

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

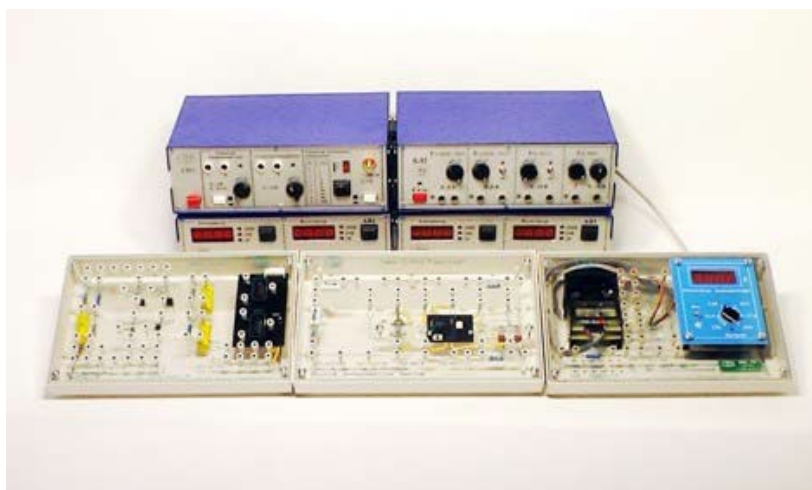
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 11-14
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*



Воронеж 2024

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Составитель

канд. физ.-мат. наук А. С. Бадаев

Радиоматериалы и радиокомпоненты: методические указания к выполнению лабораторных работ № 11-14 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. С. Бадаев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. – 40 с.

Данные методические указания представляют собой лабораторный практикум по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты», предназначенный для студентов. В методических указаниях изучаются статические характеристики и основные параметры биполярных и полевых транзисторов. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

Методические указания предназначены для студентов 4, 5 курсов, специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле РМиРК_11-14.pdf.

Ил. 17. Табл. 9. Библиогр.: 2 назв.

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ С ОБ

1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1.1. Цель работы

Изучение принципа действия, основных параметров, статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) биполярного транзистора в схеме с общей базой (ОБ).

1.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является изучение структуры, принципа действия, схем включения и параметров биполярных транзисторов, экспериментальное исследование входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме с ОБ, определение основных параметров по этим характеристикам.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

1.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

1.2.1. Задание № 1

Ознакомиться со структурой и принципом действия биполярных транзисторов.

1.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо изучить материал [1], с.125-130; [2], с.208-221.

Транзистором называют активный полупроводниковый прибор, используемый для усиления или генерирования электрических сигналов.

Биполярные транзисторы – это полупроводниковые приборы с двумя встречно включенными р-п-переходами и тремя внешними выводами. В биполярных транзисторах ток через кристалл обусловлен движением носителей за-

ряда обоих знаков – электронов и дырок. Для изготовления транзисторов используют преимущественно кремний, германий и арсенид галлия.

В зависимости от типа электропроводности слоев, составляющих транзистор, биполярные транзисторы имеют n-p-n или p-n-p-тип структуры. Упрощенные структуры плоскостных транзисторов p-n-p и n-p-n-типов показаны на рис. 1.

Биполярный транзистор имеет три области: эмиттер, базу и коллектор и два p-n-перехода: эмиттерный (на границе областей эмиттер – база) и коллекторный (на границе областей база – коллектор). Базовая область (Б) – область, в которую инжектируются неосновные для базы носители заряда. Эмиттерная область (Э) – область, назначение которой – инжекция носителей в базовую область. Коллекторная область (К) предназначена для экстракции носителей из базовой области.

Эмиттерный переход обычно смещается (включается) в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Если эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный – в прямом, такое включение биполярного транзистора называется инверсным или обратным. На условных обозначениях эмиттер изображается в виде стрелки, которая указывает прямое направление тока эмиттерного перехода (т.е. от плюса к минусу).

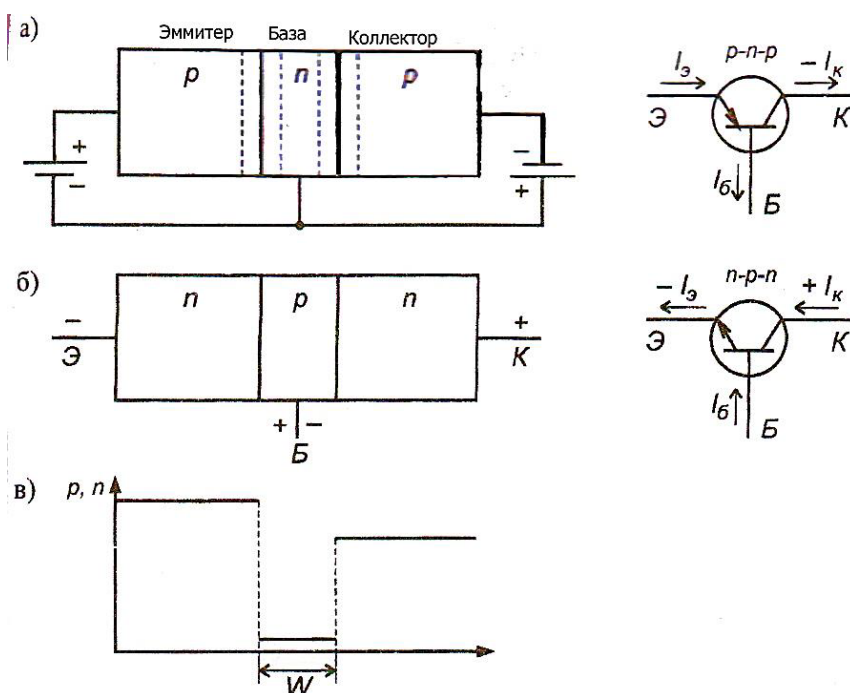


Рис. 1. Схематическое изображение биполярного плоскостного транзистора и его условное изображение: а) - p-n-p-типа; б) - n-p-n-типа; в) – распределение концентрации основных носителей заряда; W – толщина базы

Основная особенность биполярного транзистора заключается во взаимном влиянии p-n-переходов друг на друга. В биполярных плоскостных транзи-

сторях для эффективного влияния эмиттерного перехода на коллекторный необходимо выполнение следующих требований:

1. Толщина база транзистора не должна быть много меньше диффузионной длины инжектируемых в нее носителей L_b (раздел 1.3.3), т.е. $W = 1,5 - 2,5$ мкм.
2. Концентрация основных носителей в базе должна быть много меньше концентрации основных носителей в области эмиттера.
3. Площадь коллекторного перехода должна быть в несколько раз больше, чем площадь эмиттерного перехода.
4. Концентрация основных носителей в области коллектора должна быть несколько меньшей, чем в области эмиттера.

Все положения, рассмотренные ранее для одного р-п-перехода, справедливы для каждого из р-п-переходов транзистора.

1.2.2. Задание № 2

Изучить схемы включения транзисторов и их основные параметры в схеме с ОБ.

1.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует ознакомиться с материалом [1], с.130-135; [2], с.253-258.

Существует несколько способов включения биполярного транзистора в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входного и выходного сигналов (рис. 2): с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

На рис. 1,б п-р-п-транзистор включен по схеме с общей базой (ОБ). Действительно, электрод базы – общий для входной и выходной цепей (на эмиттер и коллектор напряжение задается относительно базы).

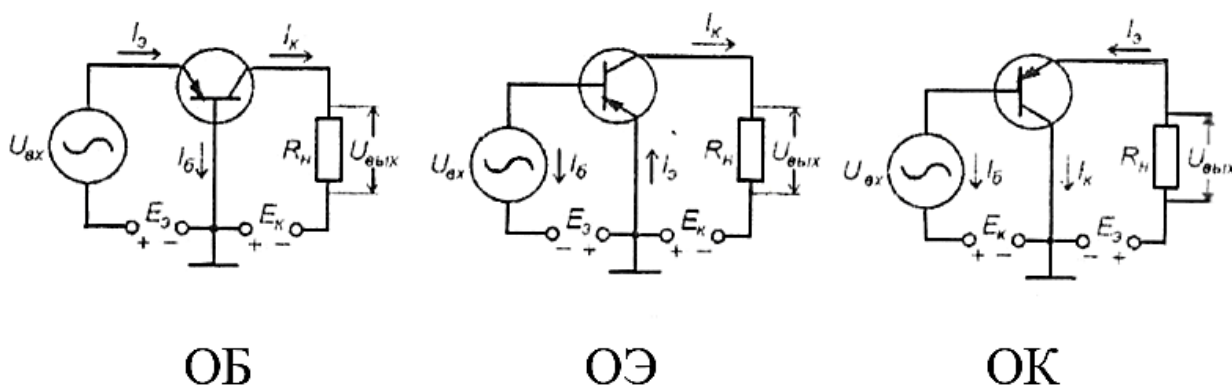


Рис. 2. Основные схемы включения транзисторов

При прямом смещении эмиттерного перехода снижается его потенциальный барьер и происходит инжекция электронов из эмиттера в базу. За счет этого, а также инжекции дырок из базы в эмиттер формируется ток эмиттера I_e .

Инжектированные электроны проходят базу и, дойдя до коллекторного перехода, экстрагируются (втягиваются электрическим полем) в коллектор. Значит, в выходной (коллекторной) цепи будет протекать ток коллектора I_k . За время прохождения базы часть электронов рекомбинирует, в результате образуется ток базы I_b . В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$I_{\varepsilon} = I_k + I_b. \quad (1)$$

В большинстве практических случаев стремятся уменьшить ток базы, что достигается снижением рекомбинационных процессов в базе. При этом улучшаются усилительные способности транзистора.

Основной параметр биполярного транзистора - коэффициент усиления по току. Для схемы ОБ коэффициент усиления (передачи) по току обозначается буквой α и определяется для нормально включенного транзистора как

$$\alpha = I_k / I_{\varepsilon}. \quad (2)$$

Поскольку $I_k < I_{\varepsilon}$, то $\alpha < 1$. Для современных биполярных транзисторов $\alpha = 0,98 - 0,999$, поэтому схема ОБ не обеспечивает усиление тока.

Коэффициент усиления по напряжению для этой схемы можно определить как

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = \frac{I_k R_n}{I_{\varepsilon} r_{\varepsilon}} = \frac{\alpha R_n}{r_{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где r_{ε} – дифференциальное сопротивление перехода эмиттер – база. Так как отношение R_n / r_{ε} значительно больше входного сопротивления, то схема с ОБ может усиливать входное напряжение.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = I_k^2 R_n / I_{\varepsilon}^2 r_{\varepsilon} = \alpha^2 R_n / r_{\varepsilon}. \quad (4)$$

Так как отношение $R_n / r_{\varepsilon} > \alpha^2$, то схема с ОБ обладает усилением по мощности. Теоретические расчеты показали, что для схемы с ОБ, например, при $\alpha = 0,98$ $K_u = 196$, а $K_p = 192$.

1.2.3. Задание № 3

Изучить статические характеристики и параметры биполярных транзисторов в схеме с ОБ.

1.2.3.1. Методические указания по выполнению задания

Изучить материал [1], с.135-142; [2], с.222-227, с.240-244.

С точки зрения теории электрических цепей транзистор, имеющий три вывода, представляет собой трехполюсник, у которого один вывод является входным, другой – выходным, а третий вывод является общим. Поэтому трехполюсник можно представить как четырехполюсник, обозначив входной ток и входное напряжение индексом «1», а выходные ток и напряжение индексом «2» (рис.3).

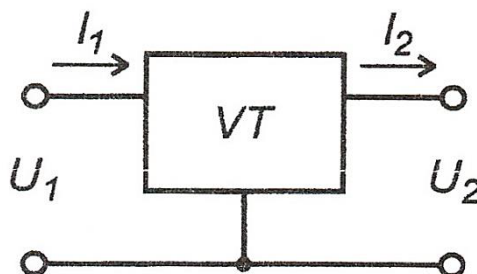


Рис. 3. Схема трехполюсника, включенного как четырехполюсник

Одним семейством статических характеристик устанавливается связь между тремя из четырех величин. Одна из этих величин выбирается независимой переменной (аргументом), и ее величина откладывается на оси абсцисс. Вторая величина будет зависимой переменной (функцией), величина которой откладывается на оси ординат. Из оставшихся двух величин одну выбирают постоянной, другую оставляют свободной, т.е. не учитывают. Ряд кривых, полученных для различных постоянных значений третьей величины, называемой параметром, и будет представлять собой семейство статических вольт-амперных характеристик.

Наиболее распространенными системами статических вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов являются:

а) для схемы с ОБ:

- $I_э = f(U_{эб})$ при $U_б = \text{const}$ – входные характеристики;
- $I_к = f(U_{кб})$ при $I_э = \text{const}$ – выходные характеристики;

б) для схемы с ОЭ:

- $I_б = f(U_{эб})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ – входные характеристики;
- $I_к = f(U_{кэ})$ при $I_б = \text{const}$ – выходные характеристики.

На рис. 4 приведены входные и выходные характеристики р-п-р-транзистора в схеме с ОБ.

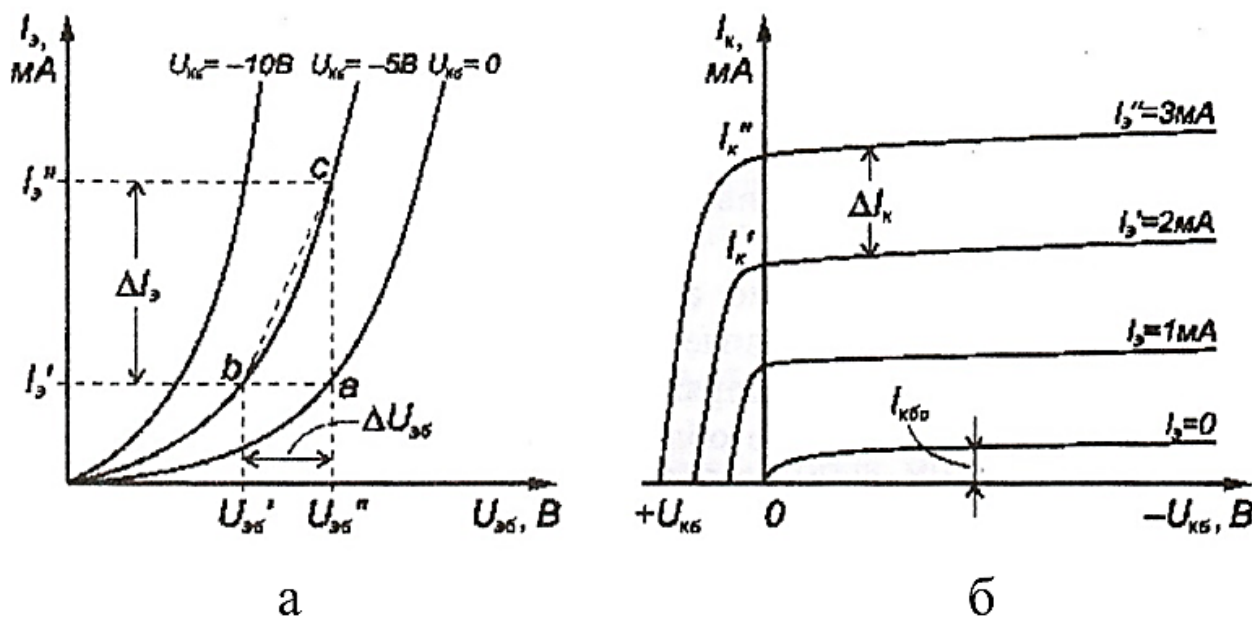


Рис. 4. Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик р-п-р-транзистора в схеме с ОБ

При напряжении $U_{кб} = 0$ входная вольт-амперная характеристика (рис. 4,а) аналогична характеристике диода при прямом включении. Увеличение напряжения коллектор – база (в абсолютном значении) и повышение температуры смещают характеристики влево.

На выходных характеристиках (рис. 4, б) при токе $I_3 = 0$ через коллекторный переход течет обратный ток $I_{кб0}$, величина которого слабо зависит от $U_{кб}$. С ростом I_3 растет ток коллектора, который практически не изменяется при увеличении по абсолютной величине напряжения $U_{кб}$. Это объясняется тем, что инжектируемые эмиттером носители, создающие коллекторный ток, практически не зависят от напряжения коллектор – база. Малый наклон характеристик $I_к$ объясняется большим сопротивлением коллекторного перехода, включенного в обратном направлении.

Коэффициент усиления по току биполярного транзистора в схеме ОБ α – интегральный (статический) параметр, поскольку представляет собой отношение постоянных токов. Существует и дифференциальный коэффициент усиления, представляющий собой отношение приращений тока в коллекторе и эмиттере: $\alpha = dI_к/dI_3$. Хотя статический и дифференциальный коэффициенты несколько отличаются, для схемы ОБ их принято обозначать одинаково – α .

Статические параметры транзисторов можно разделить на параметры малых сигналов и физические (собственные). Четырехполюсник, в качестве которого можно рассматривать и транзистор (рис. 3), как правило, описывается системой уравнений. Наиболее употребительными для транзисторов являются следующие:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2, \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} отражают свойства транзистора и являются его параметрами, получившими название h -параметров. Физический смысл h -параметров может быть определен по правилам электротехники для четырех-полюсника при проведении по переменному току опытов холостого хода ($I_2 = 0$), обратного холостого хода ($I_1 = 0$), короткого замыкания на выходе ($U_2 = 0$) и короткого замыкания на входе ($U_1 = 0$). Из уравнений (5) можно определить физический смысл h -параметров:

- 1) $h_{11} = U_1/I_1$ при $U_2 = 0$, это входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе;
- 2) $h_{12} = U_1/U_2$ при $I_1 = 0$, это коэффициент обратной связи по напряжению при холостом входе на входе;
- 3) $h_{21} = I_2/I_1$ при $U_2 = 0$, это коэффициент усиления (передачи) по току при коротком замыкании на выходе;
- 4) $h_{22} = I_2/U_2$ при $I_1 = 0$, это выходная проводимость при холостом ходе на входе.

Основное преимущество h -параметров заключается в легкости их непосредственного измерения. Существуют специальные таблицы формул, связывающие h -параметры различных схем включения транзистора между собой, а также с физическими параметрами и другими системами параметров.

1.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Что такое транзистор, биполярный транзистор?
2. Какие бывают структуры транзисторов и как они обозначаются?
3. Какие три области имеет биполярный транзистор, какой переход называют эмиттерным, какой коллекторным?
4. Как обычно смещаются переходы транзистора, что такое обратное включение?
5. Какие основные требования необходимо выполнять при изготовлении транзисторов?
6. Какие бывают схемы включения транзисторов? Начертите их.
7. Что такое коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности для схемы с ОБ, чему они равны?
8. Что представляет собой транзистор с точки зрения теории электрических цепей?
9. Нарисуйте семейство входных и выходных характеристик в схемах с ОБ.
10. Как определяются дифференциальные коэффициенты усиления по току в схемах с ОБ?
11. Что такое статические параметры транзисторов? Определите их физический смысл.
12. Какие физические параметры транзистора Вы знаете? Как они связаны с h -параметрами?

1.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

1.4.1. Задание № 1

Используя комплекс МУК – ФОЭ 1, собрать установку по соответствующей схеме для измерения входных и выходных характеристик р-п-р и п-р-п транзисторов в схеме с ОБ.

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК – ФОЭ 1:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 2шт.
2. Блок генератора напряжения ГНЗ 2шт.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭЛ01 1шт
4. Соединительные провода с наконечниками Ш4 – Ш1.6

Лабораторная установка позволяет измерить входные и выходные характеристики р-п-р и п-р-п транзисторов по схемам, представленным на рис. 5 (а,б).

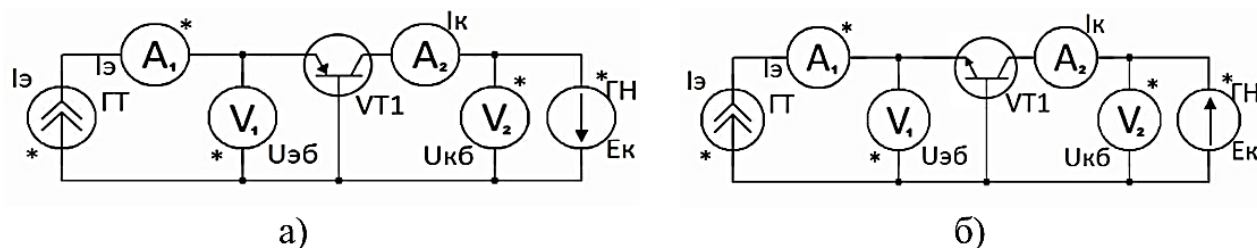


Рис. 5. Схемы измерения ВАХ биполярного р-п-р(а) и п-р-п(б) транзистора в схеме с ОБ.

Схема собирается с помощью соединительных проводов на базе учебного комплекса МУК ФОЭ1 с использованием двух ампервольтметров АВ1 и двух генераторов напряжений соответственно для входной, эмиттерной и выходной коллекторной цепи. Стенд с транзисторами СЗЭЛ01 содержит набор биполярных и полевых транзисторов. Переключение разных типов транзисторов и схем включения проводится с помощью соединительных проводов при выключенном напряжении питания на генераторах ГНЗ и измерительных приборах. Входной эмиттерный ток задается генератором тока $I_{\text{Э}}$ и контролируется миллиамперметром mA_1 . Выходное напряжение $U_{\text{КБ}}$ задается генератором $E_{\text{К}}$ и контролируется вольтметром V_2 . Входное напряжение $U_{\text{ЭБ}}$ измеряется вольтметром V_1 , а выходной ток – $I_{\text{К}}$ миллиамперметром mA_2 . На переднюю панель установки выведены регулировки эмиттерного тока и коллекторного напряжения и приборы для измерения токов и напряжений в эмиттерной и коллекторной цепях.

1.4.2. Задание № 2

Снять две входные характеристики $I_3=f(U_{эб})$ p-n-p транзистора

КТ818 по схеме Рис 5а при $U_{кб}=0$ и $U_{кб} = -5В$, задавая эмиттерный ток I_3 с помощью ГТ и снимая напряжение $U_{эб}$. Результаты измерения занести в табл. 1.

Таблица 1

Транзистор КТ818. Входные характеристики схемы с ОБ

$U_{кб}, В$	$I_3, мА$	0,1	1	2	4	6	10
$U_{кб}=0В$	$U_{эб}, В$						
$U_{кб}=-5В$	$U_{эб}, В$						

1.4.3. Задание № 3

Снять три выходные характеристики $I_к=f(U_{кб})$ транзистора КТ818 по схеме рис. 5а при $I_3=4,6$ и $8мА$, задавая $U_{кб}$ с помощью ГН и измеряя ток $I_к$. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Транзистор КТ818. Выходные характеристики схемы с ОБ

$I_3, мА$	$U_{кб}, В$	0	-0,5	-1	-2	-5	-8
$I_3=4мА$	$I_к, мА$						
$I_3=6мА$	$I_к, мА$						
$I_3=8мА$	$I_к, мА$						

1.4.4. Задание № 4

Снять семейства входных и выходных характеристик n-p-n транзистора КТ819 по схеме рис. 5б по аналогии с p-n-p транзистором. Входные характеристики снимать при $U_{кб}=0$ и $5В$, выходные для $I_3=4; 6$ и $8мА$. Результаты измерений записать в табл. 3 и 4, подобные табл. 1 и 2.

1.4.5. Задание № 5

Построить график входных и выходных характеристик исследуемых транзисторов. По снятым характеристикам определить h-параметры транзисторов, которые представляют собой производные соответствующих ВАХ в рабочих точках $I_3=6мА$ и $U_{кб}=-5В$, $U_{кб}=5В$. В случае схемы с ОБ h-параметры определяются:

$$h_{11} = \left. \frac{dU_{эб}}{dI_3} \right|_{U_{кб}=const} \quad \text{— входное сопротивление транзистора;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{dU_{эб}}{dI_{кб}} \right|_{I_3=const} \quad \text{— коэффициент обратной связи по напряжению;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{dI_{к}}{dI_3} \right|_{U_{кб}=const} \quad \text{— коэффициент передачи тока;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{dI_K}{dU_{KB}} \right|_{I_E = \text{const}} \quad - \text{выходная проводимость.}$$

Для схемы с ОБ $h_{11} \approx r_{\text{Э}}$, $h_{22} \approx \frac{1}{r_K}$, $h_{21} = -\alpha$. За положительное направление

токов в системе h -параметров принимаются токи, втекающие в транзистор. В соответствии с принципом действия транзистора ток эмиттера втекает в эмиттерный выход, а ток коллектора вытекает, поэтому $h_{21} = -\alpha$.

Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным, а h_{21} и h_{22} – по выходным характеристикам, используя соответствующие малые конечные приращения ΔU и ΔI .

1.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Привести схемы лабораторной установки для исследования входных и выходных характеристик р-п-р и п-р-п транзисторов в схеме с ОБ.
2. Объясните полярность включения источников питания в схемах.
3. Объясните методику проведения измерений и расчетов.
4. Объяснить принцип действия биполярного транзистора.
5. От каких факторов зависит коэффициент передачи тока α ?
6. Объяснить ход статических ВАХ транзистора в схеме с ОБ.
7. Объяснить физическую природу токов I_{KB0} и $I_{ЭБ0}$.
8. Объяснить физический смысл и порядок определения h -параметров в схеме с ОБ.
9. Пояснить структуру базового тока в транзисторе.
10. Почему базовый ток уменьшается при увеличении U_{KB} ?
11. Как изменяется ток коллектора при увеличении тока базы на 10 мкА, если $\alpha = 0.95$?
12. Проведите сравнительный анализ характеристик и параметров транзисторов КТ818 и КТ819. Какова цель разработки комплементарных р-п-р и п-р-п структур?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ С ОЭ

2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

2.1.1. Цель работы

Изучение принципа действия, основных параметров статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ).

2.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является изучение структуры, принципа действия, схем включения и параметров биполярных транзисторов, экспериментальное исследование входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме с ОЭ, определение основных параметров по этим характеристикам.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

2.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

2.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.2.1. Задание № 1

Ознакомиться со структурой и принципом действия биполярных транзисторов.

2.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо изучить материал [1], с.125-130; [2], с.208-221 и раздел 2.1 лабораторной работы №12 настоящих методических указаний.

2.2.2. Задание № 2

Изучить схемы включения транзисторов и их основные параметры в схеме с ОЭ.

2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует изучить материал [1], с.130-135; [2], с.253-258 и раздел 2.2 лабораторной работы №12 настоящих методических указаний.

Основная схема включения биполярного транзистора – схема с общим эмиттером (ОЭ). На рис. 2 (раздел 2.2 лабораторной работы №12) приведена схема ОЭ для нормального включения р-п-р-транзистора. Напряжение $U_{бэ}$ смещает эмиттерный переход в прямом направлении. Поскольку напряжение $U_{бэ}$ значительно меньше, чем напряжение $U_{кэ}$ ($U_{бэ} \leq 0,7$ В, а $U_{кэ}$ обычно составляет единицы или десятки вольт), то коллекторный переход оказывается смещенным в обратном направлении, т.е. имеется нормальное включение транзистора.

Коэффициент усиления по току биполярного транзистора для схемы ОЭ определяется как

$$B = I_k / I_э. \quad (6)$$

Для схемы с ОЭ ток базы входной ток, а ток коллектора – выходной. Используя соотношение $I_э = I_k + I_б$, нетрудно получить связь между B и α :

$$B = \alpha / (1 - \alpha). \quad (7)$$

Учитывая реальные значения α , из (7) находим, что величина B составляет десятки – сотни. Таким образом, транзистор, включенный по схеме ОЭ, - хороший усилитель тока.

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{вых} / U_{вх} = I_k R_n / I_э R_{э} = \alpha R_n / R_{э} (1 - \alpha). \quad (8)$$

Учитывая, что

$$R_{э} = U_{бэ} / I_б = U_{бэ} / I_э (1 - \alpha) = r_э / (1 - \alpha), \quad (9)$$

получим:

$$K_u = \alpha R_n / r_э, \quad (10)$$

т.е. такой же, как и в схеме с ОБ, см. (3) лаб. раб. №7.

Так как схема с ОЭ обладает усилением по току и напряжению, то величина коэффициента усиления по мощности будет наибольшей

$$K_p = K_I K_u = \alpha^2 R_n / (1 - \alpha) r_э = K_{p(об)} / (1 - \alpha), \quad (11)$$

где $K_{p(об)}$ – коэффициент усиления по мощности в схеме ОБ.

Обобщенные данные по параметрам для различных схем включения транзистора представлены в табл. 3.

Параметры для схем включения транзистора

Параметр	Обозначение	Схема включения		
		ОБ	ОЭ	ОК
Усиление по току	K_I	< 1	10 – 250	10 – 250
Усиление по напряжению	K_U	Среднее (30 – 300)	Среднее (30 – 300)	≈ 1
Усиление по мощности	K_P	Среднее (30 – 300)	Высокое > 1000	Среднее (10 – 100)
Входное сопротивление	$R_{вх}$	Низкое (20 – 120 Ом)	Среднее (150 Ом – 1,5 кОм)	Высокое (100 – 500 кОм)
Выходное сопротивление	$R_{вых}$	Высокое (1 – 1,5 МОм)	Среднее (10 – 100 кОм)	Низкое (10 – 100 Ом)

Таким образом, для всех схем включения транзистора общим является усиление по мощности.

2.2.3. Задание № 3

Изучить статические характеристики и параметры биполярных транзисторов в схеме с ОЭ.

2.2.3.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо изучить материал [1], с.135-142; [2], с.222-229, с.240-243 и раздел 1.2.3 лабораторной работы №12.

На рис. 6 представлены семейства входных и выходных характеристик транзистора р-п-р-типа в схеме с ОЭ.

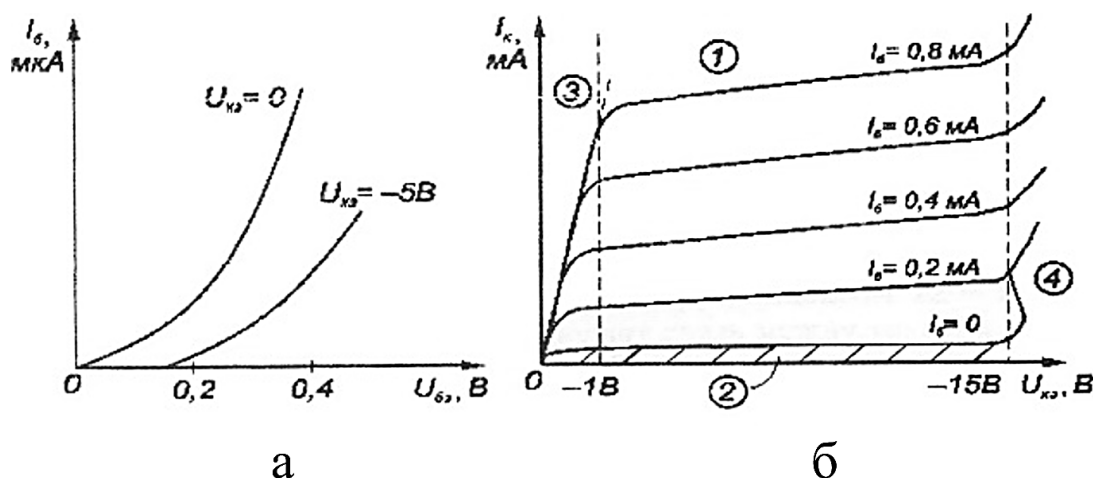


Рис. 6. Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик р-п-р-транзистора в схеме с ОЭ

Входным током транзистора при этой схеме включения является ток базы, характеристика которого (рис.6, а) при напряжении $U_{кэ} = 0$ идет из начала координат и представляет собой суммарный ток эмиттерного и коллекторного переходов, соединенных параллельно и подключенных к источнику в прямом направлении. При увеличении по абсолютной величине напряжения $U_{кэ}$ входные характеристики сдвигаются вправо, так как с ростом напряжения вероятность рекомбинаций неосновных носителей в области базы уменьшается, что приводит к уменьшению тока базы и росту I_k .

Коллекторные, т.е. выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ (рис. 6, б) выходят из начала координат, которые при малых значениях $U_{кэ}$ идут более круто, чем при больших коллекторных напряжениях. С ростом базового тока коллекторные характеристики располагаются выше, так как увеличение базового тока происходит вследствие увеличения тока эмиттера. Ток $I_{кэ0}$, протекающий в цепи коллектор – эмиттер транзистора при отключенном входном (базовом) электроде ($I_b = 0$), намного больше обратного тока коллекторного перехода:

$$I_{кэ0} = I_{кб0} (B + 1). \quad (12)$$

Из (12) следует: неуправляемый ток в цепи коллектора в схеме с ОЭ значительно больше, чем в схеме ОБ. За счет этого выходные вольт-амперные характеристики схемы ОЭ более чувствительны к изменениям температуры. При повышении температуры выходные характеристики смещаются в сторону бóльших токов, а их наклон увеличивается.

Коэффициент усиления B – статический параметр. Помимо него широко используется и дифференциальный коэффициент усиления по току для схемы ОЭ $\beta = dI_k / dI_b$. Для определения β тоже можно воспользоваться формулой (7), но в нее следует подставить уже дифференциальные коэффициенты α .

Кратко остановимся на других параметрах биполярного транзистора – сопротивлениях его переходов. Эмиттерный и коллекторный переходы представляются своими дифференциальными сопротивлениями. Поскольку эмиттерный переход смещен в прямом направлении, его дифференциальное сопротивление r_e

$$r_e = dU_{эб} / dI_e = \varphi_T / I_e, \quad (13)$$

где $\varphi_T = kT / q$ – тепловой потенциал, который при комнатной температуре приблизительно равен 26 мВ.

Из (13) следует, что сопротивление r_e мало и обратно пропорционально току эмиттера.

Поскольку коллекторный переход в транзисторе смещен в обратном направлении, ток I_k слабо зависит от напряжения $U_{кб}$. Поэтому дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

$$r_k = dU_{кб} / dI_k \approx 1 \text{ МОм.} \quad (14)$$

Для схемы с ОЭ h-параметры имеют вид:

$$h_{11} = \left. \frac{dU_{БЭ}}{dI_Б} \right|_{U_{КЭ}=const} \quad h_{12} = \left. \frac{dU_{БЭ}}{dI_{КЭ}} \right|_{I_Б=const} \quad h_{21} = \left. \frac{dI_К}{dI_Б} \right|_{U_{КЭ}=const} \quad h_{22} = \left. \frac{dI_К}{dU_{КЭ}} \right|_{I_Б=const} \quad (15)$$

2.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Что такое транзистор?
2. Какие бывают структуры транзисторов и их обозначение?
3. Перечислите основные требования, которые необходимо выполнять при изготовлении транзисторов.
4. Дайте понятие о коэффициенте инжекции эмиттера и коэффициенте переноса через базу.
5. Что называется коэффициентом передачи тока эмиттера и статическим коэффициентом передачи тока базы?
6. Начертите различные схемы включения транзистора.
7. Определите коэффициенты усиления по току, по напряжению и мощности для схем с ОЭ.
8. Проведите сравнительный анализ параметров транзисторов для различных схем включения.
9. Расскажите о транзисторе как о четырехполюснике.
10. Нарисуйте семейство входных и выходных характеристик в схемах с ОЭ.
11. Расскажите об h-параметрах транзистора.
12. Назовите физические параметры транзистора.
13. Назовите предельно допустимые параметры транзистора.

2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.4.1. Задание № 1

Используя комплекс МУК – ФОЭ 1, собрать установку по соответствующей схеме для измерения входных и выходных характеристик р-п-р и п-р-п транзисторов в схеме с ОЭ.

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК – ФОЭ 1:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 2шт.
2. Блок генератора напряжения ГНЗ 2шт.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭЛ01 1шт
4. Соединительные провода с наконечниками Ш4 – Ш1.6

Лабораторная установка позволяет измерить входные и выходные характеристики р-п-р и п-р-п транзисторов по схемам, представленным на рис. 7 (а,б).

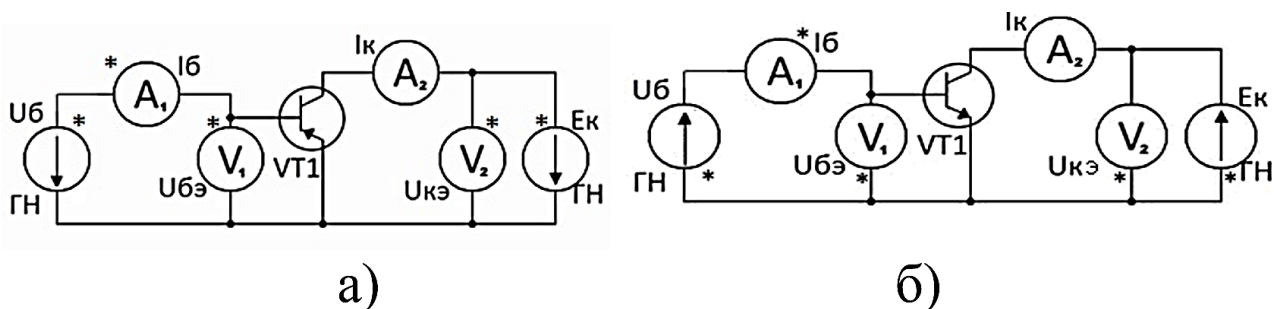


Рис. 7. Схемы измерения ВАХ биполярного р-п-р(а) и п-р-п(б) транзистора в схеме с ОЭ

Схема собирается с помощью соединительных проводов на базе учебного комплекса МУК ФОЭ1 с использованием двух ампервольтметров АВ1 и двух генераторов напряжений соответственно для входной, эмиттерной и выходной коллекторной цепи. Стенд с транзисторами СЗ ЭЛ01 содержит набор биполярных и полевых транзисторов. Переключение разных типов транзисторов и схем включения проводится с помощью соединительных проводов при выключенном напряжении питания на генераторах ГН3 и измерительных приборах.

Входное напряжение базы задается ГН $U_б$ и контролируется вольтметром V_1 , входной ток базы $I_б$ контролируется миллиамперметром A_1 . Выходное напряжение $U_{кэ}$ задается ГН $E_к$, контролируется вольтметром V_2 , выходной ток коллектора $I_к$ измеряется миллиамперметром A_2 .

2.4.2. Задание № 2

Снять 2 входные характеристики $I_б=f(U_{бэ})$ р-п-р транзистора КТ818 по схеме рис. 7, а при $U_{кэ}=0$ и $U_{кэ}=-8В$, задавая напряжение $U_{бэ}$ ГН $U_б$ и измеряя ток базы $I_б$. Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

Транзистор КТ818. Входные характеристики с ОЭ

$U_{кэ}, В$	$U_{бэ}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$U_{кэ}=0В$	$I_б, мкА$						
$U_{кэ}=-8В$	$I_б, мкА$						

2.4.3. Задание № 3

Снять семейство из трех выходных характеристик $I_k=f(U_{кэ})$ транзистора КТ818 при токах базы $I_б=0; 100; 200$ мкА, задавая $U_{кэ}$ с помощью ГН E_k и измеряя ток коллектора I_k . Особое внимание следует обратить на участок характеристик в режиме насыщения, т.е. $U_{кэ}=0 - 1$ В. При измерении важно не превысить мощность рассеивания на коллекторе (меньше $P_{kmax} = 5$ Вт). Результаты измерений следует занести в табл. 5.

Таблица 5

Транзистор КТ818. Выходные характеристики схемы с ОЭ

$I_б, \text{мкА}$	$U_{кэ}, \text{В}$	0	-0,1	-0,2	-0,5	-1	-2	-5	-8
0	$I_k, \text{мА}$								
100	$I_k, \text{мА}$								
200	$I_k, \text{мА}$								

2.4.4. Задание № 4

Снять семейство входных и выходных характеристик n-p-n транзистора КТ819 по схеме рис. 7, б по аналогии с p-n-p транзистором. Входные характеристики снимать при $U_{кэ}=0$ и $U_{кэ}=0$ В, выходные при $I_б=0; 100; 200$ мкА. Результаты измерений занести в таблицы, аналогичные табл. 4 и 5.

2.4.5. Задание № 5

Построить графики входных и выходных характеристик исследованных транзисторов. По снятым характеристикам определить h-параметры транзисторов в схеме с ОЭ, которые представляют собой производные соответствующих ВАХ в рабочих точках $U_{кэ}=\pm 8$ В, $I_б=200$ мкА. Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным, а h_{21} и h_{22} – по выходным характеристикам, используя соответствующие малые конечные приращения ΔU и ΔI по формулам (15).

2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Привести схемы лабораторной установки для исследования входных и выходных характеристик р-п-р и п-р-п транзисторов в схеме с ОЭ.
2. Объясните полярность включения источников питания в схемах.
3. Объясните методику проведения измерений и расчетов.
4. Объяснить принцип действия биполярного транзистора.
5. Как определяется коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ?
6. Сравните усилительные свойства транзистора в схемах с ОБ и ОЭ.
7. Проведите анализ статических ВАХ транзистора в схеме с ОЭ.
8. Объясните физический смысл и порядок определения h -параметров в схеме с ОЭ.
9. Как определить сопротивление эмиттерного и коллекторного переходов из h -параметров транзистора в схеме с ОЭ?
10. Сравните характеристики и параметры транзисторов КТ818 и КТ 819. Какова цель разработки комплементарных р-п-р и п-р-п структур?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ Р-Н-ПЕРЕХОДОМ

3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

3.1.1. Цель работы

Изучение принципа действия, характеристик и параметров полевого транзистора с управляющим р-п-переходом.

3.1.2. Содержание работы

В работе изучаются устройство, типы, назначение, принцип действия, схемы включения, характеристики и параметры полевых транзисторов (ПТ) с управляющим р-п-переходом. Экспериментально исследуются стокзатворная и выходные характеристики, по характеристикам определяются основные параметры ПТ.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

3.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

3.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

3.2.1. Задание № 1

Ознакомиться с классификацией, особенностями, назначением и схемами включения ПТ. Изучить структуры и принципы действия ПТ с управляющим р-п-переходом.

3.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо изучить материал [1], с.148-151; [2], с.284-289.

Полевые транзисторы – это полупроводниковые приборы, в которых изменение тока происходит под действием перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом. В основе их работы используются носители зарядов лишь одного знака – только электроны или только дырки, поэтому такие транзисторы называют также униполярными в отличие от биполярных.

Наиболее характерная черта полевых транзисторов - высокое входное сопротивление (свыше 10 МОм), поэтому они управляются напряжением, а не током, как биполярные транзисторы. Кроме того, полевые транзисторы обладают высоким коэффициентом усиления по напряжению.

Наибольшее распространение получили два основных типа полевых транзисторов: транзистор с управляющим р-п- переходом и транзистор со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП).

Принцип действия полевого транзистора с р-п-переходом основан на изменении сопротивления активного слоя (канала) вследствие расширения р-п-перехода при подаче на него напряжения обратного смещения.

На рис. 8 представлена упрощенная схема полевого транзистора с каналом n-типа. Простейший полевой транзистор с управляющим р-п-переходом состоит из полупроводниковой пластины, имеющей электропроводность определенного типа (в нашем случае n-типа), от концов которой сделаны два вывода – электроды стока (С) и истока (И) с одним или двумя р-п-переходами, от которых сделан третий вывод – затвор (З).

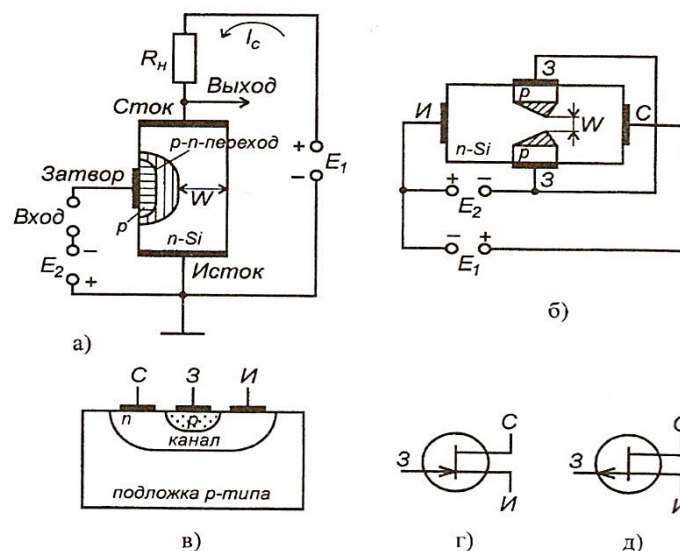


Рис. 8. Упрощенная схема устройства полевого транзистора: а – с одним управляющим р-п-переходом; б – с двумя р-п-переходами; в – типовая структура; условные обозначения транзистора с каналом п-типа (г) и р-типа (д)

Электрод, от которого начинается движение основных носителей заряда в канале, называют истоком, а электрод, к которому движутся носители, называют стоком. Расстояние между р-п-переходами называется шириной канала, а область между переходами – каналом. Проводящий канал может иметь электропроводность как п-, так и р-типа.

При включении между истоком и стоком транзистора источника напряжения E_1 (или $U_{си}$) по каналу от истока к стоку будет протекать ток основных носителей (в нашем случае – электронов) I_c , величина которого определяется сопротивлением канала при постоянном $E_{си}$. Если на затвор транзистора подать напряжение E_2 (или $U_{зи}$) так, чтобы «+» был на истоке, а «-» на затворе, то переход (переходы) сместится в обратном направлении и соответственно расширится. Вследствие этого ширина канала уменьшится, а сопротивление возрастет. С возрастанием сопротивления канала ток стока I_c уменьшается. Таким образом, изменяя напряжение $U_{зи}$, можно управлять током стока.

Различают следующие схемы включения полевых транзисторов: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ). Схема включения с общим истоком (соответствует схеме ОЭ для биполярных транзисторов) характеризуется наибольшим усилением по мощности и напряжению по сравнению с другими схемами включения.

3.2.2. Задание № 2

Изучить статические характеристики и основные параметры ПТ с управляющим р-п-переходом.

3.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Ознакомиться с материалом [1], с.151-153; [2], с.289-293.

При возрастании обратного напряжения на затворе $U_{зи}$ р-п-переход все больше расширяется, ток стока I_c постепенно уменьшается и при достаточно высоком $U_{зи}$ происходит смыкание области объемного заряда с краем кристалла (для одного р-п-перехода) или смыкание областей объемного заряда (для двух р-п-переходов). Напряжение, при котором канал полностью перекрывается и ток через него прекращается, называется напряжением отсечки $U_{отс}$ (рис. 9). Этот параметр – один из основных для любого полевого транзистора.

Помимо стокзатворных характеристик важнейшим семейством статических характеристик для полевого транзистора является семейство выходных статических характеристик, представляющих зависимость тока стока I_c от напряжения стока $U_{си}$ при различных постоянных напряжениях на затворе (рис. 10).

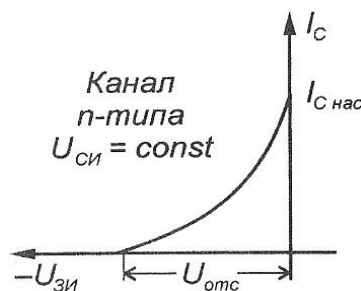


Рис. 9. Стокзатворная вольт-амперная характеристика полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

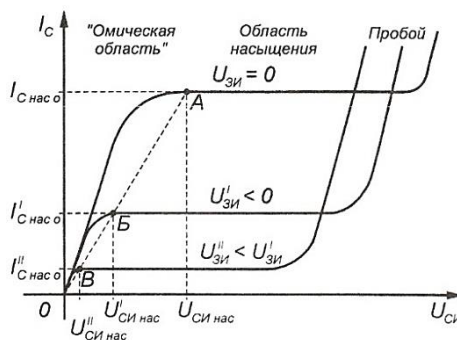


Рис. 10. Выходные статические характеристики полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

Если затвор закорочен с истоком ($U_{зи} = 0$), а на сток подается положительное относительно истока напряжение $U_{си}$, то вначале при увеличении $U_{си}$ увеличивается поток электронов к стоку, т.е. происходит линейный рост тока стока. При дальнейшем увеличении напряжения на стоке рост I_c замедляется. Эта нелинейность характеристики объясняется увеличением толщины р-п-перехода затвора около стока, так как с увеличением $U_{си}$ растет по абсолютно-

му значению обратное напряжение на р-п-переходе затвора. Ток стока, проходя по каналу, создает его неэквипотенциальность. Таким образом, наибольшая толщина р-п-перехода и соответственно наименьшее поперечное сечение канала получаются со стороны стока (рис. 8, б).

Другой физической причиной, приводящей к нелинейности выходной характеристики, является уменьшение подвижности носителей заряда в канале при увеличении в нем напряженности электрического поля.

При некотором напряжении на стоке $U_{си\text{ нас}}$ – напряжении насыщения – происходит перекрытие канала из-за увеличения толщины р-п-перехода затвора. Ток стока при дальнейшем увеличении напряжения на стоке почти не растет. Напряжение насыщения, как видно из рис.3, меняется при изменении напряжения на затворе. Область, в которой ток I_c существенно зависит от напряжения на стоке $U_{си}$ (слева от линии АБВ на рис. 10), называется омической областью, правая область, в которой ток I_c остается практически неизменным – областью насыщения.

Одним из основных параметров полевого транзистора с управляющим р-п-переходом является крутизна стокзатворной характеристики

$$S = dI_c / dU_{зи}$$

при $U_{си} = \text{const}$. С увеличением $|U_{зи}|$ ток стока и крутизна характеристики уменьшаются. Максимальное значение S при $U_{зи} = 0$ в реальных транзисторах составляет примерно 20 мА/В.

К важным параметрам таких транзисторов относятся также напряжение отсечки $U_{отс}$, ток насыщения стока $I_{с\text{ нас } 0}$ при $U_{зи} = 0$, емкости $C_{си}$ и $C_{зи}$, сопротивление транзистора в омической области R_0 , определяемое наклоном стокзатворной характеристики, внутреннее сопротивление

$$R_i = dU_c / dI_c,$$

определяемое в области насыщения при различных напряжениях на затворе $U_{зи}$, а также граничная частота. Параметры $I_{с\text{ нас } 0}$ и $U_{отс}$ определяются геометрией транзистора, свойствами полупроводникового материала и распределением примесей в управляющем р-п-переходе.

Так как подвижность электронов выше подвижности дырок, частотные свойства транзистора с п-каналом лучше, чем с р-каналом. По этой же причине транзисторы с п-каналом имеют больший ток стока I_c и большую крутизну стокзатворной характеристики S .

3.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие транзисторы называют полевыми (униполярными)?
2. Назовите характерные черты полевых транзисторов.
3. Какие два основных типа полевых транзисторов Вы знаете?
4. Нарисуйте схему устройства полевого транзистора с одним и двумя управляющими р-п-переходами и расскажите о принципе его работы.
5. Нарисуйте стокзатворную и выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и прокомментируйте их.
6. Назовите основные параметры полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.
7. Какие схемы включения ПТ вы знаете?
8. Нарисуйте обозначения ПТ с управляющим переходом с п- и р- каналами.
9. Назовите области применения ПТ.

3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

3.4.1. Задание № 1

Используя комплекс МУК-ФОЭ1, собрать установку для исследования стокзатворных и выходных характеристик ПТ с управляющим р-п-переходом с каналом п-типа КП302 по схеме с ОИ, представленной на рис. 11.

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК – ФОЭ 1:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 2шт.
2. Блок генератора напряжения ГНЗ 2шт.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭЛ01 1шт
4. Соединительные провода с наконечниками Ш4 – Ш1.6

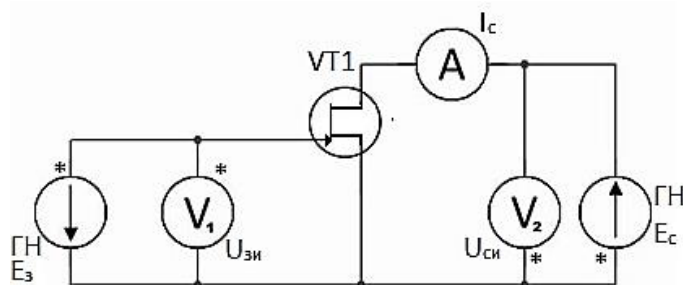


Рис. 11. Схема измерения ВАХ ПТ с управляющим р-п-переходом в схеме с ОИ

Схема собирается с помощью соединительных проводов на базе учебного комплекса МУК ФОЭ1 с использованием двух ампервольтметров АВ1 и двух генераторов напряжений соответственно для входной, эмиттерной и выходной коллекторной цепи. Стенд с транзисторами СЗЭЛ01 содержит набор биполяр-

ных и полевых транзисторов. Переключение разных типов транзисторов и схем включения проводится с помощью соединительных проводов при выключенном напряжении питания на генераторах ГНЗ и измерительных приборах.

Напряжение на затворе $U_{зи}$ задается ГН E_3 и измеряется вольтметром V_1 , выходное напряжение $U_{си}$ задается ГН E_c и контролируется вольтметром V_2 , ток стока I_c измеряется миллиамперметром A .

3.4.2. Задание № 2

Снять стокзатворную характеристику $I_c=f(U_{зи})$ ПТ КП302, используя схему (рис. 11). Для этого установить $U_{си}=10В$ и изменять напряжение $U_{зи}$ от 0В до тех пор, пока I_c не станет равен нулю. Результаты измерений занести в табл. 6. Определить напряжение отсечки $U_{зи0}$ (определить напряжение $U_{зи}$, при котором I_c снизится примерно до 10мкА).

Таблица 6

ПТ КП302. Стокзатворная характеристика схемы с ОИ

$U_{зи}, В$								
$I_c, мА$								

3.4.3. Задание № 3

Снять выходные характеристики $I_c=f(U_{си})$ ПТ КП302, используя схему рис. 4 при четырех значениях напряжения на затворе $U_{зи}$, в том числе при $U_{зи1}=0$; $U_{зи2}=0,2U_{зи0}$; $U_{зи3}=0,4U_{зи0}$ и $U_{зи4}=0,6U_{зи0}$. Результаты измерений внести в табл. 7.

Таблица 7

ПТ КП302. Выходные характеристики схемы с ОИ

$U_{зи}, В$	$U_{си}, В$	0	0,5	1	2	4	6	10
0	$I_c, мА$							
$0,2U_{зи0}$	$I_c, мА$							
$0,4U_{зи0}$	$I_c, мА$							
$0,6U_{зи0}$	$I_c, мА$							

3.4.4. Задание № 4

Построить графики статических характеристик ПТ КП302. По снятым характеристикам определить основные параметры ПТ: крутизну S в двух точках стокзатворной характеристики при $U_{зи}=0В$ и $U_{зи}=0,5U_{зи0}$; ток насыщения стока $I_{c\text{ нас}0}$, сопротивление ПТ в омической области R_0 , внутреннее сопротивление R_i (все при $U_{зи}=0$, разд. 2.2.2) – по выходным характеристикам; рассчитать коэффициент усиления μ по формуле $\mu=SR_i$ при $U_{зи}=0В$.

3.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Нарисовать схемы для исследования статических характеристик ПТ с управляющим р-п-переходом с п-и р-каналами.
2. Объясните полярность включения приборов в схемах.
3. Расскажите о методике проведения измерений.
4. Приведите и объясните стокзатворную ВАХ ПТ КП302. Какие параметры ПТ и как определяются из этой характеристики?
5. Приведите и проанализируйте выходные статические ВАХ ПТ КП302 с управляющим р-п-переходом.
6. Какие параметры ПТ и как определяются из выходных ВАХ?
7. Дайте определение предельным эксплуатационным параметрам ПТ.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ МДП-ТРАНЗИСТОРА

4.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

4.1.1. Цель работы

Целью работы является изучение принципа действия, характеристик и параметров полевого транзистора (ПТ) со структурой “металл-диэлектрик-полупроводник” (МДП).

4.1.2. Содержание работы

В работе изучаются устройство, типы, назначение, принцип действия, схемы включения, характеристики и параметры МДП - транзисторов. Экспериментально исследуются стокзатворная и выходные характеристики, по характеристикам определяются основные параметры МДП.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков

производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

4.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

4.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.2.1. Задание № 1

Ознакомиться с классификацией, особенностями, назначением и схемами включения МДП. Изучить структуры и принципы действия МДП - транзистора.

4.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с.148, с.153-155, с.157-160; [2], с.295-303, с.305-310.

Полевой транзистор с изолированным затвором (МДП) – это полевой транзистор, имеющий один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала. Структуры полевых транзисторов с изолированным затвором показаны на рис. 12.

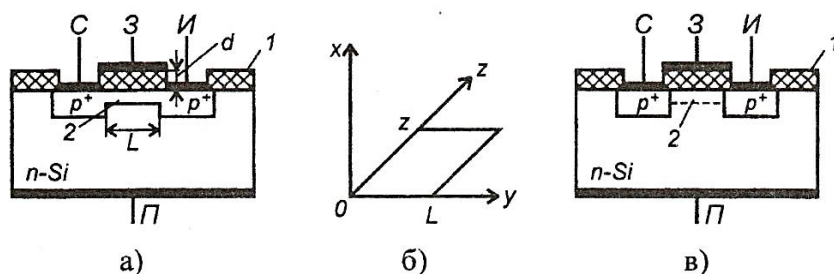


Рис. 12. Структура полевых транзисторов с изолированным затвором с р-каналом: а – со встроенным каналом; б – параметры МДП-транзистора ; в – с индуцированным каналом: 1 - диэлектрик; 2 – канал

В кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением, который называют подложкой, созданы две области с противоположным типом электропроводности. На области с проводимостью р-типа (в данном случае) нанесены металлические электроды исток (И) и сток (С), на подложку с проводимостью n-типа – электрод (П). Расстояние между областями истока и стока может составлять всего несколько микрон.

Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким (порядка 0,1 мкм) слоем диэлектрика. На слой диэлектрика нанесен металлический электрод – затвор. Нижний вывод от подложки (П) соединяется с истоком (в дискретных транзисторах) или с общей шиной (в интегральных схемах).

Полевой транзистор с изолированным затвором, в котором в качестве изоляционного слоя между металлическим затвором и проводящим каналом используется диэлектрик, называют полевым транзистором типа металл – диэлектрик – полупроводник или МДП-транзистором. Если в качестве диэлектрика применен оксид кремния, то такие транзисторы называются МОП-транзисторами (т.е. со структурой металл – оксид – полупроводник). Однако для этих транзисторов чаще используют более общий термин – МДП-транзисторы.

Эти приборы по способу образования канала подразделяются на транзисторы со встроенным каналом (канал создается при изготовлении) и с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам). Важными параметрами МДП-транзистора являются длина канала L (обычно 0,1 – 5 мкм), ширина канала Z (рис. 12, б), толщина диэлектрика d с диэлектрической постоянной ϵ и проводимость канала.

На рис. 12 представлены структуры МДП-транзисторов с р-каналами, однако в силу ряда технологических причин наибольшее распространение получили МДП-транзисторы со встроенным п-каналом и с индуцированным р-каналом.

Существенным преимуществом МДП-транзисторов является очень высокое входное сопротивление, достигающее значений более 10^4 МОм (для сравнения, у транзисторов с управляющим р-п-переходом эта величина составляет 10 МОм).

МДП-транзистор со встроенным р-каналом схематично представлен на рис. 12, а. Основой является пластина слабо легированного кремния с электропроводностью п-типа. Области стока и истока обладают электропроводностью р⁺-типа, соединенные узкой слаболегированной областью кремния с электропроводностью р-типа, что является встроенным каналом. Затвор представляет собой металлический слой, изолированный от канала тонким диэлектриком толщиной d . В транзисторе со встроенным каналом происходит расширение или сужение имевшегося канала в результате приложения отрицательного или положительного напряжения соответственно. При положительном напряжении на затворе дырки проводимости оттесняются из области канала в объем полупроводника электропроводностью п-типа. Канал обедняется носителями заряда, сужается к стоку. При подаче на затвор отрицательного напряжения происходит обогащение дырками объема канала, он расширяется, и его проводимость возрастает.

Таким образом, изменяя напряжение на затворе, можно изменять проводимость канала, т.е. ток, проходящий через этот канал.

МДП-транзистор с индуцированным р-каналом схематично показан на рис. 12, в. В качестве исходного материала транзистора использован кремний п-типа. В качестве диэлектрика чаще всего используется оксид кремния SiO_2 . В оксиде кремния всегда содержатся положительно заряженные ионы, обусловленные такими ионизирующими примесями, как положительные ионы натрия, калия, водорода, осаждаемые на поверхность кремния в процессе выполнения технологических операций. Положительный заряд в пленке оксида кремния наводит (индуцирует) в поверхностном слое n-области слой накопления электронов, в котором концентрация электронов выше, чем в объеме n-области. При подаче на затвор отрицательного напряжения $U_{\text{зи}}$ электроны поверхностного слоя отталкиваются в глубь полупроводника, а дырки движутся к поверхности. Приповерхностный слой приобретает дырочную электропроводность, т.е. появляется тонкий инверсный слой, соединяющий сток с истоком, который играет роль канала. Толщина индуцированного канала составляет всего 1 – 5 нм. При приложении напряжения между истоком и стоком дырки, перемещаясь по каналу, создают ток стока. Изменяя напряжение на затворе, можно расширять или сужать канал, увеличивая или уменьшая ток стока.

МДП-транзисторы могут быть с n-каналом. Условные графические обозначения МДП-транзисторов показаны на рис. 13. Стрелка во внутрь указывает на n-тип канала; стрелка из круга – на канал р-типа.

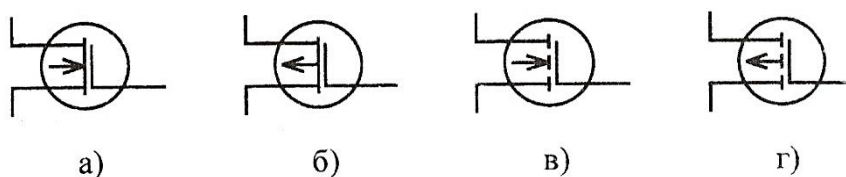


Рис. 13. Условные графические обозначения МДП-транзисторов со встроенным каналом (а, б) и с индуцированным каналом (в, г)

4.2.2. Задание № 2

Изучить статические характеристики и основные параметры МДП – транзистора.

4.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Ознакомиться с материалом [1], с.155-157, с.157-160; [2], с.303-305.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока будет протекать и при нулевом напряжении на затворе (рис. 14). Для прекращения его необходимо к затвору приложить положительное напряжение (для случая с каналом р-типа), равное напряжению $U_{\text{зиотс}}$. При приложении отрицательного напряжения канал расширяется, и ток увеличивается.

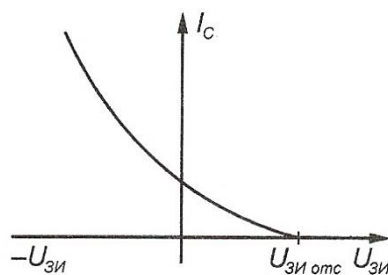


Рис. 14. Стокозатворная характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом

Выходные характеристики МДП-транзисторов аналогичны характеристикам полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (рис. 15). В них можно выделить крутую (I) и пологую (II) области, а также область пробоя (III). В области I транзистор может работать как электрически управляемое сопротивление. Пологая область II обычно используется при построении усилительных каскадов. При увеличении напряжения $U_{си}$ ширина канала уменьшается вследствие подъема на нем напряжения и изменения результирующего электрического поля.

Это особенно проявляется в той части канала, которая находится вблизи стока. При напряжении $U_{си\text{ нас}}$ канал вблизи стока становится настолько узким, что наступает динамическое равновесие, когда увеличение напряжения $U_{си}$ вызывает уменьшение ширины канала и повышение его сопротивления. В итоге значение тока I_c достигает насыщения при увеличении напряжения $U_{си}$.

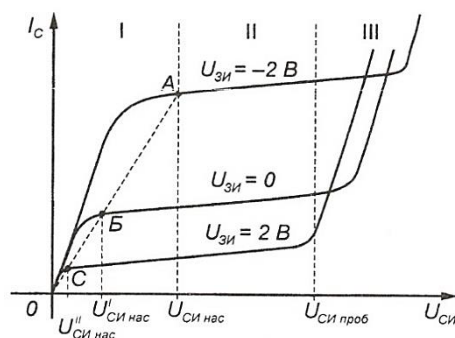


Рис. 15. Выходные характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом р-типа: I — крутая, или «омическая», область; II — пологая или насыщенная область; III — область пробоя

Статические ВАХ МДП-транзисторов с индуцированным каналом представлены на рис. 16. Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называют пороговым напряжением $U_{зи\text{ пор}}$ (рис. 16, а).

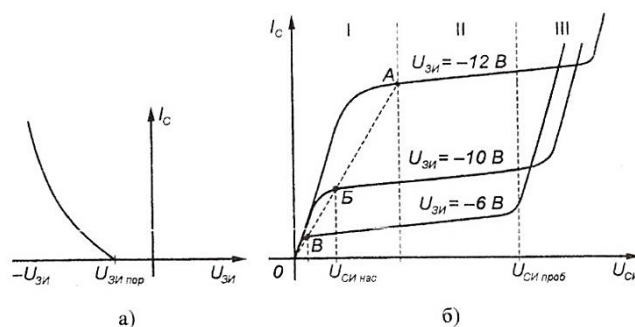


Рис. 16. Стокозатворные (а) и выходные (б) характеристики МДП-транзисторов с индуцированным каналом

Вид выходных характеристик этих транзисторов аналогичен выходным характеристикам МДП-транзисторов со встроенным каналом. Разница состоит в том, что напряжение затвор – исток всегда отрицательное, так как $U_{зи} < 0$. Наблюдаются те же три области: омическая, насыщения и пробоя. МДП-транзисторы характеризуются в основном теми же параметрами, что и полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом.

Основные параметры МДП-транзисторов и их ориентировочные значения следующие:

1. Крутизна характеристики

$$S = dI_c / dU_{зи} \text{ при } U_{си} = \text{const}, S = 0,1 - 500 \text{ мА/В.}$$

2. Начальный ток стока $I_{с \text{ нач}}$ – ток стока при нулевом напряжении $U_{зи}$ у транзисторов:

со встроенным каналом $I_{с \text{ нач}} = 0,1 - 100 \text{ мА};$

с индуцированным каналом $I_{с \text{ нач}} = 0,01 - 0,5 \text{ мкА.}$

3. Напряжение отсечки $U_{зи \text{ отс}} = 0,2 - 10 \text{ В.}$

4. Пороговое напряжение $U_{зи \text{ пор}} = 1 - 6 \text{ В.}$

5. Сопротивление сток – исток в открытом состоянии $R_{си \text{ отк}} = 2 - 300 \text{ Ом.}$

6. Максимальный ток стока $I_{с \text{ max}} = 10 \text{ мА} - 0,7 \text{ А.}$

7. Максимальная частота усиления f_{max} – частота, на которой коэффициент усиления по мощности K_p равен единице; f_{max} – десятки – сотни МГц.

4.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие транзисторы называют полевыми?
2. Назовите характерные черты полевых транзисторов.
3. Какие два основных типа полевых транзисторов Вы знаете?
4. Нарисуйте структуру МДП-транзистора со встроенным каналом и объясните принцип его работы.

5. Нарисуйте входные и выходные характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом и объясните их.
6. Объясните схему устройства и принцип работы МДП-транзистора с индуцированным каналом.
7. Нарисуйте и прокомментируйте характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом.
8. Каковы основные параметры МДП-транзисторов и их ориентировочные значения?
9. Какие схемы включения полевых транзисторов Вы знаете?
10. Приведите обозначения МДП-транзисторов со встроенным и индуцированным каналом с проводимостью n- и p- типов.

4.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.4.1. Задание № 1

Используя комплекс МУК-ФОЭ1, собрать установку для исследования стокзатворных и выходных характеристик МДП-транзистора со встроенным каналом n-типа IRFD420 в схеме с ОИ, представленной на рис. 17.

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК – ФОЭ 1:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 2 шт.
2. Блок генератора напряжения ГНЗ 2 шт.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭЛ01 1 шт.
4. Соединительные провода с наконечниками Ш4 – Ш1.6

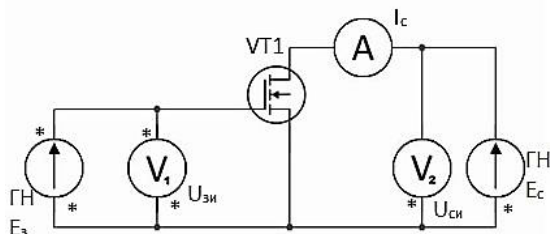


Рис. 17. Схема измерения ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом n-типа в схеме с ОИ

Схема собирается с помощью соединительных проводов на базе учебного комплекса МУК ФОЭ1 с использованием двух ампервольтметров АВ1 и двух генераторов напряжений соответственно для входной и выходной цепи. Стенд с транзисторами СЗЭЛ01 содержит набор биполярных и полевых транзисторов. Переключение разных типов транзисторов и схем включения проводится с помощью соединительных проводов при выключенном напряжении питания на генераторах ГНЗ и измерительных приборах.

Напряжение на затворе $U_{зи}$ задается ГН E_z и измеряется вольтметром V_1 , выходное напряжение $U_{си}$ задается ГН E_c и контролируется вольтметром V_2 , ток стока I_c измеряется миллиамперметром A .

4.4.2. Задание № 2

Снять стокозатворную характеристику $I_c=f(U_{зи})$ МДП-транзистора IRFD420, используя схему рис.6. Для этого установить $U_{си}=10В$ и изменять отрицательное напряжение на затворе $U_{зи}$ от 0В до тех пор, пока ток стока I_c не станет равен нулю. Определить напряжение отсечки $U_{зи0}$ (определить напряжение $U_{зи}$, при котором I_c снизится примерно до 10 мкА). Снять положительную ветвь ВАХ. Результаты измерения занести в табл. 8.

Таблица 8

ПТ IRFD 420. Стокозатворная характеристика схемы с ОИ

$U_{зи}, В$	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2
$I_c, мА$									

4.4.3. Задание № 3

Снять выходные характеристики $I_c=f(U_{си})$ МДП-транзистора IRED420, используя схему рис. 6 при четырех значениях напряжения на затворе $U_{зи}$. Результаты измерений занести в табл. 9.

Таблица 9

ПТ IRED 420. Выходные характеристики схемы с ОИ

$U_{зи}, В$	$U_{си}, В$	0	0,5	1	2	4	6	10
	$I_c, мА$							
	$I_c, мА$							
	$I_c, мА$							
	$I_c, мА$							

4.4.4. Задание № 4

Построить графики статических характеристик МДП-транзистора IRFD420. По этим характеристикам определить дифференциальные параметры транзистора: крутизну S , в двух точках стокозатворной характеристики при $U_{зи}=0В$ и $U_{зи}=0,5U_{зи0}$; ток насыщения стока $I_{c\text{ нас}0}$, сопротивление ПТ в омической области R_o , внутреннее сопротивление в R_i (все при $U_{зи}=0$, разд. 4.2.2) – по выходным характеристикам; рассчитать коэффициент усиления μ по формуле $\mu=SR_i$ при $U_{зи}=0В$.

4.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Ри-

сунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Нарисовать схемы для исследования статических характеристик МДП-транзистора IRFD420 со встроенным каналом.
2. Объясните полярность включения приборов в схемах.
3. Расскажите о методике проведения измерений.
4. Приведите и объясните стокозатворную ВАХ ПТ IRFD420. Какие параметры МДП-транзистора ПТ IRFD420 со встроенным каналом определяются из этой характеристики?
5. Приведите и проанализируйте выходные статические ВАХ МДП-транзистора IRFD420 со встроенным каналом.
6. Какие параметры МДП-транзистора IRFD420 со встроенным каналом и как определяются из выходных ВАХ?
7. Дайте определение предельным эксплуатационным параметрам МДП-транзистора IRFD420 со встроенным каналом.
8. Чем отличается МДП-транзистор от ПТ с управляющим р-п-переходом?
9. Сравните крутизну ПТ с крутизной биполярного.
10. Укажите области применения МДП-транзисторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балашов, Ю.С. Физические основы функционирования интегральных устройств микроэлектроники [Текст]: учеб. пособие/Ю.С. Балашов, М.И. Горлов. – Воронеж: ГОУ ВПО «ВГТУ», 2008. – 187с.
2. Петров, К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника [Текст]: учеб. пособие/ К.С. Петров.- СПб: Питер, 2006.- 522с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ С ОБ	3
1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	3
1.1.1. Цель работы	3
1.1.2. Содержание работы	3
1.1.3. Указания по технике безопасности	3
1.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	3
1.2.1. Задание № 1	3
1.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	3
1.2.2. Задание № 2	5
1.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	5
1.2.3. Задание № 3	6
1.2.3.1. Методические указания по выполнению задания	6
1.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	9
1.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	10
1.4.1. Задание № 1	10
1.4.2. Задание № 2	11
1.4.3. Задание № 3	11
1.4.4. Задание № 4	11
1.4.5. Задание № 5	11
1.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	12
1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	12
2.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ С ОЭ.....	13
2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	13
2.1.1. Цель работы	13
2.1.2. Содержание работы	13
2.1.3. Указания по технике безопасности	13

2.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	13
2.2.1. Задание № 1	13
2.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	13
2.2.2. Задание № 2	13
2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	14
2.2.3. Задание № 3	15
2.2.3.1. Методические указания по выполнению задания	15
2.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	17
2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	17
2.4.1. Задание № 1	17
2.4.2. Задание № 2	18
2.4.3. Задание № 3	19
2.4.4. Задание № 4	19
2.4.5. Задание № 5	19
2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	19
2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	20
3.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N-ПЕРЕХОДОМ	20
3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	20
3.1.1. Цель работы	20
3.1.2. Содержание работы	20
3.1.3. Указания по технике безопасности	21
3.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	21
3.2.1. Задание № 1	21
3.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	21
3.2.2. Задание № 2	22
3.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	23
3.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	25

3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	25
3.4.1. Задание № 1	25
3.4.2. Задание № 2	26
3.4.3. Задание № 3	26
3.4.4. Задание № 4	26
3.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	27
3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ.....	27
4.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ МДП-ТРАНЗИСТОРА.....	27
4.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	27
4.1.1. Цель работы	27
4.1.2. Содержание работы	27
4.1.3. Указания по технике безопасности	28
4.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	28
4.2.1. Задание № 1	28
4.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	28
4.2.2. Задание № 2	30
4.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	30
4.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	32
4.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	33
4.4.1. Задание № 1	33
4.4.2. Задание № 2	34
4.4.3. Задание № 3	34
4.4.4. Задание № 4	34
4.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	34
4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	36

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 11-14
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составитель

Бадаев Андрей Станиславович

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 29.05.2024.

Уч.-изд. л. 2,1.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84