

**4536**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ  
И ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Методические указания  
к лабораторным работам

Рязань 2011

УДК 621.314

Полупроводниковые приборы и пассивные элементы интегральных схем: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: В.А.Степашкин, Н.М.Прибылова. Рязань: РГРТУ, 2011. 52 с.

Содержат описание и методику выполнения четырех лабораторных работ по курсу «Электроника» по исследованию биполярных транзисторов, диодов и пассивных элементов интегральных схем, а также краткие теоретические сведения по соответствующим разделам.

Предназначены студентам дневного и заочного отделений, а также бакалаврам по направлениям 210400 – «Радиотехника» и 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Табл. 5. Ил. 31. Библиогр.: 8 назв.

*Биполярный транзистор, интегральный диод, интегральный резистор, интегральный конденсатор, эквивалентная схема, вольт-амперная характеристика, граничная частота, эпитаксия, диффузия*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиотехнических устройств РГРТУ (зав. кафедрой д-р техн. наук Ю.Н. Паршин)

Полупроводниковые приборы и пассивные элементы  
интегральных схем

Составители: С т е п а ш к и н Владимир Анатольевич  
П р и б ы л о в а Наталья Михайловна

Редактор Н.А.Орлова

Корректор М.Е.Цветкова

Подписано в печать 20.10.11. Формат бумаги 60 x 84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,25.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Стенд включает в себя лабораторный пульт, генератор стандартных сигналов GRG-450B, частотомер ЧЗ-35, милливольтметр GVT-427B, вольтметр универсальный В7-26 и цифровой мультиметр М-838. На лабораторном пульте (рис. 1) монтируются сменные панели, на которых расположены макеты лабораторных работ. В верхней части пульта находятся органы управления пультом и измерительные приборы: миллиамперметр 1 и измеритель температуры 2. Под головкой миллиамперметра расположена ручка установки нуля 3, а с правой стороны – переключатель пределов измерения миллиамперметра 4. Под головкой измерителя температуры расположены тумблер включения термостата 6 и ручка регулировки температуры 7. Предел изменения температуры от 20 до 100 °С. Тумблером «Сеть» включается лабораторный пульт, функционирование которого контролируется индикатором 8. Напряжение на лабораторную панель подается тумблером «Номер работы» 5. Описание лабораторных панелей дается ниже.

**Внимание!** Во время работы *категорически запрещается* включать тумблеры и переключатели, не относящиеся к данной работе.

Следует внимательно следить за стрелками приборов и вовремя переключать нужный предел измерения. Периодически контролировать положение нуля миллиамперметра.

**При каждом переключении пределов измерения миллиамперметра необходимо проверить установку нуля!**

### СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА И ЗАЩИТА РАБОТЫ

1. Каждый студент составляет индивидуальный отчет о работе (образец титульного листа отчета показан на рис. 2).

2. В отчете должны быть приведены:

- цель работы;
- схемы электрические принципиальные, выполненные в соответствии с требованиями ЕСКД;
- результаты измерений в виде таблиц, графиков или отдельных значений, а также необходимые расчеты (в соответствии с заданием);
- выводы по работе, касающиеся соответствия результатов измерений теоретическим данным и возможных причин при их несоответствии.

3. При защите отчета о работе студент обязан показать знание раздела теоретического курса и умение объяснить методику проведения измерений и их результаты.

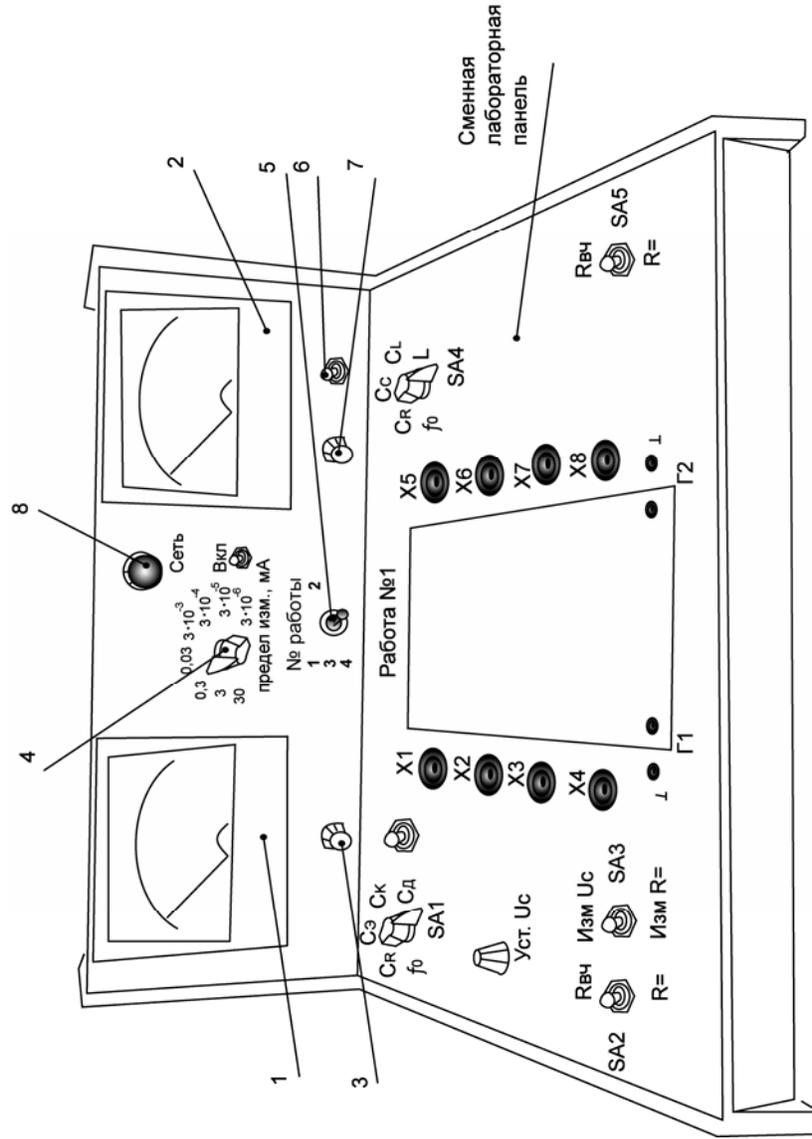


Рис. 1

РГРТУ

Кафедра РТУ

Лаборатория электроники и микросхемотехники

**О Т Ч Е Т**  
по лабораторной работе № \_\_\_\_\_

---

(название работы)

Макет № \_\_\_\_\_

Выполнил студент гр. № \_\_\_\_\_

---

(Ф.И.О. студента)

Принят «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

---

(Ф.И.О. преподавателя)

Рязань 201\_\_

Рис. 2. Образец титульного листа отчета

## Лабораторная работа № 1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

**Цель работы:** исследование электрических свойств диффузионных резисторов и конденсаторов, тонкопленочных резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности.

**1. Краткие теоретические сведения****1.1. Устройство и основные свойства полупроводниковых  
пассивных элементов**

## 1.1.1. Полупроводниковые резисторы

На рис. 1.1 показаны конфигурации резисторов, используемых в полупроводниковых ИС, которые выполняются на основе интегральной n-p-n транзисторной структуры.

Наибольшее распространение получил диффузионный резистор, который изготавливается в процессе диффузии базы (рис. 1.1, а), так как он в большей степени удовлетворяет требованиям большей стабильности при минимальных размерах [3].

Сопротивление резистора может быть выражено через поверхностное сопротивление  $R_s$ :

$$R = R_s (L/W),$$

где  $L$  – полная длина резистора;

$W$  – ширина резистора.

С увеличением примесной проводимости ослабляется величина термозависимой собственной проводимости полупроводника и уменьшается поверхностное сопротивление  $R_s$ , что приводит к увеличению площади, занимаемой резистором, как это происходит в эмиттерном резисторе (рис. 1.1, б). При увеличении  $R_s$ , как в случае эпитаксиального резистора (рис. 1.1, в), уменьшается площадь резистора или может быть увеличен номинал резистора, но сильно снижается его термостабильность. Пинч-резистор (рис. 1.1, г) по величине  $R_s$  превосходит все диффузионные резисторы, но отличается большим разбросом и возможностью работы лишь в слаботочных цепях.

Эквивалентная схема полупроводникового резистора представлена на рис. 1.2. Паразитная емкость  $C_n$  – емкость, образующаяся между резистором и подложкой:

$$C_n = \varepsilon_0 \varepsilon S/d = \varepsilon_0 \varepsilon LW/d.$$

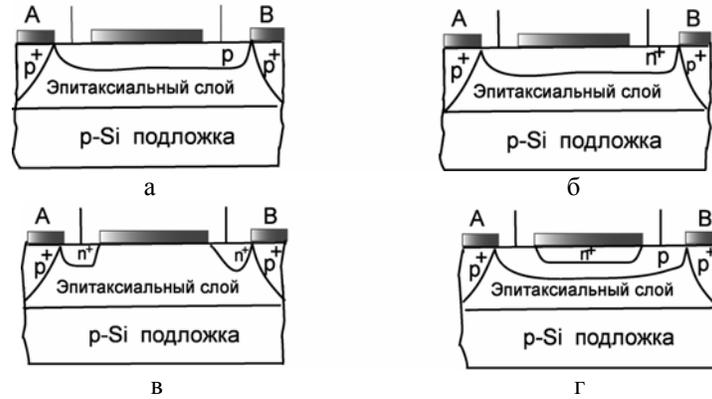


Рис. 1.1

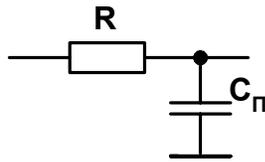


Рис. 1.2

$$\text{где } \tau = (0,5 R_s L / W) \cdot (\epsilon_0 \epsilon L W / d) = 0,5 R_s L^2 \epsilon_0 \epsilon / d.$$

Постоянная времени цепочки  $\tau = 0,5 R C_n$  определяет ширину полосы фильтра низких частот по уровню 3 дБ:

$$f_{zp} = 1 / (2\pi\tau),$$

Паразитная емкость существенно ограничивает возможность использования высокоомных резисторов на высоких частотах. Увеличение граничной частоты резистора путем уменьшения ширины резисторной полосы  $W$  ограничивается мощностью рассеяния и погрешностью фотолитографии.

В табл. 1.1 приведены основные параметры полупроводниковых резисторов. Как видно из таблицы, разброс отношения резисторов на порядок меньше разброса номинала резистора, так как он определяется разбросом геометрических размеров резистора.

Таблица 1.1

Тип резистора	$R_s$ , Ом/см <sup>2</sup>	ТКС, 10 <sup>-3</sup> /C°	Разброс	
			R, %	$R_1 / R_2$ , %
Диффузионный	100...300	+ (1,5...3)	± (5...20)	± 1
Эмиттерный	2...3	+ (0,1...0,5)	± 20	± 1
Эпитаксиальный	5·10 <sup>3</sup>	+ (5...7)	± 30	± 5
Пинч-резистор	(5...10)·10 <sup>3</sup>	+ (3...6)	± (30...50)	± 6

## 1.1.2. Полупроводниковые конденсаторы

В интегральных схемах роль конденсаторов играют обратносмещенные р-п-переходы, выполненные на основе п-р-п транзисторной структуры в едином технологическом цикле [3]. Используют или эмиттерно-базовый, или коллекторно-базовый переходы, конфигурации которых показаны на рис. 1.3 (а – коллектор-база, б – база-эмиттер). Эти переходы формируются диффузией и поэтому часто называются *диффузионными конденсаторами*. Емкость конденсатора определяется емкостью перехода, имеющего диффузионную и барьерную составляющие. Основную роль играет *барьерная емкость*.

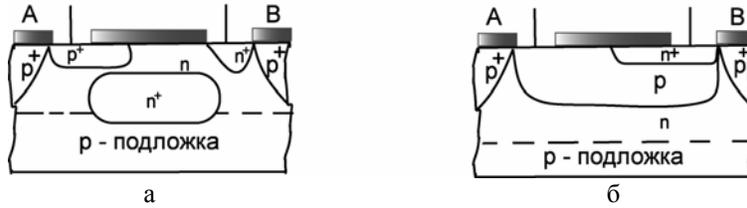


Рис. 1.3

Емкость ступенчатого р-п перехода

$$C = S [\varepsilon N q / 2 (U_{OBR} + \varphi_K)]^{1/2},$$

где  $S$  – площадь перехода;

$N$  – концентрация примесей для высокоомной области р-п перехода (базовой области для эмиттерно-базового перехода и коллекторной для коллекторно-базового);

$\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная полупроводника (кремния);

$q$  – заряд электрона;

$U_{OBR}$  – напряжение обратного смещения;

$\varphi_K$  – контактный диффузионный потенциал.

Отношение емкостей эмиттерного и коллекторного переходов при равных смещениях и площади

$$\gamma = C_{\delta\delta} / C_{\delta\kappa} = \sqrt{N_{\delta} / N_{\kappa}}.$$

В интегральном транзисторе  $N_{\delta} / N_{\kappa} = 10$ , поэтому удельная емкость коллекторного конденсатора более чем в 3 раза меньше, чем эмиттерного:

$$\begin{aligned} C_{\theta \delta\kappa} &\approx 600 \text{ пФ/мм}^2, \\ C_{\theta \delta\delta} &\approx 1900 \text{ пФ/мм}^2. \end{aligned}$$

Упрощенная эквивалентная схема диффузионного конденсатора представлена на рис. 1.4, где приняты обозначения:

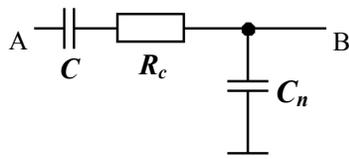


Рис. 1.4

$R_c$  – сопротивление легированных p-n областей;

$C_n$  – паразитная емкость на подложку.

Добротность конденсатора

$$Q_c = 1/W C R_c.$$

Полагая, что  $R_c$  в основном определяется высокочастотной частью и  $R_c = R_s L/W$ , получаем

$$Q_c = 1/W C R_c = \sqrt{2(U + U_{diff})} / (W R_s A L^2),$$

где  $A = \sqrt{q N \epsilon}$ .

С учетом данных соотношений параметры диффузионного конденсатора в зависимости от внешнего смещения могут быть представлены графиком, изображенным на рис. 1.5.

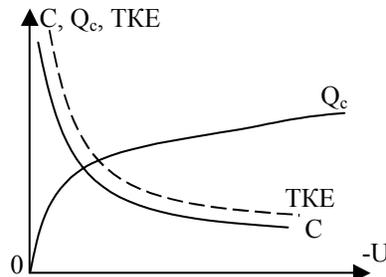


Рис. 1.5

Температурная стабильность диффузионного конденсатора при малом внешнем смещении определяется температурной стабильностью контактного диффузионного потенциала, который весьма низкий, а при большом смещении – температурной стабильностью диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

С учетом этого использовать диффузионный конденсатор допустимо при  $U \geq -3$  В. В реальных схемах с учетом  $S_c = S_{c \min}$

$$C_{diff \max} < 30 \dots 50 \text{ пФ}, Q_c = 50 \dots 100.$$

## 1.2. Устройство и основные свойства тонкопленочных пассивных элементов

### 1.2.1. Основные технологические приемы изготовления тонкопленочных элементов

Пассивные элементы и проводники наносятся на пассивную подложку методами термического испарения в вакууме, катодного распыления, химическим осаждением пленки через металлическую массу либо методом травления участков подложки, которые предвари-

тельно не защищены фоторезистивным слоем. В тонкопленочной технологии используются такие же способы фоторезистивного маскирования, как и в производстве полупроводниковых схем. В случае термического испарения испарителями являются спирали, подогреваемые проходящим через них током. При катодном распылении энергия, необходимая для отрыва атомов испаряемого вещества, получается путем бомбардирования ионами плазмы, получаемой, например, с помощью высокочастотного разреза. При электронно-лучевом испарении необходимое для испарения тепло выделяется либо за счет бомбардировки потоком электронов с раскаленного катода, получивших большую энергию в постоянном электрическом поле, либо магнетроном.

При химическом осаждении нагретую подложку помещают в поток смеси газов. При этом на поверхности происходят химические реакции разложения элементоорганических соединений или реакции синтеза, замещения или гидролиза. Продуктом реакции являются твердая пленка на поверхности подложки и газообразные составляющие, удаляемые потоком исходных газов.

Каждый из перечисленных методов имеет свои плюсы и минусы. Термические испарения позволяют получать чистые пленки, можно напылять их из сравнительно простых по химическому составу веществ. Катодные распыления, позволяющие осаждать пленки тугоплавких и сложных по химическому составу материалов на большей площади, отличаются плохой воспроизводимостью основных свойств пленок. Химические осаждения позволяют получать пленки любого состава, не требуют сложного оборудования, но из-за различия парциального давления газов имеют также плохую воспроизводимую параметров пленки. Электронно-лучевые испарения позволяют наносить пленки тугоплавких материалов, но отличаются низкой скоростью их осаждения. Этот недостаток устраняется применением в качестве источника энергии магнетрона.

### 1.2.2. Пленочные резисторы

Тонкопленочный резистор представляет собой пленку резисторного материала, нанесенную на пассивную подложку. Наибольшее распространение получили сплавы хрома Cr, никрома NiCr, кермета Cr/SiO<sub>2</sub>, Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Пленки из керметов имеют более высокую стабильность, но отличаются плохой воспроизводимостью номинала резистора и температурного коэффициента, так как трудно выдержать заданную композицию основных компонентов и избежать сильного влияния технологических факторов. Эквивалентная схема, частотные свойства и компромиссы между номиналом и площадью резистора такие же, как

у полупроводниковых резисторов, но сами параметры тонкопленочных резисторов значительно более качественные (см. табл. 1.2).

Таблица 1.2

Характеристики	NiCr	Cr/SiO
Стабильность	0,5 % / 100 ч (70 ° C)	0,2 % / 1000 ч (200 ° C)
Толщина пленки, А	130	200...1200
Поверхностное сопротивление, $R_s$ , Ом	200...300	10...1000
ТКС $10^6 / ^\circ\text{C}$	100	-25...+100

### 1.2.3. Пленочные конденсаторы

Тонкопленочный конденсатор представляет собой комбинацию нижней 3 и верхней 1 проводящих пленок и промежуточной диэлектрической пленки 2, нанесенной на пассивную подложку 4 (рис. 1.6).

Емкость пленочного конденсатора определяется по формуле

$$C = 0,0885 \varepsilon \cdot S/d,$$

где  $C$  – емкость, пФ;

$\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная пленки;

$S$  – площадь проводящих пленок,  $\text{см}^2$ ;

$d$  – толщина пленки диэлектрика, см.

Добротность конденсатора

$$Q_c = 1/W C r_c$$

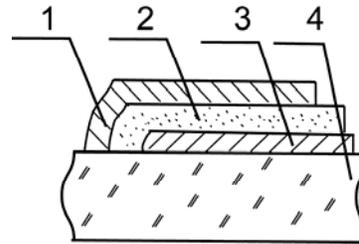


Рис. 1.6

в основном определяется качеством диэлектрика и потерями в обкладках. Для обкладок применяют материал с высокой электропроводимостью (Cu, Au, Al). Диэлектрические пленки изготавливаются на основе оксидов кремния, халькогенных стекол и окислов других металлов. Основные характеристики конденсаторов приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Характеристики	SiO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Удельная емкость, пФ/см <sup>2</sup>	1000	(8-20)10 <sup>3</sup>	(30-50)10 <sup>3</sup>	(0,1-0,2)10 <sup>6</sup>
Диэлектрическая постоянная $\varepsilon$	5...6	3,6...4,1	8...9	21...25
Добротность Q	10	5·10	100	100
ТКС $10^4, 1/^\circ\text{C}$	2...3	0,1...1,0	0,4	2...3

## 1.2.4. Пленочная индуктивность

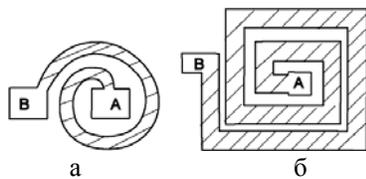


Рис. 1.7

Тонкопленочная индуктивность представляет собой проводящие пленки спиралевидной формы, нанесенные на пассивную подложку. Спираль может быть круглой (рис. 1.7, а) или квадратной (рис. 1.7, б).

Особенностью пленочной катушки является наличие больших индуктивности рассеяния и межвитковой емкости. Это ограничивает номинал индуктивности, так как при числе витков больше 5 прекращается пропорциональная зависимость между числом витков и индуктивностью.

Индуктивность спирали круглой формы находится по соотношению:

$$L_{кр} = 0,0138 a w^2,$$

квадратной:

$$L_{кв} = 55,5 a w^{5/3} \frac{8a}{t} \cdot 10^3,$$

где  $w$  – число витков;

$a = (A_n + A_в)$  – средний размер спирали;

$t = 0,5(A_n - A_в)$ ;

$A_n, A_в$  – наружный и внутренний размеры спирали.

Усредненные параметры пленочной индуктивности при разумно допустимой занимаемой площади:

$$L_{max} = 2 \dots 4 \text{ мкГн}, Q_1 = 2\pi f L / R_1, Q_1 = 50 \dots 80,$$

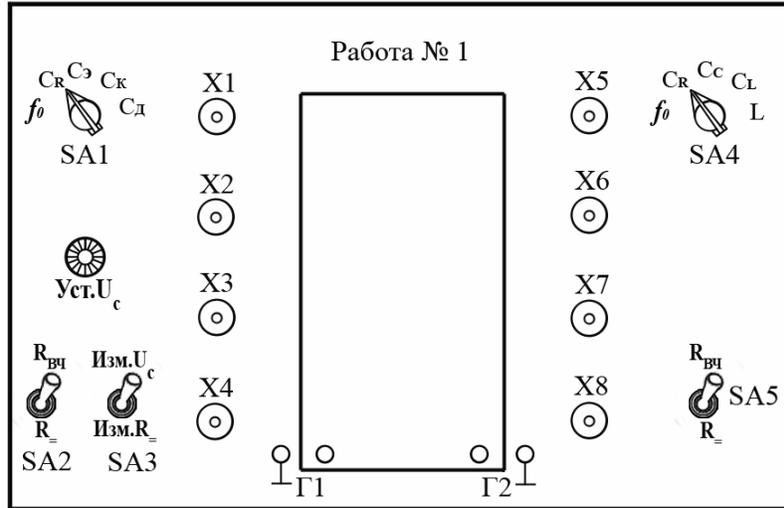
$R_1$  – сопротивление токопровода.

## 2. Исследовательская часть

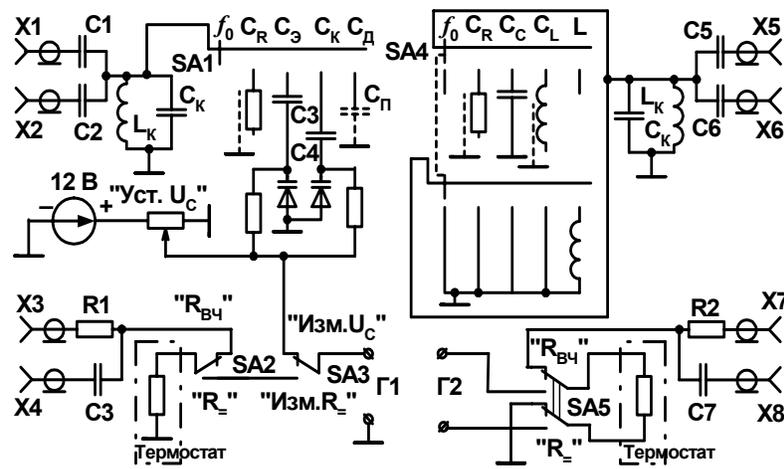
### Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы *необходимо изучить* расположение органов управления лабораторного пульта (рис. 1) и органов управления на сменной лабораторной панели (рис. 1.8, а), принципиальную схему лабораторного макета (рис. 1.8, б), а также подготовить ответы на контрольные вопросы данной работы.

Включить стенд тумблером «Сеть». Подать напряжение на работу тумблером «Номер работ», поставив его в положение 1.



a



б

Рис. 1.8

## 2.1. Исследование диффузионного резистора

2.1.1. Измерение сопротивления диффузионного резистора на постоянном токе

Тумблер SA2 поставить в положение « $R_{\Rightarrow}$ », а тумблер SA3 – в положение «Изм.  $R_{\Rightarrow}$ ». К гнездам Г1 подключить мультиметр М-838, который необходимо перевести в режим измерения сопротивлений. Измерить с помощью мультиметра сопротивление диффузионного резистора на постоянном токе  $R_{\Rightarrow}$ .

2.1.2. Измерение частотной зависимости сопротивления диффузионного резистора

Тумблер SA2 поставить в положение « $R_{\text{оч}}$ », на высокочастотный разъем X3 подать напряжение от ГСС GRG-450В, милливольтметр GVT-427В подключить к разъему X4. Изменяя частоту ГСС, снять частотную зависимость напряжения на резисторе  $U_{fi}$  в диапазоне частот 0,1...50 МГц.

Вычислить значения сопротивления диффузионного резистора на измеряемых частотах, для чего принять значение сопротивления резистора на частоте 0,1 МГц за сопротивление на постоянном токе  $R_{\Rightarrow}$ , измеренное в п. 2.1.1. Тогда сопротивление резистора на любой частоте

$$R_D = R_{\Rightarrow} U_{fi} / U_{f0,1},$$

где  $U_{fi}$  – напряжение на  $i$ -й частоте,  $U_{f0,1}$  – напряжение на частоте 0,1 МГц.

Построить график зависимости сопротивления диффузионного резистора  $R_D$  от частоты  $f$ . По графику определить граничную частоту диффузионного резистора  $f_{zp}$ , на которой его сопротивление уменьшится на 3 дБ (в 1,41 раза) по сравнению с сопротивлением на постоянном токе.

2.1.3. Измерение паразитной емкости на подложку

ГСС подключить к разъему X1, а милливольтметр – к X2 (рис. 1.8). Переключатель SA1 поставить в положение « $f_0$ ». ГСС настроить на резонансную частоту контура  $f_0$  по максимальному показанию милливольтметра, записать эту частоту. Значение резонансной частоты определяется по частотомеру ЧЗ-35А или (если это невозможно) считывается с ГСС. Переключатель SA1 поставить в положение « $C_R$ », при этом к контуру подключается паразитная емкость диффузионного резистора (рис. 1.8). Изменяя частоту ГСС, вновь настроить контур на резонансную частоту. Записать эту частоту  $f_1$ . Вычислить паразитную емкость диффузионного резистора  $C_n$  по формуле:

$$C_n = \frac{1}{4\pi^2 L_k} \left( \frac{f_0^2 - f_1^2}{f_0^2 \cdot f_1^2} \right),$$

где  $L_k = 32$  мкГн.

По определенной в п. 2.1.1 величине сопротивления диффузионного резистора на постоянном токе  $R_+$  и величине паразитной емкости  $C_n$  определить граничную частоту резистора:

$$f_{zp} = 1/(2\pi C_n R_+)$$

и сравнить полученное значение  $f_{zp}$  с величиной  $f_{zp}$ , определенной в п. 2.1.2. Построить эквивалентную схему замещения диффузионного резистора.

2.1.4. Исследование влияния температуры на сопротивление диффузионного резистора

Включить схему согласно п. 2.1.1. Тумблером 6 включить термостат и регулятором 7 (рис. 1) изменять температуру термостата (выставлять  $t_2 = 35$  °С и  $t_3 = 45$  °С). Измерить сопротивление диффузионного резистора  $R_+$  при этих двух температурах. Построить график зависимости сопротивления диффузионного резистора от температуры (по трем точкам  $t_1 = 20$  °С,  $t_2 = 35$  °С и  $t_3 = 45$  °С). По найденным значениям сопротивления резистора определить  $TKC$ :

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_+ \Delta t} \cdot 100,$$

где  $\Delta R$  – изменение сопротивления при изменении температуры на  $\Delta t$ .

## 2.2. Исследование диффузионного конденсатора

2.2.1. Переключатель SA1 (рис. 1.8) поставить в положение « $f_0$ », к разъему X1 подключить выход ГСС, а к X2 – вход милливольтметра. Настроить ГСС на резонансную частоту контура и с помощью частотомера измерить резонансную частоту  $f_0$ , а также полосу пропускания контура  $P_{0,7}$  (по уровню 0,707). Записать значения  $f_0$  и  $P_{0,7}$ .

Переключатель SA1 поставить в положение « $C_k$ ». При этом к контуру подключается диффузионный конденсатор. Напряжение смещения на этом конденсаторе контролируется с помощью мультиметра М-838, который необходимо перевести в режим измерения напряжений и подключить к гнездам Г1, тумблер SA3 должен стоять в положении «Изм.  $U_c$ ». С помощью потенциометра «Уст.  $U_c$ » установить напряжение смещения  $U_c = 10$  В. Изменяя частоту ГСС вновь

настроить контур на резонансную частоту. Измерить новую частоту резонанса  $f_1$  и полосу пропускания  $\Pi_{0,7}$ . По результатам измерений вычислить емкость диффузионного конденсатора  $C_k$  по формуле п. 2.1.3 и его добротность по формуле  $Q_k = \frac{Q_0 Q_1}{Q_0 - Q_1}$ ,

где  $Q_0 = f / \Pi_{0,7}$  – собственная добротность контура,

$Q_1 = f_1 / \Pi_{0,7}$  – добротность нагруженного контура.

Аналогичные измерения провести для  $U_c = 8, 6, 4, 2$  В. Рассчитать емкость  $C_k$  и добротность  $Q_k$  конденсатора при этих смещениях и построить зависимость емкости  $C_k$  и добротности  $Q_k$  от  $U_c$ .

2.2.2. С помощью тумблера 6 включить термостат и регулятором 7 изменять температуру термостата (выставлять  $t = 35$  °С и  $t = 45$  °С). Напряжение смещения  $U_c$  на диффузионном конденсаторе установить сначала равным 3В, а затем повторить для 10 В.

Определить температурные изменения емкости и добротности конденсатора, рассчитать температурный коэффициент емкости  $TKE$ . Построить графики  $C_k = f(t, U_c)$ ;  $Q = f(t, U_c)$ ;  $TKE = f(U_{см})$ .

2.2.3. Переключатель SA1 поставить в положение « $C_k$ ». При этом к контуру подключается емкость диффузионного конденсатора на подложку. Измерить значение резонансной частоты контура и рассчитать величину паразитной емкости по формуле п.2.1.3.

### 2.3. Исследование пленочного резистора

2.3.1. Измерить сопротивление пленочного резистора на постоянном токе.

Тумблер SA5 поставить в положение « $R_{\pm}$ ». При этом пленочный резистор подключается к клеммам Г2. Измерить сопротивление пленочного резистора с помощью мультиметра М-838.

2.3.2. Измерить частотную зависимость сопротивления пленочного резистора. Тумблер SA5 поставить в положение « $R_{вч}$ ». На высокочастотный разъем X7 подать напряжение от ГСС, вход милливольтметра подключить к X8. Измерения проводить аналогично п. 2.1.2.

2.3.3. Измерить паразитную емкость резистора на подложку. ГСС подключить к разъему X5, а милливольтметр – к X6. Переключатель SA4 – в положение « $f_0$ ». Измерение проводить аналогично п. 2.1.3.

2.3.4. Исследовать влияния температуры на сопротивление пленочного резистора. Включить вновь схему согласно п. 2.3.1. Исследование проводить аналогично п. 2.1.4.

## 2.4. Исследование пленочного конденсатора

2.4.1. Измерить емкость и добротность пленочного конденсатора. Переключатель SA4 (рис. 1.8) поставить в положение « $f_0$ », к разъему X5 подключить выход ГСС, а к X6 – милливольтметр. Настроить ГСС на резонансную частоту контура  $f_0$ , измерить ее и полосу пропускания с помощью частотомера и записать результаты. Переключатель SA4 поставить в положение « $C_c$ ». Настроить вновь генератор в резонанс и измерить эту частоту  $f_1$  и полосу пропускания. Рассчитать емкость и добротность пленочного конденсатора.

2.4.2. С помощью тумблера 6 включить термостат и регулятором 7 изменять температуру термостата (выставлять  $t_1 = 35$  °С и  $t_2 = 45$  °С). Определить температурные изменения емкости и добротности пленочного конденсатора, вычислить его *ТКЕ*. Построить графики  $C_c = f(t, ^\circ\text{C})$ ;  $Q = f(t, ^\circ\text{C})$ .

## 2.5. Исследование пленочной катушки индуктивности

2.5.1. Переключатель SA4 поставить в положение « $L$ ». При этом катушка индуктивности включается последовательно с контурной индуктивностью. Настроить ГСС на резонанс и определить с помощью частотомера значение резонансной частоты  $f_1$  и полосы пропускания  $\Pi_{0,7}$ .

По результатам измерений вычислить индуктивность пленочной катушки и ее добротность:

$$L = L_k / (f_0^2 / f_1^2 - 1),$$

где  $L_k = 32$  мкГн,  $f_0$  – резонансная частота ненагруженного контура;

$$Q_k = \frac{Q_0 Q_1}{Q_0 - Q_1} \quad (\text{см. п.2.2.1}).$$

Рассчитать сопротивление потерь пленочной катушки:

$$r_1 = 2\pi f_1 L / Q_k.$$

2.5.2. Переключатель SA4 поставить в положение « $C_L$ », при этом к измерительному контуру подключается паразитная емкость катушки индуктивности. Измерить эту емкость по методике п. 2.1.3.

Построить эквивалентную схему замещения пленочной катушки индуктивности.

#### **Контрольные вопросы**

1. Резисторы полупроводниковых интегральных микросхем, их конструкции, свойства, характеристики.
2. Частотные характеристики диффузионных резисторов.
3. Температурные характеристики диффузионных резисторов.
4. Конденсаторы полупроводниковых ИМС, их конструкции, свойства, характеристики.
5. Частотные и температурные характеристики диффузионных конденсаторов.
6. Пленочные резисторы, типы, конструкции. Схема замещения. Основные свойства и характеристики.
7. Пленочные конденсаторы, типы, конструкции. Схема замещения. Основные свойства и характеристики.
8. Пленочные индуктивности, типы, конструкции. Основные свойства и характеристики.
9. Методы изготовления тонкопленочных элементов.
10. Технология изготовления толстопленочных микросхем.
11. Основные свойства и характеристики толстопленочных элементов.
12. Сравнение свойств пассивных элементов полупроводниковых и пленочных микросхем.

#### **Лабораторная работа № 2**

##### ***ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ДИОДА***

**Цель работы:** исследование свойств интегральной транзисторной структуры в диодном включении.

##### **1. Краткие теоретические сведения**

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами (приставка «ди-» означает «два») и одним электрическим переходом.

Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных р-п-переходов, т.е. одну из областей легируют

больше, чем другую. Эта область является основным источником подвижных носителей (эмиттер). Другая область с меньшей концентрацией примесей – база. Один из вариантов конструкции и условное обозначение диода приведены на рис. 2.1, а, б. Вывод от p-области называют анодом, а от n-области — катодом.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода, т.е. зависимость протекающего через диод тока от приложенного к нему напряжения, определяется вольт-амперной характеристикой p-n-перехода (рис. 2.1, в). При подаче к диоду прямого напряжения диод открыт и пропускает прямой ток, при этом падение напряжения на нем составляет десятые доли вольт. При подаче обратного напряжения диод заперт, и если  $U_{обр}$  не достигает значения  $U_{обр\ max}$ , то через диод протекает пренебрежительно малый обратный ток  $I_0$  (прямой и обратный токи на рисунке показаны в разных масштабах). При подаче обратного напряжения, превышающего значение  $U_{обр\ max}$ , наступает пробой p-n-перехода, при котором обратный ток резко возрастает.

Идеализированная вольт-амперная характеристика диода описывается уравнением Эберса – Молла. Но вольт-амперная характеристика диода и p-n-перехода примерно совпадают только в области малых токов (рис. 2.1, в).



Рис. 2.1

В реальных диодах отличие обратной ветви вольт-амперной характеристики от идеализированной обусловлено тем, что тепловой

ток  $I_T$  при обратном включении составляет лишь часть обратного тока диода  $I_{обр}$ .

У германиевых диодов  $I_{обр} \approx I_T$ , у кремниевых  $I_{обр} \gg I_T$  ( $I_{обр} \approx 10^3 I_T$ ).

Так как *обратный ток в кремниевых диодах на несколько порядков меньше, чем в германиевых*, в кремниевых диодах им часто пренебрегают.

Для инженерных расчетов зависимости обратного тока  $I_{обр}$  от температуры окружающей среды можно пользоваться упрощенным выражением

$$I_{обр}(T) \approx I_{обр}(T_0) 2\Delta T/T^*,$$

где  $T^*$  — приращение температуры, при котором обратный ток  $I_{обр}(T)$  удваивается ( $T^* \approx 8 \dots 10$  °С для германия и  $T^* \approx 6 \dots 7$  °С для кремния).

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода отклоняется от идеализированной:

- из-за наличия токов рекомбинации в р-п-переходе;
- падения напряжения на базе диода;
- изменения сопротивления базы при инжекции в нее неосновных носителей заряда;
- наличия в базе внутреннего поля, возникающего при большом коэффициенте инжекции.

С учетом падения напряжения на базе диода можно записать уравнение прямой ветви вольт-амперной характеристики диода:

$$I = I_T \cdot (e^{(U - I \cdot r_B) / \phi_T} - 1),$$

где  $r_B$  — омическое сопротивление базы диода.

Падение напряжения на диоде:

$$U = [\phi_T \ln(I / I_T + 1)] + I r_B.$$

Для малых токов  $I$ :

$$U \approx \phi_T \ln(I / I_T + 1).$$

Падение напряжения на диоде  $U$  зависит от тока  $I$ , протекающего через него, и имеет большее значение у диодов с малым  $I_T$ .

Так как у кремниевых диодов тепловой ток  $I_T$  мал, то и начальный участок прямой ветви значительно более пологий, чем у германиевых диодов.

Сравним вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов из кремния и германия (рис. 2.2).

Прямая ветвь (прямые напряжения и токи):

$$\text{при } U_{np} = \text{const } I_{npGE} > I_{npSI},$$

$$\text{при } I_{np} = \text{const } U_{npGE} < U_{npSI}.$$

Преимущество у германиевого диода, так как потери в кремниевом диоде больше.

Обратная ветвь (обратные токи и обратные пробивные напряжения):

$$I_{обр\ GE} > I_{обр\ SI},$$

$$U_{проб\ SI} > U_{проб\ GE}.$$

Здесь очевидно преимущество кремниевого диода. Причем следует заметить, что пробой в кремниевом диоде чаще всего бывает электрический, а в германиевом – тепловой.

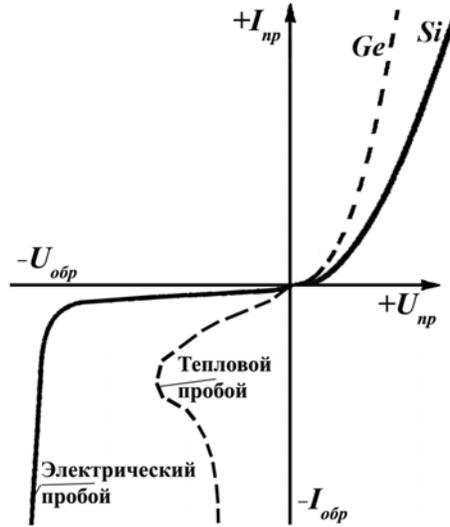


Рис. 2.2

При увеличении температуры прямая ветвь характеристики становится более крутой из-за увеличения  $I_T$  и уменьшения сопротивления базы. Падение напряжения, соответствующее тому же значению прямого тока, при этом уменьшается.

С ростом температуры увеличивается и обратный ток [1].

Германиевые диоды допускают разогрев p-n-перехода не более чем до  $70^\circ\text{C}$ , кремниевые – до  $120\dots150^\circ\text{C}$ , арсенид-галлиевые – до  $150^\circ\text{C}$ .

Эквивалентная схема диода для переменного тока (рис. 2.3, а). Сопротивление  $R_\theta$  в этой схеме представляет собой суммарное (сравнительно небольшое) сопротивление n- и p-областей и контактов этих областей с выводами. Нелинейное сопротивление  $R_{нл}$  при прямом на-

пряжении равно  $R_{np}$ , т. е. невелико, а при обратном напряжении  $R = R_{обр}$ , т. е. оно очень большое.  $C_b$  и  $C_{диф}$  – соответственно барьерная и диффузионная емкости p-n-перехода.

Приведенная эквивалентная схема в различных частных случаях может быть упрощена. На низких частотах емкостное сопротивление очень велико и можно емкость не учитывать. Тогда при прямом напряжении в эквивалентной схеме остаются лишь сопротивления  $R_0$  и  $R_{np}$  (рис. 2.3, б), а при обратном напряжении — только сопротивление  $R_{обр}$ , так как  $R_0 \ll R_{обр}$  (рис. 2.3, в). На высоких частотах емкости имеют сравнительно небольшое сопротивление. Поэтому при прямом напряжении получается схема по рис. 2.3, г (если частота не очень высокая, то  $C_b$  практически не влияет, так как сопротивление  $R_{np}$  маленькое), а при обратном остаются  $R_{обр}$  и  $C_b$  (рис. 2.3, д).

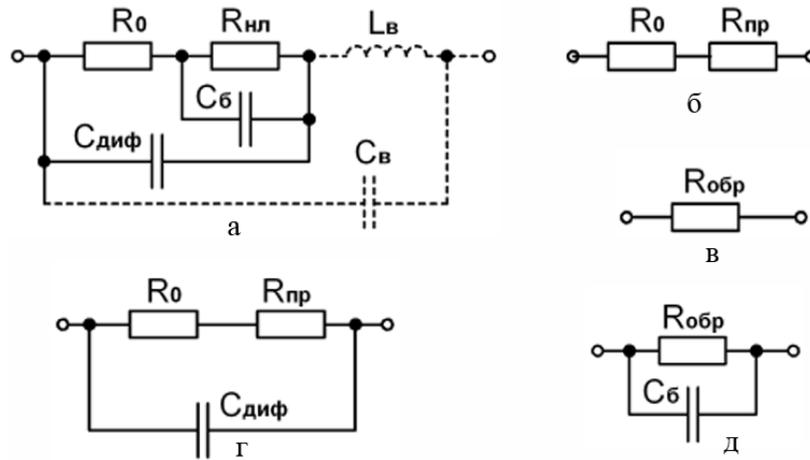


Рис. 2.3

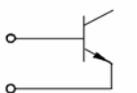
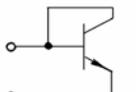
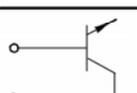
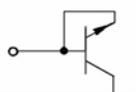
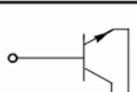
Следует иметь в виду, что существует еще емкость  $C_g$  между выводами диода, которая может заметно шунтировать диод на очень высоких частотах. Она показана на рисунке штрихами. На СВЧ может также проявляться индуктивность выводов  $L_g$ .

В зависимости от технологических процессов, использованных при их изготовлении, различают плоскостные, точечные, сплавные, диффузионные, эпитаксиальные диоды и др.

По функциональному назначению диоды делят на выпрямительные, универсальные, импульсные, смесительные, детекторные, переключающие, стабилитроны, туннельные, параметрические, фотодиоды, светодиоды, магнитодиоды, диоды Шоттки, диоды Ганна и т. д.

Подробно с каждым из этих видов диодов можно ознакомиться в литературе [1, 4].

В интегральных микросхемах диоды предназначены для выполнения ряда логических функций переключения электрических сигналов, выпрямления электрического тока, детектирования сигналов. Эти диоды специально не изготавливают, а в качестве их используют интегральные транзисторы, включаемые по одной из схем в зависимости от требований, предъявляемых к диоду [1, 3, 5]. В таблице приведена сравнительная характеристика возможных вариантов диодного включения p-n-p транзистора.

№	Тип диодного включения	Послед. объемное сопротивление	Напряжение пробоя	Паразитный P-N-P транзистор	Время переключения	Емкость	Обратный ток
1		Низкое ( $\approx r_b$ )	Низкое ( $\approx 7В$ )	Нет	В несколько раз больше, чем №2	Минимальная (дес. доли пФ)	Минимальный (0,5 - 1 нА)
2		Низкое ( $\approx \frac{r_k+r_b}{\beta_0}$ )	Низкое ( $\approx 7В$ )	Нет	Наименьшее (ед. нс)	Минимальная (дес. доли пФ)	Минимальный (0,5 - 1 нА)
3		Высокое ( $\approx r_b+r_k$ )	Высокое (40-50В)	Есть	В несколько раз больше, чем №2	Минимальная (дес. доли пФ)	Большой (15 - 30 нА)
4		Высокое ( $\approx r_b+r_k$ )	Высокое (40-50В)	Есть	В несколько раз больше, чем №2	Минимальная (дес. доли пФ)	Большой (15 - 30 нА)
5		Высокое ( $\approx r_b+r_k$ )	Низкое ( $\approx 7В$ )	Есть	Наибольшее (100 нс)	Несколько большая	Наибольший (до 40 нА)

В целом наиболее оптимальным вариантом для интегральных микросхем в большинстве случаев является структура на основе перехода «база-эмиттер» с закороченным на базу коллектором (структура № 2 в таблице).

## 2. Исследовательская часть

### Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы *необходимо изучить* расположение органов управления лабораторного пульта (рис. 1) и органов управления на сменной панели макета (рис. 2.4, а), принципиальную схему лабораторного макета (рис. 2.4, б), а также подготовить ответы на контрольные вопросы данной работы.

#### 2.1. Подать питание на макет в следующей последовательности:

- тумблер “Номер работы” должен стоять в положении “2”;
- тумблер SA2 поставить в положение «Изм. ВАХ»;
- тумблер SA3 поставить в положение « $U_{пр}$ »;
- ручку потенциометра R1 « $U_{пр-обр}$ » поставить в крайнее левое положение;
- переключатель пределов миллиамперметра поставить в положение «3мА»;
- подключить мультиметр М-838 к гнездам «Г4» (при этом переключатель рода работ мультиметра должен стоять в положении измерения постоянного напряжения «DCV», предел измерения «2000мВ»);
- включить тумблер «Сеть».

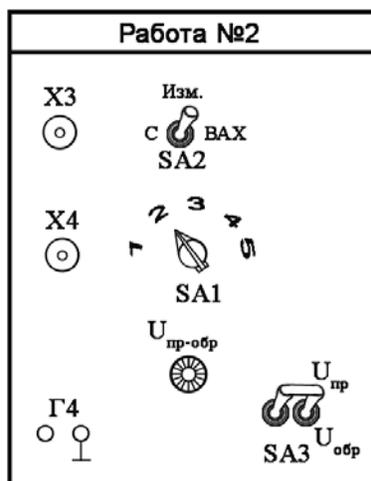
#### 2.2. Исследование характеристик интегральных диодов при прямом включении (схема измерения на рис. 2.5, а)

Снять вольт-амперную характеристику при прямом включении интегрального диода  $I_{пр} = f(U_{пр})$  для структуры 1 (используется коллекторно-базовый переход, эмиттерный вывод не подключен  $I_э = 0$ ), для чего:

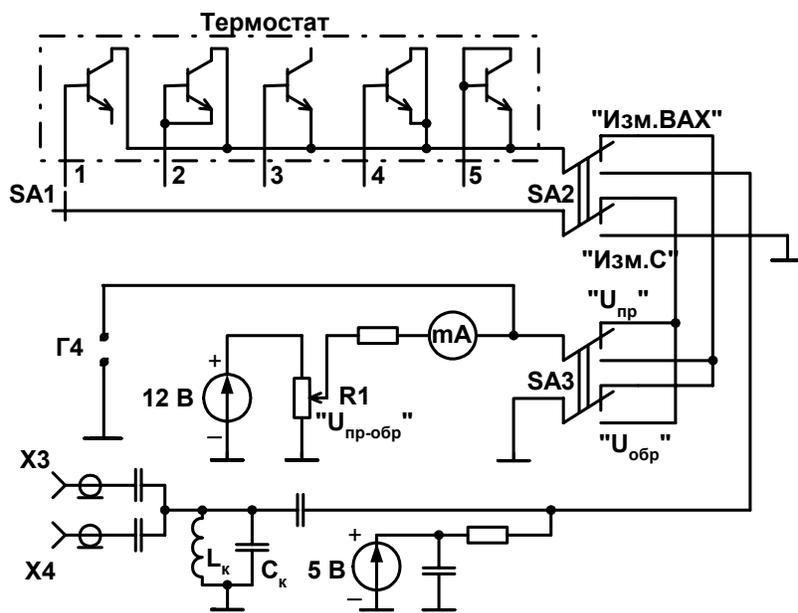
- тумблер SA1 поставить в положение «1»;
- изменяя с помощью потенциометра R1 « $U_{пр-обр}$ » напряжение  $U_{пр}$  через 0,1 В, измерить миллиамперметром ток диода  $I_{пр}$  и занести результаты измерений в таблицу.

Устанавливая переключатель SA1 последовательно в положения «2», «3», «4», «5», аналогичным образом снять вольт-амперные характеристики соответственно:

- для структуры 2 (в качестве диода используется коллекторно-базовый переход, эмиттерно-базовый переход замкнут,  $U_{бэ} = 0$ );
- структуры 3 (в качестве диода используется эмиттерно-базовый переход, коллекторный вывод не подключается,  $I_к = 0$ );



а



б

Рис. 2.4

– структуры 4 (в качестве диода используются параллельное включение эмиттерно-базового и коллекторно-базового переходов,  $U_{кб} = 0$ );

– структуры 5 (в качестве диода используется эмиттерно-базовый переход, а коллекторно-базовый переход замкнут,  $U_{кб} = 0$ ).

### 2.3. Исследование характеристик интегральных диодов при обратном включении (схема измерения на рис.2.5, б)

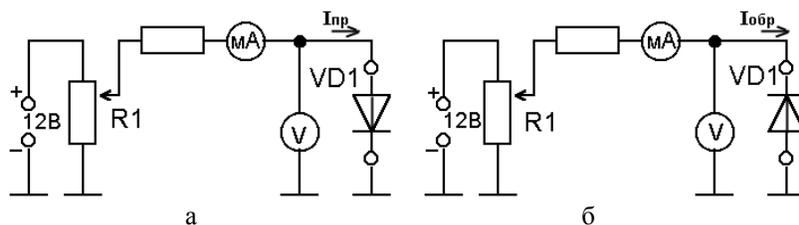


Рис. 2.5

Выполнить предварительно следующие операции:

– ручку потенциометра R1 « $U_{пр-обр}$ » поставить в крайнее левое положение;

– тумблер SA3 поставить в положение « $U_{обр}$ »;

– на мультиметре М-838 установить предел измерения «20 В»;

– переключатель пределов миллиамперметра поставить в одно из крайних правых положений (соответствующих наименьшему обратному току) и устанавливать регулятором «Уст. 0» (при  $U_{обр} = 0$ ) ноль на приборе при каждом переключении пределов;

– переключатель SA1 поставить в положение «1».

2.3.1. Снять обратную ветвь вольт-амперной характеристики интегрального диода  $I_{обр} = f(U_{обр})$  для структуры 1, для чего, изменяя с помощью потенциометра R1 « $U_{пр-обр}$ » напряжение  $U_{обр}$  через 1 В в пределах от 0 до 10 В, измерить миллиамперметром ток диода  $I_{обр}$  и занести результаты измерений в таблицу.

2.3.2. Установив переключатель SA1 в положение «2», снять обратную ветвь вольт-амперной характеристики интегрального диода  $I_{обр} = f(U_{обр})$  для структуры 2 аналогично п. 2.3.1.

2.3.3. Снять обратную ветвь вольт-амперной характеристики интегрального диода  $I_{обр} = f(U_{обр})$  для структуры 3, для чего изменять с помощью потенциометра R1 « $U_{пр-обр}$ » напряжение  $U_{обр}$  в пределах

от 0 В до напряжения пробоя  $U_{\text{проб}}$  (когда обратный ток резко возрастает). Результаты измерений занести в таблицу.

Измерить  $U_{\text{проб}}$  и соответствующий ему обратный ток в 2-х точках при увеличении обратного тока в 10 и 100 раз по сравнению с величиной обратного тока  $I_0$  до наступления пробоя (рис. 2.6, в).

2.3.4. Аналогично п. 2.3.3 устанавливая переключатель SA1 в положение «4» и «5», снять обратные ветви вольт-амперных характеристик интегрального диода  $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$  соответственно для структур 4 и 5. Результаты измерений занести в таблицу.

#### 2.4. Измерение паразитных емкостей пяти структур интегрального диода

Для чего:

– подключить к разъему X3 генератор GRG-450B, а к гнезду X4 – высокочастотный милливольтметр GVT-427B;

– установить с помощью выходного аттенюатора GRG-450B максимальное выходное напряжение генератора и, изменяя частоту генератора, настроить его на собственную резонансную частоту контура по максимальному показанию ВЧ вольтметра;

– записать измеренную собственную резонансную частоту  $f_0$  колебательного контура по показанию частотомера или по шкале генератора;

– поставить тумблер SA2 в положение «Изм. С». При этом к контуру подключается обратносмещенный ( $E_{\text{см}} = -5$  В) интегральный диод какой-либо из структур (в зависимости от положения переключателя SA1), а следовательно, изменяется частота настройки контура;

– поставить переключатель SA1 в положение «1» и, вновь изменяя частоту генератора, настроить его на резонансную частоту контура по максимальному показанию милливольтметра;

– записать смещенную частоту контура  $f_{01}$ ;

– зная емкость контура  $C = 100$  пФ, рассчитать емкость диода структуры 1 –  $C_{\text{п1}}$  из соотношений:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_k)}},$$

$$\text{откуда } C_{\text{п1}} = C \left[ \left( \frac{f_0}{f_{01}} \right)^2 - 1 \right].$$

Аналогично определить емкость  $C_{pi}$  ( $i = 2, 3, 4, 5$ ) для интегральных диодов структур 2, 3, 4, 5, для чего переключатель SA1 последовательно устанавливать соответственно в положение «2», «3», «4» и «5».

## 2.5. Исследование влияния температуры на вольт-амперные характеристики интегрального диода

(выполняется по указанию преподавателя):

- включить термостат 6 на лабораторном пульте (рис. 1);
- повысить температуру до  $t = t_{нор} + 10^\circ$  (ручка регулировки 7);
- снять вольт-амперные характеристики (прямую и обратную ветви) нескольких структур интегрального диода в соответствии с указаниями пп. 2.1-2.3.

Построить графики полученных зависимостей для двух температур ( $t_{нор}$  и  $t_1 = t_{нор} + 10^\circ$ ).

## 3. Обработка полученных результатов

3.1. Построить на миллиметровой бумаге прямую и обратную ветви вольт-амперных характеристик всех пяти структур интегрального диода.

3.2. По вольт-амперным характеристикам (прямая ветвь) определить для каждой структуры интегрального диода прямое дифференциальное сопротивление  $r_{np}$  при постоянном токе  $I_{np} = 1$  мА (см. рис.2.6, а):

$$r_{np} = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}.$$

Сравнить структуры интегрального диода по прямому дифференциальному сопротивлению.

3.3. По вольт-амперным характеристикам (обратная ветвь) определить для каждой структуры интегрального диода обратное сопротивление  $R_{обр}$  при напряжении смещения  $U_{обр} = -5$  В (см. рис.2.6, б):

$$R_{обр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}}.$$

Сравнить структуры интегрального диода по обратному сопротивлению.

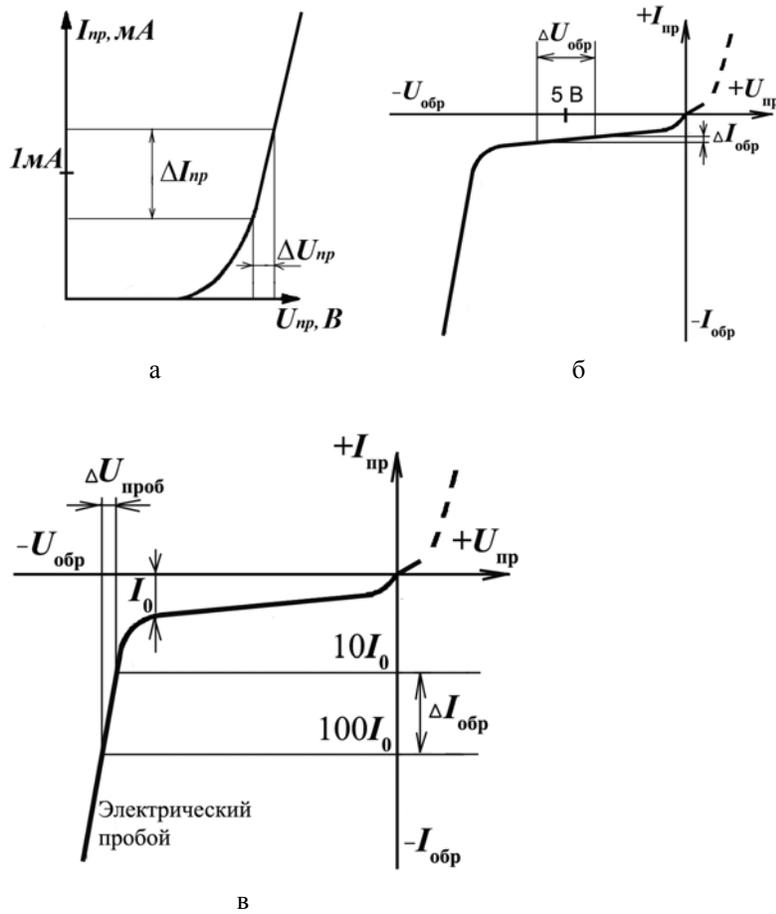


Рис. 2.6

3.4. Для диодов структур 3, 4 и 5, используя результаты пп. 2.3.3 и 2.3.4, определить дифференциальное сопротивление на участках электрического пробоя (см. рис. 2.6, в):

$$r_{диф} = \frac{\Delta U_{проб}}{\Delta I_{обр}}$$

Провести сравнение.

**Контрольные вопросы**

1. Полупроводниковые диоды. Условное обозначение, классификация.
2. Идеализированная и реальная вольт-амперная характеристика диода.
3. Зависимость обратного тока диода от температуры.
4. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода. Уравнение Эберса – Молла для диода.
5. Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов, влияние температуры.
6. Эквивалентная схема диода. Особенности эквивалентной схемы для низких и средних частот.
7. Выпрямительные диоды. Их основные параметры.
8. Импульсные диоды. Их основные параметры.
9. Диоды Шотки. Особенности их вольт-амперных характеристик.
10. Стабилитроны. Вольт-амперная характеристика, схема включения, условие стабилизации, работа с нагрузкой, основные параметры.
11. Прецизионные стабилитроны. Стабисторы.
12. Варикапы: схема включения и эквивалентная схема, вольт-фарадная характеристика, основные параметры и области применения.
13. Светодиоды. Характеристики и области применения.
14. Фотодиоды. Вольт-амперная характеристика, режимы работы, фотопреобразование и фотогенерация, основные параметры и области применения.
15. Оптроны. Характеристики и области применения.
16. Способы диодного включения интегральной транзисторной структуры и сравнение их по следующим параметрам:
  - а) максимально допустимому рабочему напряжению;
  - б) обратному сопротивлению;
  - в) высокочастотным свойствам;
  - г) прямому сопротивлению;
  - д) быстродействию.

## Лабораторная работа № 3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО БИПОЛЯРНОГО  
ТРАНЗИСТОРА в схеме с ОЭ**

**Цель работы:** исследование параметров интегрального биполярного транзистора в схеме с ОЭ и их зависимости от температуры.

**1. Краткие теоретические сведения**

Биполярные транзисторы – это полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими электрическими р-п-переходами и тремя выводами, усилительные свойства которых обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

Так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки, транзисторы называются биполярными.

В зависимости от типа электропроводности наружных слоев различают транзисторы n-p-n и p-n-p типов (рис. 3.1).

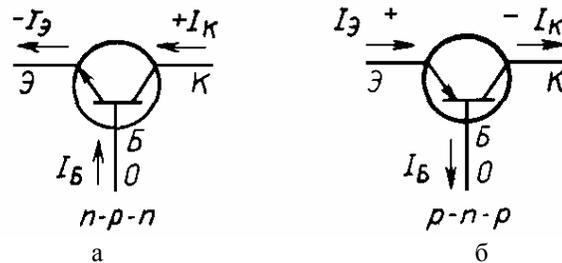


Рис. 3.1

Стрелка ставится на эмиттере и направлена всегда от р-области к n-области; в БТ она указывает направление протекания эмиттерного тока. Кружок означает, что транзистор изготовлен в самостоятельном корпусе, а отсутствие кружка – что транзистор выполнен в бескорпусном исполнении или заодно с другими элементами на пластинке полупроводника, представляющей интегральную микросхему.

Транзисторы n-p-n типа более распространены, так как имеют по сравнению с p-n-p транзисторами лучшие параметры, что связано с тем, что в них основную роль играют электроны, обладающие подвижностью, в 2 – 3 раза большей, чем дырки.

Чередующиеся области образуют два р-п-перехода: эмиттерно-базовый (Э-Б) и коллекторно-базовый (К-Б). Важно учитывать, что р-п переходы транзистора из-за очень малого расстояния между переходами, которое называют толщиной базы, сильно взаимодействуют. Это означает, что ток одного перехода сильно влияет на ток другого и наоборот. Именно это взаимодействие радикально отличает транзистор от схемы с двумя встречно включенными диодами.

Рассмотрим принцип действия n-p-n транзистора (рис. 3.2, а). Под действием прямого  $E_{БЭ}$ , которое приложено к переходу Э-Б, электроны n-области эмиттера *инжектируются* в базу, создавая  $I_Э$ . Концентрацию примесей в эмиттере делают во много раз больше, чем в базе, поэтому инжекция дырок из базы в эмиттер незначительна. Из-за малой толщины базы (доли микрона) почти все электроны, пройдя базу, через так называемое время пролета достигают коллектора. Только малая часть (1...5 %) инжектированных эмиттером электронов *рекомбинирует* с дырками базы. Обратное смещение перехода К-Б, создаваемое источником  $E_К$ , способствует тому, что электроны, подошедшие к переходу К-Б, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор (процесс *экстракции*), создавая  $I_К$ . В то же время это поле препятствует переходу электронов из коллектора в базу.

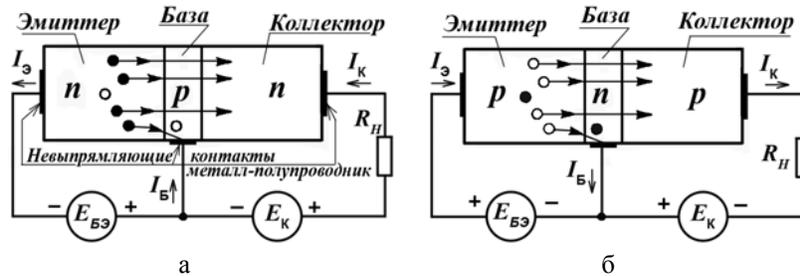


Рис. 3.2

Электроны, рекомбинировавшие с дырками базы, составляют ток базы  $I_B$ . Таким образом,

$$I_К = I_Э - I_B = \alpha I_Э,$$

где  $\alpha = 0,95...0,98$  — коэффициент передачи тока эмиттера.

Аналогично работает транзистор p-n-p-типа (рис. 3.2, б). Отличие состоит лишь в том, что его эмиттер испускает в базу не электроны, а дырки, поэтому полярности прикладываемых к нему прямого

$E_{БЭ}$  и обратного  $E_K$  напряжений должны быть противоположны транзистору n-p-n-типа (сравните рис. 3.2, а и рис. 3.2, б).

При повышении напряжения на коллекторном переходе в нем происходит лавинное размножение носителей заряда (главным образом результат ударной ионизации). Это явление и туннельный эффект способны вызвать электрический пробой, который при возрастании тока может перейти в тепловой пробой перехода. Электрический и тепловой пробой коллекторного перехода в транзисторе происходят в основном так же, как и в диоде.

Но в транзисторе при чрезмерном коллекторном токе может возникнуть тепловой пробой без предварительного электрического пробоя, т. е. без повышения напряжения на коллекторном переходе до пробивного. Это явление, связанное с перегревом коллекторного перехода в какой-то его части, получило название *вторичного пробоя*.

Изменение напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах сопровождается изменением толщины этих переходов. В результате изменяется толщина базы. Такое явление называют *модуляцией толщины базы (эффект Эрли)*.

За счет эффекта при повышении  $U_{КБ}$  толщина перехода К-Б возрастает, а толщина базы уменьшается. При очень тонкой базе может произойти эффект смыкания («прокол» базы) — соединение коллекторного перехода с эмиттерным. В этом случае область базы исчезает и транзистор перестает нормально работать.

При увеличении инжекции носителей из эмиттера в базу происходит *накопление неосновных носителей* заряда в базе, т. е. увеличение концентрации и суммарного заряда этих носителей.

Наоборот, при уменьшении инжекции происходит уменьшение концентрации и суммарного заряда неосновных носителей в ней. Этот процесс называют *рассасыванием неосновных носителей* заряда в базе.

Эти два процесса влияют на быстродействие транзистора.

При использовании транзистора в электронных устройствах нужны два вывода для входного сигнала и два — для выходного (нагрузки). Так как у транзистора всего лишь три вывода, один из них должен быть *общим*, принадлежащим одновременно и к входной, и к выходной цепи.

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим, различают три схемы включения транзисторов:

с *общей базой* (ОБ) — рис. 3.3, б,

*общим эмиттером* (ОЭ) — рис. 3.3, а и

*общим коллектором* (ОК) — рис. 3.4.

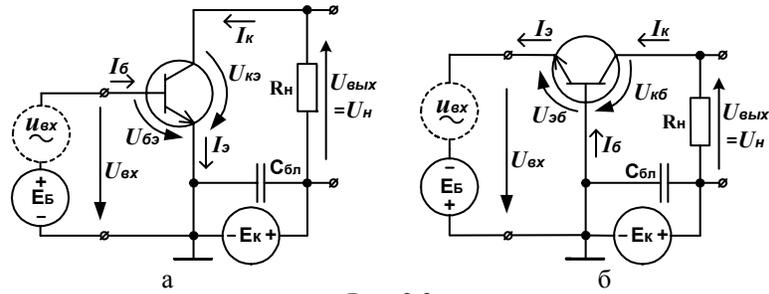


Рис. 3.3

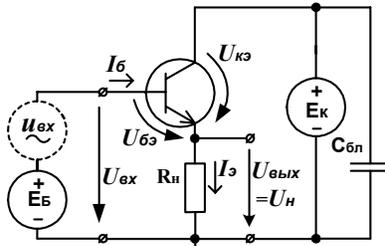


Рис. 3.4

Независимо от схемы включения транзистор может работать в одном из четырех режимов, в зависимости от полярности напряжений на его p-n переходах:

в активном режиме, когда переход Э-Б смещен в прямом направлении, а переход К-Б – в обратном;

в режиме насыщения, когда оба перехода включены в прямом направлении;

в режиме отсечки (запирания), когда оба перехода включены в обратном направлении;

в инверсном режиме, когда переход Э-Б смещен в обратном направлении, а переход К-Б – в прямом.

Активный режим является основным. Он используется в большинстве усилителей и генераторов.

Режимы отсечки и насыщения характерны для импульсной работы транзистора.

Транзистор как усилитель принято характеризовать **коэффициентами усиления** и значением **входного сопротивления**.

Различают 3 вида коэффициентов усиления:

- коэффициент усиления по току  $K_I = \Delta I_{ВЫХ} / \Delta I_{ВХ}$  ;
- коэффициент усиления по напряжению  $K_U = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ}$  ;

• коэффициент усиления по мощности  $K_P = \Delta P_{ВЫХ} / \Delta P_{ВХ} = K_I * K_U$ .

Входное сопротивление:  $R_{ВХ} = \Delta U_{ВХ} / \Delta I_{ВХ}$ .

Входное сопротивление любого усилителя приводит к искажению входного сигнала. Любой реальный источник сигнала обладает некоторым внутренним сопротивлением, и при подключении его к усилителю образуется делитель напряжения, состоящий из внутреннего сопротивления источника и входного сопротивления усилителя. Поэтому чем выше входное сопротивление усилителя, тем большая часть напряжения сигнала будет выделяться на этом сопротивлении и усиливаться и тем меньшая его часть будет падать на внутреннем сопротивлении самого источника.

Сравнительная характеристика схем включения транзистора приведена в таблице.

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
$K_I$	Десятки-сотни	Немного меньше единицы	Десятки-сотни
$K_U$	Десятки-сотни	Десятки-сотни	Немного меньше единицы
$K_P$	Сотни-десятки тысяч	Десятки-сотни	Десятки-сотни
$R_{ВХ}$	Сотни Ом-единицы кОм	Единицы-десятки Ом	Десятки-сотни кОм
$R_{ВЫХ}$	Единицы-десятки кОм	Сотни кОм-единицы МОм	Сотни Ом-единицы кОм
Фазовый сдвиг между $U_{ВЫХ}$ и $U_{ВХ}$	$180^\circ$	0	0

При изменении режима работы транзистора коэффициент  $\alpha$  изменяется в абсолютном значении незначительно и остается близким к единице, в то время как диапазон изменений коэффициента  $\beta$  будет большим. На рис. 3.5, а, б в качестве примера показана зависимость коэффициента  $\beta$  от тока эмиттера и напряжения  $U_{КЭ}$  для транзистора КТ602Б. На участке 1 зависимости  $\beta(I_E)$  в области малых токов значение  $\beta$  мало вследствие сильного влияния рекомбинации в эмиттерном переходе. Возрастание  $\beta$  на этом участке связано с уменьшением влияния рекомбинации. В области средних токов (участок 2)  $\beta$  достигает максимального значения. Область больших токов (участок 3) со-

ответствует высокому уровню инжекции, при котором проявляется несколько физических эффектов: уменьшение удельного сопротивления базы, эффект оттеснения тока эмиттера, увеличение физической толщины базы (эффект Кирка) и увеличение эффективного коэффициента диффузии электронов в базе.

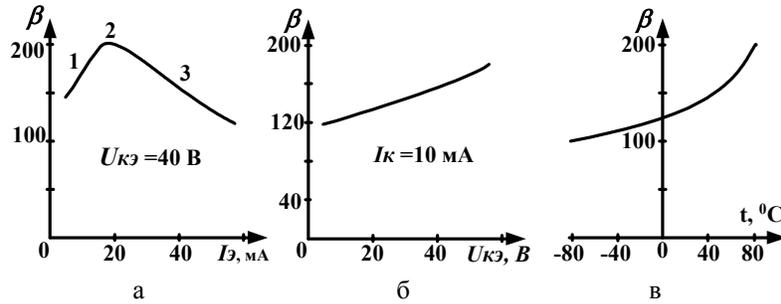


Рис. 3.5

Зависимость коэффициента передачи тока  $\beta$  от напряжения на коллекторе  $U_{кэ}$  обусловлена двумя эффектами: уменьшением толщины базы с ростом обратного напряжения на коллекторном переходе (эффект Эрли) и ударной ионизацией в коллекторном переходе. При повышении обратного напряжения на коллекторном переходе его толщина увеличивается. Переход расширяется как в сторону коллектора, так и базы. Уменьшение толщины базы приводит к повышению  $\beta$  главным образом вследствие повышения эффективности эмиттера. Ударная ионизация в коллекторном переходе возникает при достаточно высокой напряженности поля.

Коэффициент передачи тока базы зависит также и от температуры (рис. 3.5, в). Увеличение  $\beta$  связано с ростом времени жизни неосновных носителей в базе при увеличении температуры.

При рассмотрении свойств транзисторов и для практических расчетов транзисторных схем используются статические входные и выходные вольт-амперные характеристики транзисторов в той или иной схеме включения. Эти характеристики показывают зависимости между токами и напряжениями в транзисторе и снимаются при **постоянном токе и отсутствии нагрузки** в выходной цепи. В транзисторах взаимно связаны всегда четыре величины: входные и выходные токи и напряжения.

**Входная характеристика** — это зависимость  $I_{BX} = f(U_{BX})$  при фиксированных значениях  $U_{ВЫХ} = \text{const}$ .

**Выходные характеристики** (обычно семейство характеристик) — это зависимости  $I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ})$  при фиксированных значениях входного тока (или напряжения)  $I_{ВХ} = \text{const}$  ( $U_{ВХ} = \text{const}$ ).

Иногда используется **проходная характеристика** — зависимость  $I_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$  при выходном напряжении  $U_{ВЫХ} = \text{const}$  (используется чаще всего при описании полевого транзистора).

Для каждой из трех схем включения существует свое семейство характеристик [1].

С повышением частоты усиление, даваемое транзисторами, снижается. У этого явления две главные причины.

Во-первых, на более высоких частотах сказывается вредное влияние емкости коллекторного перехода  $C_K$  (на высоких частотах реактивное сопротивление емкости  $X_{CK}$  становится малым и в него отводится заметная часть тока, создаваемого генератором, а ток через  $R_H$  соответственно уменьшается). Следовательно, уменьшаются все коэффициенты усиления  $K_I$ ,  $K_U$  и  $K_P$ , выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  и выходная мощность  $P_{ВЫХ}$ .

Таким образом, вследствие влияния (главным образом) емкости  $C_K$  на высоких частотах уменьшаются коэффициенты усиления  $\alpha$  и  $\beta$ .

*Вторая причина* снижения усиления на более высоких частотах — **отставание по фазе переменного тока коллектора от переменного тока эмиттера**. Оно вызвано инерционностью процесса перемещения носителей через базу от эмиттера к коллектору, а также инерционностью процессов накопления и рассасывания заряда в базе.

За счет этого сдвига на высоких частотах возрастает переменный ток базы (рис. 3.6), а от этого снижается коэффициент усиления по току  $\beta$ .

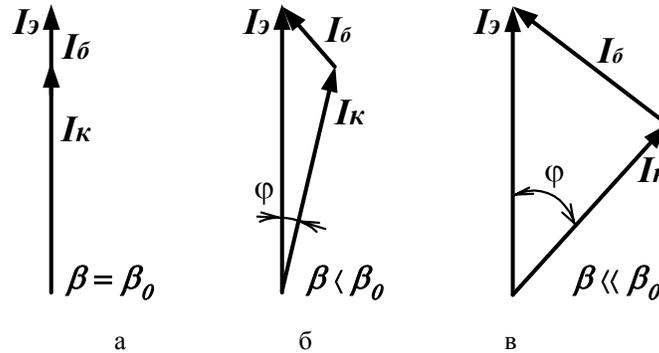


Рис. 3.6

Таким образом, при повышении частоты коэффициент  $\beta$  уменьшается значительно сильнее, нежели  $\alpha$  (рис. 3.7).

Коэффициент  $\alpha$  снижается от влияния емкости  $C_k$ , а на значение  $\beta$  влияет еще и фазовый сдвиг между  $I_k$  и  $I_\varepsilon$  за счет времени пробега носителей через базу. Отсюда ясно, что *схема ОЭ* по сравнению со схемой *ОБ* обладает *значительно худшими частотными свойствами*.

Принято считать предельно допустимым уменьшение значений  $\alpha$  и  $\beta$  на 30 % по сравнению с их значениями  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  на низких частотах. Те частоты, на которых  $\alpha = 0,7\alpha_0$  и  $\beta = 0,7\beta_0$ , называют *предельными частотами усиления* для схем ОБ и ОЭ (соответственно  $f_\alpha$  и  $f_\beta$ ).

Так как  $\beta$  уменьшается гораздо сильнее, нежели  $\alpha$ , то  $f_\beta \ll f_\alpha$  ( $f_\beta \approx f_\alpha / \beta$ ).

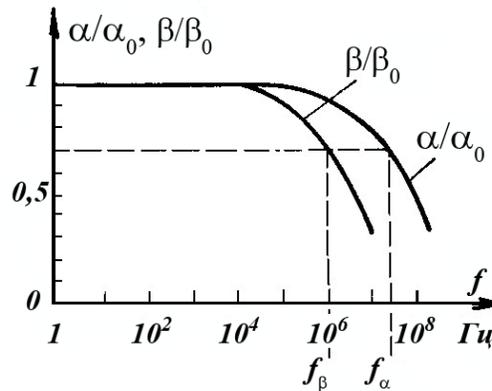


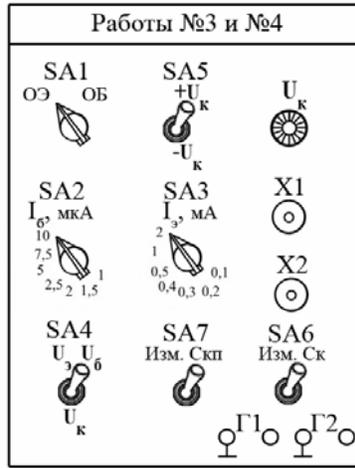
Рис. 3.7

На высоких частотах изменяются все параметры транзистора, и они будут комплексными величинами.

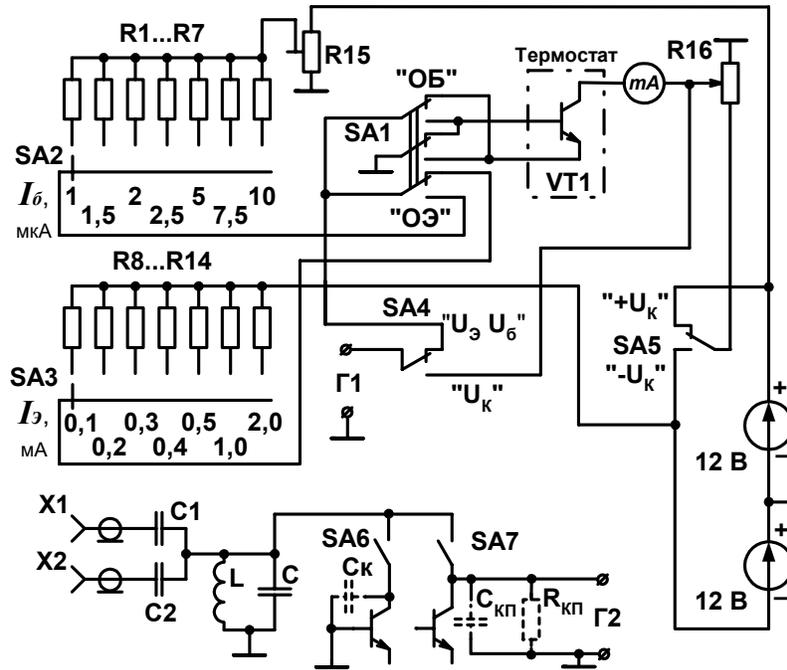
## 2. Исследовательская часть

### Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы *необходимо изучить* расположение органов управления лабораторного пульта (рис. 1) и органов управления на сменной панели макета (рис. 3.8, а), принципиальную схему лабораторного макета (рис. 3.8, б), а также подготовить ответы на контрольные вопросы данной работы.



а



б

Рис. 3.8

**2.1. Подать питание на макет в следующей последовательности:**

- тумблер “Номер работы” должен стоять в положении “3”;
- тумблер SA1 поставить в положение «ОЭ»;
- тумблер SA4 поставить в положение « $U_K$ »;
- тумблер SA5 поставить в положение « $+U_K$ »;
- подключить мультиметр М-838 к гнездам «Г1» (при этом переключатель рода работ мультиметра должен стоять в положении измерения постоянного напряжения «DCV», предел измерения «20В»);
- включить тумблер «Сеть».

**2.2. Снять входную характеристику транзистора** (зависимость тока базы  $I_B$  от напряжения база-эмиттер  $U_{BE}$ , см. рис. 3.9) в следующей последовательности:

- выставить с помощью потенциометра « $U_K$ » напряжение между эмиттером и коллектором транзистора 5 В (контролируется мультиметром, подключенным к гнездам «Г1»);
- переключить тумблер SA4 в положение « $U_B, U_3$ », при этом мультиметр будет измерять напряжение  $U_{BE}$  (на мультиметре должен стоять предел измерения «2000m»);
- изменяя с помощью переключателя SA2 ток базы от 1 до 10 мкА, снять зависимость  $U_{BE}$  от  $I_B$ .

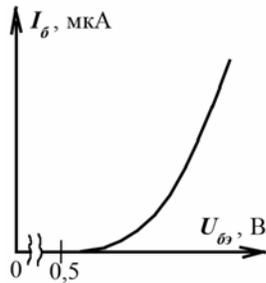


Рис. 3.9

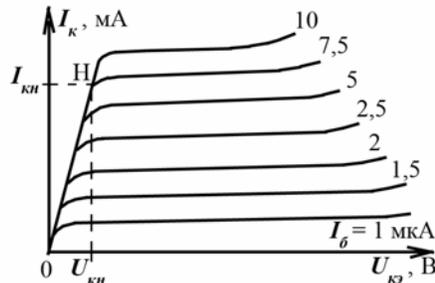


Рис. 3.10

**2.3. Снять семейство выходных характеристик транзистора** (зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения коллектор-эмиттер  $U_{CE}$  при различных токах базы  $I_B$ , см. рис. 3.10) в следующей последовательности:

- тумблер SA4 поставить в положение « $U_K$ »;

– переключателем SA2 выставить первое положение тока базы «1 мкА»;

– изменяя напряжение на коллекторе с помощью потенциометра « $U_K$ » от 0 до 10 В, снять зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения  $U_K$ , при этом: ток коллектора измеряется миллиамперметром, расположенным на вертикальной панели макета, причем необходимый предел измеряемого тока устанавливается соответствующим переключателем, расположенным рядом с прибором « $I_K$ ».

При измерениях необходимо обратить внимание на начальный участок выходных характеристик, для чего изменять напряжение  $U_K$  на участке (0...0,5) В с интервалом 0,1 В (*при этом обязательно записать значения  $I_K$  и  $U_K$  в точке перегиба характеристики*), а в дальнейшем задать значения  $U_K = 1$  В,  $U_K = 5$  В и  $U_K = 10$  В;

– повторить измерения зависимости  $I_K$  от  $U_K$  при других значениях тока базы  $I_B$ , меняя положения переключателя SA2.

**2.4. Снять проходную характеристику транзистора** (зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения  $U_{бэ}$ , см. рис. 3.11) в следующей последовательности:

– выставить потенциометром « $U_K$ » напряжение на коллекторе 5 В;

– переключатель SA4 поставить в положение « $U_6, U_3$ », при этом мультиметр будет измерять напряжение  $U_{бэ}$  (на мультиметре должен стоять предел измерения «2000m»);

– для каждого положения переключателя SA2 записать показания мультиметра – напряжение  $U_{бэ}$  и соответствующее ему значение тока коллектора  $I_K$  (миллиамперметр на вертикальной панели макета).

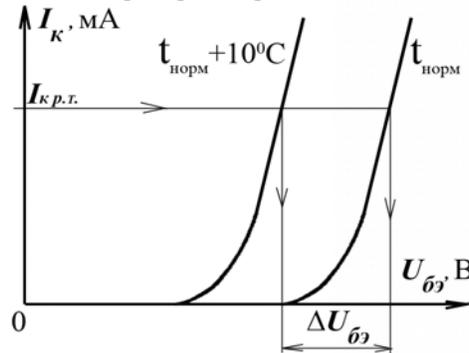


Рис. 3.11

**2.5. Исследование влияния температуры на проходную характеристику транзистора** (выполняется по указанию преподавателя):

- включить термостат 6 на лабораторном пульте (рис. 1);
- повысить температуру до  $t = t_{\text{нор}} + 10^\circ$  (ручка регулировки 7),
- снять проходную характеристику транзистора аналогично

п. 2.4.

**2.6. Измерить емкости коллектор-база  $C_K$  и коллектор-подложка  $C_{КП}$** , для чего:

- подключить к разъему X1 генератор GRG-450B, а к гнезду X2 – высокочастотный вольтметр GVT-427B;
- тумблеры SA6 и SA7 поставить в нижнее положение;
- установить с помощью выходного аттенюатора GRG-450B максимальное выходное напряжение генератора и, изменяя частоту генератора, настроить его на собственную резонансную частоту контура по максимальному показанию ВЧ вольтметра;
- записать измеренную собственную резонансную частоту  $f_0$  колебательного контура по показанию частотомера или по шкале генератора;
- поставить тумблер SA6 в положение «Изм. С». При этом к контуру подключается емкость коллектор-базового перехода транзистора, а следовательно, изменяется частота настройки контура;
- вновь изменяя частоту генератора, настроить его на резонанс по максимальному показанию ВЧ вольтметра;
- записать смещенную частоту контура  $f_{02}$ ;
- зная емкость контура  $C = 100$  пФ, рассчитать емкость  $C_K$  из соотношений:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_K)}},$$

откуда  $C_K = C \left[ \left( \frac{f_0}{f_{02}} \right)^2 - 1 \right]$ .

Аналогично определить емкость  $C_{КП}$ , для чего поставить тумблер SA6 в нижнее положение (отключается емкость  $C_K$  от контура), а тумблер SA7 – в положение «Изм. С» (к контуру подключается емкость  $C_{КП}$ ), определить новую смещенную частоту  $f_{03}$  и рассчитать значение  $C_{КП}$ .

**2.7. Измерить сопротивление коллектор-подложка интегрального транзистора**, для этого:

- поставить тумблеры SA6 и SA7 в нижнее положение;
- подключить вход омметра прибора В7-26 к гнезду «Г2» (соблюдая полярность, т.е. заземленную клемму В7-26 соединить с заземленной клеммой гнезда «Г2»);
- изменяя положение переключателя множителя омметра, измерить сопротивление  $R_{КП}$ .

### 3. Обработка полученных результатов

Перед выполнением раздела преподаватель, ведущий занятие, задает для каждого студента бригады рабочую точку (Р.Т.) на выходных характеристиках ( $I_{\bar{b}}$  и  $U_{КЭ}$ ).

3.1. Построить на миллиметровой бумаге входную и выходные характеристики исследуемого транзистора (рис. 3.9 и 3.10). При построении входной характеристики начало координат по оси абсцисс перенести в точку 0,5 В, так как при меньшем напряжении эмиттерно-базовый переход закрыт и ток через транзистор не протекает.

Нанести рабочую точку (Р.Т.) на характеристики (рис. 3.12). По значению тока базы  $I_{\bar{b}}$  на входной характеристике найти значение напряжения  $U_{\bar{b}\bar{э}}$  в Р.Т. По значению тока базы  $I_{\bar{b}}$  и напряжения  $U_{КЭ}$  на выходной характеристике определить ток  $I_{К}$  в рабочей точке.

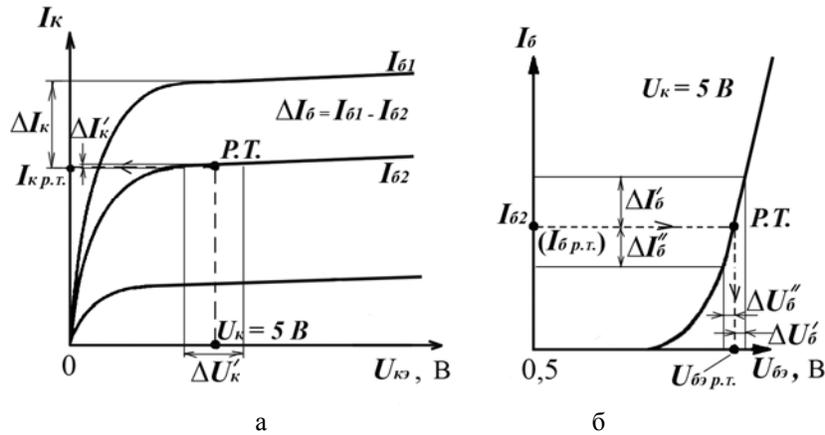


Рис. 3.12

3.2. По построенным выходным характеристикам определить в рабочей точке *дифференциальный коэффициент усиления по току*

$$\beta_0 = h_{21э} = \Delta I_{\kappa} / \Delta I_{\delta}$$

и *дифференциальное выходное сопротивление*

$$R_{\text{вых}} = h_{22э} = \Delta U'_{\kappa} / \Delta I'_{\kappa} \quad (\text{см. рис. 3.12, а}).$$

3.3. На начальном участке выходных характеристик в режиме насыщения транзистора при *заданном* токе базы  $I_{\delta \text{ р.т.}}$  (точка «Н» на рис. 3.10, на рис.  $I_{\delta \text{ р.т.}} = 7,5$  мкА) определить *распределенное сопротивление коллектора* интегрального транзистора по формуле

$$r_{\kappa} = \frac{U_{\text{кн}} - \varphi_m / \beta_{\text{инв}}}{I_{\text{кн}}},$$

где  $\varphi_m = 0,025$  В – температурный потенциал,  $\beta_{\text{инв}}$  – коэффициент усиления по току в инверсном режиме, который для данного транзистора равен 0,1.

3.4. По построенной входной характеристике определить в рабочей точке *дифференциальное входное сопротивление* транзистора в схеме с ОЭ,  $R_{\text{вх}} = h_{11э} = \Delta U_{\deltaэ} / \Delta I_{\delta}$  (см. рис. 3.12, б).

Для увеличения точности определить при положительном и отрицательном приращениях  $\Delta U_{\deltaэ}$  и вычислить среднее значение  $h_{11э} = 0,5(h_{11э \text{ max}} + h_{11э \text{ min}})$ .

3.5. Построить проходные характеристики транзистора (рис. 3.11) при двух температурах (комнатной и повышенной) и определить по ним температурный коэффициент дрейфа напряжения при постоянном токе коллектора (в рабочей точке)

$$\delta U_{\deltaэ} = \frac{U_{\deltaэ(t=t_{\text{min}})} - U_{\deltaэ(t=t_{\text{max}})}}{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}} \cdot \frac{\text{mB}}{1^{\circ}\text{C}}.$$

3.6. Рассчитать и обозначить на эквивалентной (физической) схеме замещения интегрального транзистора на высокой частоте (рис. 3.13) параметры элементов, используя результаты, полученные в предыдущих пунктах.

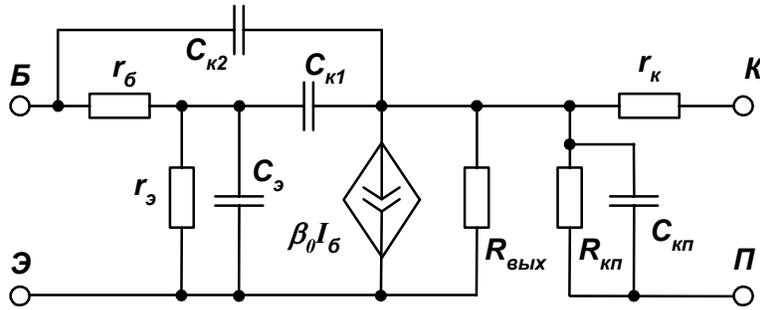


Рис. 3.13

На схеме приняты следующие обозначения:

$r_б$  – распределенное сопротивление, которое для исследуемого транзистора можно принять  $r_б = 100$  Ом;

$r_э$  – распределенное сопротивление эмиттерного перехода;

$$r_э = \frac{\varphi_T}{I_э}, \text{ где температурный потенциал } \varphi_T = \frac{\kappa T}{q},$$

$\kappa$  – постоянная Больцмана,

$T$  – абсолютная температура,

$q$  – заряд электрона,

$\varphi_T = 25$  мВ при  $t = 25$  °С,

$I_э = I_к + I_б$  – ток эмиттера;

$C_{к1}$  – активная емкость коллектора;

$C_{к2}$  – пассивная емкость коллектора.

Полная емкость коллектора  $C_к = C_{к1} + C_{к2}$  (измерена в п. 2.6).

Активная емкость  $C_{к1} = C_к \gamma$ , где  $\gamma$  – постоянная для каждого типа транзистора. Для исследуемого транзистора  $\gamma = 0,3$ ;

$\beta_0$  – коэффициент передачи по току в схеме ОЭ;

$R_{кп}$  – сопротивление коллектор-подложка, определенное в п. 2.7;

$r_к$  – распределенное сопротивление коллектора;

$C_{кп}$  – емкость коллектор-подложка, измеренная в п. 2.6.

3.7. Определение высокочастотных параметров интегрального транзистора.

Известно, что частотные параметры транзистора характеризуются частотой единичного усиления  $f_T$ , которая, как и коэффициент

усиления по току в схеме с ОЭ, сильно зависит от тока коллектора (рис. 3.14).

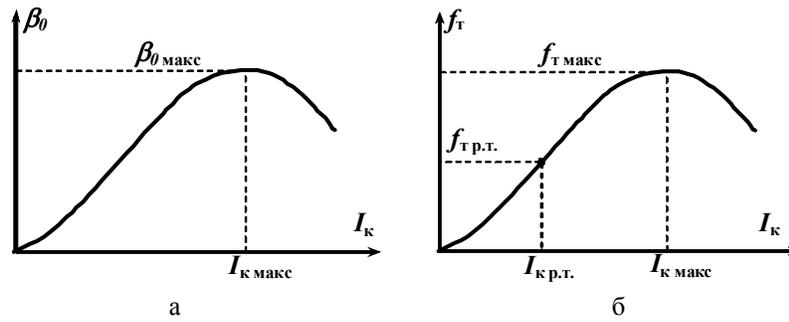


Рис. 3.14

Для исследуемого транзистора максимальное значение  $f_{T \text{ макс}} = 500$  МГц при токе  $I_{k \text{ макс}} = 5$  мА. Рабочая точка выбирается, как правило, при другом токе коллектора. Если указанные зависимости имеются, то по ним можно определить значение  $f_T$  в рабочей точке, если же они отсутствуют, то значение  $f_{T \text{ р.т.}}$  можно определить по имперической формуле

$$f_{T \text{ р.т.}} = f_{T \text{ макс}} \sqrt{\frac{I_{k \text{ р.т.}}}{I_{k \text{ макс}}}},$$

где  $I_{k \text{ р.т.}}$  и  $I_{k \text{ макс}}$  – значения тока коллектора соответственно в рабочей точке  $f_{T \text{ р.т.}}$  и в точке, где  $f_T = f_{T \text{ макс}}$ .

Постоянная времени коллекторной цепи равна

$$\tau_k = r_o C_{к1} = r_o C_k \gamma, \quad \text{где } \gamma = 0,3.$$

Граничная частота интегрального транзистора

$$\omega_{\text{инт}} = \frac{1}{r_k C_{кп}} = 2\pi f_{\text{инт}} \cdot \quad f_{\text{инт}} = \frac{1}{2\pi r_k C_{кп}}.$$

### Контрольные вопросы

1. Биполярные транзисторы: типы, принцип действия, коэффициент передачи тока эмиттера, эффект Эрли, «прокол» базы, накопление и рассасывание неосновных носителей заряда в базе.
2. Биполярные транзисторы: пробой переходов, вторичный пробой, режимы работы, параметры, характеризующие

усилительные свойства транзисторов, входное сопротивление, возможные схемы включения.

3. Схема включения транзистора с общей базой. Основные свойства и вольт-амперные характеристики.

4. Схема включения транзистора с общим эмиттером. Основные свойства и вольт-амперные характеристики.

5. Влияние режима работы транзистора и температуры окружающей среды на его коэффициенты передачи тока.

6. Схема включения транзистора с общим коллектором. Основные свойства и области применения.

7. Выходные характеристики схемы с ОЭ: нагрузочная прямая, рабочая точка, режимы работы. Влияние температуры на параметры и характеристики биполярных транзисторов.

8. Модели биполярных транзисторов Эберса – Молла (простейшая и модифицированная), общие аналитические выражения для токов транзистора.

9. Малосигнальная физическая схема замещения интегрального транзистора на высокой частоте. Ее основные параметры, отличие от схемы дискретного транзистора.

10. Модель биполярного транзистора в виде активного четырехполюсника: система H-параметров, физический смысл ее коэффициентов, эквивалентная схема.

11. Модель биполярного транзистора в виде активного четырехполюсника: система Y-параметров, физический смысл ее коэффициентов, эквивалентная схема.

12. Частотные свойства биполярных транзисторов: основные причины снижения усилительных свойств, предельные частоты усиления для схем ОБ и ОЭ, максимальная частота генерации, граничная частота усиления тока. Способы улучшения частотных свойств биполярных транзисторов.

13. Собственные шумы биполярных транзисторов: основные составляющие полного шума, коэффициент шума и его зависимость от режима работы транзистора, температуры, внутреннего сопротивления источника сигнала и схемы включения транзистора, распределение шумов в диапазоне частот. Малошумящие транзисторы.

14. Технология изготовления биполярных транзисторов.

**Лабораторная работа № 4****ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО БИПОЛЯРНОГО  
ТРАНЗИСТОРА в схеме с ОБ**

**Цель работы:** исследование параметров интегрального биполярного транзистора в схеме с ОБ, их зависимости от температуры. Расчет Y-параметров.

**1. Краткие теоретические сведения**

Краткие теоретические сведения приведены в предыдущей работе. Схема с общей базой – рис. 3.3, б.

**2. Исследовательская часть****Порядок выполнения работы**

Перед выполнением работы *необходимо изучить* расположение органов управления лабораторного пульта (рис. 1) и органов управления на сменной панели макета (рис. 3.8, а), принципиальную схему лабораторного макета (рис. 3.8, б), а также подготовить ответы на контрольные вопросы данной работы.

**2.1. Подать питание на макет в следующей последовательности:**

- тумблер “Номер работы” должен стоять в положении “4”;
- тумблер SA1 поставить в положение «ОБ»;
- тумблер SA4 поставить в положение « $U_K$ »;
- тумблер SA5 поставить в положение « $+U_K$ »;
- подключить мультиметр М-838 к гнездам «Г1» (при этом переключатель рода работ мультиметра должен стоять в положении измерения постоянного напряжения «DCV», предел измерения «20В»);
- включить тумблер «Сеть».

**2.2. Снять входную характеристику транзистора** (зависимость тока эмиттера  $I_E$  от напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$ , см. рис. 4.1) в следующей последовательности:

- выставить с помощью потенциометра « $U_K$ » напряжение между коллектором и базой транзистора 5 В (контролируется мультиметром, подключенным к гнездам «Г1»);

– переключить тумблер SA4 в положение « $U_6, U_3$ », при этом мультиметр будет измерять напряжение  $U_{63}$  (на мультиметре должен стоять предел измерения «2000m»);

– изменяя с помощью переключателя SA3 ток эмиттера от 0,1 до 2 мА, снять зависимость  $U_{63}$  от  $I_3$ .

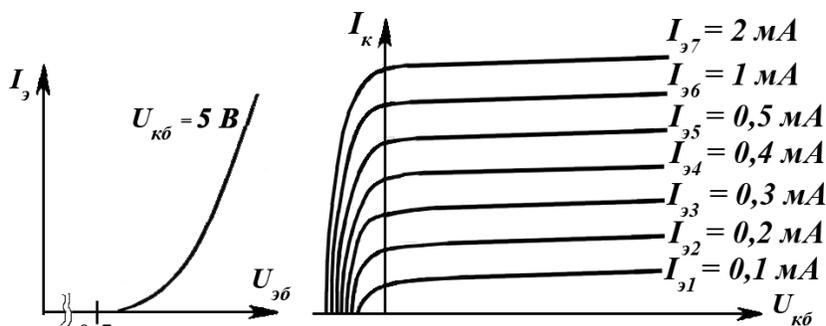


Рис. 4.1

Рис. 4.2

**2.3. Снять семейство выходных характеристик транзистора** (зависимость тока коллектора  $I_к$  от напряжения коллектор-база  $U_{кб}$  при различных токах эмиттера  $I_э$ , см. рис. 4.2) в следующей последовательности:

- тумблер SA4 поставить в положение « $U_к$ »;
- переключателем SA3 выставить первое положение тока эмиттера «0,1 мА»;
- поставить переключатель SA5 в положение « $-U_к$ »;
- изменяя отрицательное напряжение на коллекторе с помощью потенциометра « $U_к$ » от -0,6 до 0 В, снять зависимость тока коллектора  $I_к$  от напряжения  $U_к$ , **при этом**: ток коллектора измеряется миллиамперметром, расположенным на вертикальной панели макета, причем необходимый предел измеряемого тока устанавливается соответствующим переключателем, расположенным рядом с прибором « $I_к$ ». При измерениях **необходимо обратить внимание** на начальную точку выходной характеристики (записать значение  $-U_к$ , при котором начинает протекать ток коллектора  $I_к$ );
- перевести переключатель SA5 в положение « $+U_к$ »;

- изменяя напряжение на коллекторе с помощью потенциометра « $U_K$ », продолжить снятие этой характеристики для положительного коллекторного напряжения:  $U_K = 0$  В,  $U_K = 1$  В,  $U_K = 5$  В и  $U_K = 10$  В;
- повторить измерения зависимости  $I_K$  от  $U_K$  при других значениях тока эмиттера  $I_E$ , меняя положение переключателя SA3.

**2.4. Снять проходную характеристику транзистора** (зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения  $U_{бэ}$ , см. рис.4.1) в следующей последовательности:

- выставить потенциометром « $U_K$ » напряжение на коллекторе 5 В;
- переключатель SA4 поставить в положение « $U_6, U_3$ », при этом мультиметр будет измерять напряжение  $U_{бэ}$  (на мультиметре должен стоять предел измерения «2000m»);
- для каждого положения переключателя SA3 записать показания мультиметра – напряжение  $U_{бэ}$  и соответствующее ему значение тока коллектора  $I_K$  (миллиамперметр на вертикальной панели макета).

**2.5. Исследование влияния температуры на проходную характеристику транзистора** (выполняется по указанию преподавателя):

- включить термостат на вертикальной панели макета;
- повысить температуру до  $t = t_{нор} + 10$  С°;
- снять проходную характеристику транзистора аналогично п. 2.4.

### 3. Обработка полученных результатов

3.1. Построить на миллиметровой бумаге входную и выходные характеристики исследуемого транзистора (рис. 4.3). При построении входной характеристики начало координат по оси абсцисс перенести в точку 0,5 В (рис. 4.3, а), так как при меньшем напряжении эмиттерно-базовый переход закрыт и ток через транзистор не протекает.

Используя данные, полученные в 3-й работе, нанести рабочую точку на построенные характеристики. Для этого на входной характеристике схемы ОБ (рис. 4.3, а), считая что  $I_{э.т.} \approx I_{к.т.}$ , где  $I_{к.т.}$  – значение, полученное в 3-й работе (допущение справедливо, так как  $I_э = I_к + I_б$ , а  $I_б \ll I_к$ ), откладывается значение тока эмиттера в рабочей точке. Определить по характеристике  $U_{бэ}$  в ра-

бочей точке в схеме ОБ. Значение напряжения  $U_{\text{бэ}P.T.}$  в рабочей точке в схемах с ОЭ (работа № 3) и ОБ должно совпадать с погрешностью не более 15 %.

Из семейства выходных характеристик схемы с ОБ (рис. 4.3, б) выбираем характеристику, снятую при токе  $I_{\text{э}} \approx I_{\text{э}P.T.}$ . На пересечении этой характеристики и линии  $U_{\text{кб}} = 5 \text{ В}$  находим рабочую точку. Определяем ток  $I_{\text{к}P.T.}$  в рабочей точке в схеме с ОБ. Значение тока  $I_{\text{к}P.T.}$  в рабочей точке в схемах с ОЭ (работа № 3) и ОБ должно совпадать с погрешностью не более 15 %.

3.2. По построенным выходным и входной характеристикам определить в рабочей точке:

**дифференциальное выходное сопротивление** транзистора в схеме ОБ (рис. 4.3, б)

$$R_{\text{выхОБ}} = h_{22\text{б}} = \Delta U_{\text{кб}} / \Delta I_{\text{к}}$$

и **дифференциальное входное сопротивление** транзистора в схеме ОБ (рис. 4.3, а)

$$R_{\text{вхОБ}} = h_{11\text{б}} = \Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{э}}$$

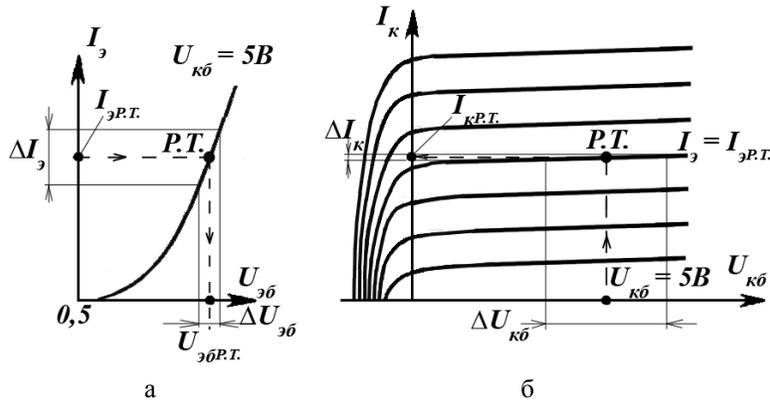


Рис. 4.3

3.3. Построить проходные характеристики транзистора при двух температурах (комнатной и повышенной) и определить по ним температурный коэффициент дрейфа напряжения при постоянном токе коллектора (в рабочей точке):

$$\delta U_{\theta_3} = \frac{U_{\theta_3(t=t_{\min})} - U_{\theta_3(t=t_{\max})}}{t_{\max} - t_{\min}} \cdot \frac{mB}{1^\circ C}.$$

3.4. Рассчитать Y-параметры интегрального транзистора на заданной преподавателем частоте по следующим формулам:

$$Y_{11} = g_{11} + jb_{11} = \frac{1 + j\beta_0 \frac{f_{зад}}{f_{T.P.T.}}}{h_{11\delta} \beta_0 \left(1 + j \frac{f_{зад}}{f_S}\right)},$$

$$Y_{12} = -\frac{j2\pi f_{зад} C_K}{1 + j \frac{f_{зад}}{f_{инт}}},$$

$$Y_{21} = -\frac{1}{h_{11\delta} \left(1 + j \frac{f_{зад}}{f_S}\right) \left(1 + j \frac{f_{зад}}{f_{инт}}\right)},$$

$$Y_{22} = g_{22} + jb_{22} = j2\pi f_{зад} (C_K + C_{кп}) + \frac{j2\pi f_{зад} \tau_K}{h_{11\delta} \left(1 + j \frac{f_{зад}}{f_S}\right)},$$

где  $f_S$  – граничная частота по крутизне,  $f_S = f_{T.P.T.} \frac{h_{11\delta}}{r_\delta}$ ,

значения  $\beta_0$ ,  $\tau_K$ ,  $f_{инт}$ ,  $f_{T.P.T.}$ ,  $r_\delta$ ,  $C_K$ ,  $C_{кп}$  взять из 3-й работы (рассчитанные для Р.Т.).

Для входной и выходной проводимостей найти их активные и реактивные составляющие  $g_{11}$  и  $b_{11}$ ,  $g_{22}$  и  $b_{22}$ , а также входные и выходные сопротивления и емкости

$$R_{ВХ} = 1/g_{11}, \quad R_{ВЫХ} = 1/g_{22}, \quad C_{ax} = \frac{b_{11}}{2\pi f_{зад}}, \quad C_{вых} = \frac{b_{22}}{2\pi f_{зад}},$$

а для прямой и обратной проводимостей найти их модули

$$|Y_{21}| = \sqrt{g_{21}^2 + b_{21}^2}, \quad |Y_{12}| = \sqrt{g_{12}^2 + b_{12}^2}.$$

Примечание. Если в бригаде 2 – 3 человека, то расчет производить индивидуально на частоте  $f_{зад}$ ,  $f_{зад} + 10$  МГц,  $f_{зад} - 10$  МГц. Построить зависимость Y-параметров от частоты.

### Контрольные вопросы

1. Биполярные транзисторы: типы, принцип действия, коэффициент передачи тока эмиттера, эффект Эрли, «прокол» базы, накопление и рассасывание неосновных носителей заряда в базе.
2. Биполярные транзисторы: пробой переходов, вторичный пробой, режимы работы, параметры, характеризующие усилительные свойства транзисторов, входное сопротивление, возможные схемы включения.
3. Схема включения транзистора с общей базой. Основные свойства и вольт-амперные характеристики.
4. Схема включения транзистора с общим эмиттером. Основные свойства и вольт-амперные характеристики.
5. Влияние режима работы транзистора и температуры окружающей среды на его коэффициенты передачи тока.
6. Схема включения транзистора с общим коллектором. Основные свойства и области применения.
7. Выходные характеристики схемы с ОЭ: нагрузочная прямая, рабочая точка, режимы работы. Влияние температуры на параметры и характеристики биполярных транзисторов.
8. Модели биполярных транзисторов Эберса – Молла (простейшая и модифицированная), общие аналитические выражения для токов транзистора.
9. Малосигнальная физическая схема замещения интегрального транзистора на высокой частоте. Ее основные параметры, отличие от схемы дискретного транзистора.
10. Модель биполярного транзистора в виде активного четырехполюсника: система H-параметров, физический смысл ее коэффициентов, эквивалентная схема.
11. Модель биполярного транзистора в виде активного четырехполюсника: система Y-параметров, физический смысл ее коэффициентов, эквивалентная схема.
12. Частотные свойства биполярных транзисторов: основные причины снижения усилительных свойств, предельные частоты усиления для схем ОБ и ОЭ, максимальная частота генерации, граничная частота усиления тока. Способы улучшения частотных свойств биполярных транзисторов.
13. Собственные шумы биполярных транзисторов: основные составляющие полного шума, коэффициент шума и его зависимость от режима работы транзистора, температуры, внутреннего сопротивления источника сигнала и схемы включения транзисто-

ра, распределение шумов в диапазоне частот. Малошумящие транзисторы.

14. Технология изготовления биполярных транзисторов.

#### Библиографический список

1. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
3. Шука А.А. Электроника: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 800 с.
4. Миловзоров О.В., Панков И.Г. Электроника: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2005. – 288 с.
5. Гребен А.Б. Проектирование аналоговых интегральных схем. – М.: Энергия, 1976. – 256 с.
6. Прянишников В.А. Электроника: полный курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
7. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. – 448 с.
8. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.

#### Содержание

Описание лабораторного макета .....	1
Составление отчета и защита работы .....	1
Лабораторная работа № 1. «Исследование пассивных элементов интегральных схем» .....	4
Лабораторная работа № 2. «Исследование интегрального диода» .....	16
Лабораторная работа № 3. «Исследование интегрального биполярного транзистора в схеме с ОЭ» .....	29
Лабораторная работа № 4. «Исследование интегрального биполярного транзистора в схеме с ОБ» .....	46