

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Методические указания
по курсовому проектированию
по дисциплине ”Твердотельная электроника”

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
2013

УДК 621.328.3

Биполярный транзистор: методические указания по курсовому проектированию по дисциплине «Твердотельная электроника» для студентов очно-заочной и заочной форм обучения / сост.: С. М. Мовнин, А. Е. Синев. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 28 с.

Содержат краткие сведения по расчету электрофизических и геометрических параметров структуры низкочастотного биполярного транзистора.

Предназначены для студентов специальности 210105.65 «Электронные приборы и устройства» и направления 210100.62 «Электроника и нанoeлектроника». Могут быть также использованы при проведении практических занятий.

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний

ВВЕДЕНИЕ

В настоящих методических указаниях изложены основы расчёта параметров биполярного транзистора. Эта методика позволяет по заданным выходным параметрам прибора рассчитать его основные электрические и геометрические параметры.

Предполагается, что приступая к курсовому проектированию, студенты изучили предшествующие курсу дисциплины: «Физика твёрдого тела» (для студентов специальности 210105.65), «Физика конденсированного состояния» (для студентов направления 210100.62) и «Материалы электронной техники» и должны использовать лекционный материал по дисциплине «Твёрдотельная электроника», а так же рекомендованную литературу.

Конструкция биполярного транзистора, предложенная Шокли (рис. 1), как правило, содержит низколегированную полупроводниковую базовую область Б – 51, в которой формируются области эмиттера Э – 52 и коллектора К – 53, имеющие другой тип проводимости и более высокую степень легирования по сравнению с базовой.

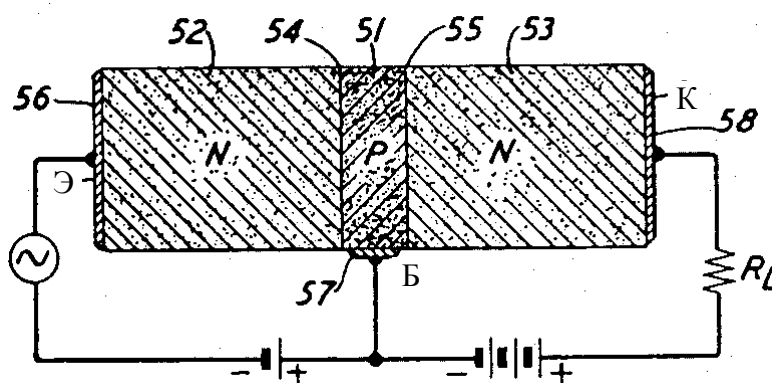


Рис. 1. Конструкция биполярного транзистора, запатентованная Шокли [1]

К каждой из областей припаиваются контакты (56, 57 и 58), таким образом, биполярный транзистор относится к классу трехэлектродных приборов. Толщина базы делается значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда.

Работа транзистора в активном режиме происходит в том случае, если эмиттерный переход (между эмиттером и базой) 54 включён в прямом направлении и через него протекает прямой ток, а коллекторный переход (между базой и коллектором) 55 включён в обратном направлении.

Выходной сигнал снимается со включённой в цепь коллектора нагрузки R_L .

Если ток через эмиттерный переход мал (прямое напряжение мало), в коллекторной цепи протекает малый ток обратносмещённого $p-n$ -перехода I_{K0} . Если напряжение на эмиттерном переходе увеличить, то протекающий через переход ток вызовет инжекцию неосновных носителей из эмиттера в базу, что приведёт к образованию в базе вблизи границы с эмиттером избыточной по сравнению с равновесной концентрации этих носителей. Под действием возникшего градиента концентрации неосновные носители начнут диффундировать в сторону коллекторного перехода. В процессе диффузии они будут рекомбинировать с основными носителями базы. При этом в базе образуется нескомпенсированный заряд, для нейтрализации которого через базовый контакт потекут основные носители, определяя тем самым ток базы. Те носители, которые достигнут границы коллекторного перехода, под действием поля будут втягиваться в коллектор, приводя к увеличению тока коллектора. Таким образом, при постоянном входном токе I_E через нагрузку протекает практически постоянный ток, равный сумме обратного тока коллекторного перехода I_{K0} и тока, обусловленного инжектированными через эмиттерный переход и прошедшими через базу носителями.

Три других режима работы получаются, когда оба перехода включены в обратном направлении (режим отсечки), оба перехода включены в прямом направлении (режим насыщения), и когда эмиттерный переход включён в обратном направлении, а коллекторный переход - в прямом (инверсный режим).

Помимо различных режимов работы различают три схемы включения транзистора в электрическую цепь, когда один из электродов оказывается общим для входного и выходного сигналов: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

В данной работе рассматривается включение транзистора по схеме с ОБ (рис. 1). Поскольку часть тока, проходящего через 54, на пути к коллектору теряется на рекомбинацию, превращаясь в ток базы, отношение коллекторного тока к току эмиттера оказывается меньше 1. Следовательно, амплитуда переменного тока на выходе меньше амплитуды тока на входе, т. е. коэффициент усиления по току в этой схеме чуть меньше 1. С другой стороны, роль входного сопротивления в схеме с ОБ играет малое сопротивление открытого (в активном режиме) эмиттерного перехода, и при незначительном измене-

нии входного напряжения изменение входного тока будет тоже незначительным. Малое изменение входного тока приведёт к почти такому же изменению выходного тока (коэффициент передачи эмиттерного тока близок к 1). Если при этом сопротивление нагрузки R_L выбрать достаточно большим, то даже малое изменение тока в выходной цепи приведёт к значительному изменению падения напряжения на нём, что и объясняет усиление сигнала как по напряжению, так и по мощности.

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, рассчитываются элементы физической эквивалентной схемы. Для этой же схемы включения проектируемого транзистора 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 максимально допустимой рассеиваемой мощности коллектора $P_{К\max}$.

УКАЗАНИЯ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ ВЫПОЛНЕНИЮ 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. Кроме того, он образует с исходным полупроводником базы эвтектический сплав.

На первом этапе формирования сплавного $p-n$ -перехода производят нагрев базовой пластины с навесками из электродного материала до температуры плавления эвтектики. На поверхности полупроводника при этом образуются связи между атомами твёрдого полупроводника базы и атомами расплавленного электродного материала, которые за счёт своего теплового движения вытягивают атомы полупроводника из кристалла. Происходит процесс растворения материала базы в расплаве навески. Охлаждение пластины приводит к рекристаллизации исходного полупроводника из раствора. При этом концентрация примеси в рекристаллизованной области определяется температурой сплавления $T_{\text{впл}}$ и предельной растворимостью легирующей примеси в исходном полупроводнике.

Таблица 1

Полупроводниковые электродные материалы, используемые
для изготовления сплавных биполярных транзисторов

Исходный полупроводник	Электродный материал	$t_{\text{впл}}, ^\circ\text{C}$	$N_{\text{Э}}, \text{см}^{-3}$
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	$1 \cdot 10^{21}$

В табл. 1 приведены некоторые часто используемые электродные материалы, соответствующие им температуры сплавления и концентрации при-

меси в рекристаллизованных областях эмиттера $N_{\text{Э}}$ и коллектора $N_{\text{К}}$, при этом $N_{\text{Э}} = N_{\text{К}}$.

Материал полупроводниковой структуры выбирают по заданной максимальной температуре коллекторного перехода $T_{\text{П}}$: принято считать, что электронно-дырочный переход из германия устойчиво работает до температуры 85 °С, а переход из кремния – до 125 °С. Тип электропроводности исходного

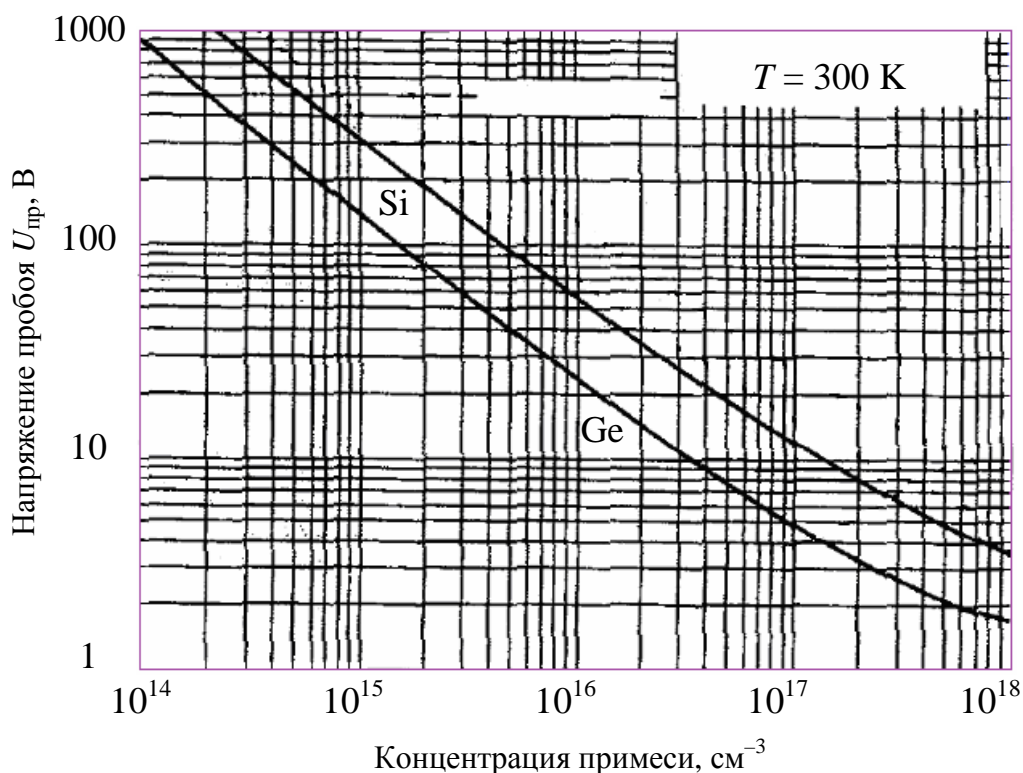


Рис. 2. Зависимость напряжения пробоя от концентрации примеси в слаболегированной базе.

материала (p или n) задается типом электропроводности базы рассчитываемого транзистора. Концентрацию примеси в базе выбирают исходя из заданного максимально допустимого напряжения $U_{\text{КБmax}}$ так, чтобы обеспечить пробивное напряжение перехода $U_{\text{проб}} = (1,3 - 2)U_{\text{КБmax}}$. Для резкого несимметричного сплавного перехода зависимость $U_{\text{проб}}$ от концентрации примеси в слаболегированной базе [2] приведена на рис. 2.

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

Необходимые для расчета сведения можно найти в прил. 1. Для определения подвижности $\mu_{\text{БН}}$ неосновных носителей заряда, можно воспользоваться данными, приведенными на рис. 3 [2].

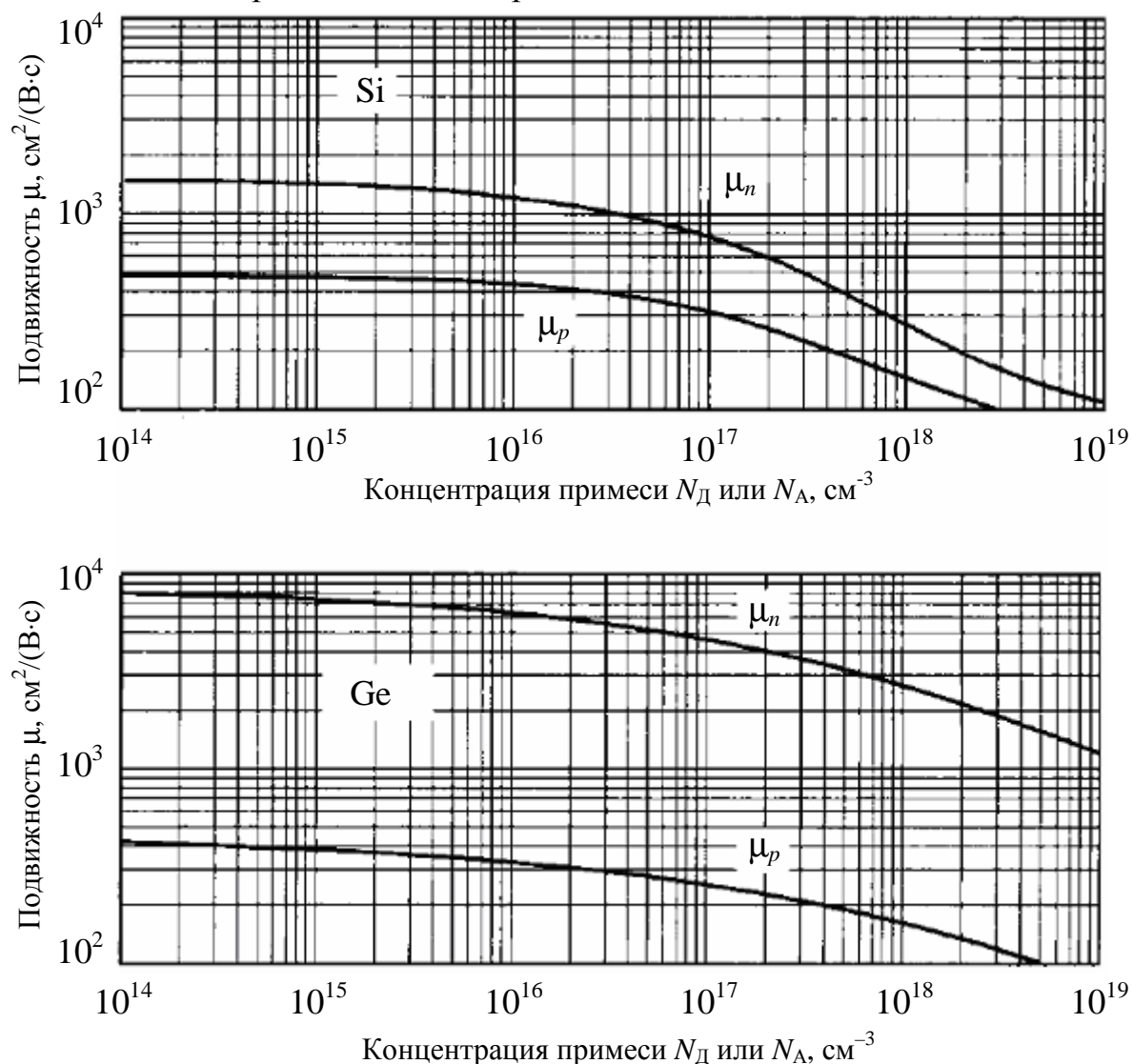


Рис. 3. Подвижности носителей в германии и кремнии в зависимости от концентрации примеси при $T = 300 \text{ K}$

Для заданного типа электропроводности базы можно определить удельное сопротивление $\rho_{\text{Б}}$, используя данные [2], приведенные на рис. 4.

При этом оно должно быть не менее значения, найденного графически.

По удельному сопротивлению выбирают марку полупроводника базы и определяют диффузионную длину неосновных носителей заряда в базе $L_{\text{Б}}$ (см. Табл. П.2.3). Зная подвижность, находят коэффициент диффузии неосновных носителей в базе:

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

где $\left(\frac{kT}{q} \right) = 39 \text{ В}^{-1}$ при комнатной температуре.

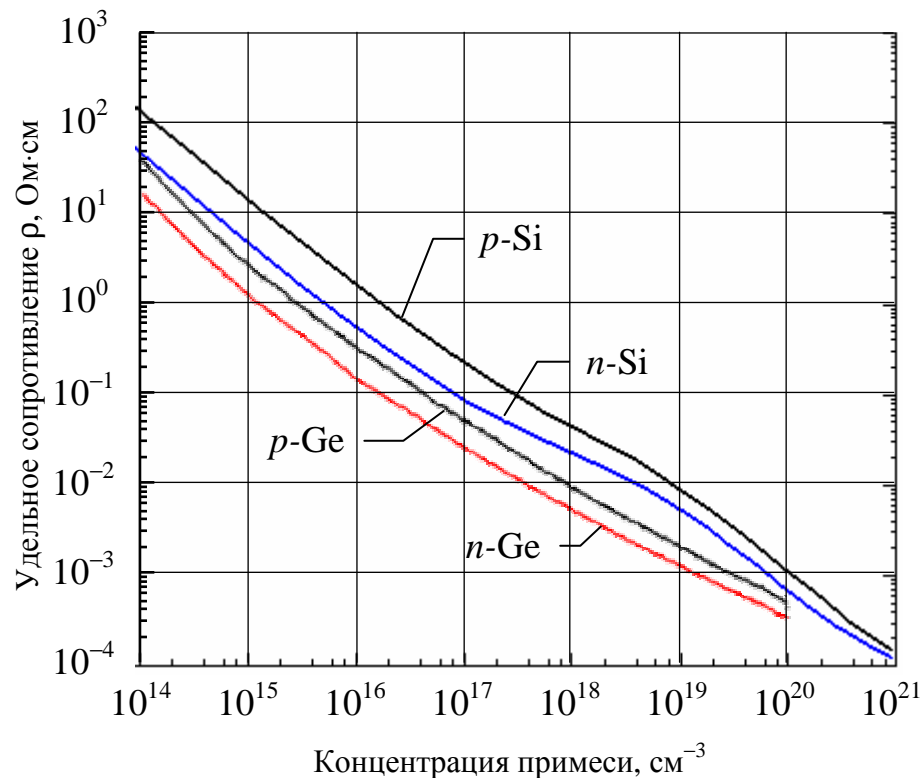


Рис. 4. Удельное сопротивление в германии и кремнии в зависимости от концентрации примеси при $T = 300 \text{ К}$

Затем, используя найденное значение $L_{\text{Б}}$, по формуле

$$\tau_{\text{Б}} = \frac{L_{\text{Б}}^2}{D_{\text{БН}}}$$

рассчитывают время жизни неосновных носителей в базе.

Определение размеров элементов транзисторной структуры

Площадь эмиттерного перехода оценивают по заданному току $I_{\text{К max}}$ и допустимой плотности прямого тока $j_{\text{пр max}}$ через электронно-дырочный переход. Для прибора из германия $j_{\text{пр max}} = 100 \text{ А/см}^2$, из кремния $j_{\text{пр max}} = 200 \text{ А/см}^2$. Считая, что наибольший ток эмиттера $I_{\text{Э max}} = I_{\text{К max}}$, определяют нижний предел площади эмиттерного перехода [3]:

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

На рис. 5 приведены варианты структур сплавных транзисторов. Выбор топологии и линейных размеров эмиттера следует проводить с учетом эффекта вытеснения тока инжекции на периферию эмиттера [3]. В результате протекания базового тока на объёмном 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 $L_{\text{Б}}$.

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

Конфигурацию коллекторного перехода выбирают так, чтобы обеспечить наиболее полное собирание инжектированных в базу неосновных носителей, не увеличивая при этом безмерно барьерную емкость коллекторного перехода. Обычно выбирают $S_{\text{Э}} \geq (2...3)S_{\text{К}}$.

Расчет толщины активной части базы проводят по заданной граничной частоте коэффициента передачи тока базы, т. е. по частоте, при которой модуль коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером становится равным 1 [4]. Частотная зависимость коэффициента передачи тока эмиттера α приближенно описывается выражением [4]

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

Для сплавного транзистора основным процессом, определяющим его быстродействие, является диффузионное движение неосновных носителей через базу. Время этого движения можно оценить по формуле [4]

$$t_{\text{дифф}} = \omega_{\alpha}^{-1} = \frac{w^2}{2D_{\text{БН}}}.$$

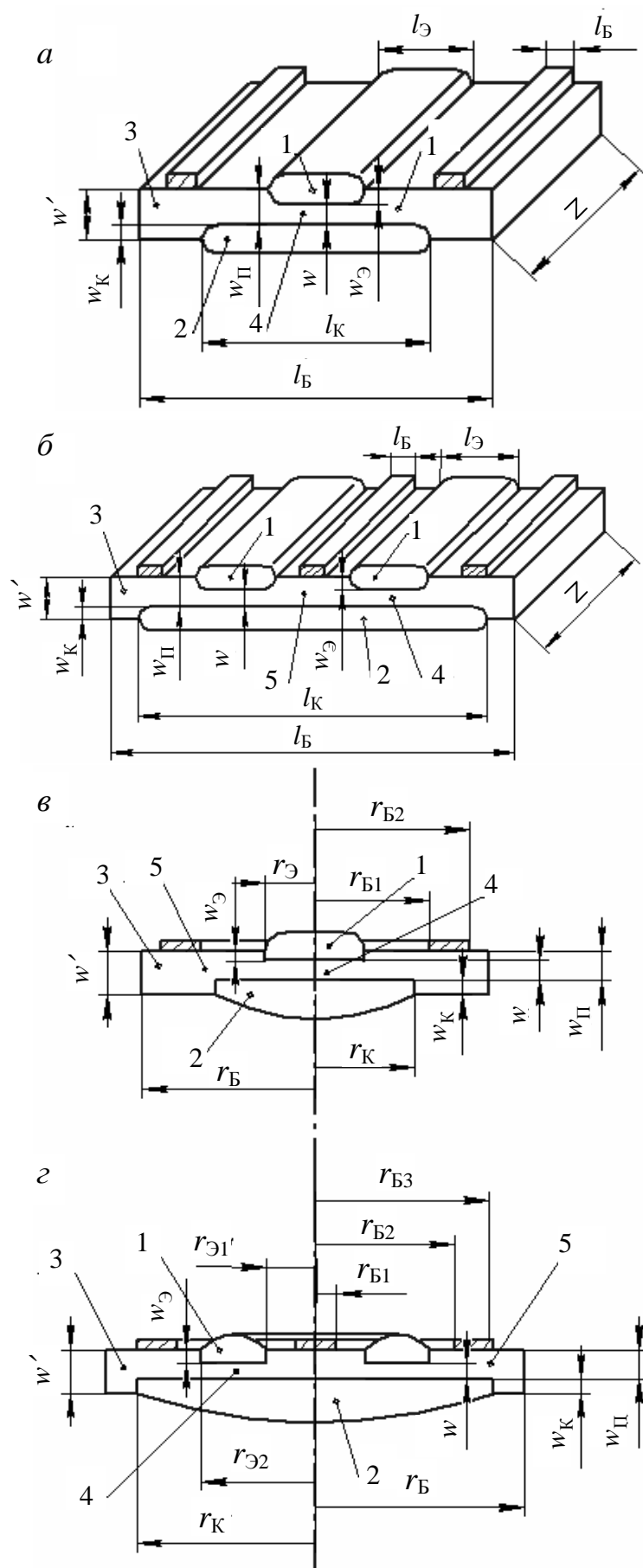


Рис. 5. Структуры сплавных транзисторов:

полосковые

а – с одним эмиттером,

б – с двумя эмиттерами,

осесимметричные

в – с круглым эмиттером,

г – с кольцевым эмиттером;

1 – эмиттер;

2 – коллектор;

3 – базовая пластинка;

4 – активная часть базы;

5 – пассивная часть базы.

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

$$w = \sqrt{\frac{D_{БН}}{\pi f_{гр}}} . \quad (1)$$

Рассмотрение работы транзистора в активном режиме проводят на основе одномерной идеализированной теоретической модели [4]. Коэффициент передачи тока эмиттера α можно представить в виде произведения [2]: $\alpha = \gamma \alpha_{п} M$, где γ – 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 γ 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. Объёмные 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 [4]:

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

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 (2) S_p – эффективная площадь поверхностной рекомбинации. Для сплавного транзистора принято считать [4], что S_p определяется площадью полосы, прилегающей к эмиттеру, шириной порядка

толщины пассивной части базы $w_{\Pi} = w + w_{\mathcal{O}}$, поэтому

$$S_p = \Pi_{\mathcal{O}} w_{\Pi}, \quad (3)$$

где $\Pi_{\mathcal{O}}$ – периметр эмиттера. Формула (2) справедлива при выполнении условия $sw_{\Pi} \leq 0,2D_{\text{БН}}$. При заданном значении s толщину базовой пластины следует выбирать так, чтобы данное условие выполнялось, учитывая при этом, что глубины сплавления эмиттера и коллектора одинаковы: $w_{\mathcal{O}} = w_{\text{К}}$. Используя выражение для коэффициента α_{Π} (2), следует оценить толщину базы w , исходя из определенного заданием коэффициента передачи тока базы

$$h_{21\mathcal{O}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

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

$$\alpha_{\Pi} = 1 - \frac{1}{h_{21\mathcal{O}} + 1}. \quad (4)$$

Используя выражение для эффективной площади рекомбинации (3), коэффициент переноса α_{Π} с учётом (2) можем записать в виде:

$$\alpha_{\Pi} = 1 - Bw^2 - Aw(w + w_{\mathcal{O}}), \quad (5)$$

где $A = \frac{s\Pi_{\mathcal{O}}}{S_{\mathcal{O}}D_{\text{БН}}}$, $B = 0,5/L_{\text{Б}}^2$. Из (4) и (5) легко получается в квадратное уравнение относительно w :

$$(A + B)w^2 + Aww_{\mathcal{O}} - (h_{21\mathcal{O}} + 1)^{-1} = 0,$$

решая которое определим толщину активной части базы

$$w = \frac{1}{2(A + B)} \left[-Aw_{\mathcal{O}} + \sqrt{A^2w_{\mathcal{O}}^2 + \frac{4(A + B)}{h_{21\mathcal{O}} + 1}} \right].$$

Рассчитав и построив зависимость $w = f(w_{\mathcal{O}})$, 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 $f_{\text{гр}}$ и параметр $h_{21\mathcal{O}}$ были не меньше, чем их значения, указанные в задании. Поэтому w выбирают наименьшей из двух значений, полученных при данных оценках.

При выборе толщины активной части базы необходимо иметь в виду, что со стороны малых значений w также ограничена. В сплавных транзисто-

рах со слаболегированной базой возможно смыкание эмиттерного и коллекторного переходов, причём толщина коллекторного перехода простирается на всю толщину активной части базы. Поэтому при напряжении на коллекторе, равном напряжению смыкания переходов $U_{\text{смк}}$, можно записать приближенное соотношение [3]

$$U_{\text{смк}} \approx \frac{w^2 q N_{\text{Б}}}{2 \epsilon_{\text{п}} \epsilon_0},$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $\epsilon_{\text{п}}$ – диэлектрическая проницаемость полупроводника, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

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

$$w \geq \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 (\phi_{\text{к}} + |U_{\text{КБ max}}|)}{q N_{\text{Б}}}}.$$

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 окончательный выбор толщины активной части базы w сделан, следует уточнить соответствующие выбранному значению w граничную частоту $f_{\text{гр}}$ по формуле (1) и коэффициент передачи тока базы $h_{21Э}$ по формулам (4), (5). Уточненные значения $f_{\text{гр}}$ 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

$$\phi_{\text{к}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{А}} N_{\text{Д}}}{n_i^2}.$$

Ширина слоя объемного заряда резко несимметричного p – n -перехода при подаче на него напряжения U определяется выражением

$$d = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\text{п}} \epsilon_0 (\phi_{\text{к}} - U)}{q N_{\text{Б}}}} \quad (6)$$

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 [4]:

$$U_{ЭБ} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{Э} w}{S_{Э} q D_{БН} N_{БН}}.$$

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 проводят на основе анализа основных физических процессов, происходящих в транзисторе, с учетом схемы его включения. Будем рассматривать эквивалентную схему транзистора, включенного по схеме с общей базой и работающего в активном режиме.

Физическая эквивалентная схема транзистора в соответствии с идеализированной моделью [4] состоит всего из двух элементов основным из которых является генератор тока $\alpha \dot{I}_{Э}$. Он отражает перенос тока из эмиттерной цепи в коллекторную и усилительные свойства транзистора. Параллельно генератору тока $\alpha \dot{I}_{Э}$ должно быть включено сопротивление коллектора r_K . По определению

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

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 $r_{Э}$, которое представляет собой диффе-

ренциальное сопротивление открытого эмиттерного перехода. Используя выражение для входного тока

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Э0}} \left(\exp \frac{qU_{\text{ЭБ}}}{kT} - 1 \right),$$

для $r_{\text{Э}}$ можно получить:

$$r_{\text{Э}} = \left. \frac{\partial U_{\text{ЭБ}}}{\partial I_{\text{Э}}} \right|_{U_{\text{КБ}} = \text{const}} \approx \frac{kT}{q} \frac{1}{I_{\text{Э}}}.$$

Переходя к эквивалентной схеме реального транзистора, приведенной на Рис. 6, а, отметим, что в реальных сплавных транзисторах необходимо учитывать объёмное сопротивление слаболегированной базы $r_{\text{Б}}'$. 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. 6, а, б). Поскольку 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

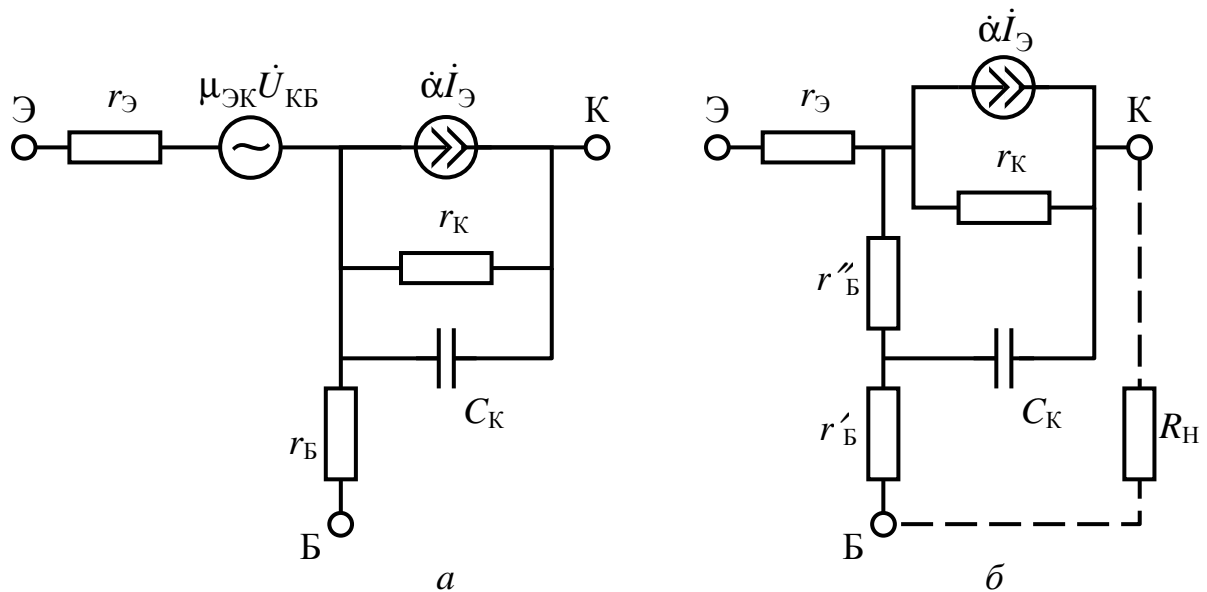


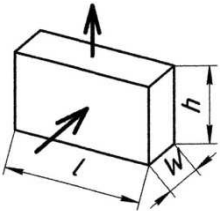
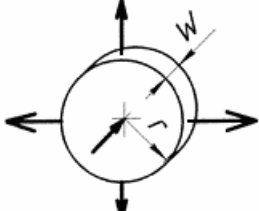
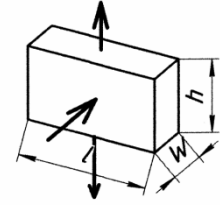
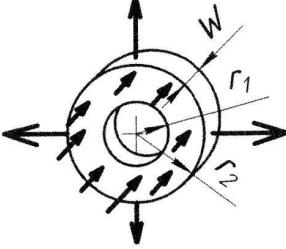
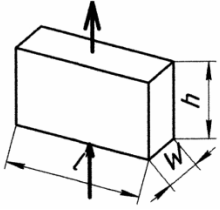
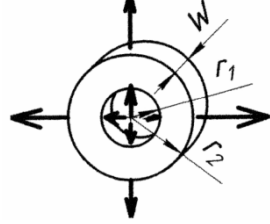
Рис. 6. Эквивалентные схемы биполярного транзистора для малого переменного сигнала

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 её периферии.

При расчете r'_B сложные конфигурации базовых областей разбивают на простые элементы, для которых легко рассчитать сопротивление для заданного направления протекания тока. Сопротивление r'_B определяют как сумму сопротивлений нескольких участков простой геометрической формы, включенных последовательно вдоль направления протекания базового тока. В табл. 2 приведены формулы для расчета объемного сопротивления r'_B для простых геометрических форм; жирными стрелками указаны направления протекания базового тока.

Таблица 2

Геометрические формы элементов базовых областей

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

В реальных транзисторах происходит модуляция толщины базы коллекторным напряжением: с увеличением обратного смещения на коллекторном переходе U_{KB} ширина слоя объемного заряда коллекторного перехода возрастает в основном за счет слаболегированной базы. На рис. 7 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).

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

$$p_{nБ}(x=0) = p_{nБ0} \exp \frac{qU_{ЭБ}}{kT}. \quad (7)$$

Коллектор экстрагирует неосновные носители из базы, поэтому их граничная концентрация со стороны коллектора в базе $p_{nБ}(x=w)=0$. В тонкой базе концентрация неосновных носителей спадает вдоль оси x по закону, близкому к линейному [4]. Диффузионный поток неосновных носителей в направлении коллектора определяется градиентом их концентрации

$$I_{Э} = -qS_{Э}D_{БН} \text{grad} p_{nБ}(x) = -qS_{Э}D_{БН} \frac{p_{nБ}(x=0)}{w},$$

поэтому при постоянном токе эмиттера наклон распределения концентрации неосновных носителей в базе остается неизменным при любых коллекторных напряжениях. На рис. 7 видно, что рост обратного смещения на коллекторе приводит к сужению базы от w до w' и далее до w'' . Поскольку база сужается за счет расширения коллекторного перехода, то

$$\frac{\partial w}{\partial U_{КБ}} = \frac{\partial d_{К}}{\partial U_{КБ}}.$$

Продифференцировав выражение для толщины коллекторного перехода (см. формулу (6)) по $U_{КБ}$, при условии $|U_{КБ}| \gg \phi_{К}$ получим

$$\frac{\partial w}{\partial U_{КБ}} = -\frac{d_{К}}{2|U_{КБ}|}. \quad (8)$$

Сужение базы под действием возрастающего коллекторного напряжения приводит к росту коэффициента переноса $\alpha_{П}$ (см. формулу (2)) и к росту коллекторного тока:

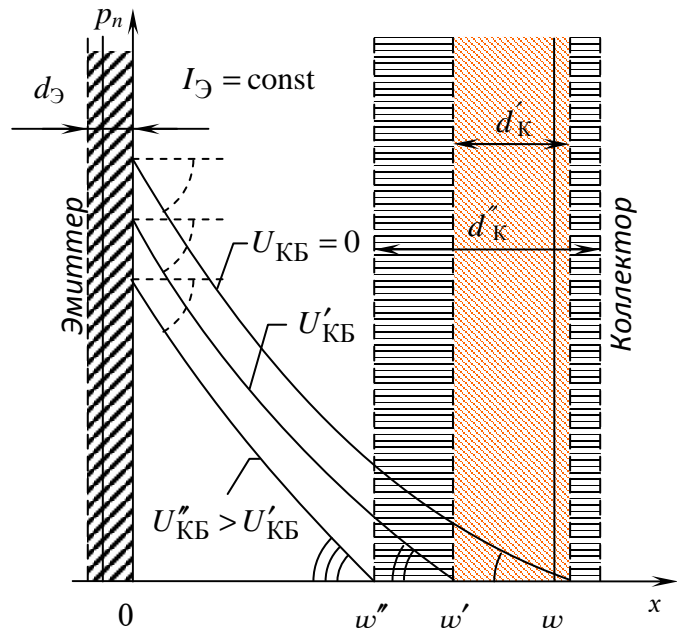


Рис. 7. Распределение концентрации неосновных носителей в базе $p-n-p$ -транзистора

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{O}} + I_{KB0},$$

здесь I_{KB0} – обратный ток коллекторного перехода при $I_{\mathcal{O}} = 0$.

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

$$\frac{1}{r'_K} = I_{\mathcal{O}} \frac{\partial \alpha}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial U_{KB}}.$$

Поскольку для сплавных транзисторов $\alpha = \alpha_{\Pi}$, то $\partial \alpha / \partial w$ на основании формулы (2) с учетом (3) можно записать как

$$\frac{\partial \alpha}{\partial w} = - \left[\frac{w}{L_B^2} + \frac{s \Pi_{\mathcal{O}} (2w + w_{\mathcal{O}})}{S_{\mathcal{O}} D_{BH}} \right],$$

и, окончательно,

$$\frac{1}{r'_K} = \frac{I_{\mathcal{O}}}{2|U_{KB}|} \left[\frac{w}{L_B^2} + \frac{s \Pi_{\mathcal{O}} (2w + w_{\mathcal{O}})}{S_{\mathcal{O}} D_{BH}} \right].$$

В результате модуляции толщины базы коллекторным напряжением в транзисторе возникает отрицательная обратная связь по напряжению, что учитывается в эквивалентной схеме генератором напряжения $\mu_{K\mathcal{O}} \dot{U}_{KB}$ в эмиттерной цепи (см. рис. 6, а). Возникновение отрицательной обратной связи по напряжению поясняет рис. 7. Сравнив распределение концентрации неосновных носителей в базе для двух коллекторных напряжений при условии $I_{\mathcal{O}} = \text{const}$, легко увидеть, что рост обратного смещения на коллекторе вызовет уменьшение граничной концентрации на эмиттерном переходе, и, следовательно, уменьшение эмиттерного напряжения.

Коэффициент обратной связи по напряжению можно представить в виде трех дифференциалов:

$$\mu_{K\mathcal{O}} = \left. \frac{\partial U_{\mathcal{O}B}}{\partial U_{KB}} \right|_{I_{\mathcal{O}} = \text{const}} = \frac{\partial U_{\mathcal{O}B}}{\partial p_{nB}(x=0)} \frac{\partial p_{nB}(x=0)}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial U_{KB}}.$$

Найдя из (7)

$$\frac{\partial U_{\mathcal{O}B}}{\partial p_{nB}(x=0)} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p_{nB}(x=0)},$$

из подобия треугольников на рис. 7

$$\frac{\partial p_{nB}(x=0)}{\partial w} = \frac{p_{nB}(x=0)}{w},$$

а также используя (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_B'' в базовую цепь (см. рис. 6, б):

$$r_B'' = \left. \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial I_K} \right|_{I_{Э}=\text{const}} = -\frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial U_{КБ}} \frac{\partial U_{КБ}}{\partial I_K} = -\mu_{КЭ} r_K'.$$

Замена генератора напряжения $\mu_{КЭ} \dot{U}_{КБ}$ сопротивлением r_B'' в базовой цепи приводит к изменению сопротивления эмиттера. Его новое значение r_E' можно определить, сравнив переменное входное напряжение $\dot{U}_{ЭБ}$ для двух эквивалентных схем (рис. 6, а, б) в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе $\dot{U}_{КБ} = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ЭБ} &= \dot{I}_{Э} r_E' + \dot{I}_{Э} (1 - \alpha) r_B', \\ \dot{U}_{ЭБ} &= \dot{I}_{Э} r_E'' + \dot{I}_{Э} (1 - \alpha) (r_B' + r_B''). \end{aligned}$$

Из условия неизменности входного напряжения

$$r_E'' = r_E' - r_B'' (1 - \alpha).$$

Барьерная емкость коллекторного перехода $C_{К\text{ бар}}$ может быть рассчитана по формуле для резкого несимметричного перехода [4]

$$C_{К\text{ бар}} = \sqrt{\frac{\epsilon_n \epsilon_0 q N_B}{2(\phi_K + |U_{КБ}|)}}.$$

При работе транзистора в качестве усилителя малого сигнала на активную нагрузку (см. рис. 6, б) цепочка $r_B' C_{К\text{ бар}}$ шунтирует сопротивление нагрузки R_H . С ростом частоты шунтирующее действие возрастает, что приводит к снижению коэффициента усиления по мощности. Частота, на которой коэффициент усиления по мощности становится равным 1, называется максимальной частотой генерации:

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

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 $f_{\text{гр}}$ 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. 5, 6). Однако более правильно в качестве толщины активной части базы использовать толщину её электронейтральной области, заключенной между слоями объемного заряда эмиттерного и коллекторного переходов (см. рис. 7):

$$w_B = w - d_K - d_E.$$

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

$$I_K = \alpha I_E - I_{KB0} \left(\exp \frac{qU_{KB}}{kT} - 1 \right) \quad (9)$$

Обратный ток коллектора I_{KB0} при отключенном эмиттере определяется экстракцией неосновных носителей из квазинейтральных областей, прилегающих к коллекторному переходу. Поскольку $N_K \gg N_B$, током экстракции неосновных носителей из коллекторной области можно пренебречь по сравнению с током экстракции из базы. Однако при условии $w_B \ll L_B$ коллекторный переход эффективно собирает все неосновные носители, возникшие в результате тепловой генерации в базе [4]. Скорость тепловой генерации неосновных носителей в базе N_{BH}/τ_B , объем, в котором происходит тепловая генерация $S_K w_B$, поэтому

$$I_{K0} = S_K \frac{qN_{BH}w_B}{\tau_B}. \quad (10)$$

С учетом процессов генерации носителей в коллекторном переходе

$$I_{KB0} = I_{K0} + I_{GK}, \quad (11)$$

а ток генерации I_{GK} рассчитывается по формуле [4]:

$$I_{GK} = S_K \frac{qn_i d_K}{2\tau_B}. \quad (12)$$

Для построения выходных статических характеристик проектируемого транзистора 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 $U_{ЭБ} = 0$):

$$w_B = w - d_K - d_0. \quad (13)$$

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

Алгоритм расчета базируется на формулах (2), (6), (9) – (13). Для выполнения расчета следует использовать исходные данные (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные к расчету

Группа	Вводимая величина	Обозначение	Единица измерения
I	Концентрация носителей в беспримесном полупроводнике	n_i	см^{-3}
	Концентрация неосновных носителей заряда	N_{BH}	см^{-3}
	Время жизни неосновных носителей в базе	τ_B	с
	Диффузионная длина неосновных носителей в базе	L_B	см
	Коэффициент диффузии неосновных носителей в базе	D_{BH}	$\text{см}^2/\text{с}$
II	Скорость поверхностной рекомбинации	S	см/с
	Площадь эмиттера	$S_{Э}$	см^2
	Площадь коллектора	S_K	см^2
	Эффективная площадь поверхностной рекомбинации	S_p	см^2
III	Толщина активной части базы	w	см
	Контактная разность потенциалов на p – n -переходе	Φ_K	В
	Ширина p – n -перехода в отсутствие внешних напряжений	d_0	см

Все используемые величины разбиты на три группы.

При расчете статических характеристик независимой переменной является коллекторное напряжение $U_{КБ}$, а параметром – ток эмиттера $I_{Э}$, для которого задаются три значения.

График должен содержать не менее 15 пар точек ($U_{КБ}$, $I_{К}$): семь из них соответствуют активному режиму работы ($U_{КБ} > 0$); семь – режиму насыщения ($U_{КБ} < 0$); и $U_{КБ} = 0$ – граничное напряжение для этих режимов в схеме с общей базой.

Графики можно строить с помощью любых программных средств (Excel, MathCad, MATLAB и др.)

ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

За время курсового проектирования проводятся две контрольные проверки для обеспечения систематической работы студентов. Сроки и содержание контрольных проверок указаны в задании. Их результаты 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 они справедливы.

Курсовая работа оценивается по следующей совокупности факторов: глубина знаний, продемонстрированных студентом во время защиты работы, объём и качество проделанной работы, систематичность работы, аккуратность в её оформлении.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

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

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).

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.

Список литературы

1. US Patent #02569347, September 25, 1951.
2. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 488 с.
3. Старосельский В. И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие. М.: Высш. образ.; Юрайт-издат, 2009. 463 с.
4. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов. 7-е изд., испр. СПб.: Изд-во «Лань», 2003. 480 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Основные электрофизические параметры германия и кремния

Таблица П.1

Материал	Ширина запрещенной зоны при $T = 300$ К, эВ	Концентрация носителей в беспримесном полупроводнике, n_i , см^{-3}	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{п}}$
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 p -типом (легированных галлием).

Примеры условного обозначения марок германия:

ГЭС 5 г1,

ГДГ 5 д5,

где первая буква Г обозначает германий; вторая буква Э (или Д) обозначает тип электропроводности; третья буква С (или Г) – легированный сурьмой или галлием; 5 – номинал удельного сопротивления, Ом·см (см. табл. П.2.3); г, д (или другие буквы) – разброс удельного сопротивления; 1, 5 – значение плотности дислокаций.

Таблица П.2.1

Номиналы удельного сопротивления германия

Интервал удельного сопротивления, Ом·см	Шаг изменения номинала удельного сопротивления, Ом·см
0,0001 ... 0,001	Через 0,00005
0,001 ... 0,01	Через 0,001
0,01 ... 0,1	Через 0,05
0,1 ... 1,0	Через 0,01
1,0 ... 10	Через 0,5
Более 10	Через 1

Таблица П.2.2

Диффузионная длина неосновных носителей в германии

Удельное сопротивление, Ом·см	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 П.2.3

Параметры слитков монокристаллического германия

Интервал номиналов удельного сопротивления, Ом·см	Легирующая примесь	Разброс удельного сопротивления, %, не более					Плотность дислокаций, см ⁻² , не более		
		а	б	в	г	д	1	5	6
0,003 ... 0,01	Сурьма	-	20	-	15	-	5·10 ⁴	-	-
0,01 ... 0,1		-	20	-	15	-	5·10 ⁴	5·10 ³	-
0,1 ... 6,0		-	20	-	15	-	-	5·10 ³	10
6,0 ... 15,0		-	-	17,5	15	-	5·10 ⁴	5·10 ³	10
15,0 ... 45,0		25	20	-	15	-	-	5·10 ³	10
0,0001 ... 0,001	Галлий	-	20	-	15	10	5·10 ⁴	-	-
0,001 ... 0,1		-	20	-	15	10	5·10 ⁴	5·10 ³	10
0,1 ... 6,0		-	20	-	15	10	-	5·10 ³	10
6,0 ... 15,0		-	20	-	15	10	-	5·10 ³	10
15,0 ... 45,0		-	20	-	15	10	-	5·10 ³	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 как с n -типом, так и с p -типом электропроводности.

Примеры условного обозначения марок кремния:

1А5 КДБ 7,5/0,1-40;

1А4 КЭФ 5/0,1-40,

где 1А – марка кремния; 4,5 (или другая цифра) – группа марок; К – кремний; Э (или Д) – тип электропроводности; Б, Ф – примесь бора или фосфора; 7,5 (или другие цифры) – номинал удельного сопротивления, Ом·см; цифры, стоящие после косой черты – минимальное значение диффузионной длины (диффузионная длина неосновных носителей заряда для всех марок кремния может превышать 0,1 либо 0,2 мм); цифры, стоящие после дефиса, – диаметр слитка, мм.

Таблица П.3

Монокристаллический кремний общего назначения

Марка	Группа	Интервал удельного сопротивления, Ом·см	Разброс удельного сопротивления, %	Плотность дислокаций, 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	$10^3 - 2 \cdot 10^4$	
	2		15	$2 \cdot 10^4$	
	3		20	10	
2Б	1	25 ... 40	20	$5 \cdot 10^4$	Фосфор
2В	1	40 ... 75	20	$5 \cdot 10^4$	
2Г	1	50 ... 150	25	$5 \cdot 10^4$	
2Д	1	100 ... 250	30	$5 \cdot 10^4$	

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	5
УКАЗАНИЯ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ	6
ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	23
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	24
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	24
ПРИЛОЖЕНИЯ	25

Редактор И. Б. Сенишева

Подписано к печати 28.02.13 Формат 60×84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman» Печ. л. 1,75.

Тираж 40 экз. Заказ

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5