

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РФ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кафедра теоретической радиотехники
С.Г.Камзолова

ПОСОБИЕ

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине

«Общая электротехника и электроника»,

раздел «Электронные приборы»

Часть I.

для студентов

специальности 201300

дневного обучения

Москва

ББК 6Ф0.3

К18

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Рубцов
Камзолова С.Г.

К18 Пособие по выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Общая электротехника и электроника», ч.1. – М.: МГТУ ГА,
2001 – 40 с.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом
для студентов специальности 201300 дневного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 07.04.2001 г.
и методического совета 24.05.2001 г.

Редактор Т.М. Приорова

ЛР №020580 от 23.06.97 г.

Подписано в печать 10.10.2001г.

Печать офсетная

Формат 60x84/16

2,5 уч.-изд. л.

2,32 усл.печ.л.

Заказ № 650/ 401

Тираж 350 экз.

Московский государственный технический университет ГА
Редакционно-издательский отдел
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный
технический университет ГА, 2001

Работа № 1

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ. ОДНОФАЗОВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик и параметров полупроводниковых диодов на базе р-п-перехода и принципа действия однополупериодного выпрямителя.

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Принцип работы большинства диодов основан на использовании физических явлений в электрическом выпрямляющем переходе, в основном, р-п-переходе и переходе Шотки. Разнообразие свойств р-п-перехода позволили на его базе разработать диоды для различных назначений. В связи с этим подготовка к выполнению лабораторной работы должна начинаться с изучения принципа работы р-п-перехода сначала при нулевом внешнем напряжении, а затем при прямом и обратном напряжениях.

Обязательно знание терминов и их определений, применяемых при описании принципа работы, таких, например, как акцептор, донор, энергия ионизация акцептора и донора, генерация и рекомбинация носителей заряда, диффузия и дрейф.

Диод на р-п-переходе имеет один выпрямляющий электрический (р-п) переход и два невыпрямляющих.

Область, откуда инжектируются носители заряда, называется эмиттером диода, куда они инжектируются, называется базой.

Условное обозначение диода представлено на рисунке 1.1. Стрелка условного обозначения показывает направление прямого тока ($I_{пр}$). Прямой ток течет через диод в случае, когда напряжение на аноде (А) положительно относительно катода (К). В противном случае, диод закрыт обратным напряжением

$$U_{обр} = U_{АК},$$

где $U_{АК}$ – напряжение между А и К.

Если $I_{пр}$ составляют, в основном, дырки, то А является эмиттером, а К – базой; в противном случае, наоборот.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) диода нелинейна. На рис.1.2. в качестве примера представлена ВАХ маломощного германиевого диода. Прямая $I_{пр} = f(U_{пр})$ и обратная $I_{обр} = f(U_{обр})$ ветви изображены в разных масштабах, поэтому ВАХ в начале координат имеет излом. Прямая ветвь имеет два участка: криволинейный, где потенциальный барьер еще не скомпенсирован, и линейный. Обратная ветвь показывает, что германиевый диод имеет довольно большой обратный ток. Следует обратить внимание, что при небольшом прямом напряжении прямой ток относительно велик, а при значительном $U_{обр}$ обратный ток мал, т.е. диод обладает односторонней проводимостью, т.е. выпрямляющим свойством. Сравнение дифференциальных сопротивлений диода при прямом и обратном включениях также подтверждает это его свойство.

Дифференциальное сопротивление диода - сопротивление малому переменному току при заданном напряжении или токе смещения, например,

$$r = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{m.A} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \Big|_{m.A}; \text{ ток смещения } I_A = 3 \text{ mA.}$$

Следует выбирать ΔU или ΔI в пределах линейного участка, обязательно включающего $m.A.$. Тогда

$$r_{пр} = \frac{0,26 - 0,23}{(3 - 2) \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ Ом.}$$

Далее в качестве примера выбирается т.В при обратном напряжении $U_{обр} = 100 \text{ В}$. Тогда $r_{обр} = \frac{100 - 50}{(0,2 - 0,1) \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ кОм}$.

Ознакомьтесь с особенностями ВАХ кремниевого диода по сравнению с германиевым. Обратите внимание, как сказывается материал на свойствах выпрямительного диода.

В настоящей лабораторной работе исследуются выпрямительные свойства маломощных германиевого и кремниевого диодов.

При достижении обратным напряжением определенного для данного диода значения дифференциальная проводимость его резко увеличивается. Различают электрический и тепловой пробой. Электрический пробой - явление обратимое. Он является основным режимом работы стабилизатора - диода, используемого для стабилизации напряжения. Его ВАХ приведена на рис.1.3. Укажите участок ВАХ, где стабилизатор выполняет свою основную функцию.

Укажите на ВАХ основные параметры стабилитрона. Тепловой пробой – необратимый процесс, в результате которого разрушается кристаллическая решетка полупроводника и диод выходит из строя. Укажите на рис. 1.3, где наступает тепловой пробой. Изучите физику лавинного и теплового пробоев. Стабилитрон также является предметом изучения данной лабораторной работы.

На рис.1.4 приведена схема однофазного однополупериодного выпрямителя. При положительной полуволне $U_{вх}$ конденсатор заряжается по цепи “а” – С – Д. При отрицательной полуволне конденсатор разряжается по цепи С – R_н. Диод открыт в течение времени, когда $U_{вх\ m} > U_C$.

Напряжение на выходе выпрямителя содержит постоянную составляющую U_0 и напряжение пульсаций $U_{п}$

Лабораторное задание

Установить сменную плату № 1, наборное поле – в положение 1.

1. Снятие ВАХ при прямом напряжении. Соединить генератор тока ГТ стенда с соответствующими точками платы, при этом ГТ будет источником прямого тока диода. Закоротить точки Х3 – Х4. Подключить прибор АВМ-2 для измерения прямого напряжения, учитывая, что $U_{пр} < I$. Установить один из диодов, выданных преподавателем, в прямом включении (VI на левой половине платы). Изменять прямой ток через диод потенциометром ГТ, контролируя его значение по измерителю выхода (ИВ). Измерять при каждом значении прямого тока значение прямого напряжения.

Аналогичные измерения провести с остальными диодами. Результаты занести в таблицы вида табл. 1.1.

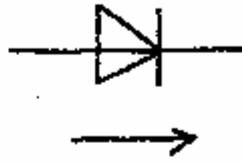


Рис. 1.1

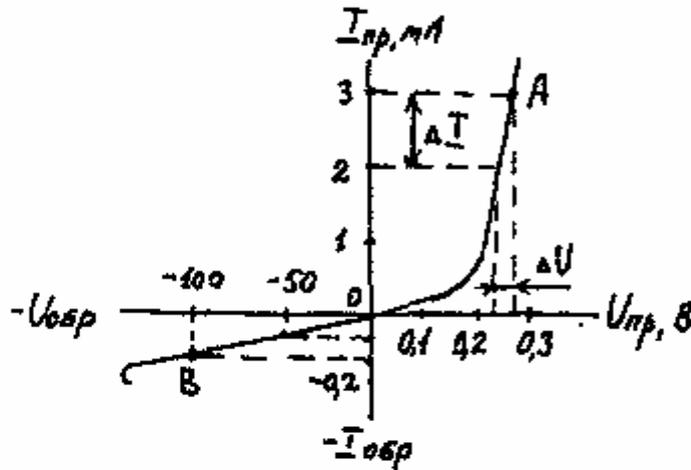


Рис. 1.2

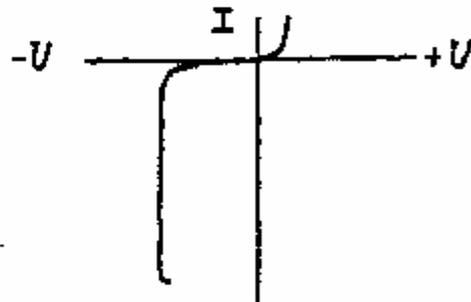


Рис. 1.3

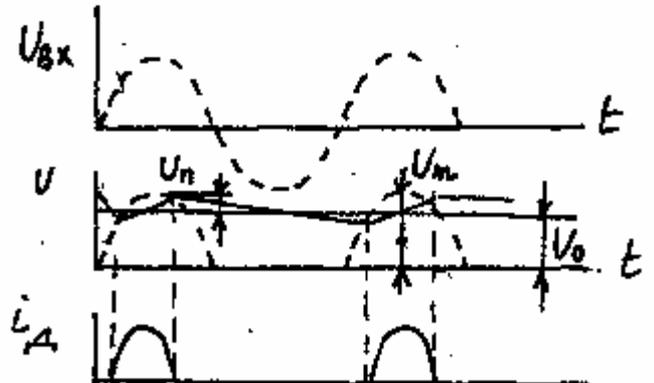
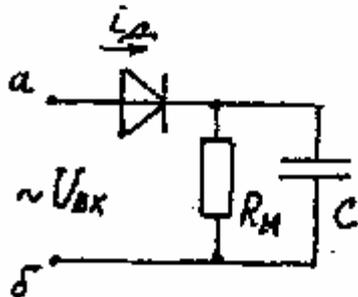


Рис. 1.4

Таблица 1.1

$I_{пр}, \text{мА}$	
$U_{пр}, \text{В}$	

Построить ВАХ при прямом напряжении для всех диодов на одном графике. Определять материал (германий, кремний) диода. Рассчитать прямое дифференциальное сопротивление на линейном и квадратичном участках ВАХ германиевого диода. Сделать сравнительные выводы о прямых участках ВАХ диодов.

2. Снятие обратных ветвей.

Установить германиевый диод в обратном включении (V2, правая половина платы). Соединить генератор напряжения ГНЗ стенда с точками X11 и X12 платы. Для измерения обратного тока использовать прибор АВО, включив его между точками X7 и X8. Изменяя обратное напряжение, измерять обратный ток диода. Обратное напряжение контролировать прибором ИВ, установив его переключатель в положение ГНЗ. Результаты занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

$I_{обр}, \text{мкА}$	
$U_{обр}, \text{В}$	

Провести аналогичные измерения с кремниевым диодом (иметь в виду, что возможны практически нулевые обратные токи).

Построить ВАХ диодов для обратного включения. Рассчитать дифференциальное сопротивление германиевого диода для $U_{обр.} = 50$ В. Сравнить значения сопротивлений для прямого и обратного включений. Сделать сравнительные выводы об обратных участках ВАХ диодов.

3. Снятие обратной ветви стабилитрона.

Установить стабилитрон в обратном включении (V2, правая половина платы). Соединить источник ГН2 стенда с точками X11 – X12 платы. Для измерения обратного тока использовать прибор АВМ-2. $U_{обр.}$ контролировать по прибору UB, установив его переключатель в положение ГН2. Снять зависимость $I_{обр.} = f(U_{обр.})$ до значения $I_{обр.} \approx 50$ мА.

Построить ВАХ стабилитрона при обратном включении. Записать значение напряжения стабилизации $U_{ст.}$ Рассчитать дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Анализируя ВАХ диодов, сделать выводы об их применении.

4. Работа диода в режиме выпрямления. Однофазный выпрямитель.

Установить плату №8, наборное поле в положение 1.

Установить германиевый диод (V1). Собрать схему однофазного однополупериодного выпрямителя, для чего закоротить точки X3-4 и установить $R2 = 1,6$ кОм.

Подать переменное напряжение с генератора низкой частоты ГНЧ стенда (1-1 - 1) между точками 1 и 2 платы, при этом переключатель ГНЧ “Диалазон” установить в положение “10 кГц”. Амплитуда переменного сигнала должна быть такой, чтобы контролируя осциллограммы на входе (X1-5) и выходе (X3-5 или 4-5), наблюдать выпрямительные свойства диода.

Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов. Определить по осциллограмме величину прямого падения напряжения на диоде и сравнить его с тем, которое определяется по ВАХ. Сделать выводы о выпрямительных свойствах диода. Установить $C1=0,1$ мкФ. Измерить U_0 и U_n , f_n – частоту пульсации.

Контрольные вопросы.

1. Дайте определение дрейфа.
2. Дайте определение диффузии.
3. Объясните процесс образования потенциального барьера.
4. Процессы в р-п-переходе при прямом включении.
5. Процессы в р-п-переходе при обратном включении.
6. Основное свойство р-п-перехода.
7. Чем отличаются ВАХ германиевого и кремниевого диодов?
8. Особенности ВАХ стабилитрона.
9. Поясните, как использовать исследуемые диоды в соответствии с их ВАХ.

Работа № 2.

СХЕМА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ.

Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик и параметров биполярного транзистора (БТ), включенного по схеме с общей базой (ОБ).

Методические указания к выполнению лабораторной работы.

Настоящая лабораторная работа является первой в серии работ с применением БТ. В связи с этим необходимо прежде всего изучить физику работы БТ. Удобно при этом использовать схему включения ОБ и активный режим работы (рис.2.1). Обратите внимание, что область эмиттера сильно легирована, т.к. именно из эмиттера инжектируются его основные носители через пониженный потенциальный барьер эмиттерного перехода; база тонкая и слабо легирована, т.к. это позволяет инжектированным в Б носителям (неосновным для Б) достичь коллекторного перехода за время их жизни. Обратносмещенный в активном режиме коллекторный переход не допускает диффузию основных носителей из коллектора в базу и из Б в К, а, наоборот, вытягивает неосновные носители из базы, т.е. обеспечивает процесс экстракции. Необходимо знать, что следующие процессы обеспечивают токи транзистора: инжекция -- ток эмиттера $I_э$, рекомбинация -- ток базы $I_б$, экстракция -- ток

коллектора I_K . Понимание характера этих процессов помогает запомнить следующие выражения:

$$I_Э = I_K + I_Б, \quad I_Б \ll I_K, \quad I_K \approx I_Э, \text{ но всегда } I_K < I_Э.$$

Изменением потенциального барьера Э-го перехода изменяется уровень инжекции, т.е. $I_Э$, а как результат, I_K . Т.е. входной ток ($I_Э$) изменяет выходной I_K – в этом заключается управление транзистором. Ток коллекторного перехода определяется током эмиттерного перехода – в этом проявляется взаимодействие переходов БТ.

После того, как изучено движение носителей заряда в активном режиме, нетрудно перейти к пониманию процессов в режимах отсечки и насыщения. Обратите внимание, что в режиме отсечки $I_Э = 0$, а ток коллектора не равен 0. Обратный ток коллекторного перехода $I_{К0}$ (иногда его называют тепловым из-за его сильного возрастания при повышении температуры) незначителен по величине, но может привести к нестабильной работе схемы.

Режим насыщения связан с изменением смещения коллекторного перехода с обратного на прямое. Реально полярность E_2 не меняют, инверсия смещения происходит из-за накопления неоснованных носителей в Б около К-го перехода вследствие его ограниченной пропускной способности, т.е. уровень экстракции падает. При дальнейшем возрастании прямого смещения К-го перехода экстракция прекращается и $I_K = 0$.

На рис.2.3 показаны входные и выходные ВАХ транзистора, включенного по схеме ОБ (рис.2.2).

Входное напряжение $U_{вх} = U_{ЭБ}$, выходное $U_{вых} = U_{КБ}$, т.е. входное и выходное напряжения задают и измеряют относительно

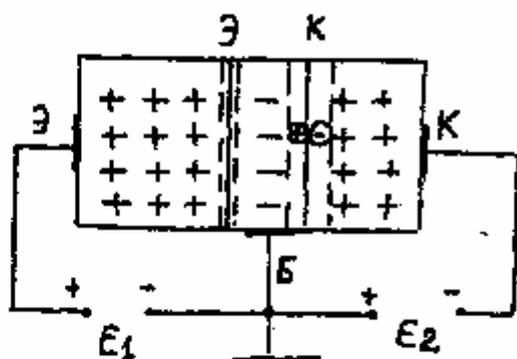


Рис. 2.1

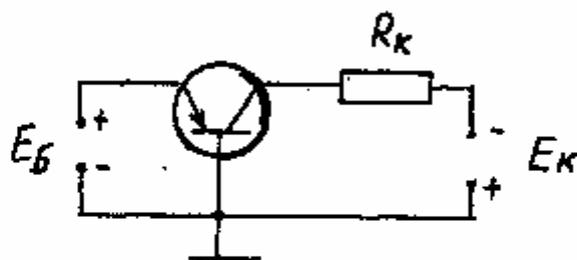


Рис. 2.2

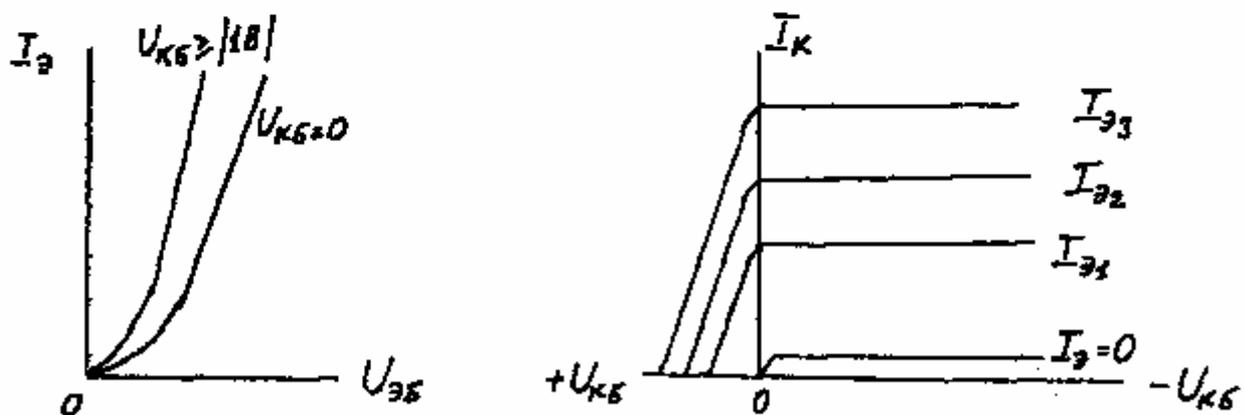


Рис. 2.3

общего электрода – базы. Входным током $I_{ВХ}$ является I_3 , выходной ток $I_{ВЫХ} = I_k$.

Параметром входных характеристик является $U_{КБ}$. При $U_{КБ} = 0$ зависимость $I_3 = f(U_{ЭБ})$ практически не отличается от ВАХ диода. При $(U_{КБ}) > 1В$, кривые сливаются. Отметим, что входные ВАХ имеют криволинейный и линейный участки, т.е. входная цепь БТ может быть источником нелинейных искажений. По входной ВАХ можно определить дифференциальное сопротивление БТ, которое примерно равно малосигнальному параметру

$$h_{11Б} = \left. \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_3} \right|_{U_{КБ} = const}$$

Параметром выходных характеристик является I_3 . Кривая с параметром $I_3 = 0$ соответствует режиму отсечки. Кривые при $U_{КБ} > 0$ соответствуют режиму насыщения. Между этими двумя режимами находится активный режим. Отметим, что в активном режиме кривые выходного семейства эквидистантны, что обеспечивает хорошую линейность усиления. По выходным ВАХ можно определить дифференциальный коэффициент передачи I_3

$$h_{21Б} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3} \right|_{U_{КБ} = const}$$

и дифференциальное выходное сопротивление БТ

$$r_{ВЫХ} = \frac{1}{h_{22Б}}, \text{ где } h_{22Б} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{КБ}} \right|_{I_3 = const}$$

Отметим, что входное сопротивление схемы ОБ невелико (единицы – десятки Ом), а выходное большое (сотни кОм). Схема усиливает напряжение и мощность, но не усиливает ток ($h_{21Б} < 1$).

Лабораторное задание

Установить сменную плату № 5, наборное поле - в положение 1. Исследуемый транзистор р-п-р. Соединить ГТ стенда с соответствующими точками платы, при этом ГТ будет источником тока эмиттера - I_3 . Подключить прибор АВМ – 2 для измерения напряжения Э-Б, учитывая, что $U_{ЭБ} < 1$ В.

Закоротить точки Х1 – Х2.

Подключить прибор АВМ – 2 для измерения тока коллектора. Соединить источник ГН1 стенда с соответствующими точками платы, при этом он задает напряжение на коллекторный переход транзистора, т.е. $U_{КБ}$.

1. Снятие входных характеристик.

Установить $U_{КБ} = 0$ В. Контролировать $U_{КБ}$ по прибору ИВ (измеритель выхода), установив его переключатель в положение ГН1. Установить переключатель прибора ИВ в положение ГТ, при этом он индицирует значение I_3 . Изменять I_3 потенциометром ГТ и контролировать $U_{ЭБ}$ (по АВМ - 1); значение I_3 и $U_{ЭБ}$ занести в таблицу 2.1.

Построить по результатам график $I_3 = f(U_{ЭБ}) | U_{КБ} = 0$

Таблица 2.1

$I_3, \text{мА}$	
$U_{ЭБ}, \text{В}$ при $U_{КБ}=0$	
$U_{ЭБ}, \text{В}$ при $U_{КБ}=-5\text{В}$	

Установить $U_{КБ}=-5 \text{ В}$ и снять, аналогично предыдущему, график $I_3=f(U_{ЭБ})|_{U_{КБ}=-5\text{В}}$.

Сделать выводы о характере зависимостей. Рассчитать $h_{11Б}$ в рабочей точке, заданной преподавателем.

2. Снятие выходных характеристик.

Установить $I_3=1\text{мА}$, контролировать I_3 по $U \text{ В}$, положение переключателя которого "ГТ". Установить переключатель ИВ в положение ГН1. Изменять напряжение $U_{КБ}$ потенциометром ГН1, начиная со значения -5 В в сторону уменьшения абсолютного значения до 0; измерять ток $I_{К}$ прибором АВМ-2. Далее увеличивать $+U_{КБ}$ до значения, при котором $I_{К}$ станет равным 0. Результаты измерений занести в табл. 2.2. Построить по результатам измерений график $I_{К}=f(U_{КБ})|_{I_3=1\text{мА}}$.

Таблица 2.2.

$U_{КБ}, \text{В}$	
$I_{К}, \text{мА}$ при $I_3=1\text{мА}$	
$I_{К}, \text{мА}$ при $I_3=2\text{мА}$	
$I_{К}, \text{мА}$ при $I_3=3\text{мА}$	

Устанавливая $I_3=2\text{мА}$ и $I_3=3\text{мА}$, снять (аналогично описанному выше) графики $I_K=f(U_{КБ})|_{I_3=2\text{мА}}$ и $I_K=f(U_{КБ})|_{I_3=3\text{мА}}$. Сделать выводы о характере зависимостей. Рассчитать $h_{21Б}$ и выходное сопротивление схемы ($\sim 1/h_{22Б}$) для рабочей точки п.1.

Контрольные вопросы.

1. Физические процессы в биполярном транзисторе.
2. Покажите, что активный режим БТ является управляемым.
3. Усилительные свойства схемы ОБ.
4. Почему схема ОБ не усиливает ток?
5. Определение входного сопротивления.
6. Определение выходного сопротивления.
7. Физический смысл h – параметров.

Работа № 3

СХЕМА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ.

Цель работы.

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик и параметров биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

Методические указания

к выполнению лабораторной работы.

БТ в схеме ОЭ управляется током базы. Введение дополнительных носителей заряда через вывод базы в эмиттерный переход понижает потенциальный барьер, вызывая увеличение уровня инжекции и, следовательно, тока коллектора. Так входной ток I_B влияет на выходной - I_K .

Носители заряда движутся в активном режиме так же, как и в этом же режиме в схеме ОБ.

Режим отсечки достигается запирающим эмиттерного перехода, при этом $I_B = -I_{K0}$, $I_K = I_{K0}$; режим насыщения происходит из-за снижения пропускной способности коллекторного перехода вследствие накопления избыточных (неосновных) носителей в базе.

Схема ОЭ представлена на рис. 3.1, а входные и выходные ВАХ для этого включения БТ – на рис.3.2.

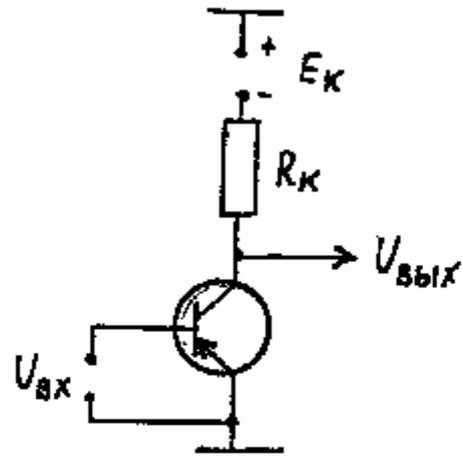


Рис. 3.1

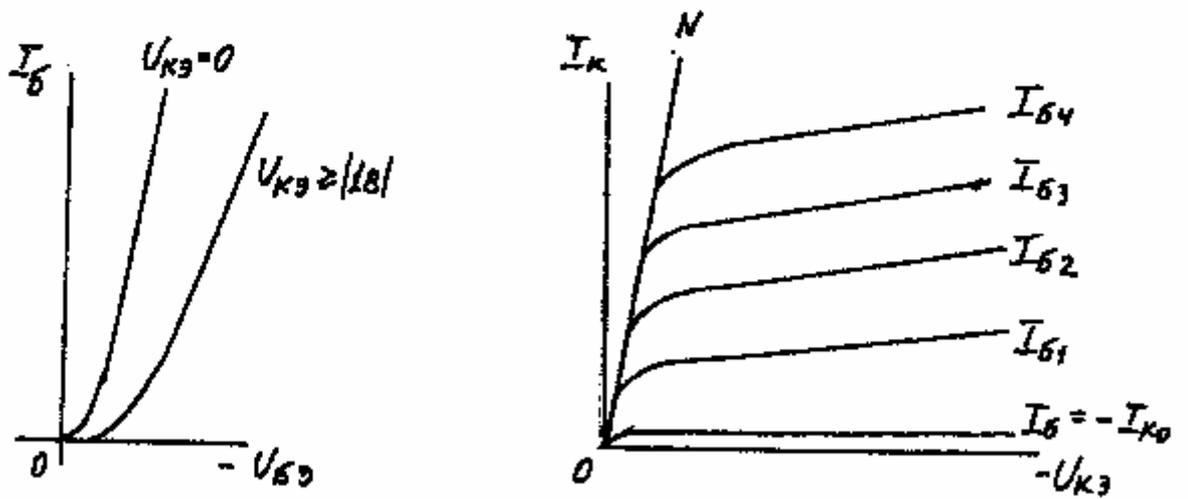


Рис. 3.2

$$U_{ВХ} = U_{БЭ}, \quad U_{ВЫХ} = U_{КЭ}, \quad I_{ВХ} = I_{Б}, \quad I_{ВЫХ} = I_{К}$$

Параметром входных характеристик является $U_{КЭ}$. При $U_{КЭ} = 0$ зависимость $I_{Б} = f(U_{БЭ})$ практически не отличается от ВАХ диода.

При $[U_{КЭ}] > 1$ В кривые сливаются. Проанализируйте возможности входных ВАХ. Могут ли они быть причиной нелинейных искажений? Какой из основных параметров БТ можно рассчитать по ним?

Параметром выходных ВАХ является ток базы. На выходных ВАХ отчетливо видны три области, соответствующие трем режимам работы: кривая с параметром $I_{Б} = -I_{К0}$ - режиму отсечки; линия ON, касательная к кривым семейства - режиму насыщения; между ними - активному режиму. Ознакомьтесь, какие малосигнальные параметры можно рассчитать по выходным ВАХ.

Схема включения ОЭ обладает наилучшими усилительными свойствами. Покажите, что это действительно так, используя очевидные соотношения:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}, \quad K_I = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}}, \quad K_P = K_{UI} \cdot K_B$$

где K_U , K_I , K_P - коэффициенты усиления соответственно напряжения, тока и мощности.

Лабораторное задание

Установить сменную плату № 6, наборное поле в положение 1.

Исследуемый транзистор р-п-р. Соединить ГТ стенда с соответствующими точками, при этом ГТ будет источником тока

базы – 16. Подключить прибор АВМ – 1 для измерения напряжения Б-Э, учитывая, что $U_{БЭ} < 1$ В.

Закоротить точки Х1 – Х2.

Подключить прибор АВМ – 2 для измерения тока коллектора I_K .

Соединить источник ГН2 стенда с соответствующими точками платы, при этом он задает напряжение $U_{КЭ}$.

1. Снятие входных характеристик.

Установить $U_{КЭ} = 0$ В. Контролировать $U_{КЭ}$ по прибору ИВ, установив его переключатель в положение ГН2.

Установить переключатель прибора ИВ в положение ГТ, при этом он индицирует значение I_B . Изменять ток базы I_B потенциометром ГТ и контролировать $U_{БЭ}$ (по АВМ-1); значения I_B и $U_{БЭ}$ занести в табл. 3.1. Построить по результатам измерений график $I_B = f(U_{БЭ}) | U_{КЭ}$.

Таблица 3.1

$I_B, \text{ мА}$	
$U_{БЭ}, \text{ В при } U_{КЭ} = 0$	
$U_{БЭ}, \text{ В при } U_{КЭ} = -5 \text{ В}$	

Установить $U_{КЭ} = -5$ В и снять (аналогично предыдущему) график $I_B = f(U_{БЭ}) | U_{КЭ} = -5 \text{ В}$.

Сделать выводы о характере зависимостей. Рассчитать h_{112} в рабочей точке, заданной преподавателем.

2. Снятие выходных характеристик.

Установить $I_B=0,1$ мА; контролировать I_B по ИВ, положение переключателя которого "ГТ". Установить переключатель ИВ в положение ГН2. Изменять напряжение $U_{кэ}$ потенциометром ГН2, начиная с -10 В в сторону уменьшения абсолютного значения до 0; измерять ток I_k прибором АВМ-2. Результаты измерений занести в табл. 3.2. Построить по результатам измерений график $I_k=f(U_{кэ})|_{I_B=0,1мА}$.

Таблица 3.2

$U_{кэ}, В$	
$I_k, мА$ при I_B	
$I_k, мА$ при $I_B=0,2$ мА	
$I_k, мА$ при $I_B=0,3$ мА	

Устанавливая $I_B=0,2$ мА и $I_B=0,3$ мА, снять (аналогично описанному выше) графики $I_k=f(U_{кэ})|_{I_B=0,2мА}$ и $I_k=f(U_{кэ})|_{I_B=0,3мА}$. Сделать выводы о характере зависимостей. Оценить дифференциальное выходное сопротивление схемы ($\sim 1/h_{22э}$) в активном режиме. Рассчитать $h_{21э}$ в рабочей точке п.1.

Сравнить схемы ОБ и ОЭ по следующим признакам: усилительные свойства, входное и выходное сопротивления, линейность характеристик.

Контрольные вопросы

1. Почему схема на рис. 3.1 называется схемой с ОЭ?
2. Покажите, что $K_U > 1$.
3. Покажите, что $K_I > 1$.
4. Покажите на схеме ОЭ контура токов I_B , I_K , I_E .
5. Почему при больших прямых напряжениях входная характеристика линейна?
6. Укажите области, соответствующие активному режиму и режиму насыщения.

Работа № 4

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР В РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ

Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ работы биполярного транзистора в схемах усиления переменного сигнала.

Методические указания

к выполнению лабораторной работы

Одним из важнейших применений транзистора является усиление переменного сигнала с допустимым или заданным уровнем искажений. Усиление сигнала происходит за счет энергии источника постоянного тока в цепи коллектора с помощью транзистора. Напомним, что наилучшими усилительными свойствами обладает схема ОЭ, поэтому она получила наибольшее распространение. Однако, с точки зрения нелинейных искажений, лучше ОБ, поэтому она используется в выходных каскадах, где на транзистор подаются большие входные сигналы.

Рассмотрим принцип усиления на примере упрощенного усилительного каскада на транзисторе, включенном по схеме ОЭ (рис.4.1) и работающем в режиме усиления класса «А».

Резисторы R_1 , R_2 и источник питания E_k задают постоянную составляющую базового тока. Усиливаемый сигнал подается на базу через конденсатор C_1 большой емкости, сопротивление которого для переменного напряжения мало. Выходной сигнал снимается с

коллектора через конденсатор С2 большой емкости и поступает в резистор нагрузки Rн. Нагрузкой может служить, например, следующий каскад усиления, тогда Rн – его входное сопротивление

На рис. 4.2а показано семейство выходных характеристик маломощного транзистора и положение точки покоя соответствующее активному режиму; она лежит на пересечении характеристики, соответствующей $I_B = I_{B0}$, и нагрузочной прямой постоянного тока, задаваемой уравнением.

$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K$, где $E_K = 25$ В; $R_K = R_K = 1$ кОм, R_K – сопротивление постоянному коллекторному току.

Эта прямая построена по 2-м точкам, одна из которых лежит на оси абсцисс ($U_{КЭ} = E_K$), а другая на оси ординат ($I_K = E_K / R_K$). Точка А определяет постоянные составляющие коллекторного тока I_{K0} и напряжения $U_{КЭ0}$. На графике входных характеристик $U_{ВХ}$ соответствует $I_B = I_{B0}$.

Пусть на входе действует малое переменное напряжение $U_{ВХм}$, изменяющееся по гармоническому закону. Так как входные характеристики слабо зависят от $U_{КЭ}$, можно считать, что рабочая точка движется вдоль отрезка ВАС, лежащего на одной и той же входной характеристике (рис. 4.2б).

На графике выходных характеристик при отсутствии В рабочая точка перемещается вдоль нагрузочной прямой постоянного тока, занимая крайние положения В и С, лежащие на характеристиках при $I_B' = I_{B0} + I_{Bм}$, $I_B'' = I_{B0} - I_{Bм}$, где $I_{Bм}$ – амплитуда базового тока. Отрезок ВС должен быть расположен в области активного режима. С учетом R_H рабочая точка движется по нагрузочной прямой переменного тока (пунктирная линия) пределах отрезка $B'A'C'$. Тангенс угла наклона ее к оси абсцисс

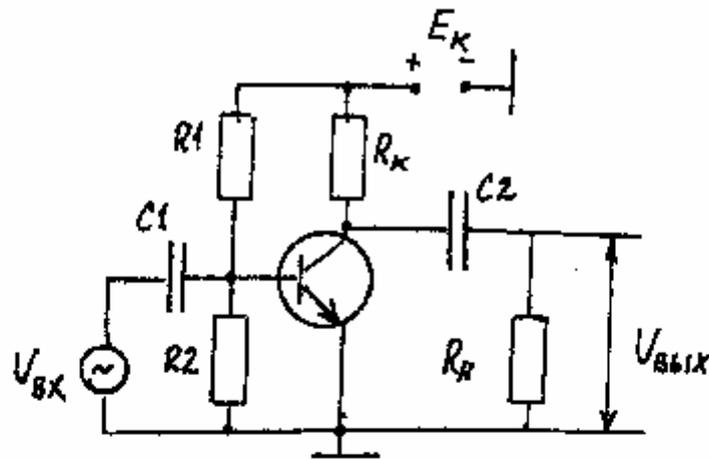


Рис. 4.1

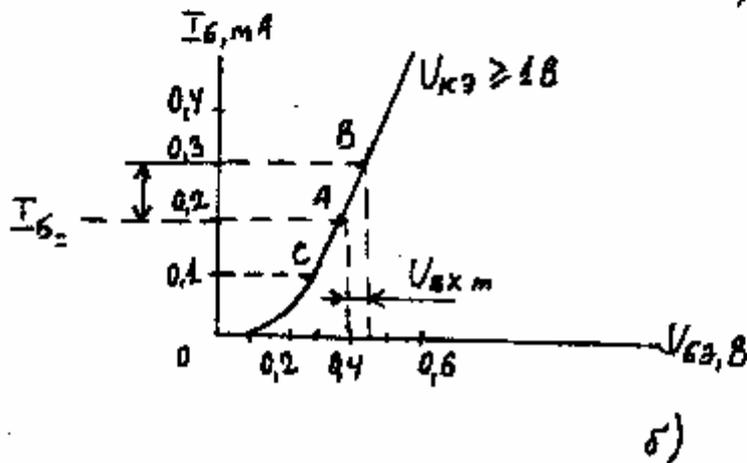
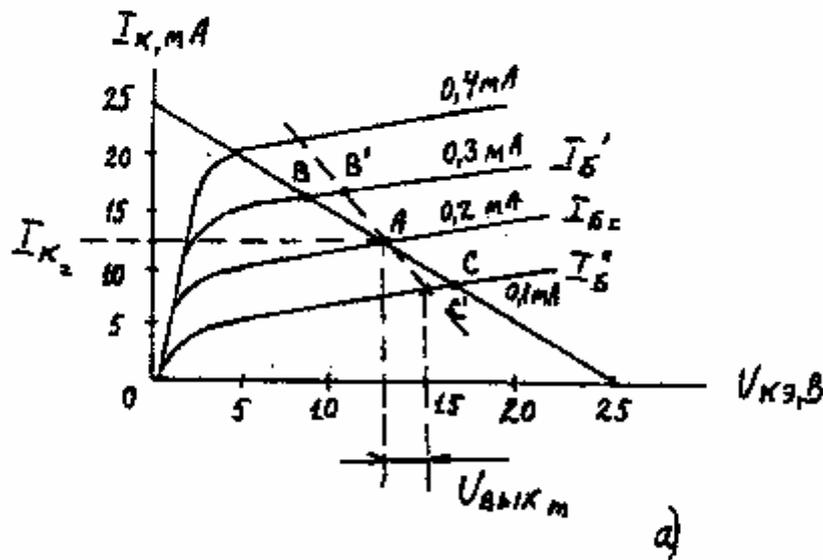


Рис. 4.2

равен $1/R_c$, где R_c - сопротивление переменному коллекторному току.

Определите коэффициенты усиления напряжения

$$K_U = \frac{U_{выхм}}{U_{вхм}}, \text{ тока } K_I = \frac{I_{выхм}}{I_{вхм}}, \text{ мощности } K_P = K_U \cdot K_I.$$

Очевидно, что коэффициент полезного действия этого режима мал (БТ все время открыт, т.е. потребляет ток от источника питания E_c).

Ознакомьтесь с режимами усиления "В" и "С". Убедитесь, что сигнал на выходе таких усилительных схем будет с отсечкой тока, что повышает к.п.д. с одновременным появлением в спектре гармоник n -го порядка, где $n=2,3$ и т.д. Для усиления основной гармоники ($n=1$) она должна быть выделена частотно-зависимой цепью (колебательный контур) в качестве коллекторной нагрузки (вместо R_c).

Лабораторное задание

Установить сменную плату № 14, наборное поле - в положение 1. Исследуемый транзистор р-п-р. Элементы R_1, R_2, C_2, C_3, C_4 не устанавливать. Закоротить сопротивление R_4 (или R_3) вместо R_2 подключить источник тока ГТ (минусом к базе), который будет задавать постоянный ток базы ($I_{Б-}$). Установить $R_3(R_c)=1$ кОм, $C_1=0,1$ мкФ. Подать питающее напряжение $E_c=-10$ В от источника ГН2 (минусом к коллектору).

1. Снятие переходной характеристики. $U_{кэ}=f(I_{Б-})$ при R_c (или R_3) = const.

Изменяя I_B (контролируется измерителем выхода ИВ в положении "ГТ") потенциометром ГТ, измерять напряжение $U_{КЭ}$ прибором АВМ-2, результаты занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

$I_B, \text{мА}$	
$U_{КЭ}, \text{В}$ при $R_K=1 \text{ кОм}$	
$U_{КЭ}, \text{В}$ при $R_K=620 \text{ Ом}$	

Провести аналогичные измерения при $R_K=620 \text{ Ом}$. Построить зависимости $U_{КЭ}=f(I_B)$ при $R_K=\text{const}$. Отметить на характеристиках области, соответствующие режимам работы транзистора. Определить токи базы насыщения $I_{БН}$. Обратит внимание, как влияет R_K на усиление каскада.

Далее работа идет с одним значением сопротивления R_K , согласованным с преподавателем.

Определить $I_{Б-}$, соответствующее примерно середине активного режима.

2. Исследование влияния положения точки покоя на нелинейные искажения.

Подключить генератор ГНЧ стенда к соответствующим гнездам платы:

а) При $I_{Б-}$, соответствующем середине активного режима, подать сигнал с ГНЧ такой величины, чтобы выходной сигнал, снимаемый с коллектора транзистора, был гармоническим (минимальные нелинейные искажения). Измерения входного ($U_{ВХ-}$) и выходного ($U_{ВЫХ-}$) сигналов производить с помощью осциллографа. Измерить коэффициент усиления по напряжению:

$K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ и зарисовать эпюры входного и выходного напряжений, при этом работать с открытым входом осциллографа и контролировать положение нулевой линии. Очевидно, что это усилительный режим "А".

б) Увеличить амплитуду входного сигнала до получения нелинейных искажений $U_{\text{вых}}$. Нарисовать эпюру $U_{\text{вых}}$. Уменьшить амплитуду $U_{\text{вх}}$ до значения $U_{\text{вхmax}}$, при котором нелинейные искажения $U_{\text{вых}}$ исчезают. Почему при $U_{\text{вх}} > U_{\text{вхmax}}$ возникают нелинейные искажения?

в) Установить $I_B \approx 0,7 \dots 0,8 I_{BA}$, т.е. сместить точку покоя вниз, ближе к режиму отсечки. Убедиться, что отрицательная полуволна $U_{\text{вых}}$ будет ограничена. Какова причина этого ограничения?

г) Установить $I_B \approx 1,1 \dots 1,2 I_{BA}$, т.е. сместить точку покоя вверх, ближе к режиму насыщения. Убедиться, что положительная полуволна $U_{\text{вых}}$ будет ограничена. Какова причина этого ограничения?

д) Установить точку покоя для режима "В" и зарисовать эпюры $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип усиления.
2. Какая схема включения БТ обладает наилучшими усилительными свойствами?
3. Какая схема включения БТ предпочтительнее с точки зрения нелинейных искажений?
4. Как строится нагрузочная прямая постоянного тока и каково ее назначение?
5. Как строится нагрузочная прямая переменного тока и каково ее назначение?

6. Покажите на переходной характеристике режимы работы БТ.

7. Особенности режимов усиления "А", "В" и "С".

8. Объясните эпюры напряжений, полученные в эксперименте?

Работа № 5

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик и параметров полевого транзистора (ПТ) с управляющим р-п переходом и каналом п-типа, а также свойства усилителей, выполненных на ПТ по схемам с общим истоком (ОИ).

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Полевыми транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых ток через канал управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между его электродами (обычно затвором и истоком).

Канал – это область полупроводникового кристалла, в котором поток носителей заряда регулируется изменением ее эффективного сечения (а следовательно, проводимости).

Истоком называют электрод полевого транзистора, через который втекают в канал носители заряда, коллектируемые при выходе из канала другим электродом - стоком.

В полевом транзисторе канал может быть «п» - или «р» - типа, тогда истоком в первом случае будет электрод, на который подан «-» питания, а во втором случае – «+» питания, т.е. в полевом транзисторе знак носителей заряда совпадает со знаком потенциала на истоке.

Электрод полевого транзистора, к которому приложено управляющее напряжение, называется затвором.

Так как в полевых транзисторах для переноса тока используют только основные носители канала, то их часто называют униполярными транзисторами в отличие от биполярных транзисторов (р-п-р или п-р-п), использующих оба типа носителей.

Различают два типа полевых транзисторов: полевые транзисторы с управляющим р-п переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором. Исходя из структуры полевые транзисторы с изолированным затвором часто называют МДП (металл – диэлектрик - полупроводник) или МОП (металл – окисел - полупроводник) приборами. МДП транзисторы, в свою очередь, подразделяются на транзисторы с встроенным (собственным) каналом и транзисторы с индуцированным каналом.

Устройство полевых транзисторов всех типов показано на рис.5.1 а, а соответствующие графические обозначения - на рис.5.1 б.

Полевые транзисторы, как и биполярные транзисторы, могут быть включены согласно трем схемам включения: с общим истоком (ОИ), общим затвором (ОЗ) и общим стоком (ОС), что соответствует включению биполярных транзисторов по схеме ОЭ, ОБ и ОК.

На рис.5.2 показаны три схемы включения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом п-типа. Наиболее часто используется схема ОИ.

Рассмотрим работу полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом п-типа (рис.5.3). Предположим, что напряжения между электродами равны нулю. На границах р-областей (соединенных с затвором) с п-кристаллом (каналом) возникает р-п-переход.

Если на переход подать обратное напряжение ($U_{зи} < 0$), то ширина р-п-перехода увеличивается, что приведет к уменьшению поперечного сечения канала, т.е. увеличению его сопротивления. При некотором значении $U_{зи}$ противоположные р-п-переходы смыкаются, т.е. канал перестает существовать и транзистор запирается. Это напряжение называется напряжением отсечки $U_{зи\text{отс}}$.

Таким образом, изменяя напряжение между затвором и истоком, можно менять сопротивление канала между истоком и стоком, т.е. при наличии питающего напряжения ($U_{си}$) изменять ток стока.

Приложим к транзистору напряжение ($U_{си}$) плюсом к стоку и минусом к истоку. По мере увеличения этого напряжения ток стока будет возрастать, однако при этом начнет увеличиваться и падение напряжения на канале. Поэтому к р-п-переходу у истока будет приложено напряжение $U_{зи}$, а к р-п-переходу у стока – сумма $|U_{си}| + |U_{зи}|$. Из-за этого область р-п-перехода у стока расширится больше, чем у истока, и сечение канала станет неравномерным по длине, уменьшаясь по мере приближения к стоку (штрихпунктирная линия на рис.5.4).

Уменьшение поперечного сечения канала у стока препятствует росту тока. Таким образом, зависимость величины тока стока от напряжения сток – исток имеет явно выраженный нелинейный характер, причем при больших значениях напряжения изменение конфигурации канала изменяет его сопротивление настолько, что ток практически не изменяется. Этот участок называется участком насыщения тока.

При достаточно высоком напряжении $U_{си}$ наблюдается резкий рост тока I_C , обусловленный пробоем р-п-перехода у стокового

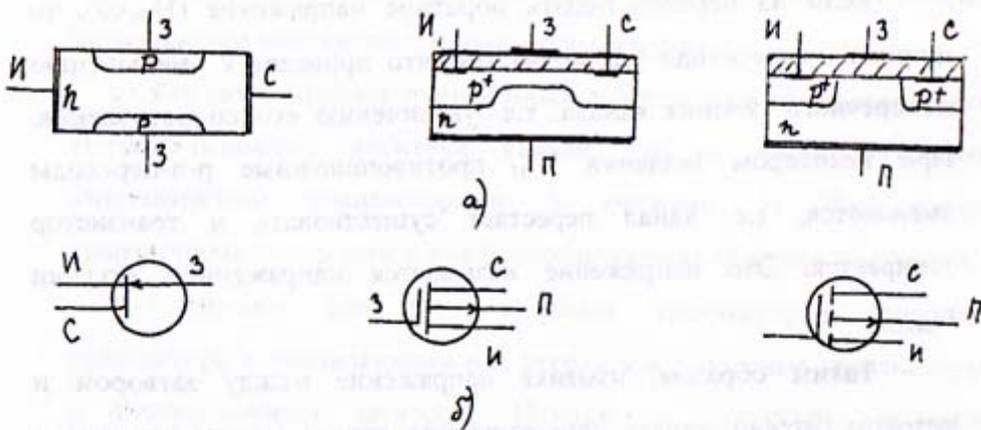


Рис. 5.1

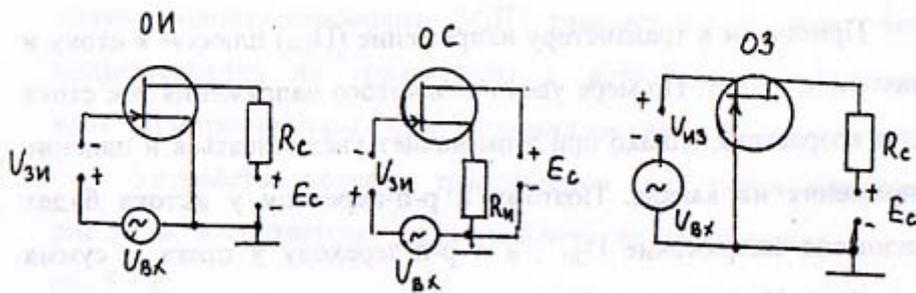


Рис. 5.2

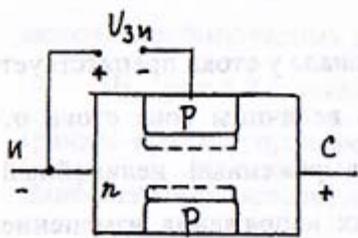


Рис. 5.3

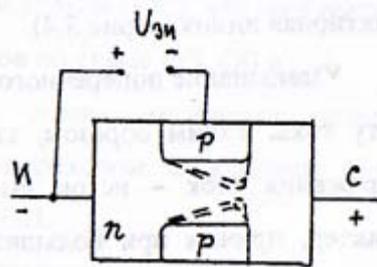


Рис. 5.4

конца канала, т.к. в этой части к переходу оказывается приложенным наибольшее суммарное напряжение $|U_{СИ}| + |U_{ЗИ}|$.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора приведены на рис.5.5. Ток насыщения при $U_{ЗИ} = 0$ называется начальным током канала $I_{С\text{нач}}$.

Большое значение для практики имеет стоко - затворная характеристика (иначе называется характеристикой прямой передачи или просто передаточной характеристикой) – зависимость тока стока насыщения от напряжения “затвор-исток” при неизменном напряжении “сток-исток” (рис.5.6). В режиме насыщения напряжение “сток-исток” на характеристику практически не оказывает влияния и вместо семейства можно пользоваться одной характеристикой.

В качестве основных параметров полевых транзисторов используют Y-параметры в уравнениях эквивалентного четырехполюсника:

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2;$$

$$I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2,$$

где I_1, U_1 – входные I и U;

I_2, U_2 – выходные токи и напряжения эквивалентного четырехполюсника.

Y- параметры определяются:

$$Y_{11} = \left. \frac{dI_3}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} \text{ - входная проводимость;}$$

$$Y_{12} = \left. \frac{dI_3}{dU_{СИ}} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}} \text{ - проводимость обратной передачи;}$$

$$Y_{21} = \left. \frac{dI_С}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} \text{ - проводимость прямой передачи;}$$

$$Y_{22} = \left. \frac{dI_С}{dU_{СИ}} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}} \text{ - выходная проводимость.}$$

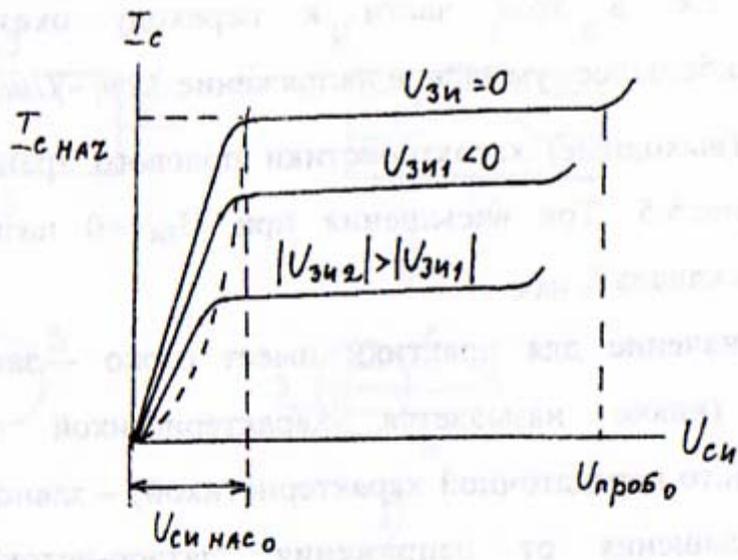


Рис. 5.5

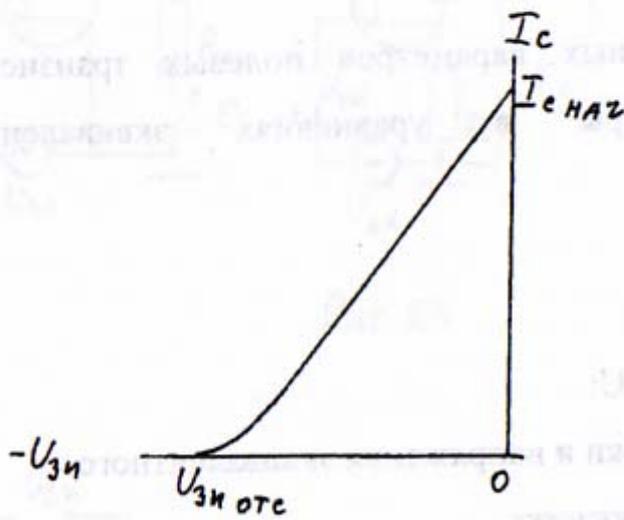


Рис. 5.6

Учитывая очень большую величину входного сопротивления, на практике (и в справочниках) часто пользуются другими обозначениями:

$S=Y_{21}$ - крутизна;

$R_i=1/Y_{22}$ - внутреннее сопротивление;

$\mu = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_{СНАС}=\text{const}}$ - статический коэффициент усиления.

Основное уравнение полевого транзистора:

$$\mu = SR_i$$

Параметры полевого транзистора определяются по вольт-амперным характеристикам в определенных точках:

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{24} \quad \text{при} \quad U_{СИ} = \text{const},$$

S равна несколько $m A/V$.

$$R_i = \Delta U_{СИ} / \Delta I_C \quad \text{при} \quad U_{ЗИ} = \text{const}.$$

На пологих участках выходных характеристик значение R_i достигает сотен килоом и оказывается во много раз больше сопротивления транзистора постоянному току R_0 .

$$\mu = -\Delta U_{СИ} / \Delta U_{ЗИ} \quad \text{при} \quad I_C = \text{const}.$$

Знак «минус» учитывает фазовый сдвиг 180° между входным и выходным сигналами.

Для пологих участков выходных характеристик μ достигает сотен и даже тысяч.

Входное сопротивление полевого транзистора

$$R_{ВХ} = \Delta U_{ЗИ} / \Delta I_3 \quad \text{при} \quad U_{СИ} = \text{const}$$

Поскольку входной ток I_3 – обратный ток р-п-перехода, а, значит, очень мал, то $R_{ВХ}$ достигает единиц и десятков мегаом.

Полевой транзистор обладает также входной емкостью между затвором и истоком $C_{ЗИ}$, которая является барьерной емкостью р-п-перехода и составляет единицы пикофард.

Как правило, выпускаются кремниевые полевые транзисторы. Кремний применяется потому, что ток затвора получается во много раз меньше, чем у германия. На рис. 5.7 представлен пример схемы усилителя на ПТ.

Лабораторное задание

1. Исследование управляющих характеристик ПТ.

С помощью короткозамкнутых перемычек (КЗП) соберите схему (рис.5.8).

В этой схеме: PV1 измеряет напряжение на затворе;

PV2 – напряжение на стоке;

РА1 – ток стока I_C .

Установите ручки потенциометров RP1 и RP2 в крайнее левое положение. Снимите управляющую характеристику ПТ $I_C=f(U_{зи})$ при $U_{си1}=\max$.

Результаты измерений занесите в табл. 5.1 и постройте характеристику.

Таблица 5.1

$U_{зи}, В$	
$I_C, мА$ при $U_{си1}=\max$	

2. Исследование выходных характеристик ПТ. Снимите выходные характеристики $I_C=f(U_{си})$ при $U_{зи}=\text{const}$ (схема та же). Для этого задайтесь фиксированными значениями $U_{зи}$ и, изменяя напряжение $U_{си}$, измерьте значения тока I_C .

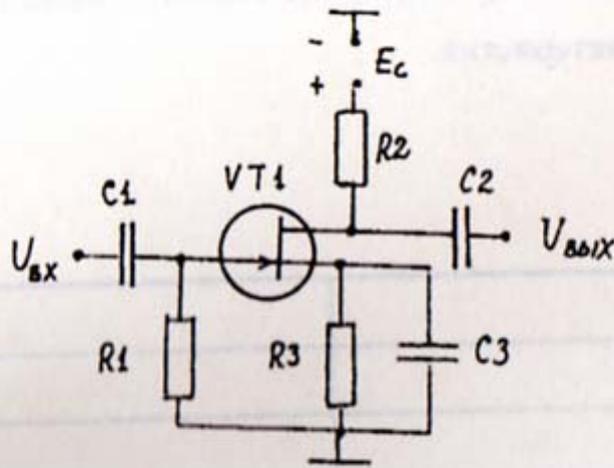


Рис. 5.7

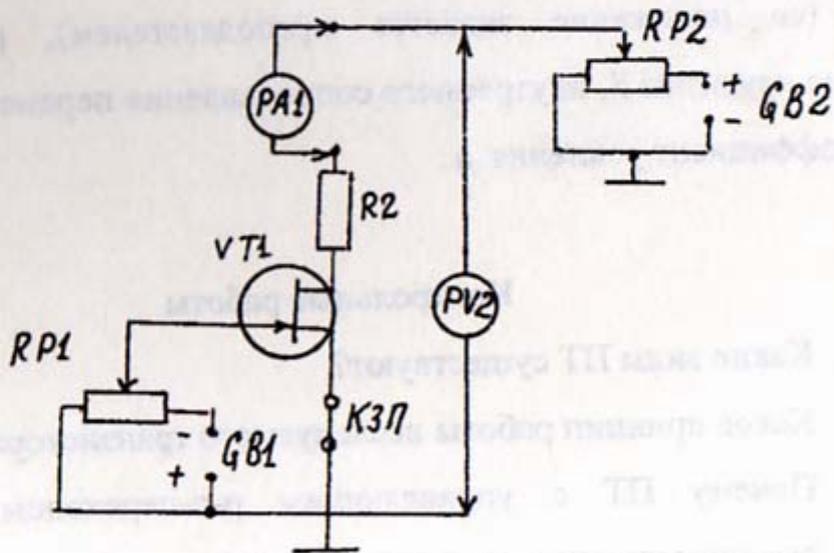


Рис. 5.8

Результаты измерений занесите в табл. 5.2 и постройте семейство выходных характеристик. Сделайте вывод о влиянии $U_{зи}$ и $U_{си}$ на ход характеристик.

Таблица 5.2

$U_{си}, В$	
$I_C, мА$ при $U_{зи}=0$	
$I_C, мА$ при $U_{зи}=\dots$	
$I_C, мА$ при $U_{зи}=\dots$	

3. Расчет параметров полевого транзистора с р-п-затвором и каналом п-типа.

Используя семейство выходных характеристик для рабочей точки (ее положение задается преподавателем), рассчитайте значения крутизны S , внутреннего сопротивления переменному току R_i и коэффициент усиления μ .

Контрольные работы

1. Какие виды ПТ существуют?
2. Каков принцип работы исследуемого транзистора?
3. Почему ПТ с управляющим р-п-переходом обладает высоким входным сопротивлением?
4. Поясните процесс насыщения ПТ.
5. Как определяются S , R_i и μ ?
6. Определите напряжение отсечки по стоко-затворной характеристике.
7. Определите начальный ток стока.