

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет “ЛЭТИ”

И. Ф. Ливенцева

Методические указания  
к выполнению курсовой работы

по дисциплине

“Твердотельная электроника”

Санкт-Петербург  
2008

УДК 621.328.3

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине " Твердотельная электроника ". Расчет биполярного транзистора / Сост. И.Ф.Ливенцева: ЛЭТИ. - Л., 1989. - 32 с.

Указания содержат краткие сведения по расчету электрофизических и геометрических параметров структуры низкочастотного биполярного транзистора. Статические характеристики рассчитываются на ЭВМ. Предназначены для студентов специальности 20.04, обучающихся по вечерней форме на У КП на базе объединения "Светлана".

Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний.

© «ЛЭТИ», 1989

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа по дисциплине "Полупроводниковые приборы" на тему "Расчет биполярного транзистора" имеет целью закрепление и углубление знаний, полученных в лекционном курсе по этой дисциплине. Выполнение курсовой работы способствует развитию у студентов навыков самостоятельного решения конкретных инженерных задач, связанных с расчетом и проектированием полупроводниковых приборов, работой с научно-технической и справочной литературой.

При выполнении курсовой работы студенты должны использовать лекционный материал по дисциплине "Полупроводниковые приборы", рекомендованную литературу, а также некоторые разделы предшествующих курсов дисциплин - "Физические основы электронной техники" и "Материалы электронной техники".

## ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Задание на курсовую работу предусматривает разработку низкочастотного биполярного транзистора, включая выбор исходного материала, выбор геометрии структуры, расчет конструктивных параметров и составление эскизного чертежа структуры. В ходе выполнения работы студенты должны построить зонные энергетические диаграммы разрабатываемого биполярного транзистора в отсутствие внешних напряжений и в активном режиме работы. Для транзистора, работающего в активном режиме и включенного по схеме с общей базой, проводится расчет элементов физической эквивалентной схемы. Для этой же схемы включения проектируемого транзистора с использованием ЭВМ выполняется расчет выходных статических характеристик.

Исходными данными для расчета биполярного бездрейфового транзистора являются коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала в схеме с общим эмиттером  $h_{21э}$ , граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером  $f_{гр}$ , максимально допустимое постоянное напряжение коллектор-база  $U_{КБ\max}$ , максимально допустимый постоянный ток коллектора  $I_{К\max}$ , максимальная температура коллекторного перехода  $T_{п}$ . Для расчета элементов физической эквивалентной схемы и построения зонных энергетических диаграмм задается режим по постоянному току, соответствующий активному режиму работы прибора. Для построения кривой допустимой мощности на семействе выходных статических характеристик задается значение максимальной допустимой рассеиваемой мощности коллектора  $P_{К\max}$ .

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Готовая курсовая работа должна содержать пояснительную записку и графическую часть. Пояснительная записка должна включать титульный лист установленного образца, оглавление, задание, перечень принятых в работе обозначений, основную часть работы и список литературы, использованной при выполнении курсовой работы [1].

Основная часть работы должна содержать краткое введение с постановкой задачи, подробный расчет и обоснование выбора конструкции элементов проектируемого прибора и заключение.

Пояснительная записка выполняется на одной стороне листа бумаги формата А4 (210 x 297). Объем пояснительной записки не должен превышать 25 страниц. Оформление пояснительной записки и графической части работы должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ [2 - 5].

Графическая часть курсовой работы должна состоять из эскизного чертежа структуры, выполненного в двух проекциях (вид сверху и разрез), зонных энергетических диаграмм в отсутствие внешних напряжений и в заданном режиме по постоянному току и выходных статистических характеристик. Все расчетные формулы и справочные данные должны иметь ссылку на литературный источник.

## **УКАЗАНИЯ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ**

Порядок расположения материала в этом разделе соответствует рекомендуемой последовательности выполнения курсовой работы.

### ***Выбор материала для изготовления транзистора***

Низкочастотный бездрейфовый транзистор представляет собой высокоомную базовую пластину, в которой методом сплавления примесей сформированы сильнолегированные области эмиттера и коллектора. При формировании электронно-дырочных переходов этим методом в качестве легирующих материалов используют чистые металлы и сплавы, называемые электродными. Электродный материал должен обладать способностью создавать в полупроводниковом материале (германии, кремнии) области с типом электропроводности, противоположным исходному типу проводимости. Электродный материал образует с исходным полупроводником базы эвтектический сплав.

На первом этапе формирования сплавного р-п перехода производят нагрев базовой пластины с навесками из электродного материала до температуры плавления эвтектики, при этом атомы полупроводника базы растворяются в расплаве навески. В процессе охлаждения происходит рекристаллизация исходного полупроводника из раствора. Концентрация примеси в рекристаллизованной области определяется температурой сплавления

ТВПЛ и предельной растворимостью легирующей примеси в исходном полупроводнике. В табл. 4.1 приведены некоторые часто используемые электродные материалы, соответствующие им температуры плавления и концентраций примеси в рекристаллизованных областях эмиттера  $N_E$  и коллектора  $N_K$ , при этом  $N_E = N_K$ .

Таблица 4.1

Полупроводниковые электродные материалы, используемые для изготовления сплавных биполярных транзисторов

Исходный полупроводник	Электродный материал	$T_{\text{впл}}, ^\circ\text{C}$	$N_E, \text{см}^{-3}$
n-Ge	In - Ga	450 - 650	$2 \cdot 10^{19}$
p-Ge	Pb-Sb	650 - 750	$1 \cdot 10^{19}$
n-Si	Al	1100 - 1250	$2 \cdot 10^{19}$
p-Si	Sn-P	900 - 1200	$1 \cdot 10^{21}$

Материал полупроводниковой структуры выбирают по заданной максимальной температуре коллекторного перехода ТП: принято считать, что электронно-дырочный переход из германия устойчиво работает до температуры  $85^\circ\text{C}$ , а переход из кремния – до  $125^\circ\text{C}$ . Тип электропроводности исходного материала задается типом электропроводности базы рассчитываемого транзистора  $p-n-p$  или  $n-p-n$  типа. Концентрацию примеси в базе выбирают,

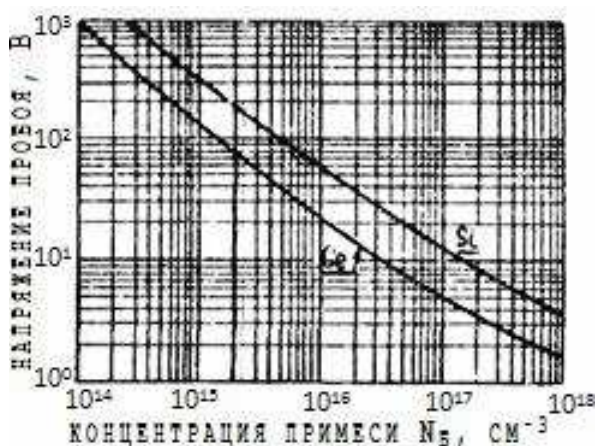


Рис.4.1. Зависимость напряжения пробоя от концентрации примеси в слабелегированной базе при  $T=300\text{ K}$

исходя из заданного максимально допустимого напряжения  $U_{\text{КБ max}}$ , так, чтобы обеспечить пробивное напряжение перехода  $U_{\text{проб}} = (1,3 - 2) U_{\text{КБ max}}$ . Для резкого несимметричного сплавного перехода зависимость  $U_{\text{проб}}$  от концентрации примеси в слабелегированной базе [6] приведена на рис.4.1. Пунктирная кривая на этом рисунке разделяет области лавинного и туннельного пробоя.

Зная концентрацию примеси в базе  $N_E$ , можно рассчитать концентрацию неосновных носителей заряда  $N_{\text{БН}}$ .

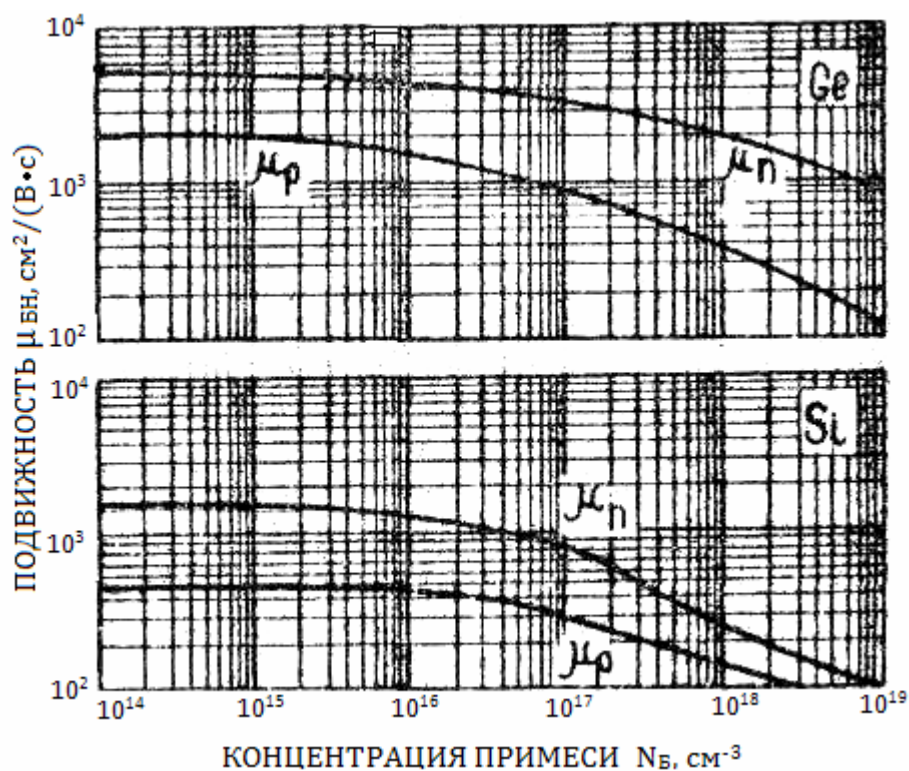


Рис.4.2. Подвижность носителей заряда в германии и кремнии при  $T = 300\text{ K}$

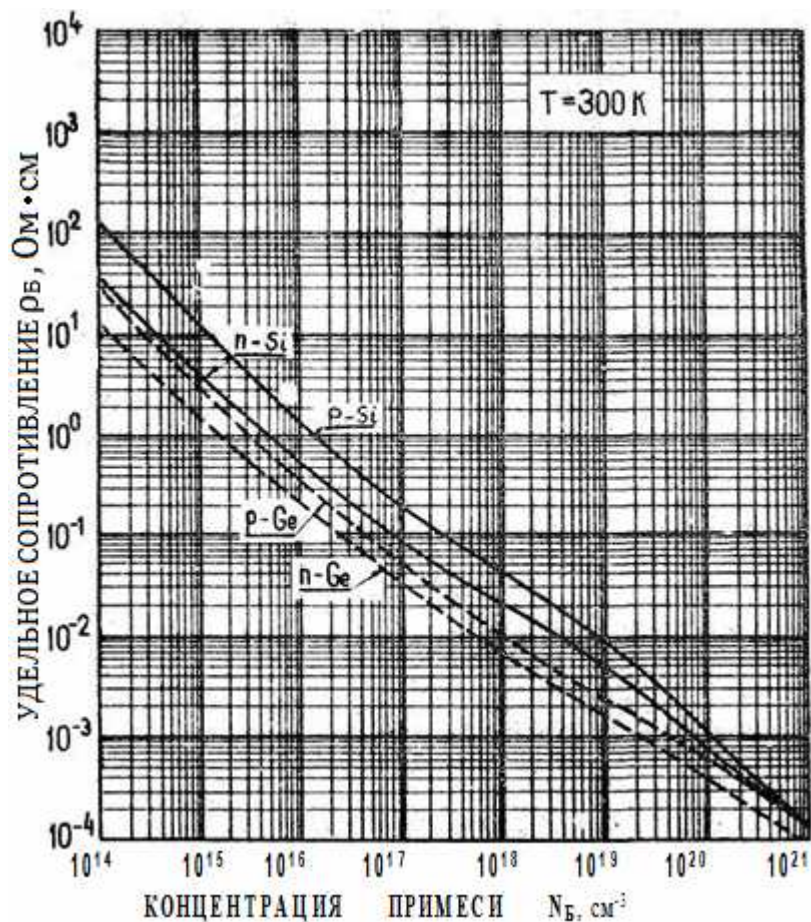


Рис.4.3. Удельное сопротивление в германии и кремнии в зависимости от концентрации примеси при  $T=300\text{ K}$



Необходимые для расчета сведения можно найти в Приложении 1. Для определения подвижности  $\mu_{БН}$  неосновных носителей заряда, можно воспользоваться данными, приведенными на рис. 4.2 [6].

Для заданного типа электропроводности базы можно определить удельное сопротивление  $\rho_B$ , используя данные [6], приведенные на рис. 4.3.

Выбранное значение удельного сопротивления полупроводника базы  $\rho_B$  должно быть не менее значения, найденного по рис. 4.3.

По удельному сопротивлению выбирают марку полупроводника базы [7-9] и определяют диффузионную длину неосновных носителей заряда в базе  $L_B$  (см. прил. 2.3). Зная подвижность, находят коэффициент диффузии неосновных носителей в базе

$$D_{БН} = \mu_{БН} \cdot \left( \frac{kT}{q} \right),$$

где  $\left( \frac{kT}{q} \right) = 39 \text{ В}^{-1}$  при комнатной температуре. Затем, используя найденное значение  $L_B$ , рассчитывают время жизни неосновных носителей в базе

$$\tau_B = \frac{L_B^2}{D_{БН}}$$

### **Определение размеров элементов транзисторной структуры**

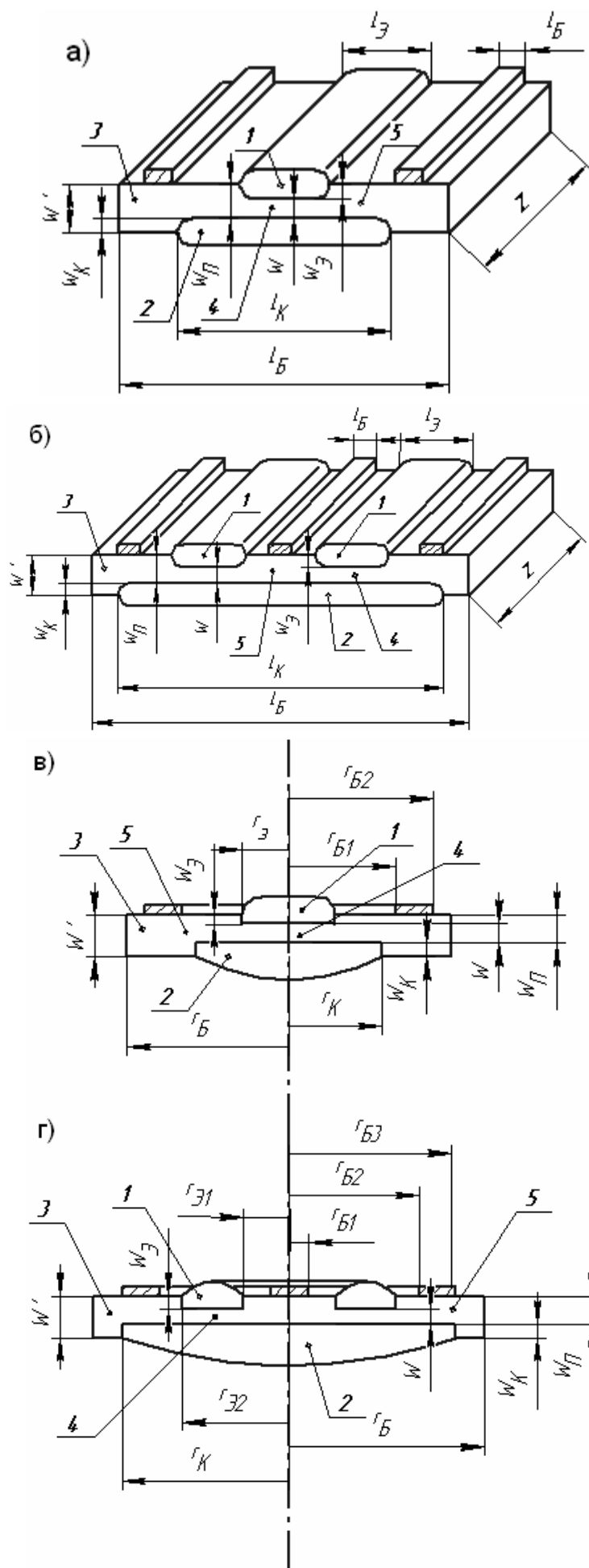
Площадь эмиттерного перехода оценивают по заданному току  $I_{К\max}$  и допустимой плотности прямого тока  $j_{ПР\max}$  через электронно-дырочный переход. Для прибора из германия  $j_{ПР\max} = 100 \text{ А/см}^2$ , из кремния -  $200 \text{ А/см}^2$ . Считая, что наибольший ток эмиттера  $I_{Э\max} = I_{К\max}$ , определяют нижний предел площади эмиттерного перехода [10]

$$S_{Э} \geq \left( \frac{I_{К\max}}{j_{ПР\max}} \right).$$

На рис. 4.4 приведены варианты структур сплавных транзисторов. Выбор топологии и линейных размеров эмиттера следует проводить с учетом эффекта вытеснения тока инжекции на периферию эмиттера [10]. В результате протекания базового тока на объемном сопротивлении базы возникает падение напряжения. Оно уменьшает прямое смещение той части эмиттера, которая наиболее удалена от базового контакта. В результате ток инжекции эмиттера смещается на его край, обращенный к базовому контакту. Принято считать, что эффективно работает лишь часть эмиттерного перехода шириной порядка диффузионной длины неосновных носителей в базе  $L_B$ .

Если в осесимметричной структуре радиус эмиттера по расчету оказался больше  $L_B$ , то следует выбрать структуру с кольцевым эмиттером, причем ширина кольца не должна превышать  $L_B$ . По тем же причинам в полосковой структуре переходят от одноэмиттерной к многоэмиттерной конструкции, при этом ширина эмиттерных полос выбирается меньшей, чем  $L_B$ .

Конфигурацию коллекторного перехода выбирают так, чтобы обеспечить наиболее полное собирание инжектированных в базу неосновных но-



сителей, не увеличивая при этом безмерно барьерную емкость коллекторного перехода. Обычно выбирают  $S_K \geq (2 - 3)S_Э$ .

Расчет толщины активной части базы проводят по заданной граничной частоте коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером. Частотная зависимость коэффициента передачи тока эмиттера  $\alpha$  приближенно описывается выражением [II]

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha}{1 + \frac{i\omega}{\omega_\alpha}}$$

Для сплавного транзистора основным процессом, определяющим его быстродействие, является диффузионное движение неосновных носителей через базу. Время

этого движения можно оценить по формуле

$$t_\theta = \omega_\alpha^{-1} = \frac{w^2}{2D_{BH}}$$

**Рис. 4.4.** Структуры сплавных транзисторов: полосковые с одним эмиттером (а); с двумя эмиттерами (б); осесимметричные с круглым эмиттером (в); с кольцевым эмиттером (г);

1 – эмиттер; 2 – коллектор; 3 – базовая пластинка; 4 – активная часть базы; 5 – пассивная часть базы.



Поскольку  $f_{ГР} = \frac{\omega_{\alpha}}{2\pi}$ , для оценки толщины активной части базы можно воспользоваться соотношением

$$w = \left( \frac{D_{БН}}{\pi f_{ГР}} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

Рассмотрение работы транзистора в активном режиме проводят на основе одномерной идеализированной теоретической модели [11]. Коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$  можно представить в виде произведения [6]:  $\alpha = \gamma \alpha_{п} M$ , где  $\gamma$  - коэффициент эффективности эмиттера,  $\alpha_{п}$  - коэффициент переноса неосновных носителей через базу,  $M$  - коэффициент лавинного умножения носителей в коллекторном переходе.

Коэффициент эффективности эмиттера показывает долю тока инжекции неосновных носителей в базу в полном токе через эмиттерный переход. Поскольку концентрация примесей в эмиттере на несколько порядков больше, чем в базе, на практике значение  $\gamma$  мало отличается от единицы и для инженерных расчетов можно полагать  $\gamma = 1$ . Если транзистор работает при относительно малом коллекторном напряжении, так что  $|U_{КБ}| < |U_{К проб}|$ , можно считать  $M = 1$ .

Коэффициент переноса  $\alpha_{п}$  характеризует рекомбинационные потери неосновных носителей в базе. Объемные потери учитываются выражением, полученным для одномерной идеализированной модели транзистора на постоянном токе

$$\alpha_{п} = 1 - \frac{1}{2} * \left( \frac{w}{L_{Б}} \right)^2$$

С учетом рекомбинации на поверхности базы коэффициент переноса может быть записан в виде [11]

$$\alpha_{п} = 1 - \frac{1}{2} * \left( \frac{w}{L_{Б}} \right)^2 - \frac{s S_p w}{S_{\Sigma} D_{БН}} \quad (4.2)$$

Скорость поверхностной рекомбинации  $s$  определяется материалом транзистора и технологией обработки поверхности. В германиевых транзисторах типичные значения  $s$  лежат в диапазоне от 50 до 500 см/с, в кремниевых - от 20 до 2000 см/с. В формуле (4.2)  $S_p$  - эффективная площадь поверхностной рекомбинации. Для сплавного транзистора принято считать [11], что  $S_p$  определяется площадью полосы, прилегающей к эмиттеру, шириной порядка толщины пассивной части базы  $w_{п} = w + w_{\Sigma}$ , поэтому

$$S_p = \Pi_{\Sigma} w_{п}, \quad (4.3)$$

где  $\Pi_{\Sigma}$  - периметр эмиттера. Формула (4.2) справедлива при выполнении условия  $s w_{п} \leq 0.2 * D_{БН}$ . При заданном значении  $s$  толщину базовой пластины следует выбирать так, чтобы это условие выполнялось, учитывая при этом, что глубина сплавления эмиттера и коллектора одинаковы  $w_{\Sigma} = w_{К}$ . Используя выражение для коэффициента  $\alpha_{п}$  (4.2), следует оценить толщину базы  $w$ , исходя из определенного заданием коэффициента передачи тока ба-

$$h_{213} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

если  $\alpha \approx \alpha_{\Pi}$ , то

$$\alpha_{\Pi} = 1 - \frac{1}{h_{213} + 1}. \quad (4.4)$$

Используя приведенное выше выражение для эффективной площади рекомбинации (4.3), для  $\alpha_{\Pi}$  запишем

$$\alpha_{\Pi} = 1 - Bw^2 - Aw(w + w_3), \quad (4.5)$$

где  $A = \frac{s_{\Pi 3}}{(S_3 D_{BH})}$ ,  $B = 0.5/L_B^2$ . Полученное выражение с учетом (4.4) легко преобразуется в квадратное уравнение относительно  $w$

$$(A + B)w^2 + Aww_3 - (h_{213} + 1)^{-1} = 0,$$

решая которое получим для толщины активной части базы

$$w = \frac{1}{2(A + B)} \left( -Aw_3 + \sqrt{A^2 w_3^2 + \frac{4(A + B)}{h_{213} + 1}} \right).$$

Рассчитав и построив зависимость  $w = f(w_3)$ , можно выбрать толщину активной части базы так, чтобы она согласовывалась с результатами выполненной ранее оценки  $w$  по значению граничной частоты.

Теперь следует выбрать толщину активной части базы так, чтобы граничная частота  $f_{гр}$  и параметр  $h_{213}$  были не меньше, чем их значения, указанные в задании. Поэтому  $w$  выбирают наименьшей из двух значений, полученных при этих оценках.

При выборе толщины активной части базы необходимо иметь в виду, что со стороны малых значений  $w$  также ограничена. В сплавных транзисторах со слаболегированной базой возможно смыкание эмиттерного и коллекторного переходов, при этом толщина коллекторного перехода простирается на всю толщину активной части базы. Поэтому при напряжении на коллекторе, равном напряжению смыкания переходов  $U_{смк}$ , можно записать приближенное соотношение [10]

$$U_{смк} \approx \frac{w^2 q N_B}{2 \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_0}$$

где  $q = 1.6 * 10^{-19}$  Кл - заряд электрона,  $\varepsilon_{\Pi}$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\varepsilon_0 = 8.85 * 10^{-14} \frac{\Phi}{см}$

Толщину активной части базы выбирают таким образом, чтобы напряжение смыкания переходов было несколько больше максимально Допустимого напряжения на коллекторном переходе  $U_{КБ max}$ :

$$w \geq \left( \frac{2 \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_0 (\varphi_K + |U_{КБ max}|)}{q N_B} \right)^{\frac{1}{2}}$$

При выборе толщины активной части базы сплавного транзистора следует также иметь в виду, что изготовление транзистора с толщиной активной части базы менее 20 мкм является трудно выполнимой технологической задачей.

После того, как сделан окончательный выбор толщины активной части базы  $w$ , следует уточнить соответствующие выбранному значению  $w$  граничную частоту  $f_{гр}$  по формуле (4.1) и коэффициент передачи тока базы  $h_{21э}$  по формулам (4.4), (4.5). Уточненные значения  $f_{гр}$  и  $h_{21э}$  - следует использовать для дальнейших расчетов.

### **Построение зонных энергетических диаграмм**

Для построения зонных энергетических диаграмм проектируемой транзисторной структуры необходимо рассчитать контактную разность потенциалов любого из  $p$ - $n$  переходов транзистора

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Ширина слоя объемного заряда резко несимметричного  $p$ - $n$  перехода определяется выражением

$$d = \left( \frac{2\varepsilon_{п}\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{qN_B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

Глубина залегания уровня Ферми  $E_F$  по отношению к середине запрещенной зоны  $E_i$  базового полупроводника биполярного транзистора может быть рассчитана по одной из формул

$$\frac{E_i - E_F}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

для полупроводника  $p$ -типа,

$$\frac{E_F - E_i}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}$$

для полупроводника  $n$ -типа.

При заданном токе эмиттера напряжение на эмиттерном переходе можно оценить из соотношения [12]

$$U_{эб} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_э w}{S_э q D_{БН} N_{БН}}$$

### **Расчет элементов физической эквивалентной схемы.**

Свойства транзистора - усилителя малого переменного сигнала в заданном режиме по постоянному току - принято описывать с помощью физической эквивалентной схемы. Расчет параметров эквивалентной схемы производят на основе анализа основных физических процессов, происходящих в транзисторе, с учетом схемы его включения. Будем рассматривать эквива-

лентную схему транзистора, включенного по схеме с общей базой и работающего в активном режиме.

Физическая эквивалентная схема транзистора в соответствии с идеализированной моделью [II] состоит всего из двух элементов: основным элементом эквивалентной схемы является генератор тока  $\alpha I_E$ . Он отражает перенос тока из эмиттерной цепи в коллекторную и усилительные свойства транзистора. Параллельно генератору тока  $\alpha I_E$  должно быть включено сопротивление коллектора  $r_K$ . По определению

$$r_K^{-1} = \left. \frac{\partial I_K}{\partial U_{KB}} \right|_{I_E = \text{const}}$$

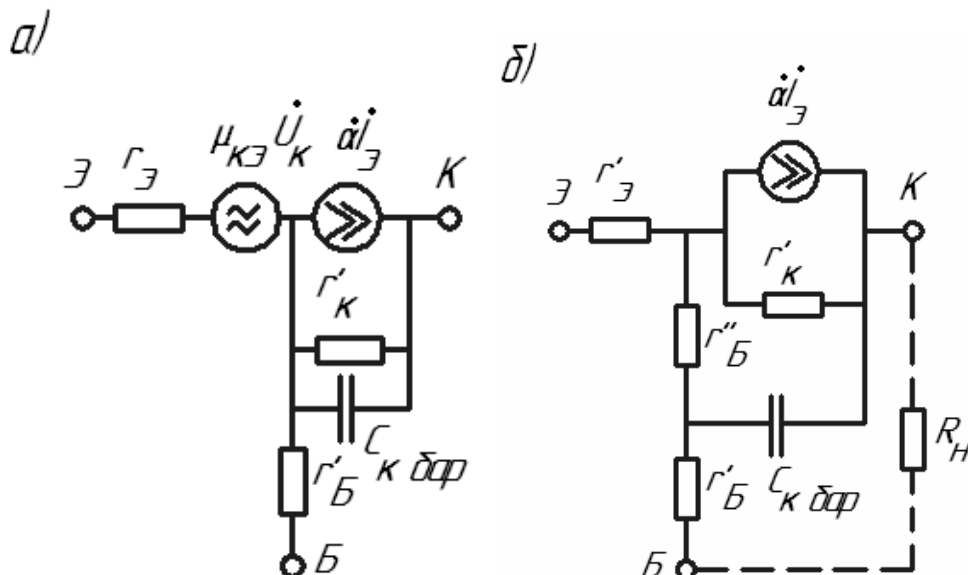
В идеализированном транзисторе ток коллектора  $I_K$  не зависит от коллекторного напряжения  $U_{KB}$ , поэтому  $r_K = \infty$  и этот элемент в эквивалентной схеме идеализированного транзистора отсутствует. Во входной цепи транзистора стоит сопротивление эмиттера  $r_E$ , которое представляет собой дифференциальное сопротивление открытого эмиттерного перехода. Используя выражение для входного тока

$$I_E = I_{E0} \left( \exp \frac{q U_{ЭБ}}{kT} - 1 \right)$$

для  $r_E$  можно получить

$$r_E = \left. \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial I_E} \right|_{U_{KB} = \text{const}} \approx \frac{kT}{q} \frac{1}{I_E}.$$

Переходя к эквивалентной схеме реального транзистора, приведенной



**Рис.4.5.** Эквивалентные схемы биполярного транзистора для малого переменного сигнала

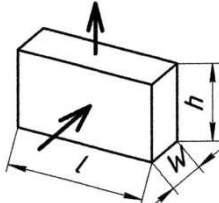
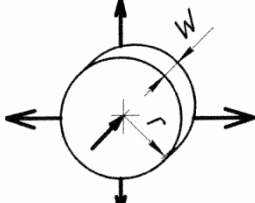
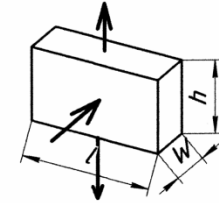
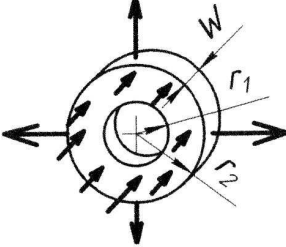
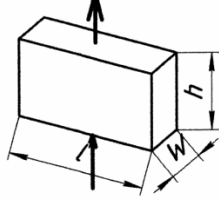
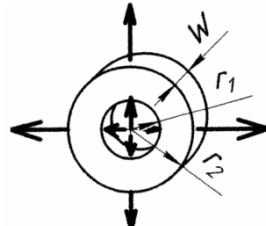
на рис. 4.5,а, отметим, что в реальных сплавных транзисторах необходимо учитывать объемное сопротивление слаболегированной базы  $r'_B$ . В идеализированной модели оно полагается бесконечно малым. В эквивалентной схеме реального транзистора это сопротивление является элементом обратной связи по напряжению входной и выходной цепей (см. рис. 4.5,а,б). По-

сколько базовый ток в основном определяется процессами рекомбинации неосновных носителей в базе, он протекает перпендикулярно основному диффузионному потоку неосновных носителей от эмиттера к коллектору. Базовый ток течет параллельно поверхностям эмиттерного и коллекторного  $p$ - $n$  переходов и замыкается через базовый вывод. Например, в осесимметричной структуре базовый ток течет радиально от центра структуры к базовому контакту на ее периферии.

При расчете  $r'_{\text{Б}}$  сложные конфигурации базовых областей разбивают на простые элементы, для которых легко рассчитать сопротивление для заданного направления протекания тока. Сопротивление  $r'_{\text{Б}}$  определяют как сумму сопротивлений нескольких участков простой геометрической формы, включенных последовательно вдоль направления протекания базового тока. В табл. 4.2. приведены результаты расчета объемного сопротивления  $r'_{\text{Б}}$  для простых геометрических форм; жирными стрелками указаны направления протекания базового тока.

Таблица 4.2

Геометрические формы элементов базовых областей

Конфигурация базовой области	Формула для $r'_{\text{Б}}$	Конфигурация базовой области	Формула для $r'_{\text{Б}}$
	$\frac{\rho h}{3wl}$		$\frac{\rho}{8\pi w}$
	$\frac{\rho h}{12wl}$		$\frac{\rho}{4\pi w} \ln \frac{r_2}{r_1}$
	$\frac{\rho h}{wl}$		$\frac{\rho}{2\pi w} \ln \frac{r_2}{r_1}$

В реальных транзисторах происходит модуляция толщины базы коллекторным напряжением: с увеличением обратного смещения на коллекторном переходе  $U_{\text{КБ}}$ , ширина слоя объемного заряда коллекторного перехода возрастает в основном за счет слаболегированной базы. На рис. 4.6 этот эффект проиллюстрирован на примере транзистора  $p$ - $n$ - $p$  типа. На этом

рисунке показано распределение концентрации неосновных носителей в базе в активном режиме работы транзистора (например, распределение 1).

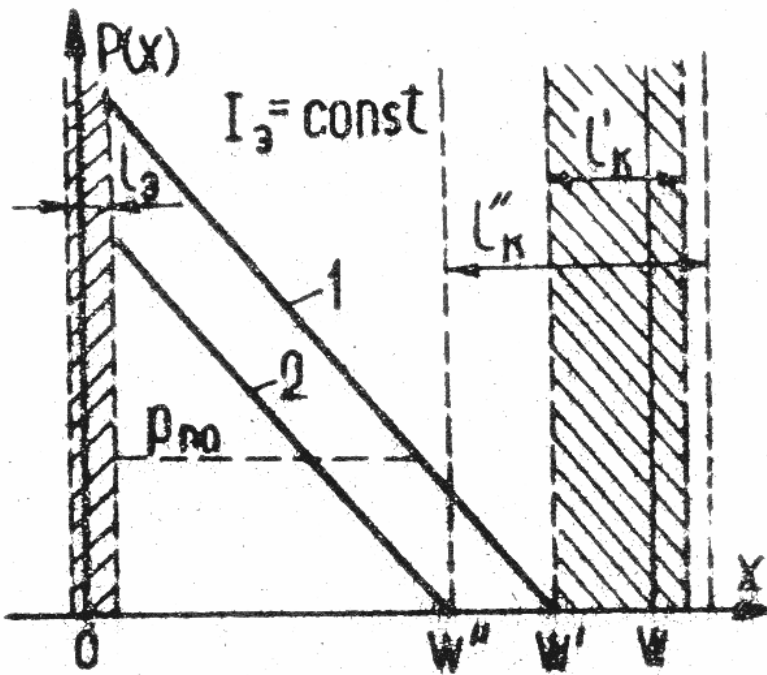


Рис. 4.6. Распределение концентрации неосновных носителей в базе р-п-р транзистора; распределение 1 соответствует напряжению  $U_{KB}$ , 2 – напряжению  $U_{KB}'$ ,  $|U_{KB}''| > |U_{KB}'|$

Эмиттер инжектирует в базу неосновные носители. Их граничная концентрация на эмиттерном переходе

$$p_n^B(x=0) = p_{n0}^B \exp \frac{qU_{ЭБ}}{kT} \quad (4.7)$$

Коллектор экстрагирует неосновные носители из базы, поэтому их граничная концентрация со стороны коллектора в базе  $p_n^B(x=w) = 0$ . Концентрация неосновных носителей спадает вдоль оси  $x$  по линейному закону [11]. Диффузионный поток неосновных носителей в направлении коллектора определяется градиентом их концентрации

$$I_3 = -qS_3 D_{БН} \text{grad } p_n^B(x) = -qS_3 D_{БН} \frac{p_n^B(x=0)}{w},$$

поэтому при постоянном токе эмиттера наклон распределения концентрации неосновных носителей в базе остается неизменным при любых коллекторных напряжениях. На рис. 4.6 видно, что рост обратного смещения на коллекторе приводит к сужению базы от  $w'$  до  $w''$ . Поскольку база сужается за счет расширения коллекторного перехода

$$\frac{\partial w}{\partial U_{KB}} \frac{\partial d_K}{\partial U_{KB}}.$$

Продифференцировав выражение для толщины коллекторного перехода (см. формулу (4.6)) по  $U_{KB}$ , при условии  $|U_{KB}| \gg \varphi_K$  получим

$$\frac{\partial w}{\partial U_{KB}} = - \frac{d_K}{2|U_{KB}|}. \quad (4.8)$$

Сужение базы под действием возрастающего коллекторного напряжения приводит к росту коэффициента переноса  $\alpha_n$  (см. формулу (4.2)) и к рос-



ту коллекторного тока

$$I_K = \alpha I_3 + I_{КБ0},$$

здесь  $I_{КБ0}$  - обратный ток коллекторного перехода при  $I_3 = 0$

Сопротивление коллектора  $r'_K$  реального транзистора вычисляют с учетом эффекта модуляции толщины базы коллекторным напряжением

$$(r'_K)^{-1} = I_3 \frac{\partial \alpha}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial U_{КБ}}.$$

Поскольку для сплавных транзисторов  $\alpha = \alpha_n$ , то  $\frac{\partial \alpha}{\partial w}$  на основании формулы (4.2) с учетом (4.3) можно записать

$$\frac{\partial \alpha}{\partial w} = - \left( \frac{w}{L_E^2} + \frac{s \Pi_3 (2w + w_3)}{S_3 D_{БН}} \right),$$

и окончательно,

$$(r'_K)^{-1} = \frac{I_3}{2|U_{КБ}|} \left( \frac{w}{L_E^2} + \frac{s \Pi_3 (2w + w_3)}{S_3 D_{БН}} \right).$$

В результате модуляции толщины базы коллекторным напряжением в транзисторе возникает отрицательная обратная связь по напряжению, что учитывается в эквивалентной схеме генератором напряжения  $\mu_{КЭ} \dot{U}_{КБ}$  в эмиттерной цепи (см. рис. 4.5, а). Возникновение отрицательной обратной связи по напряжению поясняет рис. 4.6. Сравнивая распределение концентрации неосновных носителей в базе для двух коллекторных напряжений при условии  $I_3 = \text{const}$ , легко видеть, что рост обратного смещения на коллекторе вызывает уменьшение граничной концентрации на эмиттерном переходе, и, следовательно, уменьшение эмиттерного напряжения.

Коэффициент обратной связи по напряжению можно представить в виде трех дифференциалов

$$\mu_{КЭ} = \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial U_{КБ}} \Big|_{I_3 = \text{const}} = \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial p_n^B(x=0)} \frac{\partial p_n^B(x=0)}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial U_{КБ}}$$

Находя из (4.7)

$$\frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial p_n^B(x=0)} = \frac{kT}{q} \left( p_n^B(x=0) \right)^{-1},$$

из подобия треугольников на рис. 4.6

$$\frac{\partial p_n^B(x=0)}{\partial w} = \frac{p_n^B(x=0)}{w},$$

а также используя (4.8), для  $\mu_{КЭ}$  можно окончательно получить

$$\mu_{КЭ} = - \frac{kT}{q} \frac{d_K}{w} \frac{1}{2|U_{КБ}|}.$$

Для описания этой обратной связи чаще вместо генератора напряжения в эмиттерной цепи включают сопротивление  $r''_Б$  в базовую цепь (см. рис. 4.5, б):

$$r''_Б = \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial I_K} \Big|_{I_3 = \text{const}} = - \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial U_{КБ}} \frac{\partial U_{КБ}}{\partial I_K} = - \mu_{КЭ} r'_K.$$

Замена генератора напряжения  $\mu_{КЭ} \dot{U}_{КБ}$  сопротивлением  $r''_Б$  в базовой цепи приводит к изменению сопротивления эмиттера. Его новое значение  $r'_Э$  можно определить, сравнив переменное входное напряжение  $\dot{U}_{ЭБ}$  для двух эквивалентных схем (рис.4.5,а,б) в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе  $\dot{U}_{КБ} = 0$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ЭБ} &= I_Э r'_Э + I_Э (1 - \alpha) r'_Б, \\ \dot{U}_{ЭБ} &= I_Э r''_Э + I_Э (1 - \alpha) (r'_Б + r''_Б).\end{aligned}$$

Из условия неизменности входного напряжения

$$r''_Э = r'_Э - r''_Б (1 - \alpha).$$

Барьерная емкость коллекторного перехода  $C_{К\text{ бар}}$  может быть рассчитана по формуле для резкого несимметричного перехода [12]

$$C_{К\text{ бар}} = \left( \frac{\varepsilon_n \varepsilon_0 q N_B}{2(\varphi_K + |U_{КБ}|)} \right)^{1/2}.$$

При работе транзистора в качестве усилителя малого сигнала на активную нагрузку (см. рис. 4.5,б) цепочка  $r'_Б C_{К\text{ бар}}$  шунтирует сопротивление нагрузки  $R$ . С ростом частоты шунтирующее действие возрастает, что приводит к снижению коэффициента усиления по мощности. Частота, на которой коэффициент усиления по мощности становится равным единице, называется максимальной частотой генерации

$$f_{max} = \sqrt{\frac{\alpha f_\alpha}{8\pi r'_Б C_{К\text{ бар}}}} = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{f_{гр}}{8\pi r'_Б C_{К\text{ бар}}}}$$

и является одним из параметров, характеризующих частотные свойства биполярного транзистора.

Расчет элементов физической эквивалентной схемы и максимальной частоты генерации следует выполнить в рабочей точке, определенной заданием, с учетом уточненных значений параметров  $f_{гр}$  и  $h_{21Э}$ .

### **Расчет выходных статических характеристик**

При проведении инженерных расчетов до сих пор предполагалось, что толщина активной части базы равна расстоянию  $W$  между металлургическими границами  $p$ - $n$  переходов эмиттера и коллектора (см. рис.4.4, 4.6). Однако, точнее определить толщину активной части базы как толщину электронейтральной базы, заключенной между слоями объемного заряда эмиттерного и коллекторного переходов (см. рис.4.6):  $w_B = W - d_K - d_E$ .

Для расчета выходных характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой, можно воспользоваться формулой

$$I_K = \alpha I_Э - I_{КБ0} \left( \exp \frac{q U_{КБ}}{kT} - 1 \right). \quad (4.9)$$

Обратный ток коллектора  $I_{КБ0}$  при отключенном эмиттере определяется экстракцией неосновных носителей из квазинейтральных областей, прилегающих к коллекторному переходу. Поскольку  $N_K \gg N_B$ , током экстракции неос-

новных носителей из коллекторной области можно пренебречь по сравнению с током экстракции из базы. Но при условии  $w_B \ll L_B$  коллекторный переход эффективно собирает все неосновные носители, возникшие в результате тепловой генерации в базе [12]. Скорость тепловой генерации неосновных носителей в базе  $N_{BH}/\tau_B$ , объем, в котором происходит тепловая генерация  $S_K w_B$ , поэтому

$$I_{KO} = S_K \frac{q N_{BH} w_B}{\tau_B} \quad (4.10)$$

С учетом процессов генерации носителей в коллекторном переходе

$$I_{KBO} = I_{KO} + I_{GK}, \quad (4.11)$$

а ток генерации  $I_{GK}$  рассчитывается по формуле [12]

$$I_{GK} = S_K \frac{q n_i d_K}{2 \tau_B} \quad (4.12)$$

Для расчета выходных статических характеристик проектируемого транзистора используется ЭВМ СМ 14-10. Программа " KURS4 " на ФОРТРАНЕ приведена в прил. 4. В программе толщина активной части базы  $w_B$  рассчитывается без учета изменения напряжения на эмиттерном переходе - ширина слоя объемного заряда на эмиттерном переходе при любом  $U_{ЭБ}$  полагается равной  $d_0$  (его ширине при  $U_{ЭБ} = 0$ )

$$w_B = w - d_K - d_0$$

Расчет характеристик проводится в предположении, что температура полупроводникового кристалла соответствует 300 К.

Алгоритм счета приведен в тексте программы (см. комментарий). Он базируется на формулах (4.2), (4.6), (4.9) - (4.13). Для выполнения расчета в машину следует ввести исходные данные (табл.4.3) .

Таблица 4.3

Исходные данные к расчету

Группа	Вводимая величина	Обозначение величины	Единица измерения	Обозначение в программе
I	Концентрация носителей в беспримесном полупроводнике	$n_i$	$\text{см}^{-3}$	NI
	Концентрация неосновных носителей заряда	$N_{BH}$	$\text{см}^{-3}$	NBH
	Время жизни неосновных носителей в базе	$\tau_B$	с	TAUB
	Диффузионная длина неосновных носителей в базе	$L_B$	см	LB
	Коэффициент диффузии неосновных носителей в базе	$D_{BH}$	$\text{см}^2/\text{с}$	DBH
II	Скорость поверхностной рекомбинации	S	$\text{см}/\text{с}$	S

	Площадь эмиттера	$S_э$	$\text{см}^2$	SE
	Площадь коллектора	$S_к$	$\text{см}^2$	SK
	Эффективная площадь поверхностной рекомбинации	$S_p$	$\text{см}^2$	SP
III	Толщина активной части базы	w	см	W
	Контактная разность потенциалов на $p$ - $n$ переходе	$\varphi_k$	В	FIK
	Ширина $p$ - $n$ перехода в отсутствие внешних напряжений	$d_0$	см	D

Все вводимые в машину величины разбиты на три группы. Численные значения величин каждой группы вводятся после соответствующего запроса программы.

Числа, используемые для расчета, действительного типа с удвоенной точностью. Исходные данные вводятся в экспоненциальной форме  $m \cdot 10^n$ , где  $m$  - мантисса, записанная с использованием десятичной точки,  $n$  - порядок числа. Пример: число 0,256 можно записать в виде 2.56D-1.

Кроме перечисленных, в программе также используются обозначения

в тексте	$U_{KB}$	$I_K$	$I_E$	$I_{KB0}$	$I_{K0}$	$I_{GK}$	$d_E$	$d_K$	$q$	$\alpha$
в программе	UKB	IK	IE	IKB0	IK0	IGK	DE	DK	Q	ALFA

При расчете статических характеристик независимой переменной является коллекторное напряжение  $U_{KB}$ , а параметром - ток эмиттера  $I_E$ . Набор эмиттерных токов, при которых рассчитываются выходные характеристики, составляет массив M. Он состоит из трех значений  $I_E$  в мА (  $M=3$  ).

Набор значений  $U_{KB}$ , при которых происходит расчет  $I_K$ , составляет массив N. В этот массив входят 15 значений  $U_{KB}$ : семь из них соответствуют активному режиму работы (в программе этому режиму соответствует  $U_{KB} > 0$ ); семь - режиму насыщения ( $U_{KB} < 0$ ); и  $U_{KB} = 0$  - граничное для этих режимов в схеме с общей базой. Массив N вводится в виде шага напряжения  $U_{KB}$  в сторону положительных значений ( ДП ) и шага в сторону отрицательных значений  $U_{KB}$  - ( ДМ )

Результаты расчета выводятся на печатающее устройство в виде таблицы.

## ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

За время курсового проектирования проводятся две контрольные проверки для обеспечения систематической работы студентов. Сроки контрольных проверок указаны в задании. К первой проверке студент должен выполнить объем работы в соответствии с пп.4.1 и 4.2, ко второй проверке - пп.4.3, 4.4. Результаты контрольных проверок заносятся на карту контроля и учитываются при выставлении итоговой оценки за курсовую работу.

Выполненная студентом курсовая работа представляется на проверку руководителю в срок, указанный в задании.

Защита курсовой работы проводится перед комиссией, назначенной заведующим кафедрой. При защите работы студент должен уметь обосновать выбор того или иного решения при проектировании прибора, понимать физический смысл расчетных формул и знать допущения, при которых справедливы эти формулы.

Курсовая работа оценивается по совокупности факторов: глубина знаний, продемонстрированных студентом при защите работы, объем и качество проделанной работы, систематичность работы, аккуратность оформления работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение об организации курсового проектирования в институте. /Под ред. В.И.Тимохина. ЛЭТИ.- Л., 1979.
2. ГОСТ 2.105-79 (СТ СЭВ 2667-80). Общие требования к текстовым документам. - Взамен ГОСТ 2.105-68. Введ. с 01.07.80. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - (ЕСКД).
3. ГОСТ 2.106-68. Текстовые документы. - Взамен ГОСТ 5295-60 в части разд. III; введ. с 01.01.74 - М.: Изд-во стандартов, 1985.- (ЕСКД).
4. ГОСТ 2.109-73 (СТ СЭВ 858-78, СТ СЭВ 1182-78, СТ СЭВ 4769-84). Основные требования к чертежам. - Введ. с 01.07.74. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - (ЕСКД)
5. ГОСТ 2.319-81 (СТ СЭВ 2824-80). Правила выполнения диаграмм. - Введ с 01.01.83. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - (ЕСКД).
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. /Пер. с англ. Под ред. Р. А. Суриса. - М.: Мир, 1984. - Т. I.
7. ТУ 48-4-293-74. Германий монокристаллический.
8. ТУ 48-4-295-74. Кремний монокристаллический.
9. Курносов А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. - М.: Высш. шк., 1975.
10. Чиркин Л.К., Миронов В.А., Юрченко Е.П. Расчет полупроводниковых приборов. ЛЭТИ. - Л, 1980.
11. Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов. - 2-е изд., перераб. и дополн. - М.: Энергия, 1971.
12. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. - М.: Высш. шк., 1987.



# 1. Основные электрофизические параметры германия и кремния

Полупроводник	Ширина запрещенной зоны при $T = 300 \text{ К}$ , эВ.	Концентрация носителей в беспримесном полупроводнике, $n_i, \text{см}^{-3}$	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_n$
Германий	0,67	$2,4 \cdot 10^{13}$	16,3
Кремний	1,12	$1,9 \cdot 10^{10}$	11,7

## 2. Монокристаллический германий

Германий монокристаллический производится в виде слитков с n-типом электропроводности (легированных сурьмой) и с р-типом (легированных галлием).

Примеры условного обозначения марок германия:

ГЭС 5 г1,

ГДТ 5 д5,

где Г- германий, Э или Д -тип электропроводности, С или Г - легированный сурьмой или галлием, 5 - номинал удельного сопротивления в  $\text{Ом} \cdot \text{см}$  (см. табл. II.2.3); г, д или другие буквы – разброс удельного сопротивления  $\rho$ , 1, 5 – значение плотности дислокаций.

Таблица II.2.1

### Номиналы удельного сопротивления

Интервал удельного сопротивления, $\text{Ом} \cdot \text{см}$	Шаг изменения номинала удельного сопротивления, $\text{Ом} \cdot \text{см}$
От 0,0001 до 0,001	Через 0,00005
От 0,001 до 0,01	Через 0,001
От 0,01 до 0,1	Через 0,05
От 0,1 до 1,0	Через 0,01
От 1,0 до 10	Через 0,5
Более 10	Через 1

Таблица II.2.2

Диффузионная длина неосновных носителей в германии

Удельное сопротивление, <b>Ом * см</b>	Диффузионная длина, мм, не менее	
	дырок	электронов
0,24 – 0,5	0,3	0,3
0,5 – 0,9	0,4	0,5
0,9 – 2,5	0,5	0,6
2,5 – 4,2	0,8	0,8
4,2 – 16,0	1,0	1,0
16,0 – 36,0	1,2	1,2
свыше 36	3,0	3,0

Таблица II.2.3

Параметры слитков монокристаллического германия

Интервал номиналов удельного сопротивления, <b>Ом * см</b>	Легирующая примесь	Разброс удельного сопротивления, %, не более					Плотность дислокаций, см <sup>-2</sup> , не более		
		а	б	в	г	д	1	5	6
0,003 – 0,01	Сурьма	-	20	-	15	-	<b>5 * 10<sup>4</sup></b>	-	-
0,01 – 0,1	Сурьма	-	20	-	15	-	<b>5 * 10<sup>4</sup></b>	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	-
0,1 – 6,0	Сурьма	-	20	-	15	-	-	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10
6,0 – 15,0	Сурьма	-	-	17,5	15	-	<b>5 * 10<sup>4</sup></b>	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10
15,0 – 45,0	Сурьма	25	20	-	15	-	-	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10
0,0001 – 0,001	Галлий	-	20	-	15	10	<b>5 * 10<sup>4</sup></b>	-	-
0,001 – 0,1	Галлий	-	20	-	15	10	<b>5 * 10<sup>4</sup></b>	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10
0,1 – 6,0	Галлий	-	20	-	15	10	-	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10
6,0 – 15,0	Галлий	-	20	-	15	10	-	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10
15,0 – 45,0	Галлий	-	20	-	15	10	-	<b>5 * 10<sup>3</sup></b>	10

### 3. Монокристаллический кремний

В современном производстве основным методом производства монокристаллического кремния общего назначения является метод Чохральского ( $\rho < 250 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Этим методом выращиваются слитки с n- и p- типом электропроводности.

Примеры условного обозначения марок кремния: 1А5 КДБ 7,5/0,1-40;  
1А 4 КЭФ 5/0,1-40,

где 1А – марка кремния, 4,5 или другая цифра – группа марок, К – кремний, Э или Д – тип электропроводности; 7,5 или другие цифры – номинал удельного сопротивления в **Ом \* см**. Диффузионная длина неосновных носителей заряда для всех марок кремния может превышать 0,1 либо 0,2 мм; минимальное значение диффузионной длины указано в маркировке цифрами,

стоящими после косой черты; Б, Ф – примесь бора или фосфора; диаметр слитка в мм.

Таблица II.3.1

Монокристаллический кремний общего назначения

Марка	Группа	Интервал удельного сопротивления, $\Omega \cdot \text{см}$	Разброс удельного сопротивления, %	Плотность дислокаций, $\text{см}^{-2}$	Легирующая примесь
1А	1	1 - 15	15	$10^3 - 2 \cdot 10^4$	Фосфор Бор
	2		15	$2 \cdot 10^3$	
	3		20	$10^3 - 2 \cdot 10^4$	
	4		20	$2 \cdot 10^3$	
	5		20	10	
	6		15	10	
2А	1	15 - 25	20	$10^3 - 2 \cdot 10^4$	Фосфор Бор
	2		15	$2 \cdot 10^4$	
	3		20	10	
2Б	1	25 - 40	20	$5 \cdot 10^4$	Фосфор
2В	1	40 - 75	20	$5 \cdot 10^4$	Фосфор
2Г	1	50 - 150	25	$5 \cdot 10^4$	Фосфор
2Д	1	100 - 250	30	$5 \cdot 10^4$	Фосфор

