

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
Кафедра «Промышленная электроника»

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА  
по курсу «**Физические основы электроники**»  
для студентов по направлениям  
«Электроника и наноэлектроника», «Радиотехника»,  
«Биотехнические системы и технологии»

Комсомольск-на-Амуре  
2020

УДК 621.385

Расчетно-графическая работа по курсу «Физические основы электроники» для студентов по направлениям «Электроника и нанoeлектроника», «Радиотехника», «Биотехнические системы и технологии» / сост. С.М. Копытов. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. - 21 с.

Включены варианты заданий для выполнения расчетно-графической работы и методические указания по их выполнению. РГР включает задания по первой части курса ФОЭ «Твердотельная электроника». В этой части рассматриваются физические основы работы полупроводниковых приборов, а также анализируются параметры и характеристики электропреобразовательных полупроводниковых приборов.

### ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И ВЫБОР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ РГР

На титульном листе отчета должны быть указаны фамилия, имя, отчество студента, номер зачетной книжки, номер группы, наименование дисциплины.

Отдельные задания решать в общем виде, подробно объясняя основные этапы решения. В полученные формулы подставлять цифровые значения величин, указывать размерность полученного результата. Все рисунки, графики, схемы выполнять аккуратно карандашом по линейке. Электрические схемы должны быть вычерчены в соответствии с правилами ЕСКД. Следует строго придерживаться установленных буквенных обозначений и наименований электрических величин.

В конце работы должны быть список использованной литературы.

Работа засчитывается, если все задания выполнены принципиально правильно и отвечают перечисленным требованиям.

Работа включает семь практических задач. Номера заданий для своего варианта необходимо выбирать в соответствии с таблицей 1 по двум последним цифрам номера зачетной книжки.

При решении задач обратите особое внимание на размерности данных и результатов. Ни в коем случае нельзя смешивать в одном выражении значения с различными размерностями! Рекомендуется все используемые значения предварительно переводить в единицы СИ.

Таблица 1

Выбор номеров заданий по двум последним цифрам номера зачетной книжки

Книжка	Номера заданий	Книжка	Номера заданий
00, 25, 50, 75	1, 15, 20, 21, 26, 31, 41	13, 38, 63, 88	10, 16, 20, 21, 28, 36, 47
01, 26, 51, 76	2, 14, 19, 22, 27, 32, 42	14, 39, 64, 89	9, 15, 19, 22, 29, 35, 46
02, 27, 52, 77	3, 13, 18, 23, 28, 33, 43	15, 40, 65, 90	8, 14, 18, 23, 30, 34, 45
03, 28, 53, 78	4, 12, 17, 24, 29, 34, 44	16, 41, 66, 91	7, 13, 19, 23, 29, 33, 44
04, 29, 54, 79	5, 11, 16, 25, 30, 35, 45	17, 42, 67, 92	6, 12, 18, 24, 30, 32, 43
05, 30, 55, 80	2, 15, 19, 22, 26, 36, 46	18, 43, 68, 93	5, 11, 17, 21, 27, 31, 42
06, 31, 56, 81	3, 14, 18, 23, 27, 37, 47	19, 44, 69, 94	4, 14, 20, 22, 24, 32, 41
07, 32, 57, 82	4, 13, 17, 24, 28, 38, 48	20, 45, 70, 95	3, 11, 18, 23, 25, 33, 42
08, 33, 58, 83	5, 12, 16, 25, 29, 39, 49	21, 46, 71, 96	2, 14, 19, 25, 29, 34, 43
09, 34, 59, 84	6, 11, 15, 21, 30, 40, 50	22, 47, 72, 97	1, 12, 15, 20, 28, 35, 44
10, 35, 60, 85	7, 16, 19, 23, 26, 39, 50	23, 48, 73, 98	10, 13, 16, 25, 30, 36, 45
11, 36, 61, 86	8, 15, 18, 24, 27, 38, 49	24, 49, 74, 99	5, 14, 17, 22, 26, 37, 46
12, 37, 62, 87	9, 14, 17, 22, 30, 37, 48		

**Цель работы:** изучение физических основ функционирования, принципов устройства и работы полупроводниковых диодов и биполярных транзисторов, ознакомление с их характеристиками и параметрами.

### 1 РЕШИТЬ ЗАДАЧИ ИЗ РАЗДЕЛА «КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ»

1.  $P$ - $n$ -переход имеет обратный ток насыщения  $I_o = 10$  мкА, напряжение, приложенное к переходу, равно 0,5 В. Пользуясь уравнением ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода, найти отношение прямого тока к обратному при  $T = 300$  К.

2. Обратный ток насыщения идеального германиевого диода при  $T = 300$  К составляет  $I_o = 30$  мкА. Найти сопротивление диода постоянному току  $R_0$  и дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$  при прямом и обратном напряжениях, равных 0,2 В.

3. Обратный ток насыщения  $p$ - $n$ -перехода  $I_o = 1$  мкА при  $T = 300$  К. Определить сопротивление перехода постоянному току и дифференциальное сопротивление перехода при прямом и обратном напряжениях, равных 150 мВ.

4. Обратный ток насыщения идеального  $p$ - $n$ -перехода при температуре  $T = 300$  К равен  $2 \cdot 10^{-7}$  А. Найти: а) ток, текущий при прямом напряжении, равном 0,1 В; б) сопротивление диода постоянному току и дифференциальное сопротивление при прямом и обратном напряжениях, равных 0,3 В.

5.  $P$ - $n$ -переход имеет прямой ток 0,8 А при прямом напряжении 0,3 В и температуре окружающей среды  $T = 35^\circ$  С. Определить: а) обратный ток насыщения; б) дифференциальное сопротивление перехода при прямом напряжении 0,2 В; в) дифференциальное сопротивление перехода при обратном напряжении 1 В.

6. Обратный ток насыщения  $I_0$   $p$ - $n$ -перехода при  $T = 300$  К равен  $10^{-12}$  А. При повышении температуры на  $75^\circ$  С обратный ток насыщения увеличился в  $10^3$  раз. Определить напряжение на переходе при комнатной и повышенной температуре, если прямой ток через него  $I = 5$  мА.

7. Изобразите ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода. Здесь же начертите реальную характеристику диода и объясните различия между этими двумя кривыми. Вычислите дифференциальные сопротивления  $r_{\text{диф}}$   $p$ - $n$ -перехода при токе  $I = 0,01; 0,05; 0,1; 1,0; 2,0; 5,0$  и  $10,0$  мА. Температура  $T = 300$  К, обратный ток насыщения  $I_o = 1$  мкА. Основываясь на полученных значениях сопротивления  $r_{\text{диф}}$  при различных токах  $I$ , обсудите возможности практического использования диода как элемента с управляемой проводимостью.

8. Диоды, смещенные в обратном направлении, часто используют в качестве переменных конденсаторов. Вычислите, как уменьшается барьерная емкость диода с резким переходом при увеличении модуля напряжения смещения на 1 В, если известно, что при  $U = 5$  В,  $C_{\text{бар}} = 20$  пФ.

9. У полупроводникового диода  $R_{\text{пр}} = 25$  Ом;  $R_{\text{обр}} = 2,5$  МОм;  $C = 120$  пФ. Определить: а) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно  $R_{\text{обр}}$  и вследствие этого произойдет заметное увеличение обратного тока (но он все еще будет малым); б) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно  $R_{\text{пр}}$  и произойдет резкое ухудшение выпрямляющего действия диода.

10. Германиевый  $p$ - $n$ -переход имеет обратный ток насыщения 5 мкА, а кремниевый переход таких же размеров имеет обратный ток насыщения  $10^{-10}$  А. Вычислить и сравнить прямые напряжения на переходах при  $T = 325$  К и токе 0,2 А. Сопротивлением базы пренебречь.

## 2 РЕШИТЬ ЗАДАЧИ ИЗ РАЗДЕЛА «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ»

**11.** Имеется кремниевый диод. Вычислить: а) высоту потенциального барьера  $\phi_K$ , считая, что концентрация легирующих примесей  $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; б) максимальную напряженность электрического поля и толщину области перехода; в) высоту потенциального барьера и параметры  $l_n$  и  $l_p$  при обратном смещении  $U = -10 \text{ В}$ .

**12.** Решить предыдущую задачу для германиевого диода.

**13.** В равновесном состоянии высота потенциального барьера германиевого  $p$ - $n$ -перехода равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей  $N_a$  в  $p$ -области много меньше концентрации доноров  $N_d$  в  $n$ -области и равна  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Требуется вычислить ширину  $p$ - $n$ -перехода для обратных напряжений 0,1 и 10 В, и для прямого напряжения 0,1 В.

**14.** Удельное сопротивление  $p$ -области кремниевого  $p$ - $n$ -перехода  $\rho_p = 3,5 \text{ Ом см}$ , а удельное сопротивление  $n$ -области  $\rho_n = 2 \text{ Ом см}$ . Вычислить высоту потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода при  $T = 350 \text{ К}$ .

**15.** Определить ширину электронно-дырочного перехода  $l_n$  и  $l_p$  в  $n$ - и  $p$ -областях соответственно, контактную разность потенциалов  $\phi_K$  и максимальное значение напряженности электрического поля  $E_{\max}$  в  $p$ - $n$ -переходе германиевого туннельного диода при  $T = 300 \text{ К}$  с  $N_a = N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

**16.** В германиевом туннельном диоде концентрация акцепторной примеси равна концентрации донорной примеси, причем на каждые  $10^3$  атомов германия приходится один атом примеси. Определить при  $T = 300 \text{ К}$  контактную разность потенциалов и ширину области объемного заряда.

**17.** Чем определяется ширина области объемного заряда  $p$ - $n$ -перехода? Определите ширину этой области для резкого германиевого перехода для комнатной температуры при прямом напряжении 0,1 В и при обратном – 10 В, если удельное сопротивление электронной области  $\rho_n = 1 \text{ Ом см}$ , а удельное сопротивление дырочной области  $\rho_p = 0,1 \text{ Ом см}$ .

**18.** Области диода с резким кремниевым переходом имеют удельное сопротивление  $\rho_p = 0,013 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и  $\rho_n = 44,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ;  $\mu_p = 480 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $\mu_n = 1400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

а) В условиях термодинамического равновесия при температуре  $T = 300 \text{ К}$  определите высоту потенциального барьера  $U_0$ , а также изобразите энергетическую диаграмму.

б) Изобразите энергетические диаграммы при прямом и обратном смещении.

**19.** Имеется кремниевый диод со следующими параметрами:  $N_a = 2,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_d = 2,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; площадь перехода  $A = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ; толщина перехода в  $n$ -области  $W_n = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ . К диоду приложено прямое напряжение смещения  $U = 0,5 \text{ В}$ . Вычислить:

а) сопротивление постоянному току  $R$ ;

б) дифференциальное сопротивление  $r$ .

**20.** Барьерная емкость варикапа равна 40 пФ при обратном напряжении 3 В. Определить уменьшение емкости при уменьшении обратного напряжения до 9 В.

**Методические указания к решению задач из раздела «Контактные явления», «Полупроводниковые диоды»**

Плотность атомов в германии составляет  $4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , а в кремнии  $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . В собственном полупроводнике концентрация электронов  $n_i$  в зоне проводимости равна концентрации дырок  $p_i$  в валентной зоне:

$$n_i = p_i = A \cdot e^{-\frac{\Delta W_3}{2kT}},$$

где  $A$  – коэффициент с размерностью концентрации, числовое значение которого зависит от рода полупроводника;  $\Delta W_3$  – ширина запрещенной зоны полупроводника в джоулях;  $k = 1,37 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура, К.

Ширина запрещенной зоны при  $T = 300 \text{ К}$  составляет для германия 0,72 эВ, для кремния 1,12 эВ, для арсенида галлия 1,43 эВ. С ростом температуры ширина запрещенной зоны незначительно уменьшается. При  $T = 300 \text{ К}$  в кремнии  $n_i \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , в германии  $n_i \approx 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

В примесном полупроводнике при рабочих температурах концентрации основных носителей заряда приближенно равны концентрациям соответствующих примесей:

$$p_p \approx N_a, \quad n_n \approx N_d,$$

где  $p_p$ ,  $n_n$  – концентрации дырок и электронов соответственно в  $p$ - и  $n$ -полупроводниках;  $N_a$ ,  $N_d$  – концентрации акцепторной и донорной примесей соответственно.

Характерной особенностью полупроводников является то, что произведение концентраций основных и неосновных носителей заряда при данной температуре является постоянной величиной и определяется из соотношения:

$$n_n \cdot p_n = p_p \cdot n_p = n_i \cdot p_i = A^2 \cdot e^{-\frac{\Delta W_3}{kT}},$$

где  $p_n$  и  $n_p$  – концентрации дырок и электронов соответственно в  $n$ - и  $p$ -полупроводниках.

При контакте двух полупроводников с различными концентрациями носителей заряда из-за диффузии носителей возникает двойной электрический слой с контактной разностью потенциалов:

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n \cdot p_p}{n_i^2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p},$$

где  $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$  – заряд электрона.

ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода имеет вид:

$$I = I_0 \cdot (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) = I_0 \cdot (e^{\varphi_T} - 1),$$

где  $I_0$  – ток насыщения, создаваемый неосновными носителями заряда;  $U$  – напряжение, приложенное к  $p$ - $n$ -переходу,  $\varphi_T = \frac{kT}{q}$  – тепловой потенциал.

Сопротивление перехода постоянному току характеризуется величиной:

$$R_0 = U/I,$$

где  $U$  – напряжение на переходе;  $I$  – ток через него.

Важной характеристикой прибора, зависящей от выбора рабочей точки на его ВАХ, является дифференциальное сопротивление:

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Продифференцировав выражение для ВАХ прибора по напряжению, проще сначала определить величину, обратную  $r_{\text{диф}}$ , а затем вычислить  $r_{\text{диф}}$ :

$$\frac{1}{r_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU}.$$

Ширина  $p$ - $n$ -перехода в равновесном состоянии находится из выражения:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{\text{к}}}{q} \cdot \frac{N_{\text{а}} + N_{\text{д}}}{N_{\text{а}} \cdot N_{\text{д}}}},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Относительная диэлектрическая проницаемость кремния  $\varepsilon = 12$ , германия –  $\varepsilon = 16$ . Если концентрация примесей в одной области  $p$ - $n$ -перехода много меньше, чем в другой, то выражение для ширины несимметричного  $p$ - $n$ -перехода упрощается. Например, в случае если  $N_{\text{д}} \ll N_{\text{а}}$ , имеем:

$$l_0 \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{\text{к}}}{qN_{\text{д}}}}.$$

Если  $p$ - $n$ -переход смещен в прямом направлении внешним напряжением  $U$ , то потенциальный барьер уменьшается и становится равным:  $U' = \varphi_{\text{к}} - |U|$ . Ширина  $p$ - $n$ -перехода уменьшается и становится равной:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{\text{к}} - U)}{q} \cdot \frac{N_{\text{а}} + N_{\text{д}}}{N_{\text{а}} \cdot N_{\text{д}}}}.$$

При смещении  $p$ - $n$ -перехода в обратном направлении высота потенциального барьера возрастает до величины  $U'' = \varphi_{\text{к}} + |U|$ , а его ширина увеличивается:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{\text{к}} + U)}{q} \cdot \frac{N_{\text{а}} + N_{\text{д}}}{N_{\text{а}} \cdot N_{\text{д}}}}.$$

Между шириной  $p$ - $n$ -перехода ( $l_n$  и  $l_p$  в  $n$ - и  $p$ -областях соответственно) и концентрациями примесей существует зависимость, которая описывается соотношением:

$$\frac{l_n}{l_p} = \frac{N_{\text{а}}}{N_{\text{д}}}.$$

В первом приближении считают, что напряженность контактного диффузионного поля максимальна на металлургическом контакте и линейно спадает к границам перехода. Максимальное значение напряженности поля в равновесном переходе находится из выражения:

$$E_{\text{max}} = \frac{2\varphi_{\text{к}}}{l_n + l_p} = \frac{2\varphi_{\text{к}}}{l}.$$

В случае если переход смещен внешним напряжением, в последнее выражение необходимо подставлять новые значения высоты потенциального барьера и ширины  $p$ - $n$ -перехода.

Между удельным сопротивлением  $\rho_p$  и  $\rho_n$   $p$ - и  $n$ -полупроводников и концентрациями соответствующих примесей существует зависимость, которая описывается соотношениями:

$$\rho_p \approx \frac{1}{N_a \cdot q \cdot \mu_p}, \quad \rho_n \approx \frac{1}{N_d \cdot q \cdot \mu_n},$$

где  $\mu_p$  и  $\mu_n$  – подвижности дырок и электронов. Для германия  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , а для кремния  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

### Примеры решения задач из раздела «Контактные явления», «Полупроводниковые диоды»

**Пример. 1.** Имеется германиевый  $p$ - $n$ -переход с концентрацией примесей  $N_d = 10^3 N_a$ , причем на каждые  $10^8$  атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре  $T = 300$  К. Концентрация атомов германия  $N = 4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ; собственная концентрация носителей

$$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

#### Решение

Концентрация атомов акцепторов:

$$N_a = N/10^8 = 4,4 \cdot 10^{22}/10^8 = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Концентрация атомов доноров:

$$N_d = 10^3 \cdot N_a = 10^3 \cdot 4,4 \cdot 10^{14} = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

При  $T = 300$  К все атомы примеси ионизированы, поэтому контактная разность потенциалов:

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \right) = 0,025 \cdot \ln \left( \frac{4,4 \cdot 10^{17} \cdot 4,4 \cdot 10^{14}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \right) = 0,326 \text{ В}.$$

**Пример. 2.** Удельное сопротивление  $p$ -области германиевого  $p$ - $n$ -перехода  $\rho_p = 2$  Ом см, а удельное сопротивление  $n$ -области  $\rho_n = 1$  Ом см. Вычислить высоту потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода при  $T = 300$  К.

Для германия при  $T = 300$  К подвижность дырок  $\mu_p = 1800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ; подвижность электронов  $\mu_n = 3800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ; равновесная концентрация носителей заряда  $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

#### Решение

Удельное сопротивление  $p$ -области полупроводника:

$$\rho_p = 1/(N_a \cdot q \cdot \mu_p).$$

Отсюда найдем концентрацию акцепторов в  $p$ -области:

$$N_a = \frac{1}{\rho_p \cdot q \cdot \mu_p} = \frac{1}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1800} = 1,74 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Аналогично найдем концентрацию доноров в  $n$ -области полупроводника:

$$N_d = \frac{1}{\rho_n \cdot q \cdot \mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3800} = 1,64 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Считая примеси ионизированными, найдем высоту потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода:

$$q \cdot \varphi_K = k \cdot T \cdot \ln \left( \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \right) = 0,025 \cdot \ln \left( \frac{1,74 \cdot 10^{15} \cdot 1,64 \cdot 10^{15}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \right) = 0,217 \text{ эВ}.$$

**Пример. 3.** В структуре с кремниевым  $p$ - $n$ -переходом удельная проводимость  $p$ -области  $\sigma_p = 10^4$  См /м и удельная проводимость  $n$ -области  $\sigma_n = 10^2$  См /м. Вычислить контактную разность потенциалов в переходе при  $T = 300$  К.

Для кремния при  $T = 300$  К: подвижность дырок  $\mu_p = 500$  см<sup>2</sup>/(В·с); подвижность электронов  $\mu_n = 1400$  см<sup>2</sup>/(В·с); равновесная концентрация носителей  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

**Решение**

Для полупроводника  $p$ -типа  $\sigma_p = p_p \cdot q \cdot \mu_p$ . Отсюда найдем концентрацию дырок:

$$p_p = \sigma_p / (q \cdot \mu_p) = 10^4 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,05) = 1,25 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Аналогично найдем концентрацию электронов в  $n$ -области:

$$n_n = \sigma_n / (q \cdot \mu_n) = 100 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14) = 4,46 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Используя закон действующих масс, найдем концентрацию дырок в  $n$ -области:

$$p_n = n_i^2 / n_n = (1,4 \cdot 10^{10})^2 / (4,46 \cdot 10^{21}) = 4,39 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов:

$$\varphi_K = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{p_p}{p_n} \right) = 0,025 \cdot \ln \left( \frac{1,25 \cdot 10^{24}}{4,39 \cdot 10^{10}} \right) = 0,799 \approx 0,8 \text{ В}.$$

**Пример. 4.** Германиевый  $p$ - $n$ -переход имеет обратный ток насыщения 1 мкА, а кремниевый переход таких же размеров – обратный ток насыщения  $10^{-8}$  А. Вычислить и сравнить прямые напряжения на переходах при  $T = 300$  К и токе 100 мА. Сопротивлением базы пренебречь.

**Решение**

Ток через переход определим по формуле:

$$I = I_0 \cdot [\exp U_{пр} / \varphi_T - 1],$$

где  $I_0$  – обратный ток насыщения.

Для германиевого  $p$ - $n$ -перехода можем записать:

$$100 \cdot 10^{-3} = 10^{-6} \cdot \exp [U_{пр} / 0,025 - 1],$$

откуда  $U_{пр} = 288$  мВ. Аналогично для кремниевого  $p$ - $n$ -перехода при  $I_0 = 10^{-8}$  А получаем  $U_{пр} = 407$  мВ.

**Пример. 5.** Обратный ток насыщения  $I_0$   $p$ - $n$ -перехода при  $T = 300$  К равен  $10^{-14}$  А. При повышении температуры на  $125$  °С обратный ток насыщения увеличился в  $10^5$  раз. Определить напряжение на переходе при комнатной и повышенной температуре, если прямой ток через него  $I = 1$  мА.

**Решение**

Из ВАХ  $p$ - $n$ -перехода имеем:

$$I/I_0 + 1 = \exp U/\varphi_T .$$

Логарифмируя и решая это уравнение относительно  $U$ , получаем:

$$U = \varphi_T \cdot \ln(I/I_0 + 1).$$

При  $T = 300$  К (комнатная температура)  $\varphi_T = 0,025$  В, тогда

$$U = 0,025 \cdot \ln(10^{-3}/10^{-14} + 1) = 0,66 \text{ В.}$$

При  $T = (300 + 125)$  К:

$$U = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (300 + 125)}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln[10^{-3}/(10^{-14} \cdot 10^5) + 1] = 0,5 \text{ В.}$$

**Пример. 6.** Барьерная емкость варикапа равна 25 пФ при обратном напряжении 5 В. Определить уменьшение емкости при уменьшении обратного напряжения до 7 В.

**Решение**

Пренебрегая контактной разностью потенциалов, можно записать:

$$C_{\text{б1}} = k/\sqrt{U_1},$$

где  $k$  – постоянная;  $U$  – обратное напряжение, откуда

$$k = C_{\text{б1}} \cdot \sqrt{U_1}.$$

Тогда при уменьшении обратного напряжения до 7 В барьерная емкость:

$$C_{\text{б2}} = k/\sqrt{U_2} = C_{\text{б1}} \cdot \sqrt{U_1}/\sqrt{U_2} = 25 \cdot \sqrt{5}/\sqrt{7} = 21 \text{ пФ.}$$

Следовательно, емкость уменьшается на  $\Delta C = C_{\text{б1}} - C_{\text{б2}} = 25 - 21 = 4$  пФ.

**Пример. 7.** У полупроводникового диода  $R_{\text{пр}} = 40$  Ом;  $R_{\text{обр}} = 0,4$  МОм;  $C = 80$  пФ.

Определить:

а) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно  $R_{\text{обр}}$  и вследствие этого произойдет заметное увеличение обратного тока (но он все еще будет малым);

б) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно  $R_{\text{пр}}$  и произойдет резкое ухудшение выпрямляющего действия диода.

**Решение**

а) Исходя из выражения для емкостного сопротивления  $X_C = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$  при  $X_C = R_{\text{обр}}$ ,

$$f = 1/(2 \cdot \pi \cdot X_C \cdot C) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 80 \cdot 10^{-12}) \approx 5000 \text{ Гц или } 5 \text{ кГц.}$$

б) Поскольку 0,4 МОм в 10000 раз больше 40 Ом, то

$$f = 5000 \cdot 10000 = 5 \cdot 10^7 \text{ Гц или } 50 \text{ МГц.}$$

**3 РЕШИТЬ ЗАДАЧИ ИЗ РАЗДЕЛА «БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ»**

**21.** Определить статические коэффициенты усиления по току биполярного транзистора, включенного в схемы с ОБ, ОЭ, если при изменении тока эмиттера на 1,6 мА ток коллектора увеличился на 1,57 мА. Ответ:  $\alpha = 0,98$ ;  $\beta = 52,6$ .

**22.** Для транзистора типа  $p$ - $n$ - $p$  задано:  $I_{p\text{Э}} = 2$  мА;  $I_{n\text{Э}} = 0,015$  мА;  $I_{p\text{К}} = 1,94$  мА;  $I_{n\text{К}} = 0,002$  мА. Вычислить:

а) коэффициент инжекции  $\gamma$ ;

б) коэффициент переноса тока базы  $\delta$ ;

в) ток базы и коэффициент передачи тока в схемах ОБ и ОЭ;

г) значения токов  $I_{кб0}$  и  $I_{кэ0}$ ,

д) значения  $\beta$  и  $I_{б}$ , если  $I_{рК} = 1,98$  мА.

Как изменятся значения  $\beta$  и  $I_{б}$ , если ток  $I_{нЭ}$  увеличится?

**23.** Транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы  $\beta = 100$ , обратный ток коллекторного перехода  $I_{кб0} = 5$  мкА, включен в схему с общим эмиттером. Определить:

а) ток эмиттера  $I_{э}$ ;

б) ток базы  $I_{б}$ ;

в) коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$ ;

г) обратный ток коллектора  $I_{кэ0}$ , если ток коллектора  $I_{к} = 1$  мА.

**24.** Сплавной транзистор типа  $p-n-p$  включен в схему с ОЭ и оторванной базой. Определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера транзистора  $\alpha = 0,97$  и обратный ток коллекторного перехода  $I_{кб0} = 35$  мкА.

**25.** В схеме на рисунке 1  $E_{к} = 10$ В,  $E_{б} = 5$ В,  $R_{к} = 1$ кОм,  $\beta = 50$ . Определить сопротивление  $R_{б}$ , при котором транзистор переходит в насыщение. Считать, что  $U_{кЭ\text{ нас}} = 0,2$ В.

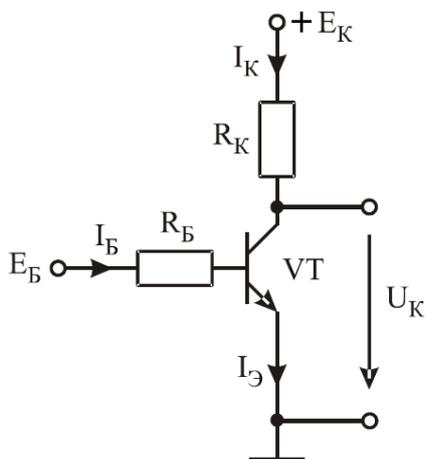


Рисунок 1

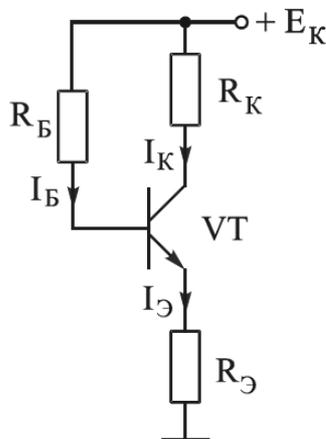


Рисунок 2

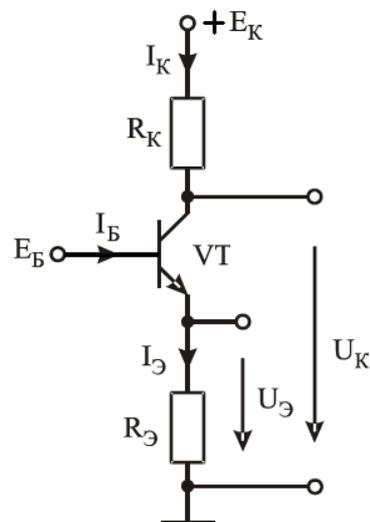


Рисунок 3

**26.** В схеме на рисунке 1  $E_{к} = 10$ В,  $E_{б} = 5$ В,  $R_{к} = 2$  кОм,  $R_{б} = 100$  кОм,  $\beta = 100$ . Рассчитать токи в электродах и напряжение  $U_{к}$ .

**27.** В схеме на рисунке 1  $E_{к} = 9$ В,  $E_{б} = 3$ В,  $R_{к} = 1,1$  кОм к  $R_{б} = 5,6$  кОм,  $\beta = 50$ . Рассчитать токи в электродах и напряжение  $U_{к}$ .

**28.** В схеме на рисунке 2  $R_{к} = R_{э} = 1,2$  кОм,  $E_{к} = 15$ В,  $\beta = 80$ . Рассчитать сопротивление резистора  $R_{б}$ , при котором ток коллектора  $I_{к} = 4,1$  мА.

**29.** Рассчитать токи и напряжения в схеме, показанной на рисунке 3, если  $R_{к} = 4,7$  кОм,  $R_{э} = 3,3$  кОм,  $\beta = 100$ ,  $E_{б} = 4$ В,  $E_{к} = 10$ В.

**30.** В схеме на рисунке 3  $E_{к} = 12$ В, ток коллектора  $I_{к} = 0,5$ мА, напряжение коллектор-база  $U_{кб} = 2$ В,  $R_{э} = 2$  кОм,  $\beta = 50$ . Рассчитать остальные токи в электродах, напряжения  $U_{к}$  и  $U_{э}$ ,  $R_{к}$ .

### Методические указания и примеры решения задач из раздела «Биполярные транзисторы»

Для решения задач **21 - 24** следует внимательно разобрать решение следующих примеров.

**Пример. 8.** Для транзистора типа *p-n-p* задано:  $I_{pЭ} = 1$  мА;  $I_{nЭ} = 0,01$  мА;  $I_{pК} = 0,98$  мА;  $I_{nК} = 0,001$  мА. Вычислить:

- коэффициент инжекции  $\gamma$ ;
- коэффициент переноса тока базы  $\delta$ ;
- ток базы и коэффициент передачи тока в схемах ОБ и ОЭ;
- значения токов  $I_{кб0}$  и  $I_{кэ0}$ ,
- значения  $\beta$  и  $I_{б}$ , если  $I_{pК} = 0,99$  мА. Как изменятся значения  $\beta$  и  $I_{б}$ , если ток  $I_{nЭ}$  увеличится?

#### Решение

$$а) \gamma = \frac{I_{pЭ}}{I_{pЭ} + I_{nЭ}} = \frac{1}{1 + 0,01} = 0,99.$$

$$б) \delta = I_{pК} / I_{pЭ} = 0,98 / 1 = 0,98.$$

$$в) I_{э} = I_{pЭ} + I_{nЭ} = 1 + 0,01 = 1,01 \text{ мА}; I_{к} = I_{pК} + I_{nК} = 0,98 + 0,001 = 0,981 \text{ мА};$$

$$I_{б} = I_{э} - I_{к} = 1,01 - 0,981 = 0,029 \text{ мА или } 29 \text{ мкА.}$$

$$\alpha \approx \gamma \cdot \delta = 0,99 \cdot 0,98 = 0,97; \beta = \alpha / (1 - \alpha) = 0,97 / (1 - 0,97) = 32,67.$$

$$г) I_{кб0} \approx I_{nК} = 1 \text{ мкА}; I_{кэ0} \approx I_{кб0} \cdot (\beta + 1) = 1 \cdot (32,67 + 1) = 33,7 \text{ мкА.}$$

$$д) I_{pК} = 0,99 \text{ мА} \rightarrow \alpha = I_{pК} / (I_{pЭ} + I_{nЭ}) = 0,99 / (1 + 0,01) = 0,98;$$

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha) = 0,98 / (1 - 0,98) = 49,5;$$

$$I_{б} = (I_{nЭ} + I_{pЭ}) - (I_{nК} + I_{pК}) = (0,01 + 1) - (0,001 + 0,99) = 0,019 \text{ мА или } 19 \text{ мкА.}$$

Если ток  $I_{nЭ}$  возрастает, то значение  $\beta$  уменьшается, поскольку уменьшается значение  $\gamma$ . Действительно, если уменьшить  $\gamma$ , то также уменьшатся значения  $\alpha$  (так как  $\alpha \approx \gamma \cdot \delta$ ) и  $\beta$ , поскольку  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ . Ток  $I_{б}$  можно найти, используя результаты, полученные в п. в) и д).

**Пример. 9.** Сплавной транзистор типа *p-n-p* включен в схему с ОЭ и оторванной базой. Определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера транзистора  $\alpha = 0,98$  и обратный ток коллекторного перехода  $I_{кб0} = 10$  мкА.

#### Решение

Воспользуемся известным соотношением для токов транзистора в активном режиме:

$$I_{к} = \alpha I_{э} + I_{кб0}.$$

Поскольку цепь базы разорвана, то  $I_{к} = I_{э}$ . Исключив из уравнения  $I_{э}$ , получим:

$$I_{к} = \alpha I_{к} + I_{кб0} \quad \text{или} \quad I_{к} \cdot (1 - \alpha) = I_{кб0},$$

откуда

$$I_{к} = I_{кб0} / (1 - \alpha) = I_{кб0} \cdot (1 + \beta).$$

Полученный ток  $I_{к}$  обозначается символом  $I_{кэ0}$  и называется обратным током коллектор – эмиттер при разомкнутом выводе базы.

Подставляя числовые значения из условия задачи в последнее выражение, получаем:

$$I_{кЭ0} = 10/(1 - 0,98) = 500 \text{ мкА.}$$

Полученный ток в  $1 + \beta$  раз больше обратного тока коллектора  $I_{кБ0}$ . Большое значение тока  $I_{кЭ0}$  снижает устойчивость работы транзистора в схеме с ОЭ и может привести к тепловому пробую. Поэтому при эксплуатации транзисторов не допускается отключение или разрыв цепи базы при наличии напряжения на других электродах.

В этой задаче, кроме того, дан очень простой и точный способ измерения коэффициента передачи тока эмиттера ( $\alpha$ ). Если вначале измерить обратный ток коллекторного перехода  $I_{кБ0}$  (включая батарею между коллектором и базой), а затем измерить коллекторный ток в схеме с ОЭ и с оторванной базой, то можно непосредственно определить  $1 - \alpha$ .

Для решения задач **25 - 30** нужно учесть следующие положения.

Перед расчетом токов в цепях электродов транзистора и напряжений на резисторах в цепях его электродов следует сначала проверить, в каком режиме работает транзистор. Существуют три основных режима работы – активный, отсечки тока и насыщения тока. В нормальном активном (усилительном) режиме эмиттерный переход приложенным напряжением смещен в прямом направлении, а коллекторный переход источником ЭДС в цепи коллектора – в обратном. В этом режиме часть ЭДС источника падает на самом транзисторе (на его коллекторном переходе), а оставшееся напряжение – на внешних элементах выходной цепи.

В режиме отсечки тока эмиттерный переход закрыт, поскольку на него не подают прямое напряжение, транзистор полностью закрыт, и вся ЭДС источника в выходной цепи падает на нем. Отсутствует как входной, так и выходной ток, если не учитывать очень малые тепловые токи переходов. Данный режим используется в импульсных и цифровых схемах, когда транзистор выполняет функцию закрытого электронного ключа, а также иногда используется в комбинации с активным режимом для повышения КПД мощного усилителя.

В режиме насыщения тока эмиттерный переход смещают прямо и сильно увеличивают ток базы. В результате ток коллектора возрастает настолько, что практически вся ЭДС источника в выходной цепи падает на резисторе в цепи коллектора. Транзистор полностью открывается, ток в цепи коллектора ограничивается внешним сопротивлением. Данный режим используется в импульсных и цифровых схемах, когда транзистор выполняет функцию открытого электронного ключа.

**Пример. 10.** В цепи на рисунке 3  $E_K = 9\text{В}$ ,  $E_B = 3\text{В}$ ,  $R_K = 1,0 \text{ кОм}$ ,  $R_Э = 470 \text{ Ом}$ ,  $\beta = 100$ . Рассчитать токи и напряжения, показанные на рисунке.

**Решение**

Определим режим работы транзистора. Транзистор *n-p-n*-типа. На базу подано положительное напряжение 3 В, а эмиттер через резистор  $R_Э$  соединен с «землей», следовательно, эмиттерный переход смещен в прямом направлении. На открытом эмиттерном переходе падает напряжение порядка 0,8 В. Поэтому напряжение на эмиттере  $U_Э = E_B - 0,8 = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ В}$ .

Находим ток эмиттера  $I_Э = U_Э / R_Э = 2,2 / 470 = 0,00468 \text{ А} = 4,68 \text{ мА}$ .

В активном режиме  $I_K = I_Э = 4,68 \text{ мА}$ .

Падение напряжения на резисторе  $R_K$   $U_{R_K} = I_K * R_K = 0,00468 * 1000 = 4,68 \text{ В}$ .

Тогда  $U_K = E_K - U_{R_K} = 9 - 4,68 = 4,32 \text{ В}$ .

Ток базы  $I_B = I_K / \beta = 0,00468 / 100 = 0,0000468 \text{ А} = 46,8 \text{ мкА}$ .

#### 4 ВЫПОЛНИТЬ РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ ИЗ РАЗДЕЛА «БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ»

Расчетное задание состоит из трех подпунктов.

##### 4.1 По входным и выходным ВАХ найти $h$ -параметры транзистора как четырехполюсника для схемы ОЭ.

Пользуясь справочными данными, приведите семейство входных и выходных характеристик транзистора в схеме ОЭ. В качестве независимых переменных используйте входное и выходное напряжение. Тип транзистора выберите согласно своему варианту по таблице 2. Поясните поведение входных и выходных характеристик транзистора.

Таблица 2

Выбор типа транзистора для своего варианта

Номер задачи	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Тип транзистора	КТ603В	КТ325А	КТ301Б	КТ340А	КТ342А	КТ351А	КТ368А	КТ3127А	КТ608А	КТ646А

По справочнику установите максимально допустимые параметры транзистора: постоянный ток коллектора  $I_{Kmax}$ ; напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭmax}$ ; мощность рассеиваемую коллектором транзистора  $P_{Kmax}$ . На семейство выходных характеристик нанесите границы области допустимых режимов работы.

Задайтесь положением рабочей точки и, пользуясь характеристиками, рассчитайте для нее значения  $h$ -параметров транзистора. На основании полученных числовых значений параметров рассчитайте параметры  $T$ -образной эквивалентной схемы транзистора и изобразите ее.

##### 4.2 Найти физические и $h$ -параметры транзистора как четырехполюсника для схемы ОЭ, используя $h$ -параметры для схемы ОБ.

Привести и описать эквивалентные схемы биполярного транзистора для малого сигнала с ОБ и с ОЭ ( $T$ -образные схемы замещения в физических параметрах).

Определить внутренние физические параметры  $r_{\bar{\sigma}}$ ,  $r_{\bar{\epsilon}}$ ,  $r_{\bar{\kappa}}$ ,  $r_{\bar{\kappa}}^*$  и коэффициенты передачи по току  $\alpha$  и  $\beta$   $T$ -образных эквивалентных схем с ОБ и с ОЭ транзистора, если известны его  $h$ -параметры как активного линейного четырехполюсника, включенного по схеме с ОБ (таблица 3).

Таблица 3

Выбор  $h$  – параметры схемы с ОБ для своего варианта

Номер задания	$h$ – параметры для схемы с ОБ			
	$h_{11\bar{\sigma}}$ , Ом	$h_{12\bar{\sigma}}$	$h_{21\bar{\sigma}}$	$h_{22\bar{\sigma}}$ , См
41	40	$6,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,97	$2 \cdot 10^{-6}$
42	30	$5,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,96	$1 \cdot 10^{-6}$
43	35	$4,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,95	$1 \cdot 10^{-6}$

<b>44</b>	32	$1,2 \cdot 10^{-4}$	- 0,98	$1 \cdot 10^{-6}$
<b>45</b>	24	$1,2 \cdot 10^{-3}$	- 0,99	$5 \cdot 10^{-6}$
<b>46</b>	25	$2,5 \cdot 10^{-4}$	- 0,96	$3 \cdot 10^{-6}$
<b>47</b>	40	$4,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,98	$1 \cdot 10^{-6}$
<b>48</b>	28	$2,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,95	$1 \cdot 10^{-6}$
<b>49</b>	38	$5,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,98	$2 \cdot 10^{-6}$
<b>50</b>	36	$4,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,99	$4 \cdot 10^{-6}$

Указанные в таблице  $h$ -параметры для схемы с ОБ пересчитать в  $h$ -параметры для схемы с ОЭ.

### 4.3 Рассчитать частотные свойства транзистора

Рассчитайте модуль  $|h_{21э}|$  и фазу  $\varphi_{h_{21э}}$  коэффициента передачи по току транзистора в схеме с ОЭ на частоте  $f$ . В качестве исходных данных используйте заданные в таблице 4 значения предельной частоты коэффициента передачи по току в схеме с ОБ  $f_{h_{21б}}$ , статический коэффициент передачи по току в схеме с ОБ  $\alpha$  и частоты  $f$ .

Таблица 4

Выбор исходных данных для своего варианта

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{h_{21б}}$ , МГц	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$f$ , кГц	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha$	0,98	0,975	0,973	0,978	0,95	0,965	0,959	0,983	0,976	0,985

**Методические указания к расчетному заданию из раздела «Биполярные транзисторы»**

#### 1 Определение $h$ -параметров транзистора как четырехполюсника для схемы ОЭ по входным и выходным ВАХ

Эквивалентные схемы (схемы замещения) транзисторов для малого сигнала облегчают расчет транзисторных схем по переменному току. Используют как схемы замещения в физических параметрах, построенные с учетом принципов работы реальных приборов, так и универсальные формальные схемы замещения транзистора как четырехполюсника. Вид  $T$ -образной схемы замещения в физических параметрах зависит от схемы включения транзистора (с ОБ, с ОЭ, с ОК).  $T$ -образные схемы замещения в физических параметрах приводят для нормального активного режима работы для транзистора прямой ( $p$ - $n$ - $p$ ) или обратной ( $n$ - $p$ - $n$ ) проводимости.

Рассмотрим физические  $T$ -образные эквивалентные схемы транзистора со структурой  $p$ - $n$ - $p$  (схемы в прямоугольниках на рисунке 4). Они достаточно полно отражают свойства реального транзистора на низких частотах и используются при анализе тран-

зисторных схем. Если  $T$ -образные схемы внутри прямоугольников скрыть, то останутся формальные схемы замещения транзистора в виде четырехполюсников. Внутренние стрелки показывают общепринятые направления токов в электродах транзистора, а внешние – токи четырехполюсника, принятые за положительные. Видно, что направления токов физических и формальных схем замещения могут не совпадать.

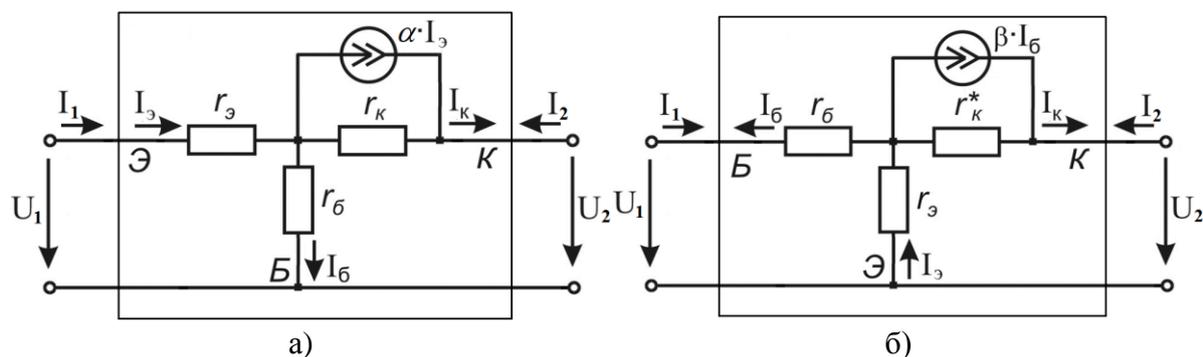


Рисунок 4 - Физические  $T$ -образные эквивалентные схемы транзистора, заключенные в структуру четырехполюсника: а – ОБ, б – ОЭ

Рассмотрим параметры физических  $T$ -образных эквивалентных схем транзистора. Резистор  $r_б$  моделирует омическое сопротивление слаболегированной базовой области. Резистор  $r_э$  моделирует малое дифференциальное сопротивление прямо смещенного эмиттерного перехода. Высокоомный резистор  $r_к^*$  моделирует большое дифференциальное сопротивление обратсмещенного коллекторного перехода. Зависимый источник тока  $\beta \cdot I_б$  моделирует экстрагирующие свойства коллекторного перехода транзистора, т.е. он создает ток коллектора, пропорциональный входному току базы. В  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторе токи базы и коллектора вытекают, тогда как для четырехполюсника за положительно направленные приняты втекающие входной и выходной токи.

Свойства четырехполюсника можно описать тремя видами параметров –  $Z$  (полными сопротивлениями),  $Y$  (проводимостями) и  $H$  (смешанной системой параметров). Для описания свойств транзистора по переменному току на низких и средних частотах чаще всего используется система дифференциальных  $h$ -параметров, которая представляется следующими уравнениями:

$$dU_1 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2;$$

$$dI_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2.$$

Рассмотрим методику определения  $h$ -параметров биполярных транзисторов по статическим ВАХ. Статические ВАХ позволяют найти дифференциальные параметры транзистора.

Для нахождения  $h$ -параметров по статическим характеристикам дифференциалы заменим конечными приращениями и получим выражения, позволяющие определить физический смысл  $h$ -параметров

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2=const} \quad \text{– входное сопротивление в режиме короткого замыкания (КЗ) на}$$

выходе;

$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{I_1=const}$  – коэффициент обратной связи по напряжению в режиме холостого хода (XX) по входу;

$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2=const}$  – коэффициент передачи по току в режиме КЗ на выходе;

$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1=const}$  – выходная проводимость в режиме XX по входу.

Для расчета  $h$ -параметров удобно использовать семейства входных и выходных характеристик транзистора. Рассмотрим порядок графо-аналитического метода расчета  $h$ -параметров в схеме ОЭ.

1) Определение выходной проводимости транзистора  $h_{22Э}$ .

На линейном участке выходных характеристик транзистора выбрать рабочую точку  $A$ , в которой требуется найти  $h$ -параметры (рисунок 5, б).

Далее при постоянном токе базы задать приращение  $\Delta U_{КЭ}$  и найти получающееся при этом приращение тока коллектора  $\Delta I_K$ . Выходная проводимость транзистора  $h_{22Э}$  вычисляется по формуле:

$$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B=const} .$$

2) Определение коэффициента передачи тока в схеме ОЭ  $h_{21Э}$ .

По выходным характеристикам схемы ОЭ (рисунок 5, б) при постоянном напряжении на коллекторе ( $U_{КЭ2} = const$ ), проходящем через точку  $A$ , определить приращение тока коллектора  $\Delta I'_K$ , переходя вдоль вертикальной оси с кривой с базовым током  $I_{B1}$  до другой кривой с базовым током  $I_{B3}$ . Коэффициент передачи тока  $h_{21Э}$  вычисляется по формуле:

вычисляется по формуле:  $h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I'_K}{I_{B3} - I_{B1}} \right|_{U_{КЭ}=const} .$

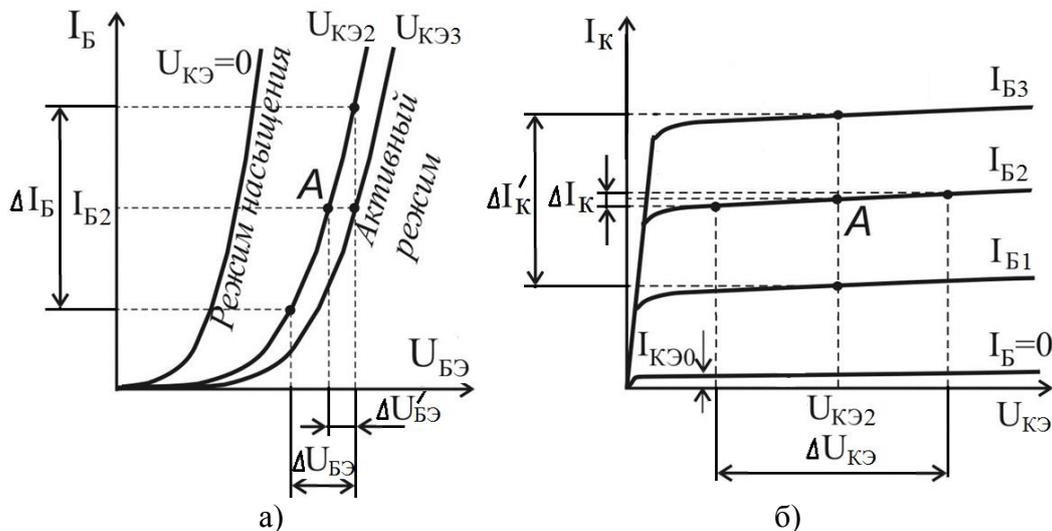


Рисунок 5 - Определение  $h$ -параметров для схемы ОЭ по входным (а) и выходным (б) ВАХ

3) Определение входного сопротивления в схеме ОЭ  $h_{11Э}$ .

На входных характеристиках транзистора с ОЭ (рисунок 5, а) выбрать рабочую точку  $A$  ту же, что и при определении параметра  $h_{22Э}$ .

Задать приращение тока базы  $\Delta I_B$  при постоянном напряжении на коллекторе и найти получившееся при этом приращение напряжения базы  $\Delta U_{БЭ}$ . Входное сопротивление  $h_{11Э}$  определяется по формуле:  $h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \Big|_{U_{КЭ}=\text{const}}$ .

4) Определение коэффициента обратной связи по напряжению  $h_{12Э}$ .

По входным характеристикам в той же рабочей точке  $A$  при постоянном токе базы задать приращение напряжения коллектор-эмиттер  $\Delta U_{КЭ}$ , т.е. перейти с характеристики для  $U_{КЭ2}$  на характеристику для  $U_{КЭ3}$  (см. рисунок 5, а). Определить получающееся при этом изменение напряжения база-эмиттер  $\Delta U'_{БЭ}$  и приращение выходного напряжения  $\Delta U_{КЭ} = U_{КЭ3} - U_{КЭ2}$ .

Коэффициент обратной связи по напряжению  $h_{12Э}$  находится по формуле:

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U'_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \Big|_{I_B=\text{const}}$$

Аналогично определяются  $h$ -параметры для транзистора с ОБ.

Коэффициент обратной связи по напряжению  $h_{12Э}$  имеет очень малую величину ( $10^{-4} \dots 10^{-3}$ ), поэтому в справочных данных приводят семейство входных ВАХ, состоящее из двух кривых: одну для  $U_{КЭ} = 0$  и одну для  $U_{КЭ} \neq 0$ . Обычно для  $U_{КЭ} = 5$  или 10 В. Это обусловлено тем, что входные характеристики для  $U_{КЭ} > 1$  В практически накладываются друг на друга. Использование приведенных характеристик не позволяет точно рассчитать значение  $h_{12Э}$ . Для вычисления величины коэффициента обратной связи по напряжению необходимо рассчитать параметры  $T$ -образной эквивалентной схемы транзистора.

Значения физических параметров транзистора могут быть найдены с использованием известных  $h$ -параметров четырехполюсника в схеме с ОЭ

$$r_э = \frac{h_{12Э}}{h_{22Э}}, r^*_к = \frac{1}{h_{22Э}}, \beta = h_{21Э}, r_б = h_{11Э} - (1 + h_{21Э})r_э.$$

Поэтому в первую очередь вычисляется дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода  $r_э = \varphi_T / I_{Э0}$ , где  $\varphi_T = kT/q$  – тепловой потенциал, равный 26 мВ при  $T=300$  К;  $I_{Э0}$  – ток эмиттера транзистора в рабочей точке (можно считать  $I_{Э0} \approx I_{К0}$ ). Затем определяются  $r^*_к$ ,  $\beta$  и находится коэффициент обратной связи по напряжению  $h_{12Э} = r_э \cdot h_{22Э}$ .

Область допустимых режимов на семействе выходных характеристик транзистора, заштрихованная на рисунке 6, определяется его максимально допустимыми параметрами: постоянным током коллектора  $I_{Кmax}$ ; постоянным напряжением коллектор-эмиттер  $U_{КЭmax}$ ; постоянной рассеиваемой мощностью коллектора  $P_{Кmax} = I_K U_{КЭ}$ .

Рабочая точка транзистора для работы в малосигнальном усилителе выбирается обычно в центре области допустимых режимов работы на линейных участках ВАХ, соответствующих активному режиму работы.

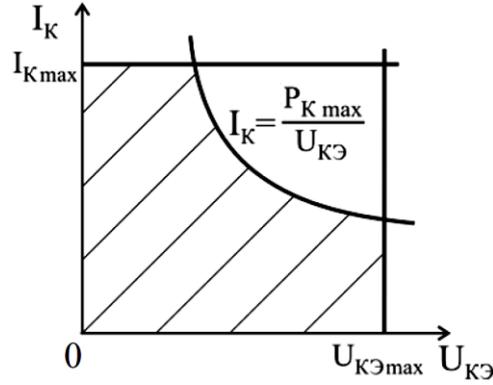


Рисунок 6 - Область допустимых режимов на семействе выходных характеристик транзистора

## 2 Определение физических и $h$ -параметров транзистора как четырехполюсника для схемы ОЭ, используя $h$ -параметры для схемы ОБ

Физические параметры транзистора выражаются через его  $h$ -параметры в схеме с ОБ:

$$r_{\varepsilon} = h_{11\delta} - (1 + h_{21\delta})h_{12\delta}/h_{22\delta}, \quad r_{\delta} = h_{12\delta}/h_{22\delta}, \quad r_{к(\delta)} = 1/h_{22\delta}, \quad r_{к(\varepsilon)}^* = r_{к(\delta)}/\beta.$$

$$\alpha = -h_{21\delta}, \quad \beta = \alpha/(1 - \alpha), \quad \alpha = \beta/(1 + \beta).$$

Кроме того, зная  $h$ -параметры для схемы включения с ОБ легко перейти к  $h$ -параметрам для схемы с ОЭ:

$$h_{11\varepsilon} = \frac{h_{11\delta}}{1 + h_{21\delta}}; \quad h_{12\varepsilon} = \frac{h_{11\delta}h_{22\delta}}{1 + h_{21\delta}} - h_{12\delta}; \quad h_{21\varepsilon} = -\frac{h_{21\delta}}{1 + h_{21\delta}}; \quad h_{22\varepsilon} = \frac{h_{22\delta}}{1 + h_{21\delta}}.$$

## 3 Расчет частотных свойств транзистора

На высоких частотах возникает фазовый сдвиг между входным и выходным токами транзистора, обусловленный конечным временем пролета носителей от эмиттера к коллектору и наличием емкостей переходов транзистора. Это приводит к комплексному характеру коэффициентов передачи по току и их частотной зависимости

$$\dot{h}_{21\delta}(f) = |h_{21\delta}(f)|e^{j\varphi_{h_{21\delta}}(f)} \quad \text{и} \quad \dot{h}_{21\varepsilon}(f) = |h_{21\varepsilon}(f)|e^{j\varphi_{h_{21\varepsilon}}(f)}.$$

Необходимо уяснить понятие предельной частоты коэффициента передачи по току транзистора для схемы включения с ОБ и ОЭ. Частотные зависимости модуля и фазы коэффициентов передачи по току характеризуются выражениями:

$$|h_{21\delta}(f)| = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + (f/f_{h_{21\delta}})^2}}; \quad \varphi_{h_{21\delta}} = \text{arctg}(f/f_{h_{21\delta}});$$

$$|h_{21\varepsilon}(f)| = \frac{\beta}{\sqrt{1 + (f/f_{h_{21\varepsilon}})^2}}; \quad \varphi_{h_{21\varepsilon}} = \text{arctg}(f/f_{h_{21\varepsilon}}),$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – статические коэффициенты передачи по току транзистора для включения с ОБ и ОЭ, соответственно;  $f_{h_{21\delta}}$ ,  $f_{h_{21\varepsilon}}$  – предельные частоты коэффициентов передачи по току для схемы с ОБ и ОЭ, соответственно.

Причем связь между этими частотами определяется выражением

$$f_{h_{21\beta}} = f_{h_{21\alpha}} / (1 + \beta).$$

Пусть, например,  $f_{h_{21\alpha}} = 5$  МГц;  $\alpha = 0,98$ ;  $f = 200$  кГц. Определим статический коэффициент передачи по току для включения с ОЭ:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,98}{1 - 0,98} = 49.$$

Тогда предельная частота коэффициента передачи по току для включения с ОЭ

$$f_{h_{21\beta}} = \frac{f_{h_{21\alpha}}}{1 + \beta} = \frac{5 \cdot 10^6}{1 + 49} = 100 \text{ кГц},$$

модуль коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ

$$|h_{21\beta}| = \frac{49}{\sqrt{1 + (200/100)^2}} \approx 22,$$

и фаза коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ

$$\varphi_{h_{21\beta}} = \arctg(f / f_{h_{21\beta}}) = \arctg(2) = 63,4^\circ.$$

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пасынков Б.Б., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1987. - 480 с.
2. Булычев А.Л., Лямин П.М., Тулинов Е.С. Электронные приборы. – М.: Лайт Лтд., 2000. – 416 с.
3. Электронные приборы: Учебник для вузов /В.Н. Дулин, Н.А. Аваев, В.П. Демин и др.; Под ред. Г.Г. Шишкина. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат., 1989. - 496 с.
4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Радио и связь, 1990. - 264 с.
5. Батушев В.А. Электронные приборы. - М.: Высшая школа, 1980. - 383 с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
7. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
8. Дулин В. Л. Электронные приборы. - М.: Энергия, 1977. - 424 с.
9. Крутякова М.Г. и др. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования: Учебник для техникумов/ М.Г. Крутякова, Н.А. Чарыков, В.В. Юдин. - М.: Радио и связь, 1983. - 352 с.
10. Ржевкин К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов: М.: Изд-во МГУ, 1986. - 256с.
11. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - М.: Энергия, 1977. - 672 с.
12. Овечкин Ю.А. Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 1979. – 279 с.
13. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.
14. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 260 с.
15. Линч П., Николайдес А. Задачи по физической электронике. - М.: Энергия, 1975. - 264 с.
16. Полупроводниковые приборы: Диоды выпрямительные. Стабилитроны. Тиристоры: Справочник /Под общей редакцией А.В. Голомедова. - М.: Радио и связь, 1988. - 526 с.
17. Полупроводниковые приборы: Транзисторы: Справочник /Под общей редакцией Н.Н. Горюнова. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 902 с.
18. Твердотельная электроника: Методическое пособие. /Копытов С.М. (автор-составитель) – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2003. – 180 с.