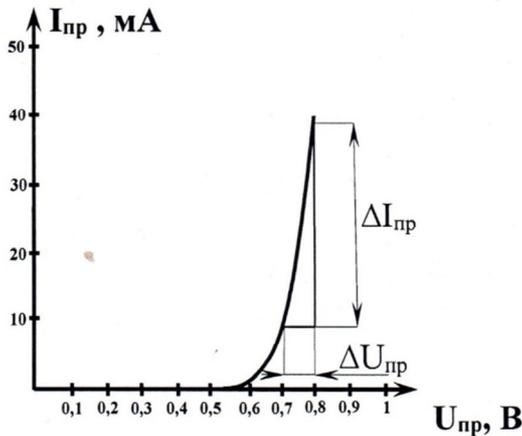


Рис. 4 ВАХ стабилитрона при прямом включении

$$S = \frac{\Delta I_{пр}}{\Delta U_{пр}} \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

3. Вычислите дифференциальное сопротивление стабилитрона:

$$r = \frac{1}{S} \text{ кОм}$$

4. Определите прямое и обратное статическое сопротивление для стабилитрона (прямое сопротивление определить в двух точках – на середине

линейного участка и на пологом участке характеристики).

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}$$

5. Обратное статическое сопротивление определить при напряжении – 20 Вольт.

$$R_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}}$$

6. По данным таблиц 1 и 2 постройте ВАХ стабилитрона.

7. Рассчитать динамическое сопротивление стабилитрона  $R_{\text{д}}$  (по обратной ветви ВАХ).

$$R_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}$$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

*Цель:* исследование полупроводниковой структуры с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами.

### 1 Подготовка к лабораторной работе

Изучить литературу [1], [2], конспект лекций по данной теме.

Обратить внимание на то, что в лабораторной работе для исследований полупроводниковой структуры используется биполярный транзистор (БТ) с выпрямляющими электрическими переходами в виде  $p$ - $n$ -переходов (рисунки 3.1, 3.2).

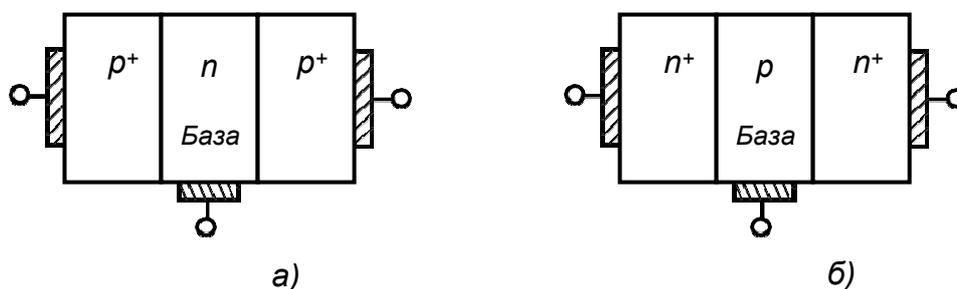


Рисунок 1 – Схематическое изображение структур биполярных транзисторов:

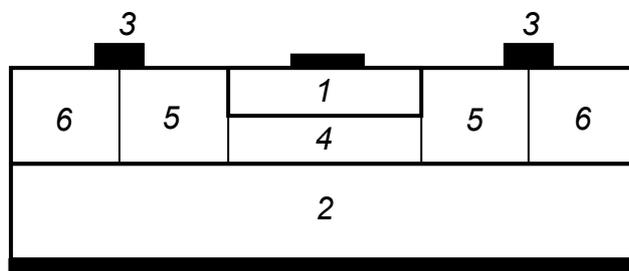


Рисунок 2 – Одна из структур реального транзистора:

1 – эмиттер, 2 – коллектор, 3 – электрод к базовой области,  
4 – активная, 5 – пассивная, 6 – периферическая части базы

Обозначения БТ с соответствующими базами показаны на рис.3.3:

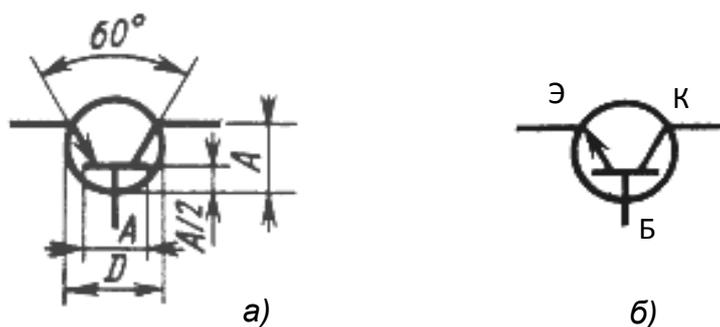


Рисунок 3 – Обозначение БТ: *а* – *p-n-p*-типа, *б* – *n-p-n*-типа  
(Э – эмиттер, Б – база, К – коллектор)

Основное внимание следует уделить физическому смыслу протекающих процессов и методу измерений основных статистических характеристик (входных и выходных) БТ в активном режиме.

В лабораторной работе используются кремниевый и германиевый транзисторы (таблица 1).

Таблица 1

Тип	Структура	$h_{21Э}$	$f_{h_{21Э}}(f_T)$ , МГц	$I_{к доп}$ , мА	$U_{кэ доп}$ , В	$P_{к доп}$ , мВт	$C_{к(10В)}$ , пФ
МП37Б	n-p-n, Ge,	20-50	1,0	20	15	150	40
МП39Б	p-n-p, Ge,	20-50	1,5	20	20	150	40
КТ315Б	n-p-n, Si,	50-350	250	100	20	150	7
КТ361Б	p-n-p, Si,	50-350	250	50	20	150	9

В процессе измерений **НЕДОПУСТИМО** превышение предельных значений токов, напряжений и мощности, указанных в паспортных параметрах исследуемого транзистора. Перед измерениями необходимо построить в соответствующих осях координат линии, ограничивающие область безопасности режимов работы транзистора. В качестве примера на рисунке 3.5 показано построение ограничивающих линий в системе координат  $I_k$ ,  $U_{кб}$  для транзистора МП-39.

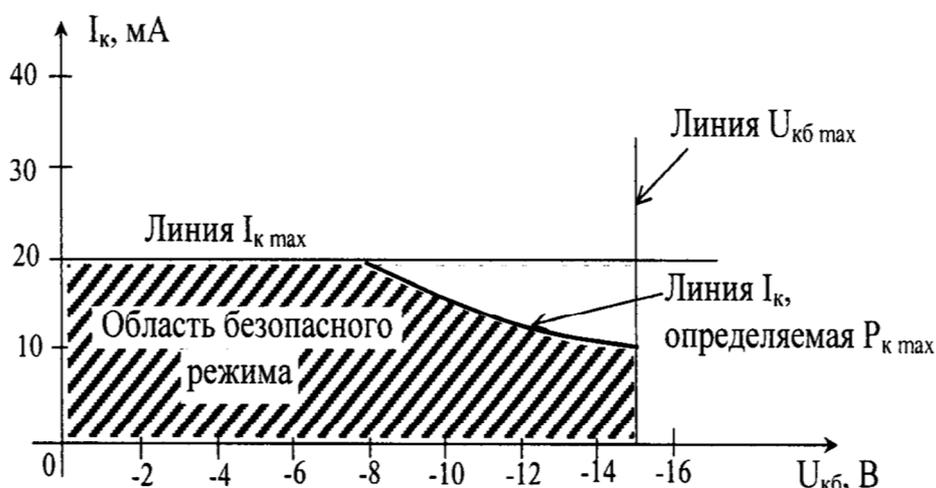


Рисунок 5 – Построение области безопасных режимов работы БТ

## 2 Порядок выполнения лабораторной работы

2.1 Собрать схему исследования (рисунок 3.6) на учебной лабораторной установке «Электронные приборы». Следует обратить внимание на полярность питающих напряжений эмиттерной и коллекторной цепей! Она должна соответствовать активному режиму работы исследуемой полупроводниковой структуры (*p-n-p*-типа или *n-p-n*-типа)!

2.2 Снять три входные статические характеристики БТ в схеме с ОБ (при комнатной температуре). Для этого необходимо:

2.2.1 На входе и выходе схемы с помощью регулируемых источников питания  $E_1$ ,  $E_2$  установить нулевые значения напряжений.  $U_{кб}$  – параметр входных статических характеристик БТ в схеме с ОБ.

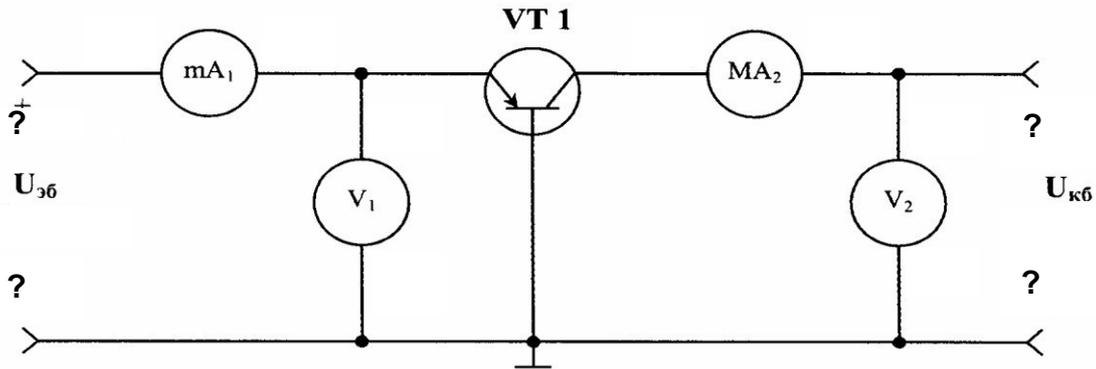


Рисунок 6 – Схема включения с ОБ БТ

2.2.2 Изменяя значение входного напряжения  $U_{ЭБ}$ , фиксировать соответствующие значения входного тока  $I_{Э}$  ( $I_{Э} = f(U_{ЭБ})$ ). Результаты занести в таблицу 2.

2.2.3 Далее повторить действия п.п. 2.2.1, 2.2.2, при этом увеличить абсолютное значение параметра выходной цепи  $U_{КБ}$ . Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{КБ} = 0 \text{ В}$	$U_{ЭБ}, \underline{\hspace{1cm}}$						
	$I_{Э}, \underline{\hspace{1cm}}$						
$U_{КБ} = \dots \text{ В}$	$U_{ЭБ}, \underline{\hspace{1cm}}$						
	$I_{Э}, \underline{\hspace{1cm}}$						
$U_{КБ} = \dots \text{ В}$	$U_{ЭБ}, \underline{\hspace{1cm}}$						
	$I_{Э}, \underline{\hspace{1cm}}$						

2.3 Снять три выходные статические характеристики БТ в схеме с ОБ. Для этого необходимо:

2.3.1 **ВНИМАНИЕ!** Построить (используя паспортные данные) в соответствующей системе координат линии, ограничивающие область безопасности режимов работы транзистора (рисунок 3.5).

2.3.2 Установить на входе схемы  $I_{Э} = 0 \text{ А}$  ( $I_{Э}$  – параметр выходных статических характеристик БТ в схеме с ОБ). На выходе схемы с помощью регулируемого источника питания  $E2$  установить нулевое значение

напряжения.

2.3.3 Изменяя значение выходного напряжения  $U_{КБ}$ , фиксировать соответствующие значения выходного тока  $I_{К}$  ( $I_{К} = f(U_{КБ})$ ). Результаты занести в таблицу 2.

2.3.4 Далее повторить действия п.п. 2.3.2, 2.3.3, но при этом увеличить абсолютное значение параметра входной цепи  $I_{Э}$ . Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

$I_{Э}=0\text{мА}$	$U_{КБ}, \text{---}$						
	$I_{К}, \text{---}$						
$I_{Э}=\dots \text{мА}$	$U_{КБ}, \text{---}$						
	$I_{К}, \text{---}$						
$I_{Э}=\dots \text{мА}$	$U_{КБ}, \text{---}$						
	$I_{К}, \text{---}$						

### 3. Обработка результатов измерений

3.1 По результатам измерений (таблица 2) построить графики входных статических характеристик  $I_{Э} = f(U_{ЭБ})$  при  $U_{КБ} = \text{const}$  на одном рисунке.

3.2 По результатам измерений (таблица 3) построить графики выходных статических характеристик  $I_{К} = f(U_{КБ})$  при  $I_{Э} = \text{const}$  на одном рисунке.

3.3 По семейству выходных характеристик реального транзистора построить характеристику управления (прямой передачи).

3.4 По семейству входных характеристик реального транзистора построить переходную характеристику (обратной передачи).

3.5 Сделать вывод по каждому пункту исследований.

#### 4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- паспортные данные и схему расположения выводов исследуемого транзистора;
- схемы измерений;
- таблицы и графики статических характеристик транзистора;
- выводы о соответствии полученных данных теории.

#### 4 Контрольные вопросы

1. Расскажите о токодвижении в *p-n-p*-транзисторе, включенном по схеме ОБ. Нарисуйте входные статические характеристики БТ с ОБ.
2. Нарисуйте выходные статические характеристики БТ с ОБ.
3. Как объяснить вид входных и выходных статических характеристик БТ, включенного по схеме с ОБ?
4. Охарактеризуйте три области, отвечающие различным режимам работы БТ, выделяемые на выходной характеристике БТ.
5. Охарактеризуйте закономерность в отличии входных характеристик кремниевых и германиевых транзисторов.
6. Как влияет температура на обратный ток  $I_{кб0}$ ? Ответ поясните.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО  
ТРАНЗИСТОРА. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ**

*Цель:* исследование полупроводниковой структуры с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами, включенной по схеме общий эмиттер (ОЭ).

### **1 Подготовка к лабораторной работе**

Изучить литературу [1], [2], конспект лекций по данной теме.

Обратить внимание на то, что в лабораторной работе для исследований полупроводниковой структуры используется биполярный транзистор (БТ) с выпрямляющими электрическими переходами в виде *p-n*-переходов (рисунки 3.1, 3.2).

Следует обратить внимание, изучаемая схема обладает усилением по току, т.к.  $I_B = I_E - I_C \ll I_C$  ( $I_C \approx I_E$ ), и усилением по напряжению  $\Delta U_{КЭ} > \Delta U_{БЭ}$ . Кроме того, ее входное сопротивление намного больше входного сопротивления схемы с ОБ.

**ВНИМАНИЕ!** В процессе измерений **НЕДОПУСТИМО** превышение предельных эксплуатационных параметров (см. лабораторную работу № 3).

### **2 Порядок выполнения лабораторной работы**

2.1 Собрать схему исследования (рисунок 5.1) на учебной лабораторной установке «Электронные приборы». Следует обратить внимание на полярность питающих напряжений эмиттерной и коллекторной цепей! Она должна соответствовать активному режиму работы исследуемой полупроводниковой структуры (*p-n-p*-типа или *n-p-n*-типа)!

2.2 Снять входные статические характеристики БТ (при комнатной температуре).

2.2.1 На входе и выходе схемы с помощью регулируемых источников питания E1, E2 установить нулевые значения напряжений.  $U_{кЭ}$  – параметр входных статических характеристик БТ в схеме с ОЭ.

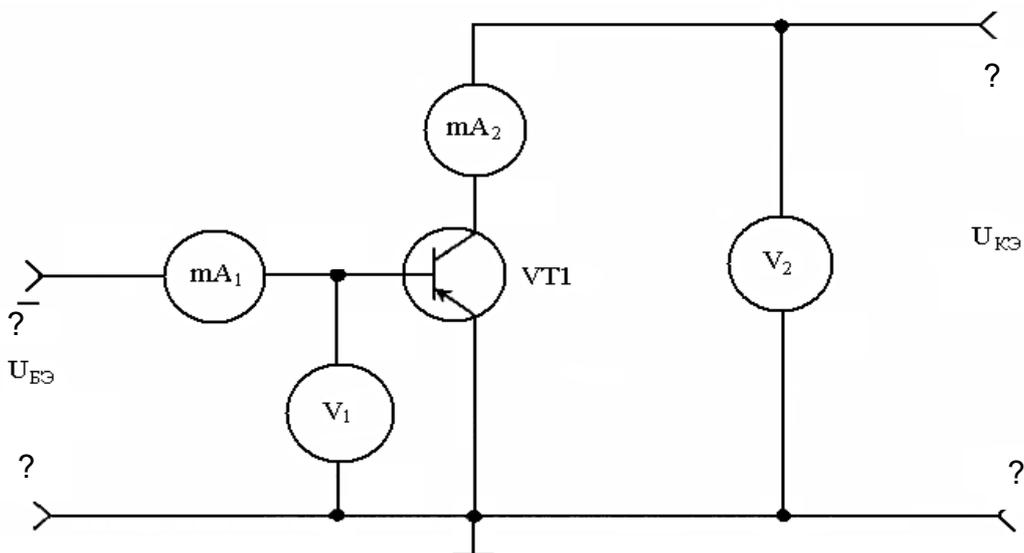


Рисунок 1 - Схема исследования входных и выходных статических характеристик

2.2.2 Изменяя значение входного напряжения  $U_{БЭ}$ , фиксировать соответствующие значения входного тока  $I_B$  ( $I_B = f(U_{БЭ})$ ). Результаты занести в таблицу 1.

2.2.3 Повторить действия п.п. 2.2.1, 2.2.2, при этом увеличить абсолютное значение параметра выходной цепи  $U_{кБ}$  по сравнению с предыдущим. Результаты занести в таблицу 2.

2.2.6 Результаты свести в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{кЭ}=0 \text{ В}$	$U_{БЭ}, \text{___}$						
	$I_B, \text{___}$						
$U_{кЭ}=\dots \text{ В}$	$U_{БЭ}, \text{___}$						
	$I_B, \text{___}$						
$U_{кЭ}=\dots \text{ В}$	$U_{БЭ}, \text{___}$						
	$I_B, \text{___}$						

2.3 Снять выходные статические характеристики БТ в схеме с ОЭ. Для этого необходимо:

2.3.1 **ВНИМАНИЕ!** Построить (используя паспортные данные) в соответствующей системе координат линии, ограничивающие область безопасности режимов работы транзистора (рисунок 3.5).

2.3.2 На входе с помощью регулируемого источника питания E1 установить  $I_B = 0$ . На выходе схемы с помощью регулируемого источника питания E2 установить нулевое значение напряжения.  $I_B$  – параметр выходных статических характеристик БТ в схеме с ОЭ.

2.3.3 Изменяя значение выходного напряжения  $U_{кэ}$ , фиксировать соответствующие значения выходного тока  $I_k$  ( $I_k = f(U_{кэ})$ ). Результаты занести в таблицу 2.

2.3.4 Повторить действия п.п. 2.3.2, 2.3.3, но при этом увеличить абсолютное значение параметра входной цепи  $I_B$ . Результаты занести в таблицу 2.

2.3.5 Повторить п.2.3.4.

Таблица 2

$I_B = 0$ мА	$U_{кэ}, \text{_____}$							
	$I_k, \text{_____}$							
$I_B = \dots$ мА	$U_{кэ}, \text{_____}$							
	$I_k, \text{_____}$							
$I_B = \dots$ мА	$U_{кэ}, \text{_____}$							
	$I_k, \text{_____}$							

### 3 Обработка результатов измерений

- 3.1 По результатам измерений (таблица 1) построить графики входных характеристик  $I_B = f(U_{БЭ})$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$  на одном рисунке.
- 3.2 По результатам измерений (таблица 2) построить графики выходных характеристик  $I_C = f(U_{КЭ})$  при  $I_B = \text{const}$  на одном рисунке.
- 3.3 По семейству выходных характеристик реального транзистора построить характеристику управления (прямой передачи).
- 3.4 По семейству входных характеристик реального транзистора построить переходную характеристику (обратной передачи).
- 3.5 По каждому пункту исследований сделать выводы.

### 4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- паспортные данные и схему расположения выводов исследуемого транзистора;
- схемы измерений;
- таблицы и графики статических характеристик транзистора;
- выводы о соответствии полученных данных теории.

## **5 Контрольные вопросы**

- 1 Расскажите о токодвижении в  $p-n-p$ -транзисторе, включенном по схеме ОЭ.
- 2 Нарисуйте входные статические характеристики БТ с ОЭ.
- 3 Нарисуйте выходные статические характеристики БТ с ОЭ.
- 4 Как объяснить вид входных и выходных статических характеристик БТ, включенного по схеме с ОЭ?
- 5 Охарактеризуйте три области, отвечающие различным режимам работы БТ, выделяемые на выходной характеристике БТ.
- 6 Охарактеризуйте закономерность в отличии входных характеристик кремниевых и германиевых транзисторов.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ ПЕРЕХОДОМ**

*Цель:* исследование полупроводниковой структуры, в которой управление током в объемном канале осуществляется с помощью выпрямляющего электрического перехода поперечным электрическим полем.

#### **1. Подготовка к лабораторной работе**

Изучить литературу [1], [2], конспект лекций по данной теме.

Обратить внимание на то, что в лабораторной работе для исследований полупроводниковой структуры используется полевой транзистор с управляющим электронно-дырочным переходом (ПТУП) – это полупроводниковый прибор с двумя управляющими электрическими переходами и тремя выводами (рисунок 2.1).

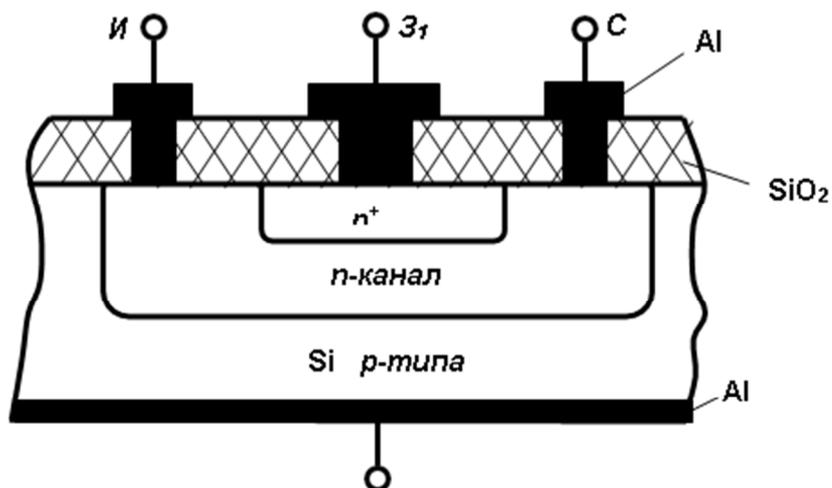


Рисунок 1 – Структура ПТУП с двумя управляющими электрическими переходами

Обозначения ПТУП с соответствующими каналами показаны на рисунке 2.

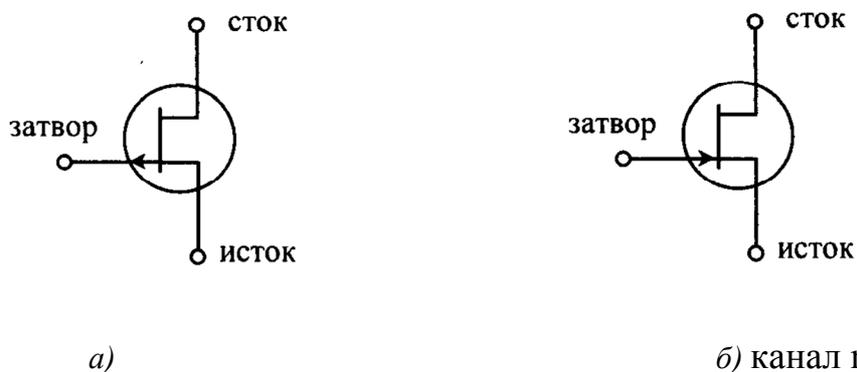


Рисунок 2 – Обозначения ПТУП: а – канал p-типа, б – канал n-типа

**ВНИМАНИЕ!** В процессе измерений **НЕДОПУСТИМО** превышение предельно-допустимых значений токов и напряжений. Для предупреждения выхода из строя ПТУП следует определить область безопасных режимов.

Перед измерениями необходимо построить в соответствующих осях координат линии, ограничивающие область безопасности режимов работы транзистора. В качестве примера на рис.2.3 показано построение ограничивающих линий в системе координат  $I_K, U_{кб}$  для транзистора МП-39.

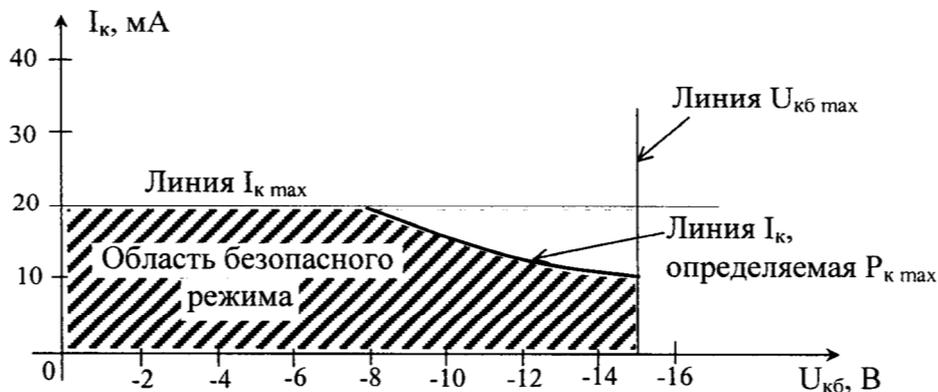


Рисунок 3 – Построение области безопасных режимов работы биполярного транзистора МП-39

Обратить внимание на тот факт, что основной схемой включения полевых транзисторов с управляющим переходом (ПТУП) является схема с общим истоком (рисунок 2.5).

Далее, необходимо обратить внимание на то, что в справочниках приводится обычно одна стоко-затворная характеристика, снятая при типовом напряжении  $U_{си}$ .

В лабораторной работе используются транзисторы, паспортные данные которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип транзистора	Тип канала	$I_{с\ max}$ , мА	$U_{си\ доп}$ , В	$P_{с\ доп}$ , мВт	$C_{зи}$ пФ	$C_{зс}$ пФ	$R_{к}$ , Ом	$U_{зиотс}$ , В
КП103И	р	1,8	12	21	20	8	30	0,8-3
КП103Е	р	1,5	10	7	20	8	50	0,4-1,5
КП103М	р	7,5	10	120	20	8	60	3-5

Расположение выводов у исследуемых транзисторов показано на рисунке 2.4.

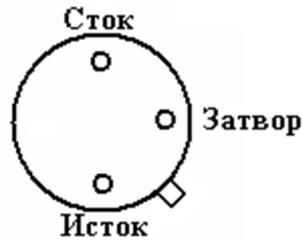


Рисунок 4 – Расположение выводов ПТУП

## 2. Порядок выполнения лабораторной работы

2.1 Собрать схему исследования (рисунок 2.5) на учебной лабораторной установке «Электронные приборы». Следует обратить внимание на полярность питающих напряжений! Она должна соответствовать рабочему режиму работы исследуемой полупроводниковой структуры (ПТУП с каналом р-типа или ПТУП с каналом n – типа).

2.2 Снять одну характеристику прямой передачи  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при типовом напряжении  $U_{СИ} = 0,45 \text{ В}$ .

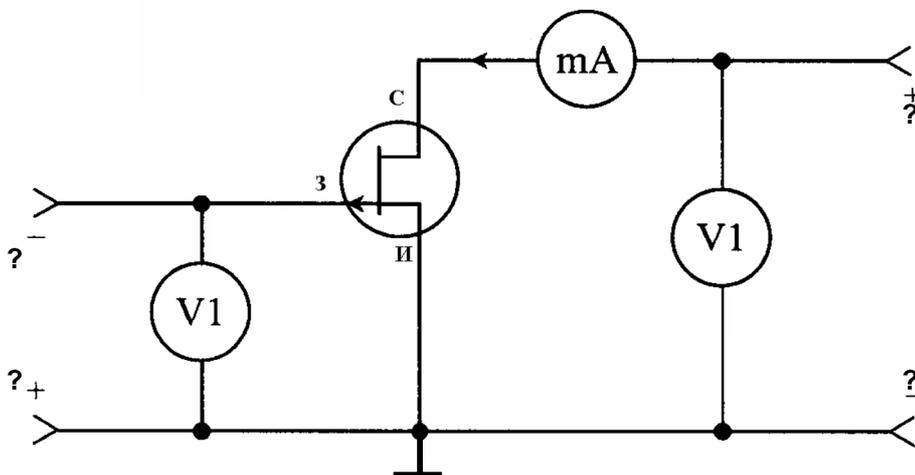


Рисунок 5 – Схема измерений статических характеристик ПТУП с каналом р-типа.

2.2.1 Установить на выходе собранной схемы с помощью регулируемого источника E2 значение параметра  $U_{си} = 0,45$  В. Задавая смещение отрицательного напряжения  $U_{зи}$  посредством E1, фиксировать соответствующие значения тока стока  $I_c$ .

2.2.2 Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{си} = \dots$ В	$U_{зи}, \text{---}$							
	$I_c, \text{---}$							

2.3 Снять выходные статические характеристики ПТУП в схеме с ОИ.

2.3.1 Выписать предельные эксплуатационные параметры и определить область безопасных режимов работы ПТУП.

2.3.2 С помощью регулируемого источника питания E1 установить значение параметра  $U_{зи} = 0$  В. Задавая смещение напряжения  $U_{си}$  посредством E2, снять соответствующие смещения тока стока  $I_c$  с помощью mA1.

2.3.3 Повторить п. 2.3.2, каждый раз увеличивая абсолютное значение отрицательного параметра  $U_{зи}$ .

2.3.4 Результаты измерений занести в таблицу 3

Таблица 3

$U_{зи} = 0$ В	$U_{си}$							
	$I_c$							
$U_{зи} = \dots$ В	$U_{си}$							
	$I_c$							
$U_{зи} = \dots$ В	$U_{си}$							
	$I_c$							

### 3. Обработка результатов измерений

3.1 По результатам измерений (таблица 2) построить график прямой передачи исследуемого ПТУП.

3.2 По результатам измерений (таблица 3) построить графики семейства выходных характеристик ПТУП на одном рисунке.

3.3 Провести графоаналитические расчеты дифференциальных параметров, используя графики п.3.2.

3.4 Провести аналитические расчеты дифференциальных параметров крутизны  $S$  передаточной характеристики (1), внутреннего сопротивления  $R_i$  (2, 3), статического коэффициента  $\mu$  усиления по напряжению (4, 5), входного сопротивления (6), напряжения сток-исток  $U_{си}$  в режиме насыщения (7), тока стока в режиме насыщения  $U_{снас}$  (8), сопротивления аттенюатора (9).

#### 1) крутизна передаточной характеристики

$$S = \frac{dI_C}{dU_{зи}} \square \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} \quad \text{при } U_{си} = \text{const} \quad (1)$$

Крутизна определяет наклон статической стоко-затворной характеристики. Соответствующие значения  $\Delta I_C$  и  $\Delta U_{зи}$  при  $U_{си} = \text{const}$  могут быть найдены в заданной точке. Крутизна линейно зависит от напряжения на затворе и имеет максимальное значение при  $U_{зи} = 0$ .

#### 2) выходная проводимость

$$G_{вых} = \frac{dI_C}{dU_{си}} \square \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{си}} \quad \text{при } U_{зи} = \text{const} \quad (2)$$

Обратная ей величина называется внутренним сопротивлением транзистора  $R_i$ .

$$R_i = \frac{1}{G_{вых}} \approx \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_C} \quad \text{при } U_{зи} = \text{const} \quad (3)$$

Оно характеризует влияние напряжения  $U_{си}$  на ток стока. В режиме насыщения ток стока изменяется незначительно при изменении напряжения  $U_{си}$ , поэтому  $R_i$  от нескольких десятков до сотен килом. Соответствующие приращения  $\Delta U_{си}$  и  $\Delta I_c$  при  $U_{зи} = \text{const}$  могут быть найдены по статическим характеристикам в заданной точке (рис. 4)

3) статический коэффициент усиления по напряжению

$$\mu = \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \approx \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \quad \text{при } I_c = \text{const} \quad (5)$$

Статический коэффициент усиления  $\mu$  показывает, во сколько раз изменение по напряжению на затворе влияет на ток стока по сравнению с изменением напряжения на стоке.

Коэффициент  $\mu$  определяет потенциальные возможности полевого транзистора как усилителя напряжения и имеет значения несколько сотен.

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} = R_i \cdot S \quad (6)$$

4) входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{dU_{зи}}{dI_з} \approx \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_з} \quad \text{при } U_{си} = \text{const} \quad (7)$$

Так как ток в цепи затвора практически отсутствует, то входное сопротивление полевых транзисторов очень велико. У ПТУП оно составляет  $10^7 \dots 10^9$  Ом.

4) напряжение сток-исток в режиме насыщения

$$U_{си} = U_{зи} - U_{зи \text{ отс}}, \quad (8)$$

где  $U_{зи \text{ отс}}$  – напряжение отсечки (справочник).

Режим насыщения при увеличении абсолютного значения отрицательного

напряжения наступает при меньших значениях напряжения на стоке.

5) ток стока в режиме насыщения

$$I_{C \text{ НАС}} = I_{C \text{ МАХ}} = \frac{(U_{\text{ЗИ}} - U_{\text{ЗИ ОТС}})^2}{U_{\text{ЗИ ОТС}}^2} \quad (9)$$

где  $I_{C \text{ МАХ}}$  – максимальное значение тока стока (справочник).

6) сопротивление аттенюатора

$$R = \frac{2U_{\text{ЗИ ОТС}}^2}{S}$$

3.5 Полученные результаты свести в таблицу 6. (10)

Таблица 6

$U_{\text{ЗИ}}, \text{ В}$	$U_{\text{СИ НАС}}, \text{ В}$	$S, \text{ мА/В}$	$R_i, \text{ кОм}$	$\mu$	$R_{\text{ВХ}}, \text{ Ом}$	$R, \text{ кОм}$	$I_{\text{С НАС}}, \text{ мА}$

3.6 По результатам расчетов (таблица 6) построить графики  $S = f(U_{\text{ЗИ}})$  и  $R = f(U_{\text{ЗИ}})$ .

3.7 По каждому пункту исследований сделать выводы о соответствии полученных результатов теории.

#### 4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- название и цель работы;
- паспортные данные исследуемого ПТУП;
- рисунок с областью безопасного режима работы данного ПТУП;
- схемы измерений на лабораторной установке;
- таблицы и графики характеристики прямой передачи и семейства выходных характеристик для реального ПТУП;
- графоаналитический и аналитический расчеты дифференциальных параметров реального исследуемого ПТУП;
- графики зависимостей  $S = f(U_{зи})$  и  $R = f(U_{зи})$  для реального ПТУП;
- выводы.

#### 5. Контрольные вопросы

- 1 Поясните конструкцию и принцип действия ПТУП с каналом n-типа и с каналом p-типа.
- 2 Приведите условные графические обозначения полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом.
- 3 Какие физические факторы могут влиять на характер зависимости тока стока от напряжения на стоке ПТУП?
- 4 Изобразите и поясните статические характеристики ПТУП.
- 5 Запишите и объясните теоретическое выражение характеристики прямой передачи ПТУП.
- 6 Запишите и объясните теоретическое выражение для крутого участка характеристик ПТУП.
- 7 Чем объясняется наличие пологого участка выходных характеристик ПТУП.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ

*Цель:* исследование полупроводниковой структуры транзистора, в которой управление током в приповерхностном индуцированном канале осуществляется с помощью поперечного электрического поля, а управляющий электрод (затвор) изолирован от проводящего канала.

#### 1 Подготовка к лабораторной работе

Изучить литературу [1], [2], конспект лекций по данной теме.

Обратить внимание на то, что в лабораторной работе для исследований используется полевой транзистор с изолированным затвором – МДП-транзистор (рисунок 4.1).

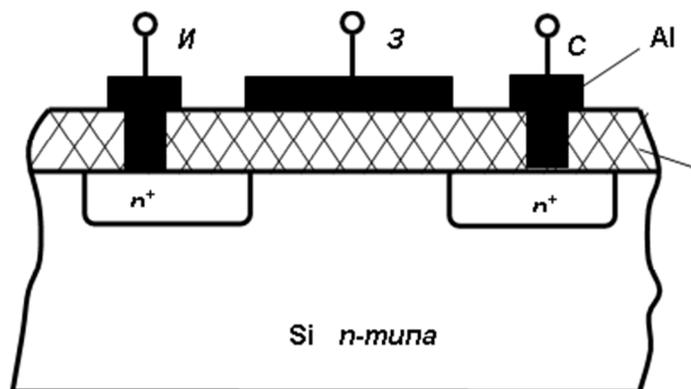


Рисунок 1 – Структура полевого транзистора с изолированным затвором (с *p*-каналом)

Необходимо помнить, что МДП-транзисторы с индуцированным каналом работают только в режиме обогащения канала основными носителями заряда.

Основными параметрами, характеризующими полевой транзистор как нелинейный элемент, являются: коэффициент усиления по напряжению  $k_U$ , крутизна передаточной характеристики  $S$ , дифференциальное выходное

внутреннее сопротивление  $R_i$ , дифференциальное сопротивление участка затвор-сток  $R_{зс}$ .

Следует обратить внимание на параметры полевых транзисторов (в том числе МДП-транзисторов), которые зависят от температуры. Ими являются напряжение отсечки и пороговое напряжение. В режиме больших токов стока повышение температуры окружающей среды приводит к уменьшению тока стока  $I_c$ . То есть автоматически происходит снижение мощности, рассеиваемой в полевом транзисторе, что обуславливает значительно меньшую склонность этих транзисторов к тепловому пробую (по сравнению с биполярными транзисторами).

**ВНИМАНИЕ!** В процессе измерений **НЕДОПУСТИМО** превышение предельно-допустимых значений токов и напряжений. Для предупреждения выхода из строя МДП-транзистора следует определить область безопасных режимов. Подробно процедура описана в лабораторной работе №2.

Обозначения МДП-транзисторов с соответствующим индуцированным каналом показаны на рисунке 4.2.



Рисунок 2 – Полевой транзистор с изолированным затвором (МДП-транзистор) с индуцированным  $p$ -каналом и  $n$ -каналом

## 2 Порядок выполнения лабораторной работы

2.1 Собрать схему исследования (рисунок 4.3) на лабораторной установке «Электронные приборы». Следует обратить внимание на полярность питающих напряжений! Она должна соответствовать рабочему режиму работы исследуемой полупроводниковой структуры (МДП-транзистор с индуцированным  $p$ -каналом или  $n$ -каналом).

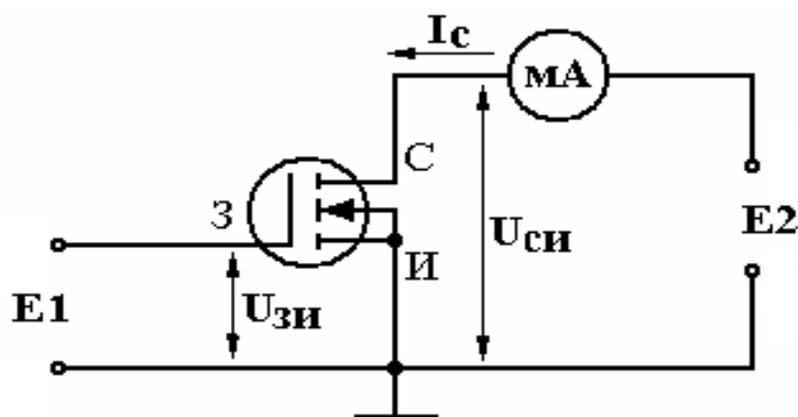


Рисунок 3 – Схема для измерений статических характеристик

2.2 Снять две передаточные характеристики  $I_c = f(U_{зи})$  при напряжении на стоке  $0,3U_{си доп}$  и  $0,6U_{си доп}$ . Результаты измерений занести в таблицу 1.

В ходе эксперимента определить пороговое значение напряжения  $U_{пор}$  при токе стока порядка  $I_c = 100$  мкА, а затем, увеличивая  $U_{зи}$ , снять экспериментальные значения тока.

Таблица 1

0,3 $U_{си доп}$		0,6 $U_{си доп}$	
$U_{зи}$ , В	$I_c$ , мА	$U_{зи}$ , В	$I_c$ , мА

2.3 Снять выходные характеристики  $I_c = f(U_{си})$  МДП-транзистора с индуцированным каналом (при комнатной температуре).

2.3.1 Установить на входе собранной схемы такое значение параметра  $U_{зи}$ , которое соответствует току стока  $0,3I_{с доп}$  при  $U_{си доп}$  (п. 2.2).

2.3.2 В выходной цепи, изменяя значение напряжения  $U_{си}$ , фиксировать соответствующие значения тока стока.

2.3.3 Увеличить на входе схемы значение параметра  $U_{зи}$  до величины, которая соответствует току стока в п. 2.2  $I_c = 0,8I_{с доп}$  при  $U_{си доп}$ .

2.3.4 В выходной цепи, изменяя значение напряжения  $U_{си}$ , фиксировать соответствующие значения тока стока  $I_c$ .

2.3.5 Установить на входе значение параметра  $U_{зи}$ , соответствующее среднему значению относительно пунктов 2.3.1 и 2.3.3. Выполнить пункт 2.3.4.

2.3.6 Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{зи} =$	$I_c = 0,3 I_{c \text{ доп}}$	$U_{зи} =$	$I_c = 0,8 I_{c \text{ доп}}$	$U_{зи} =$	$I_c = I_{c \text{ доп}}$
$U_{си}, В$	$I_c, мА$	$U_{си}, В$	$I_c, мА$	$U_{си}, В$	$I_c, мА$

2.4 Поместить МДП-транзистор в термостат при температуре  $T = 40^\circ\text{C}$ .

2.5 Снять управляющую (передаточную) характеристику  $I_c = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = 0,3 U_{си \text{ доп}}$ . Для этого необходимо повторить пункт 2.2.

2.6 Поместить МДП-транзистор в термостат при температуре  $T = 80^\circ\text{C}$ . Повторить пункт 2.5.

2.7. По результатам измерений заполнить таблицу 3.

Таблица 3

$T = 40^\circ\text{C}, U_{си} = 0,3 U_{си \text{ доп}}$		$T = 80^\circ\text{C}, U_{си} = 0,3 U_{си \text{ доп}}$	
$U_{зи}, В$	$I_c, мА$	$U_{зи}, В$	$I_c, мА$

### 3 Обработка результатов измерений

3.1 По результатам измерений (таблица 1) построить графики двух управляющих (передаточных) характеристик МДП-транзистора  $I_c = f(U_{зи})$ .

3.2 По результатам измерений (таблица 2) построить графики семейства выходных характеристик  $I_c = f(U_{си})$  МДП-транзистора на одном рисунке (при комнатной температуре).

3.3 По результатам измерений (таблица 3) построить графики управляющих (передаточных) характеристик  $I_c = f(U_{зи})$  МДП-транзистора на одном рисунке (при температуре 40°C и 80°C).

3.4 По результатам обработки измерений (п.п. 3.1, 3.2) рассчитать теоретические зависимости  $I_c = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = 0,6U_{си доп}$  и  $I_c = f(U_{си})$  при  $U_{зи}$ , соответствующем току стока  $I_c = 0,8 I_{c доп}$ . Для этого с использованием формулы (3) определить крутизну  $S$  по передаточной характеристике (п. 3.1) при  $U_{си} = 0,3U_{си доп}$  ( $U_{зи}$  выбрать в середине снятой характеристики).

По найденному значению  $S$  рассчитать удельную крутизну  $b$  (5.4).

На семействе выходных характеристик отметить границы линейного участка и границу режима насыщения  $U_{си нас} = U_{си} - U_{пор}$ .

Далее по формулам (1) и (2) рассчитать требуемые теоретические зависимости и нанести их на графики, полученные в результате экспериментальных исследований.

Для расчета тока стока в линейном режиме при  $U_{си} < U_{си нас} = U_{зи} - U_{зи 0}$  используются следующие выражения:

$$I_c = b(U_{зи} - U_{пор})U_{си} - \frac{U_{си}^2}{2} \quad (1)$$

При  $U_{cu} \ll U_{зи} - U_{пор}$  можно использовать линейную аппроксимацию зависимости

$$5.1 \quad I_c = b(U_{зи} - U_{пор})U_{cu}$$

Тогда в этом режиме можно рассчитать зависимость выходного сопротивления  $R_{вых л.р.}$  от напряжения  $U_{зи}$

$$R_{вых л.р.} = \frac{1}{b(U_{зи} - U_{пор})}$$

Для расчета тока стока в режиме насыщения при  $U_{cu} \geq U_{cu \text{ нас}}$  используются следующие выражения

$$I_c = 0,5b(U_{зи} - U_{пор}) \quad (2)$$

В соответствии с (5.2)  $I_c$  в режиме насыщения не зависит от  $U_{cu}$ , т.е. выходное сопротивление МДП-транзистора неограниченно велико.

Реальная величина  $R_{вых \text{ нас}}$  составляет десятки  $кОм$ , что связано с уменьшением длины канала. Для режима насыщения также можно использовать линейную аппроксимацию

$$I_c = \frac{b}{2}(U_{зи} - U_{пор})^2 + \frac{U_{cu} - (U_{зи} - U_{пор})}{R_{вых \text{ нас}}}$$

По управляющей характеристике можно определить крутизну МДП-транзистора

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{cu} - \text{const} \quad (3)$$

или рассчитать ее с учетом (2):

$$S = b(U_{зи} - U_{пор}) \quad (4)$$

для пологого участка стоковой характеристики.

3.5 По каждому пункту исследований сделать выводы о соответствии полученных результатов теории.

## 4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- название и цель работы;
- паспортные данные исследуемого МДП-транзистора;
- схемы измерений на лабораторной установке;
- таблицы и графики управляющей (передаточной) характеристики и семейства выходных характеристик для реального МДП-транзистора;
- выводы.

## 5 Контрольные вопросы

- 1 Нарисуйте структуру и объясните принцип действия МДП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа.
- 2 Нарисуйте и объясните передаточную (управляющую) характеристику МДП-транзистора.
- 4 Нарисуйте и объясните семейство выходных характеристик МДП-транзистора.
- 5 В чем различие принципа действия и основных характеристик полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом и МДП- транзистора с индуцированным каналом?
- 6 Какими преимуществами обладают полевые транзисторы по сравнению с биполярными?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Основы полупроводниковой электроники: учебное пособие М.: Горячая линия - Телеком, 2011. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=315879>
2. Соколов С.В., Титов Е.В. Электроника: учебное пособие для вузов М.: Горячая линия – Телеком, 2013. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=436971>

