

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Ульяновский государственный университет»

Инженерно-физический факультет высоких технологий

Кафедра радиофизики и электроники

С. Г. Новиков, С. В. Елисеева

Расчетные задания по дисциплине

**«Проектирование полупроводниковых
приборов»**

Учебно-методическое пособие

Ульяновск 2014

УДК 621.314:537.3

ББК 32.853.1

Н75

Печатается по решению Ученого совета
инженерно-физического факультета высоких технологий
Ульяновского государственного университета

Рецензенты:

кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
А. А. Черторийский;
кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры физического материаловедения ФГБОУ
ВПО «Ульяновский государственный университет»
И. О. Явтушенко

Новиков, С. Г.

**Н75 Расчетные задания по дисциплине «Проектирование
полупроводниковых приборов»:** учебно-методическое пособие /
С. Г. Новиков, С. В. Елисеева. – Ульяновск : УлГУ, 2014. – 76 с.

В учебно-методическом пособии приведены задания по расчету параметров и характеристик полупроводниковых структур, выполненных на основе *p-n*-переходов, предназначенные для самостоятельного выполнения студентами, изучающими физику, технику и технологии проектирования полупроводниковых приборов. Также в пособии представлены примеры расчетов полупроводниковых диодов, транзисторов и тиристоров.

Учебно-методическое пособие содержит 6 заданий.

Предназначено для студентов, изучающих курсы «Проектирование полупроводниковых приборов» и «Моделирование и автоматизированное проектирование полупроводниковых приборов и интегральных микросхем».

УДК 621.314:537.3

ББК 32.853.1

©Новиков С. Г., Елисеева С. В., 2014

©Ульяновский государственный университет, 2014

Оглавление

Предисловие	4
Задание № 1. Расчеты структуры и электрических параметров полупроводниковых сплавных выпрямительных диодов	6
Задание № 2. Расчет диффузионного выпрямительного диода	12
Задание № 3. Расчет СВЧ переключательного диода с $p-i-n$ -структурой	16
Задание № 4. Расчет бездрейфового биполярного транзистора	19
Задание № 5. Расчет дрейфового планарно-эпитаксиального $p-n-p$ -транзистора	31
Задание № 6. Расчет основных параметров тиристора	55
Заключение	61
Литература	62
Приложение А. Справочные графики и таблицы	63

Предисловие

Проектирование полупроводниковых приборов является сложной инженерной задачей, требующей фундаментальных знаний в области теории полупроводников [1–3], полупроводниковых приборов, в математике и вычислительной технике, в полупроводниковой технологии [4] и т. п.

Изучение дисциплины «Проектирование полупроводниковых приборов» кроме теоретической составляющей включает и практические занятия, направленные на приобретение конкретных методических и методологических знаний и навыков, необходимых при выполнении работ, связанных с проектированием полупроводниковых приборов.

Целью данного пособия является демонстрация примеров расчета параметров и характеристик полупроводниковых приборов, а также формулировка вариантных заданий для самостоятельного анализа и расчета.

Задания для семинарских занятий, представленные в данном пособии, связаны с частными случаями проектирования полупроводниковых приборов, включающими две группы расчетов [5].

Во-первых, по заданным электрическим параметрам и некоторым дополнительным условиям, например, диапазону рабочих температур, технологическому методу получения структуры и пр., требуется выбрать полупроводниковый материал, определить электрофизические свойства p - и n -областей, рассчитать геометрические размеры структуры и определить технологические режимы образования p - n -перехода [4].

Во-вторых, на основании заданной структуры прибора (характер распределения концентрации примеси, геометрические размеры p - и n -областей и т. д.) необходимо определить основные технологические режимы реализации такой структуры и электрические параметры p - n -перехода (напряжение пробоя, емкость и т. д.).

Также в пособии представлены примеры, в которых подробно рассмотрены методы и алгоритмы расчетов полупроводниковых диодов, транзисторов и тиристоров.

Необходимо подчеркнуть, что в процессе расчетов следует широко пользоваться справочными данными — таблицами, графиками, чтобы не вычислять известных величин.

Результатом выполнения заданий, представленных в пособии, является более глубокое понимание физических процессов, протекающих в полупроводниковых приборах, механизмов влияния технологических и конструктивных особенностей на параметры приборов, математических моделей и алгоритмов расчета параметров и характеристик различных приборов.

Кроме того, важным результатом выполнения представленных заданий являются приобретаемые навыки работы со справочным материалом, дополнительной технической литературой и документацией.

Задание № 1

Расчеты структуры и электрических параметров полупроводниковых сплавных выпрямительных диодов

Задано: геометрия кристалла – параллелепипед с квадратным основанием и толщиной базовой области w для каждого варианта, заданной в табл. 1.1; прямое падение напряжения $U_{пр}$; максимальное обратное напряжение $U_{обр.max}$; прямой допустимый ток $I_{пр.доп}$ и диапазон температур окружающей среды. Все параметры для каждого варианта заданы в табл. 1.1.

Определить или выбрать: исходный полупроводниковый материал; концентрацию примесей в p - и n -областях N_a и N_d ; равновесную концентрацию основных p_{p0} , n_{n0} и неосновных n_{p0} , p_{n0} носителей заряда; удельное сопротивление областей ρ_p , ρ_n ; марку полупроводникового материала и другие электрофизические параметры p - и n -областей; геометрические размеры кристалла – площадь основания A ; ширину ОПЗ p - n -перехода при $U_{обр.max}$; прямую и обратную ВАХ; конструкцию корпуса диода.

Рассмотрим пример расчета сплавного выпрямительного диода.

Задано: геометрия кристалла – параллелепипед с квадратным основанием и толщиной базовой области $w = 250$ мкм; прямое падение напряжения $U_{пр} \leq 0,8$ В; максимальное обратное напряжение $U_{обр.max} = 100$ В; прямой допустимый ток $I_{пр.доп} = 5$ А; диапазон температур окружающей среды от -60 до $+125$ °С.

Определить или выбрать: исходный полупроводниковый материал; концентрацию примесей в p - и n -областях N_a и N_d ; равновесную концентрацию основных p_{p0} , n_{n0} и неосновных n_{p0} , p_{n0} носителей заряда; удельное сопротивление областей ρ_p , ρ_n ; марку полупроводникового материала и другие электрофизические параметры p - и n -областей; геометрические размеры кристалла – площадь основания A ; ширину ОПЗ p - n -перехода

Варианты заданий

Параметр	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Толщина базовой области w , мкм	50	100	150	200	250	300	350
Прямое падение напряжения $U_{пр}$, В	$\leq 0,7$	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	$\leq 0,9$	$\leq 0,9$	$\leq 0,9$	$\leq 1,0$
Максимальное обратное напряжение $U_{обр.мах}$, В	50	70	100	130	150	150	200
Прямой допустимый ток $I_{пр.доп}$, А	3	4	5	6	7	8	10
Диапазон температур окружающей среды, °С	от -60 до +125	от -60 до +100	от -60 до +100	от -60 до +125			

при $U = U_{обр.мах}$; прямую и обратную ВАХ; конструкцию корпуса диода.

Порядок расчета

1. Определим вид полупроводникового материала. Для изготовления выпрямительных диодов используют германий и кремний. По заданному диапазону температур выбираем кремний, так как германий не обеспечивает работу при $+125$ °С.

2. Концентрацию примеси в слаболегированной базовой области диода определяем по напряжению пробоя, которое для обеспечения надежной работы прибора должно в 1,5–2 раза превышать $U_{обр.мах}$. Выбираем двукратный запас: $U_{проб} = 2U = U_{обр} = 200$ В. Так как сплавные p - n -переходы резкие, то по графику рис. А.1 находим $N = 1,8 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

Сплавные переходы на кремнии обычно получают вплавлением алюминия как акцепторной примеси. Поэтому базовая область и, соответственно, исходная пластина кремния должны иметь электропроводность n -типа. Концентрация донорной примеси в ней ($N_d = 1,8 \cdot 10^{15}$ см⁻³) соответствует

(согласно графику рис. А.2) [6] $\rho_n = 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Таким образом, для изготовления диода надо использовать кремний марки 1А КЭФ 2,5/0,1 с удельным сопротивлением $2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и диффузионной длиной $L_p = 0,01 \text{ см}$.

Концентрация примеси в p^+ -области определяется по кривой предельной растворимости алюминия в кремнии (рис. А.3). Для температуры сплавления $700 \text{ }^\circ\text{C}$ концентрация акцепторов $N_a = 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Согласно рис. А.2 удельное сопротивление p^+ -области $\rho_p = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Зная концентрацию основных носителей при $T = 293 \text{ К}$, определяем концентрацию неосновных носителей заряда согласно выражению и рис. А.4:

$$p_{n0} = n_i^2/n_{n0} = (1,6 \cdot 10^{10})^2/1,8 \cdot 10^{15} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$$

для n -области;

$$n_{p0} = (1,6 \cdot 10^{10})^2/9 \cdot 10^{18} = 28 \text{ см}^{-3}$$

для p -области.

Коэффициент диффузии дырок в кремнии $D_p = 12,5 \text{ см}^2/\text{с}$, электронов $D_n = 33 \text{ см}^2/\text{с}$. Для расчетов принимаем время жизни неосновных носителей $\tau_p = \tau_n$, и из соотношения $L_p = \sqrt{D_p\tau_p}$ находим $\tau_p = L_p^2/D_p = (0,01)^2/12,5 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 8 \text{ мкс}$.

Диффузионная длина электронов

$$L_n = \sqrt{D_n\tau_n} = \sqrt{33,6 \cdot 8 \cdot 10^{-8}} = 0,016 \text{ см}.$$

Подвижность электронов μ_n и дырок μ_p определяем по известной концентрации примесей N_d и N_a (см. рис. А.5): $\mu_n = 1300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $\mu_p = 40 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

3. Площадь кристалла определяем исходя из двух основных величин: допустимой плотности тока $J_{\text{доп}} = 10^2 \text{ А}/\text{см}^2$ и максимальной емкости. Так как емкость не задана, то учитываем только допустимую плотность тока $J_{\text{пр.доп}} = A \cdot J_{\text{доп}}$, отсюда

$$A = J_{\text{пр.доп}}/J_{\text{доп}} = 5/10^2 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2.$$

4. Ширину ОПЗ резкого p^+ - n -перехода для $U = U_{\text{обр.мах}}$ определяем по

формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{обр. max}}}{q \cdot N_{\text{д}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 100}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,8 \cdot 10^{15}}} = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

5. Вольт-амперная характеристика диода имеет вид

$$I = j_s A \left(e^{qU/kT} - 1 \right),$$

где плотность тока насыщения

$$j_s = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0}.$$

Так как $p_{n0} \geq n_{p0}$, то электронной составляющей плотности тока насыщения можно пренебречь, и тогда:

$$j_s = q n_i^2 \frac{D_p}{L_p} \cdot \frac{1}{N};$$

$$I_s = A \cdot j_s = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,6 \cdot 10^{10})^2 \frac{12,5}{0,01} \cdot \frac{1}{1,8 \cdot 10^{15}} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \approx$$

$$\approx 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ А.}$$

В реальных кремниевых диодах следует учесть составляющую обратного тока, обусловленную генерацией носителей в ОПЗ:

$$I_{RG}^- = q \frac{n_i \delta}{\tau} \text{ А.}$$

При $U = U_{\text{обр. max}}$ ток генерации

$$I_{RG}^- = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{10} \cdot 8,6 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-6}} \cdot 5 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 1,35 \cdot 10^{-8} \text{ А} = 13,5 \text{ нА.}$$

Таким образом, $I_{RG}^- \gg I_s$, и обратный ток зависит от напряжения по тому же закону, что и ширина ОПЗ:

$$I_{\text{обр}} = I_{RG}^- (U_{\text{обр. max}}) \sqrt{U_{\text{обр}}/U_{\text{обр. max}}}.$$

Прямая ветвь ВАХ определяется зависимостью

$$I_{\text{пр}} = j_s A e^{qU/kT} = 1,4 \cdot 10^{-12} e^{39U} \text{ при } T = 300 \text{ К.}$$

Некоторые значения напряжений и токов прямой и обратной ВАХ ветви ВАХ приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Прямая и обратная ВАХ

U, В	-100	-50	-10	-1	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8
I, А	$-1,35 \cdot 10^{-8}$	$-9,6 \cdot 10^{-9}$	$-4,3 \cdot 10^{-9}$	$-1,35 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	50,6

Как следует из табл. 1.2, $I_{\text{пр.доп}} = 5 \text{ А}$ достигается при $U_{\text{пр}} < 0,8 \text{ В}$, что удовлетворяет поставленному в задании требованию.

6. Конструкцию диода выбираем на основании значения теплового сопротивления

$$R_T = (T_{j \text{ max}} - T_{\text{окр}}) / P_{\text{max}}$$

Максимальная температура p - n -перехода кремниевых приборов $T_{j \text{ max}} = +175 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная температура окружающей среды задана: $T_{\text{окр}} = +125 \text{ }^\circ\text{C}$. Мощность, выделяемая в p - n -переходе:

$$P_{\text{max}} = I_{\text{пр.доп}} U_{\text{пр}} = 5 \cdot 0,8 = 4 \text{ Вт.}$$

Тепловое сопротивление диода $R_T = (175 - 125) / 4 = 12,5 \text{ К/Вт}$.

В табл. 1.3 приведены емкость, индуктивность и тепловое сопротивление корпусов полупроводниковых диодов. По тепловому сопротивлению и данным табл. 1.2 выбираем корпус типа 1-4а, применяемый для диодов типов Д214, Д215 с $R_T = 6,5 \text{ К/Вт}$. В таком корпусе температура p - n -перехода не превышает $T_{j \text{ max}} = T_{\text{окр}} + R_T P_{\text{max}} = 125 + 6,5 \cdot 4 = 151 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 1.3

Параметры корпусов полупроводниковых диодов

Тип корпуса	Конструкция	C , пФ	L , кГц	R_T , К/Вт
1-1а	Стеклоянная	0,1	1	900
1-1б		0,25	0,5	500
1-1в		0,24	28	150
1-2а	Металлостеклянная	0,3	0,6	230
1-2б		0,4	1	600
1-2в		0,15	0,3	850
1-3а	Металлическая	0,3	0,7	65
1-3б		0,5	0,5	165
1-3в		0,5	0,5	38
1-4а	Металлическая с винтом	1	0,3	0,5
1-4б		1	0,3	3
1-4в		0,5	0,3	3,3

Задание № 2

Расчет диффузионного выпрямительного диода

Задано: структура получена диффузией фосфора при постоянной поверхностной концентрации $N_{д0}$; материал исходной пластины ЗА КДБ 0,4/0,1; площадь p - n -перехода A ; толщина базовой области w ; глубина залегания p - n -перехода x_j ; прямое падение напряжения $U_{пр}$; максимальная окружающая температура $T_{окр}$. Для каждого варианта перечисленные параметры приведены в табл. 2.1.

Определить: основные технологические факторы получения диффузионного p - n -перехода: коэффициент диффузии D и время диффузии t фосфора; градиент концентрации примеси в p - n -переходе a ; напряжение пробоя $U_{проб}$; ширину ОПЗ при $U_{обр.мах} = 0,5U_{проб}$; барьерную емкость $C_{бар}$ при $U_{обр.мах}$; обратный ток через диод при $U_{обр.мах}$; прямой допустимый ток $I_{пр.доп}$; приемлемую конструкцию корпуса.

Рассмотрим пример расчета.

Задано: структура получена диффузией фосфора при постоянной поверхностной концентрации $N_{д0} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; материал исходной пластины ЗА КДБ 0,4/0,1; площадь p - n -перехода $A = 1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$; толщина базовой области $w = 200 \text{ мкм}$; глубина залегания p - n -перехода $x_j = 25 \text{ мкм}$; прямое падение напряжения $U_{пр} \leq 0,8 \text{ В}$; максимальная окружающая температура $T_{окр} = +125 \text{ }^\circ\text{С}$.

Определить: основные технологические факторы получения диффузионного p - n -перехода: коэффициент диффузии D и время диффузии t фосфора; градиент концентрации примеси в p - n -переходе a ; напряжение пробоя $U_{проб}$; ширину ОПЗ при $U_{обр.мах} = 0,5U_{проб}$; барьерную емкость $C_{бар}$ при $U_{обр.мах}$; обратный ток через диод при $U_{обр.мах}$; прямой допустимый ток $I_{пр.доп}$; приемлемую конструкцию корпуса.

Порядок расчета Для определения основных технологических фак-

Варианты заданий

Параметр	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Поверхностная концентрация $N_{д0}$, см^{-3}	$4 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$9 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{20}$	$8 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{19}$
Площадь p - n -перехода A , 10^{-2} см^2	1	2	1,5	1	2,5	2	4
Толщина базовой области w , мкм	50	100	150	200	250	300	350
Глубина залегания p - n -перехода x_j , мкм	15	20	25	30	25	20	15
Прямое падение напряжения $U_{пр}$, В	$\leq 0,7$	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	$\leq 0,9$	$\leq 0,9$	$\leq 0,9$	$\leq 1,0$
Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	+125	+100	+100	+125	+125	+125	+125

торов процесса диффузии необходимо знать закон распределения концентрации примеси. Воспользуемся следующей формулой:

$$N(x) = N_{д0} e^{-(kx+0,3)^2} - N_{д},$$

где $k = 1/2\sqrt{Dt}$.

На глубине залегания p - n -перехода $N_{д}(x_j) = N_{а}$ – концентрации акцепторной примеси в исходной пластине.

По графику рис. А.2 для $\rho_p = 0,4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ определяем $N_{а} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.
Для $x = x_j$ $N_{д}(x_j) = N_{д0} e^{-(kx_j+0,3)^2} = N_{а}$.

Согласно формуле в случае диффузии донорной примеси

$$k = 1/2\sqrt{Dt} = \frac{1}{x_j} \left(\sqrt{\ln \frac{N_{д0}}{N_{а}}} - 0,3 \right),$$

$$\begin{aligned} \text{т. е. } Dt &= \frac{x_j^2}{4\left(\sqrt{2,3 \lg(N_{д0}/N_a)} - 0,3\right)^2} = \\ &= \frac{(25 \cdot 10^{-4})^2}{4\left(\sqrt{2,3 \lg(3 \cdot 10^{20}/5 \cdot 10^{16})} - 0,3\right)^2} = 2,23 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2. \end{aligned}$$

1. Зададимся температурой диффузии. Оптимальный температурный диапазон составляет 1150-1250 °С. Выберем $T=1250$ °С, при этом коэффициент диффузии фосфора в кремнии определяем по графику А.6: $D = 8 \cdot 10^{-12}$ см²/с.

Длительность диффузии находим из соотношения $t = 2,23 \cdot 10^{-7}/D = 2,23 \cdot 10^{-7}/8 \cdot 10^{-12} \approx 2,8 \cdot 10^4$ с ≈ 7 ч 45 мин.

2. Для расчета градиента концентрации примеси в p - n -переходе используем формулу

$$\begin{aligned} a &= 2k(kx_j + 0,3)N_a = \\ &= \frac{2}{2\sqrt{2,23 \cdot 10^{-7}}} \left(\frac{25 \cdot 10^{-4}}{2\sqrt{2,23 \cdot 10^{-7}}} + 0,3 \right) \cdot 5 \cdot 10^{16} \approx 3,0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}. \end{aligned}$$

3. Напряжение пробоя плавного p - n -перехода определяется градиентом концентрации примеси. Для кремниевого p - n -перехода с линейным распределением примеси

$$\begin{aligned} U_{\text{проб}} &= 60 \left(\frac{\Delta E}{1,1} \right)^{1,2} \left(\frac{a}{3,0 \cdot 10^{20}} \right)^{-0,4} = \\ &= 60 \left(\frac{1,1}{1,1} \right)^{1,2} \left(\frac{3,0 \cdot 10^{20}}{3,0 \cdot 10^{20}} \right)^{-0,4} = 60 \text{ В}. \end{aligned}$$

4. Ширину ОПЗ для линейного перехода при $U_{\text{обр.мах}} = 0,5 \cdot U_{\text{проб}} = 30$ В находим по формуле

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{обр.мах}}}{q \cdot a}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 30}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,0 \cdot 10^{20}}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

5. При $U_{\text{обр}} = 30$ В барьерная емкость

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{\delta} = \frac{12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-4}} \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} = 50 \text{ пФ}.$$

Определим обратный ток через диод. Вследствие того что $N_a \ll N_d$, ток насыщения состоит из электронного тока:

$$\begin{aligned} I_s &= A \cdot j_s = q n_i^2 \frac{D_p}{L_p} \cdot \frac{A}{N_a} = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,6 \cdot 10^{10})^2 \frac{36}{0,01} \cdot \frac{10^{-2}}{5 \cdot 10^{16}} \approx 3 \cdot 10^{-14} \text{ А.} \end{aligned}$$

6. При $U_{\text{обр}} = 30 \text{ В}$ находим ток генерации, предварительно определив

$$\tau_0 = L_n^2 / D_n = (0,01)^2 / 36 = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 2,8 \text{ мкс.}$$

$$\begin{aligned} I_{RG}^- &= q \frac{n_i \delta}{\tau_0} A = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{2,8 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 1,9 \text{ нА.} \end{aligned}$$

Таким образом, I_{RG}^- преобладает, поэтому обратная ветвь ВАХ зависит от напряжения по тому же закону, что и ширина ОПЗ:

$$I_{\text{обр}} = I_{RG}^- (U_{\text{обр.мах}}) \sqrt{U_{\text{обр}} / U_{\text{обр.мах}}}.$$

7. Прямой допустимый ток $I_{\text{пр.доп}} = A \cdot j_{\text{доп}} = 10^2 \cdot 0,01 = 1 \text{ А}$.

8. Для выбора корпуса необходимо оценить максимальную мощность, выделяющуюся в кристалле полупроводника: $P_{\text{мах}} = I_{\text{пр.доп}} U_{\text{пр}} = 1 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ Вт}$.

Тепловое сопротивление диода $R_T = (T_{j \text{ мах}} - T_{\text{окр}}) / P_{\text{мах}} = (175 - 125) / 0,8 = 62,5 \text{ К/Вт}$.

В этом случае подходит корпус типа 1-Эв (см. табл. 1.3), применяемый для стабилитронов Д818 с $R_T = 38 \text{ К/Вт}$. Температура p - n -перехода в таком корпусе не превышает $T_{j \text{ мах}} = T_{\text{окр}} + R_T P_{\text{мах}} = 125 + 38 \cdot 0,8 = 155 \text{ }^\circ\text{С}$.

Задание № 3

Расчет СВЧ переключательного диода с $p-i-n$ -структурой

Задано: полупроводниковый материал – кремний; обратное напряжение $U_{обр}$; барьерная емкость $C_{бар}$; сопротивление i -области R_i для каждого варианта приведено в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Варианты заданий

Параметр	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Обратное напряжение $U_{обр}$, В	40	45	50	55	60	65	70
Барьерная емкость $C_{бар}$, пФ	3	4	5	6	7	8	9
Сопротивление i -области R_i , Ом	40	50	60	70	80	900	100

Определить: марку кремния для i -области; толщину i -области; площадь $p-i-n$ -структуры A ; прямой допустимый ток $I_{пр,доп}$; ток насыщения I_s и ток генерации I_{RG}^- при $U_{обр}$.

Рассмотрим пример расчета.

Задано: полупроводниковый материал – кремний; обратное напряжение $U_{обр} = 50$ В; барьерная емкость $C_{бар} = 1$ пФ; сопротивление i -области $R_i = 100$ Ом.

Определить: марку кремния для i -области; толщину i -области; площадь $p-i-n$ -структуры A ; прямой допустимый ток $I_{пр,доп}$; ток насыщения I_s и ток генерации I_{RG}^- при $U_{обр}$.

Порядок расчета 1. Выбираем кремний для i -области. Известно, что получить кремний с собственной электропроводностью невозможно из-за технологических трудностей. Поэтому используется высокоомный кремний. Выбор его удельного сопротивления определяется многими противоречивыми факторами. В частности, при уменьшении ρ снижается сопротивление i -области, но растет барьерная емкость. Для оптимизации значений $C_{бар}$ и R_i произведем математические преобразования.

Так как $C_{бар} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{w}$, а $R_i = \rho w / A$, то $\rho = AR_i / w$; $A / w = C_{бар} / \varepsilon_0 \varepsilon$ и $\rho = \frac{C_{бар} R_i}{\varepsilon_0 \varepsilon} = 1 \cdot 10^{-12} \cdot 100 / 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} = 94 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Вследствие более высокой технологичности и во избежание каналообразования выбираем кремний n -типа электропроводности. При таком удельном сопротивлении подвижность электронов максимальна: $\mu_n = 1500 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$. Концентрация донорной примеси

$$N_d = \frac{1}{q \cdot \rho_n \cdot \mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 94 \cdot 1500} = 4,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

Выбираем кремний марки КЭ2Г, для которого диффузионная длина $L_p \approx 0,2 \text{ мм}$, время жизни носителей $\tau_p = L_p^2 / D_p = (0,02)^2 / 12,5 = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 32 \text{ мкс}$.

2. Толщину i -области определяем по заданному значению $U_{обр}$, которое должно иметь примерно двукратный запас относительно напряжения пробоя, т. е. $U_{проб} = 2U_{обр} = 100 \text{ В}$.

В идеальной p - i - n -структуре все поле сосредоточено в i -области, поэтому напряжение пробоя определяется произведением максимальной напряженности электрического поля при пробое ($E_{max} = 2 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ для кремния) на толщину i -области. Исходя из этого определяем

$$w = \frac{U_{проб}}{E_{max}} = \frac{100}{2 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 5 \text{ мкм}.$$

Реальная структура вместо i -области содержит n -область, поэтому полученное значение $w = 5 \text{ мкм}$ следует уточнить. Для достижений малых значений последовательного сопротивления диода в обратном включении используют режим прокола базы, при котором ширина ОПЗ равняется ширине i -области. Ширина ОПЗ резкого p^+ - n -перехода

$$\begin{aligned}\delta &= \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{обр}}}{q \cdot N_{\text{д}}}} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 50}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,4 \cdot 10^{13}}} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 39 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Таким образом, при $\delta = 5$ мкм режим прокола будет выдержан. Принимаем $w = \delta \approx 5$ мкм.

3. Площадь p - i - n -структуры определим исходя из значения барьерной емкости $C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{w}$, откуда

$$A = \frac{w C_{\text{бар}}}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{1 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14}} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2.$$

4. Прямой допустимый ток

$$I_{\text{пр.доп}} = A \cdot J_{\text{доп}} = 10^2 \cdot 4,7 \cdot 10^{-4} = 0,047 \text{ А} = 47 \text{ мА}.$$

5. Ток насыщения будет в основном дырочным. Так как $L_p > w$, то в расчетную формулу вместо L_p подставляем w , тогда

$$\begin{aligned}I_s &= A \cdot j_s = q n_i^2 \frac{D_p}{w} \cdot \frac{A}{N_{\text{д}}} = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,6 \cdot 10^{10})^2 \frac{12,5}{4,4 \cdot 10^{13}} \cdot \frac{4,7 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-4}} = 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ А}.\end{aligned}$$

Ток генерации в ОПЗ при $U_{\text{обр}} = 50$ В

$$\begin{aligned}I_{RG}^- &= q \frac{n_i w}{\tau_0} A = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{10} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 4,7 \cdot 10^{-4}}{3,2 \cdot 10^{-5}} = 1,9 \cdot 10^{-11} \text{ А} = 19 \text{ пА}.\end{aligned}$$

Отметим, что при $U_{\text{обр}} = 50$ В ток генерации остается практически неизменным, так как ширина ОПЗ остается равной ширине i -области.

Задание № 4

Расчет бездрейфового биполярного транзистора

Задано: 1. Электрофизические параметры слоев полупроводника: концентрация легирующей примеси в эмиттере $N_{\text{Э}}$, в базе $N_{\text{Б}}$ и в коллекторе $N_{\text{К}}$; время жизни неосновных носителей заряда в указанных областях транзистора; скорость поверхностной рекомбинации на свободной поверхности базы транзистора s .

2. Геометрические размеры структуры: толщина активной области базы $\omega_{\text{б}}$, глубина залегания эмиттерного $\omega_{\text{э}}$ и коллекторного $\omega_{\text{к}}$ p - n -переходов; радиусы эмиттера $R_{\text{э}}$, коллектора $R_{\text{к}}$ и внутренний радиус кольцевого базового электрода $R_{\text{б}}$.

3. Рабочее напряжение на коллекторе $U_{\text{К}} = -5$ В, ток эмиттера $I_{\text{Э}} = 1$ мА.

4. Температура $T = 300$ К.

Для каждого варианта перечисленные параметры приведены в табл. 4.1.

Определить: 1. Электрофизические параметры слоев транзисторов: подвижность, коэффициент диффузии и диффузионные длины неосновных носителей заряда, подвижность основных носителей заряда и удельное электрическое сопротивление слоев.

2. Параметры эквивалентной схемы транзистора для большого сигнала.

3. Параметры физической Т-образной эквивалентной схемы и h -параметры транзистора с общей базой и общим эмиттером.

4. Основные и справочные электрические параметры транзистора.

5. Максимально допустимые параметры транзистора.

Рассмотрим пример расчета германиевого сплавного p - n - p -транзистора. Структура, топология и обозначения геометрических размеров транзистора представлены на рис. А.7а.

Варианты заданий

Параметр	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Концентрация легирующей примеси в эмиттере $N_{\text{Э}}, 10^{19} \text{ см}^{-3}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Концентрация легирующей примеси в базе $N_{\text{Б}}, 10^{15} \text{ см}^{-3}$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Концентрация легирующей примеси в коллекторе $N_{\text{К}}, 10^{19} \text{ см}^{-3}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Время жизни ННЗ в эмиттере, 10^{-9} с	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9
Время жизни ННЗ в базе, 10^{-6} с	27	28	29	30	31	32	33
Время жизни ННЗ в коллекторе, 10^{-9} с	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9
Скорость поверхностной рекомбинации $s, \text{ см} \cdot \text{ с}^{-1}$	320	330	340	350	360	370	380
Толщина активной области базы $\omega_{\text{Б}}, 10^{-4} \text{ см}$	27	28	29	30	31	32	33
Глубина залегания эмиттерного p - n -перехода $\omega_{\text{Э}}, 10^{-4} \text{ см}$	47	48	49	50	51	52	53
Глубина залегания коллекторного p - n -перехода $\omega_{\text{К}}, 10^{-4} \text{ см}$	67	68	69	70	71	72	73
Радиус эмиттера $R_{\text{Э}}, 10^{-4} \text{ см}$	222	223	224	225	226	227	228
Радиус коллектора $R_{\text{К}}, 10^{-4} \text{ см}$	322	323	324	325	326	327	328
Внутренний радиус кольцевого базового электрода $R_{\text{Б}}, \text{ см}$	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13

Задано: 1. Электрофизические параметры слоев полупроводника: концентрация легирующей примеси в эмиттере $N_{\text{Э}}$, в базе $N_{\text{Б}}$ и в коллекторе $N_{\text{К}}$; время жизни неосновных носителей заряда в указанных областях тран-

зистора; скорость поверхностной рекомбинации на свободной поверхности базы транзистора s .

2. Геометрические размеры структуры: толщина активной области базы ω_6 , глубина залегания эмиттерного $\omega_э$ и коллекторного $\omega_к$ p - n -переходов; радиусы эмиттера $R_э$, коллектора $R_к$ и внутренний радиус кольцевого базового электрода $R_б$.

3. Рабочее напряжение на коллекторе $U_к = -5$ В, ток эмиттера $I_э = 1$ мА.

4. Температура $T = 300$ К.

Электрофизические параметры и геометрические размеры транзистора сведены в табл. 4.2. Здесь приняты обозначения: ННЗ – неосновные носители заряда; ОНЗ – основные носители заряда.

Таблица 4.2

Электрофизические и геометрические параметры структуры транзистора

Параметры структуры	Эмиттер p -типа	База n -типа	Коллектор p -типа
Концентрация легирующей примеси, см^{-3}	$1,3 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{19}$
Концентрация ННЗ, см^{-3}	$3,08 \cdot 10^7$	$2,63 \cdot 10^{11}$	$3,08 \cdot 10^7$
Подвижность ОНЗ, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	210	3700	210
Подвижность ННЗ, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	370	1800	370
Коэффициент диффузии ННЗ, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	9,55	46,4	9,55
Время жизни ННЗ, с	$16,6 \cdot 10^{-9}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$16,6 \cdot 10^{-9}$
Длина диффузии ННЗ, см	$3,98 \cdot 10^{-4}$	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$3,98 \cdot 10^{-4}$
Скорость поверхностной рекомбинации, $\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$	-	350	-
Удельное сопротивление слоя, Ом·см	$2,29 \cdot 10^{-3}$	1,13	$2,29 \cdot 10^{-3}$
Толщина слоя, см	$50 \cdot 10^{-4}$	$30 \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$
Радиус p - n -перехода или электрода, см	$225 \cdot 10^{-4}$	0,1	$325 \cdot 10^{-4}$

Определить: 1. Электрофизические параметры слоев транзисторов: подвижность, коэффициент диффузии и диффузионные длины неосновных носителей заряда, подвижность основных носителей заряда и удельное электрическое сопротивление слоев.

2. Параметры эквивалентной схемы транзистора для большого сигнала.
3. Параметры физической Т-образной эквивалентной схемы и h -параметры транзистора с общей базой и общим эмиттером.
4. Основные и справочные электрические параметры транзистора.
5. Максимально допустимые параметры транзистора.

Порядок расчета 1. Собственную концентрацию носителей заряда при $T = 300$ К находим из графика рис. А.4: $n_i = 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Это значение использовано для нахождения концентраций НЗ по формуле $n_{p0} = n_i^2/p_{p0}$; $p_{n0} = n_i^2/n_{n0}$.

Подвижность основных и неосновных носителей заряда находим из графика рис. А.5а. Коэффициенты диффузии неосновных носителей связаны с их подвижностью соотношением Эйнштейна $D = \varphi_T \mu$, где $\varphi_T = 0,0258$ В при 300 К. Диффузионная длина рассчитывается по формуле $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$.

Удельное сопротивление $\rho_n = (q\mu_n N)^{-1}$ для электронного полупроводника и $\rho_p = (q\mu_p N)^{-1}$ для дырочного. Результаты расчета сведены в табл. 4.2.

2. Для расчета коэффициента передачи тока идеализированной модели транзистора необходимо определить ширину квазинейтральной базы ω , равную исходной технологической ширине базы за вычетом расширения ОПЗ коллекторного p - n -перехода в область базы. Расширение ОПЗ эмиттера в область базы мало, и им можно пренебречь. Необходимые для расчета значения контактной разности потенциалов коллектора $\varphi_{кк}$ в соответствии с формулой $\varphi_{кк} = \varphi_T \ln \frac{n_{n0}}{n_i} + \varphi_T \ln \frac{p_{p0}}{n_i} = \varphi_T \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2}$ и равновесной ширины ОПЗ коллектора приведены в табл. 4.3. Расчет ширины ОПЗ коллектора при $U = -5$ В по формуле

$$\delta_k = \delta_n + \delta_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{кк} - U)}{qN^*}} = \delta_0 \sqrt{1 - \frac{U}{\varphi_{кк}}},$$

где δ_0 – полная ширина ОПЗ, рассчитанная без учета влияния приложенного напряжения, дает

$$\delta_k = 0,734 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{1 - (-5)/0,457} = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

Величина $\omega = 30 \cdot 10^{-4} - 2,54 \cdot 10^{-4} = 27,5 \cdot 10^{-4}$ см.

Коэффициент инжекции эмиттера $\gamma_N \approx 1 - \frac{D_{nэ} n_{n0} \omega}{D_p p_{p0э} L_{nэ}}$ дает $\gamma_N = 1 -$

Электrofизические и геометрические параметры *p-n*-переходов

Параметр	Эмиттерный переход	Коллекторный переход
Контактная разность потенциалов, В	0,457	0,457
Ширина ОПЗ при $U = 0$, см	$0,734 \cdot 10^{-4}$	$0,734 \cdot 10^{-4}$
Радиус <i>p-n</i> -перехода, см	$255 \cdot 10^{-4}$	$325 \cdot 10^{-4}$
Периметр <i>p-n</i> -перехода, см	0,141	0,204
Площадь боковой части <i>p-n</i> -перехода, см ²	$0,705 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$
Площадь плоской части <i>p-n</i> -перехода, см ²	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$3,32 \cdot 10^{-3}$
Полная площадь <i>p-n</i> -перехода, см ²	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,75 \cdot 10^{-3}$
Удельная барьерная емкость при $U = 0$, Ф·см ⁻²	$1,93 \cdot 10^{-8}$	$1,93 \cdot 10^{-8}$
Барьерная емкость при $U=0$, Ф	$44,4 \cdot 10^{-12}$	$91,6 \cdot 10^{-12}$

$$1,65 \cdot 10^{-4} = 0,99984 \approx 1.$$

Прежде чем вычислить коэффициент переноса, рассчитываем коэффициент рекомбинационных потерь в базе по формуле

$$K_{\kappa} = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{L_p} \right)^2 + \frac{\Pi_{\text{э}}(\omega_{\text{э}} + \omega)^2 \omega}{2A_{\text{э-пл}} L_p^2} + s \frac{\Pi_{\text{э}}(\omega_{\text{э}} + \omega) \omega}{2A_{\text{э-пл}} D_p}, \quad (4.1)$$

где $\Pi_{\text{э}}$ – периметр эмиттера; s – скорость поверхностной рекомбинации; $A_{\text{э-пл}}$ – площадь плоской части эмиттера.

Для эмиттера в виде круга $\Pi_{\text{э}} = 2\pi R_{\text{э}}$, а для полоскового (прямоугольного) эмиттера $\Pi_{\text{э}} = 2(l_{\text{э}} + z_{\text{э}})$. В выражении (4.1) первое слагаемое отражает объемные потери дырок в активной базе, второе – объемные потери дырок в пассивной базе, а третье – потери дырок на поверхностную рекомбинацию. В германиевых транзисторах типичные значения $s = 50 - 500$ см/с, в кремниевых $s = 200 - 2000$ см/с и сильно зависят от технологии изготовления транзистора.

$$K_{\kappa} = 2,72 \cdot 10^{-3} + 5,26 \cdot 10^{-3} + 7,13 \cdot 10^{-3} = 15,1 \cdot 10^{-3}.$$

В соответствии с формулой $\kappa_N \approx 1 - K_{\kappa}$ коэффициент переноса с уче-

том поверхностной рекомбинации

$$\kappa_N = 1 - K_\kappa = 1 - 15,1 \cdot 10^{-3} = 0,985.$$

Коэффициент передачи тока эмиттера при отсутствии лавинного умножения носителей заряда в коллекторе $\alpha_N \approx \kappa_N = 0,985$.

Коэффициент передачи тока базы $\beta_N = \alpha_N / (1 - \alpha_N) = 65,2$.

Инверсный коэффициент передачи тока

$$\alpha_I \approx \kappa_I \approx A_\Delta / A_K = 2,3 \cdot 10^{-3} / 4,75 \cdot 10^{-3} = 0,484.$$

Рассчитаем дырочные составляющие плотности тока насыщения эквивалентной схемы транзистора для большого сигнала (см. рис. А.8а) по формуле

$$j_{\Delta ps} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p \operatorname{th}(\omega/L_p)} = j_{kps}.$$

При этом учтем, что $\omega/L_p = 27,5 \cdot 10^{-4} / 3,73 \cdot 10^{-2} = 7,37 \cdot 10^{-2} \ll 1$ и $\operatorname{th}(\omega/L_p) \approx \omega/L_p$. Поэтому

$$j_{\Delta ps} = j_{kps} = \frac{qD_p p_{n0}}{\omega} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 46,4 \cdot 2,63 \cdot 10^{11}}{27,5 \cdot 10^{-4}} = 7,10 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Рассчитаем электронные составляющие плотности тока насыщения в силу симметрии структуры ($N_\Delta = N_K$):

$$j_{\Delta ns} = j_{kns} = \frac{qD_{p\Delta} p_{p0\Delta}}{L_{n\Delta}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,55 \cdot 3,08 \cdot 10^7}{3,98 \cdot 10^{-4}} = 1,18 \cdot 10^{-7} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Плотности электронных токов пренебрежимо малы по сравнению с плотностями дырочных, и поэтому собственные токи насыщения эмиттера и коллектора

$$I'_{\Delta 0} \approx A_\Delta j_{\Delta ps} = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 1,63 \cdot 10^{-6} \text{ А};$$

$$I'_{K0} \approx A_K j_{kps} = 4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 3,37 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

В соответствии с формулой

$$r_B = \rho_B \left(\frac{1}{8\pi\omega} + \frac{1}{2\pi\omega'} \ln \frac{R_K}{R_\Delta} + \frac{1}{2\pi\omega_{кр}} \ln \frac{R_6}{R_K} \right)$$

сопротивление базы

$$r_B = 16,3 + 8,53 + 13,5 = 38,3 \text{ Ом.}$$

Сопротивление растекания тела коллектора

$$r_{KK} = \rho_K^r \omega_K / A_K = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

3. Расчет параметров T -образной эквивалентной схемы для малого сигнала начинаем с расчета дифференциального сопротивления эмиттера, которое определяется формулой

$$r_{\text{э}} = \left. \frac{dU_{\text{э}}}{dI_{\text{э}}} \right|_{U_K} = \left. \frac{u_{\text{э}}}{i_{\text{э}}} \right|_{u_K=0} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{э}} + I'_{\text{э}0}}.$$

Предварительно рассчитаем $\varphi_T = kT/q = 1,38 \cdot 10^{-33} \cdot 300 / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,0258 \text{ В.}$

В рабочей точке $I_{\text{э}} = 0,001 \text{ А}$, и поэтому $r_{\text{э}} = 0,0258 / 0,001 = 25,8 \text{ Ом.}$

Рассчитаем дифференциальную проводимость коллектора по формуле

$$g'_K = \frac{I_{\text{э}} \delta_K}{2(\varphi_K - U_K)} \left[\frac{\omega}{L^2 p} + \frac{\Pi_{\text{э}}(\omega_{\text{э}} + \omega)(\omega_{\text{э}} + 3\omega)}{2A_{\text{э-пл}} L_p^2} + s \frac{\Pi_{\text{э}}(\omega_{\text{э}} + 2\omega)}{2A_{\text{э-пл}} D_p} \right]$$

в рабочей точке $I_{\text{э}} = 1 \text{ мА}$, $U_K = -5 \text{ В}$:

$$g'_K = 2,33 \cdot 10^{-8} (1,98 + 3,27 + 3,51) = 2,04 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}.$$

Вторую составляющую проводимости коллектора можно рассчитать по формуле

$$g''_K = I_{RGK}^- / (2(\varphi_{KK} - U_K)) = 5,88 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}.$$

Обратный ток генерации при $U_K = -5 \text{ В}$:

$$I_{RGK}^- = -A_K \frac{qn_i \delta_K}{2\tau} (e^{U_K/\varphi_T} - 1)$$

$$I_{RGK}^- \approx 4,57 \cdot 10^{-3} \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{13} \cdot 2,54 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 30 \cdot 10^{-6}} = 6,42 \cdot 10^{-8} \text{ А.}$$

Окончательно имеем

$$g_{\text{к}} = g_{\text{к}}' + g_{\text{к}}'' = 2,10 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}; \quad r_{\text{к}} = 1/g_{\text{к}} = 4,76 \text{ МОм}.$$

Коэффициент обратной связи по напряжению $\mu_{\text{эк}} = \delta_{\text{к}} \varphi_{\text{T}} / 2(\varphi_{\text{кк}} - U_{\text{к}}) \omega$.

$$\mu_{\text{эк}} = 2,54 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0258 / (2(0,457 + 5) \cdot 27,5 \cdot 10^{-4}) = 2,18 \cdot 10^{-4}.$$

Сопротивление базы и коэффициент передачи тока эмиттера были рассчитаны ранее.

Расчет h -параметров транзистора с общей базой проводим по формулам

$$h_{11\text{б}} \approx r_{\text{э}} + r_{\text{б}}(1 - \alpha); \quad h_{21\text{б}} = \alpha r_{\text{к}} / (r_{\text{б}} + r_{\text{к}}) \approx \alpha;$$

$$h_{12\text{б}} \approx r_{\text{б}} / r_{\text{к}} + \mu_{\text{эк}}; \quad h_{22\text{б}} = 1 / (r_{\text{б}} + r_{\text{к}}) \approx 1 / r_{\text{к}},$$

используя параметры T -образной эквивалентной схемы транзистора с общей базой:

$$h_{11\text{б}} = 25,8 + 38,3(1 - 0,985) = 26,4 \text{ Ом}; \quad h_{21\text{б}} = 0,985;$$

$$h_{12\text{б}} = 8,05 \cdot 10^{-6} + 2,18 \cdot 10^{-4} = 26,4 \cdot 10^{-4}; \quad h_{22\text{б}} = g_{\text{к}} \approx 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}.$$

Параметры T -образной схемы транзистора с общим эмиттером в соответствии с выражениями $r_{\text{к}}^* = 1/g_{\text{к}}^* = r_{\text{к}} / (\beta + 1)$, $C_{\text{к}}^* = C_{\text{к}}(\beta + 1)$ следующие: $\beta = 65,2$; $r_{\text{к}}^* = 4,76 \cdot 10^6 / 66,2 = 7,19 \cdot 10^4 \text{ Ом}$. Расчет h -параметров транзистора с общим эмиттером по формулам

$$h_{21\text{э}} \approx \beta; \quad h_{11\text{э}} \approx r_{\text{б}} + (\beta + 1)r_{\text{э}};$$

$$h_{12\text{э}} = r_{\text{э}} / (r_{\text{к}}^* + r_{\text{э}}) - \mu_{\text{эк}} \approx r_{\text{э}} / r_{\text{к}}^* - \mu_{\text{эк}}; \quad h_{22\text{э}} = (1 - \mu_{\text{эк}}) / (r_{\text{к}}^* + r_{\text{э}}) \approx 1 / r_{\text{к}}^*.$$

дает

$$h_{21\text{э}} = \beta = 65,2; \quad h_{11\text{э}} = 38,3 + (65,2 + 1)25,8 = 1,75 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 1,75 \text{ кОм};$$

$$h_{12\text{э}} = 3,59 \cdot 10^{-4} - 2,18 \cdot 10^{-4} = 1,41 \cdot 10^{-4}; \quad h_{22\text{э}} = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}.$$

4. Удельная барьерная емкость эмиттера и коллектора при $U = 0$:

$$C_{\bar{6}} = \varepsilon\varepsilon_0/\delta_{k0} = 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}/0,734 \cdot 10^{-4} = 1,93 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Барьерные емкости эмиттера и коллектора при $U = 0$:

$$C_{\bar{3} \text{ бар}}(0) = A_{\bar{3}}C_{\bar{6}} = 44,4 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 44,4 \text{ пФ};$$

$$C_{\bar{K} \text{ бар}}(0) = A_{\bar{K}}C_{\bar{6}} = 91,6 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 91,6 \text{ пФ}.$$

Для расчета барьерной емкости эмиттера в заданной рабочей точке надо предварительно рассчитать напряжение на эмиттерном переходе. В соответствии с выражением $I_{\bar{3}} = I'_{\bar{3}0}(e^{U_{\bar{3}}/\varphi_T} - 1)$ имеем

$$U_{\bar{3}} = \varphi_T \ln(I_{\bar{3}} / I'_{\bar{3}0}) = 0,166 \text{ В}.$$

При этом напряжении барьерная емкость эмиттера, рассчитанная по формуле

$$C_{\bar{3} \text{ бар}}(U) = \frac{C_{\bar{3} \text{ бар}}(0)}{\sqrt{1 - U/\varphi_{\bar{K}\bar{K}}}}, \quad (4.2)$$

$$C_{\bar{3} \text{ бар}} = 55,5 \text{ пФ}.$$

Расчет барьерной емкости коллектора по формуле (4.2) при $U_{\bar{K}} = -5$ В дает $C_{\bar{K} \text{ бар}} = 26,5 \text{ пФ}$.

Для расчета диффузионной емкости эмиттера по формуле $C_{\bar{3} \text{ диф}} = \tau_{\bar{K}}/r_{\bar{3}} = \tau_{\bar{K}}(I_{\bar{3}} + I'_{\bar{3}0})/\varphi_T$ предварительно найдем

$$\tau_{\bar{K}} = \omega^2/(2D_p) = (27,5 \cdot 10^{-4})^2/(2 \cdot 46,4) = 8,15 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

$$\text{Поэтому } C_{\bar{3} \text{ бар}} = 8,15 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-3}/0,0258 = 3,16 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Рассчитаем диффузионную емкость коллектора по формуле $C_{\bar{K} \text{ диф}} = \tau_p I_{\bar{3}} d\alpha/dU_{\bar{K}} = \tau_p g'_{\bar{K}}$; $C_{\bar{K} \text{ диф}} = 30 \cdot 10^{-6} \cdot 2,04 \cdot 10^{-7} = 6,12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$.

Рассчитаем по формуле

$$I_{K0} = I'_{K0}(1 - \alpha_N \alpha_I) = A_{\bar{K}} \frac{pD_p p_{n0}}{L_p} \text{th} \frac{\omega}{L_p} \approx A_{\bar{K}} \frac{q p_{n0} \omega}{\tau_p}$$

обратный ток коллектора при отключенном эмиттере для идеализирован-

ной модели транзистора:

$$I_{K0} = 3,37 \cdot 10^{-6}(1 - 0,985 \cdot 0,484) = 1,76 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Обратный ток коллектора с учетом тока генерации в ОПЗ коллектора при $U_K = -5 \text{ В}$

$$I_{KB0} = I_{K0} + I_{RGK}^- = 1,76 \cdot 10^{-6} + 6,42 \cdot 10^{-8} = 1,83 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Обратный ток коллектор – эмиттер при коротком замыкании выводов базы и эмиттера рассчитаем по формуле

$$I_{KЭК} = I'_{K0} + I_{RGK}^- = 3,37 \cdot 10^{-6} + 6,42 \cdot 10^{-8} = 3,43 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Обратный ток коллектор – эмиттер при разомкнутой базе идеализированной модели без учета тока генерации в ОПЗ коллектора

$$I_{K0}^* = I_{K0}(\beta_N + 1) = 1,76 \cdot 10^{-6}(65,2 + 1) = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Обратный ток коллектор – эмиттер при разомкнутой базе и $U_K = -5 \text{ В}$

$$I_{KЭХ} = I_{KB0}(\beta_N + 1) = 1,83 \cdot 10^{-6} \cdot 66,2 = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Рассчитаем предельную частоту теоретической модели транзистора по формуле

$$f_\alpha = \omega_\alpha / (2\pi) = 1 / (2\pi\tau_\alpha) = 1,95 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 1,95 \text{ МГц.}$$

Рассчитаем постоянные времени, входящие в формулу для граничной частоты:

$$\tau_{c3} = r_3 C_3 = 25,8 \cdot 55,6 \cdot 10^{-12} = 1,43 \cdot 10^{-9} \text{ с;}$$

$$\tau_{CK} = (r_{KK} + (1 - \alpha_0)r_6)C_K = (4,82 \cdot 10^{-3} + (1 - 0,985) \cdot 38,3) \cdot 26,5 \cdot 10^{-12} = 1,52 \cdot 10^{-11} \text{ с.}$$

Таким образом, $\tau_{OB} = 8,29 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ и граничная частота $f_{ГР} = \omega_{ГР} / (2\pi) = 1 / (2\pi\tau_{OB}) = 1,92 \text{ МГц.}$

Расчет максимальной частоты генерации по формуле

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha_0 f_\alpha}{8\pi r_B C_K}} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{D_p}{4\pi r_B C_K}}$$

дает $f_{\max} = 8,67$ МГц.

Вычисляем постоянную времени коэффициента передачи тока базы:

$$\tau_{\beta} = \tau_{\kappa}(\beta_0 + 1) = 8,15 \cdot 10^{-8} \cdot 66,2 = 5,39 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Предельная частота коэффициента передачи тока базы

$$f_{\beta} = \omega_{\beta}/(2\pi) = 1/(2\pi\tau_{\beta}) = 2,94 \cdot 10^4 \text{ Гц} = 29,4 \text{ кГц.}$$

5. В соответствии с расчетом по формуле

$$U_{\text{проб}}(B) \approx 60 \left(\frac{\Delta E}{1,1} \right)^{1,5} \left(\frac{N}{10^{16}} \right)^{-0,75},$$

где N – концентрация примеси в базе, см^{-3} ; ΔE – ширина запрещенной зоны, эВ, или графиком рис. А.1 при $N = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ напряжение пробоя коллекторного p - n -перехода $U_{K \text{ проб}} \approx 117 \text{ В}$.

Для сплавных транзисторов возможно смыкание ОПЗ эмиттера и коллектора при некотором *напряжении смыкания* $U_{\text{смк}}$.

Предполагая, что неравномерность фронта сплавления составляет ± 10 мкм, минимальная ширина базы $\omega_{\min} = 30 - 10 - 10 = 10$ мкм. Напряжение смыкания находим из условия

$$\delta_{\kappa}(U_{\text{смк}}) = \delta_{\kappa 0} \sqrt{1 + U_{\text{смк}}/\varphi_{\text{КК}}} = \omega_{\min};$$

$$U_{\text{смк}} = \varphi_{\text{КК}} [(\omega_{\min}/\delta_{\kappa 0})^2 + 1] = 0,457 [(10 \cdot 10^{-4}/0,734 \cdot 10^{-4})^2 + 1] = 85,3 \text{ В.}$$

Пробивное напряжение коллектора, измеряемое между выводами эмиттера и коллектора при нулевом токе базы, рассчитываем по формуле

$$U_{KЭ \text{ проб}} = U_{\alpha} = U_{K \text{ проб}} \sqrt[n]{1 - \alpha_{N0}}.$$

Выбираем $n = 3$ и, используя значение $\alpha_{N0} = \alpha_N = 0,985$, полученное ранее, имеем $U_{KЭ \text{ проб}} = 28,8 \text{ В}$.

Для германиевых транзисторов максимальная температура перехода $T_{j \text{ max}}$ лежит в диапазоне от 75 до 100 °С. Примем $T_{j \text{ max}} = 85$ °С. Выбираем для транзистора конструкцию в универсальном корпусе с тепловым сопротивлением $R_{\text{т п-с}} = 0,33 \text{ К/мВт}$ (как у транзистора МП 20). Тогда при температуре окружающей среды $T_0 = 20$ °С максимальная мощность,

рассеиваемая коллектором,

$$P_{K \max} = (T_{j \max} - T_0)/R_{T \text{ П-С}} = (85 - 20)/0,33 = 197 \text{ мВт.}$$

С ростом температуры окружающей среды максимальная мощность, рассеиваемая коллектором, снижается.

Задавая максимальную мощность 50 мВт, при некоторой максимально допустимой температуре окружающей среды $T_{0 \max}$ определяем

$$T_{0 \max} = T_{j \max} - R_{K \max}(T_{0 \max})R_{T \text{ П-С}} \approx 70 \text{ }^\circ\text{С.}$$

Задание № 5

Расчет дрейфового планарно-эпитаксиального *p-n-p*-транзистора

Задано: 1. Электрофизические параметры слоев кремния: концентрация легирующих примесей N_{20} , N_{10} , N_0 ; концентрация донорной примеси в n^+ -подложке $N_{\text{п}}$; время жизни неосновных носителей заряда в указанных слоях.

2. Геометрические размеры и топология структуры: глубина залегания эмиттерного $x_{\text{э}}$ и коллекторного $x_{\text{к}}$ p - n -переходов, толщина исходного эпитаксиального n -слоя $x_{\text{п}}$, толщина подложки $\omega_{\text{п}}$ (см. рис. А.9); длина $l_{\text{э}}$ и ширина $z_{\text{э}}$ эмиттерной полоски; длина $l_{\text{к}}$ и ширина $z_{\text{к}}$ коллектора; размеры полосок базовой металлизации $l_{\text{б}}$ и $z_{\text{б}}$. Будем считать, что все зазоры, определяющие базы, от края эмиттера до края коллектора и т.д. (см. рис. А.10) составляют Δ .

3. Рабочее напряжение на коллекторе $U_{\text{к}} = -5$ В, ток эмиттера $I_{\text{э}} = 1$ мА.

4. Температура $T = 300$ К.

Для каждого варианта перечисленные параметры приведены в табл. 5.1.

Рассмотрим пример расчета кремниевого планарно-эпитаксиального дрейфового n^+ - p - n - n^+ -транзистора. Распределение примеси в нем представлено на рис. А.9б, а его структура и топология – на рис. А.10. Для создания n^+ - p - n - n^+ -структуры в эпитаксиальную пленку n -типа электропроводности, выращенную на сильнолегированной n^+ -подложке, проводят локальную двухстадийную диффузию акцепторной примеси (бора) с низкой поверхностной концентрацией для образования области базы p -типа электропроводности. Затем проводят локальную двухстадийную диффузию донорной примеси (фосфора) для формирования области эмиттера

Варианты заданий

Параметр	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Концентрация легирующей примеси в эмиттере N_{20} , 10^{20} см^{-3}	1,1	1,2	1,3	1,0	1,4	1,5	1,6
Концентрация легирующей примеси в базе N_{10} , 10^{18} см^{-3}	5,1	5,2	5,3	5,0	5,4	5,5	5,6
Концентрация легирующей примеси в коллекторе N_0 , 10^{16} см^{-3}	1,1	1,2	1,3	1,0	1,4	1,5	1,6
Концентрация донорной примеси в n^+ -подложке $N_{\text{п}}$, 10^{20} см^{-3}	1,1	1,2	1,3	1,0	1,4	1,5	1,6
Время жизни ННЗ в эмиттере, 10^{-9} с	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0
Время жизни ННЗ в базе, 10^{-9} с	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1
Время жизни ННЗ в коллекторе, 10^{-9} с	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0
Толщина подложки $\omega_{\text{п}}$, мкм	170	180	190	200	210	220	230
Толщина исходного эпитаксиального n -слоя $x_{\text{п}}$, 10^{-4} см	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
Глубина залегания эмиттерного p - n -перехода $x_{\text{э}}$, 10^{-4} см	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
Глубина залегания коллекторного p - n -перехода $x_{\text{к}}$, 10^{-4} см	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
Длина $l_{\text{э}}$ и ширина $z_{\text{э}}$ эмиттерной полоски, 10^{-4} см	7; 47	8; 48	9; 49	10; 50	11; 51	12; 52	13; 53
Длина $l_{\text{к}}$ и ширина $z_{\text{к}}$ коллектора, 10^{-4} см	67; 67	68; 68	69; 69	70; 70	71; 71	72; 72	73; 73
Длина $l_{\text{б}}$ и ширина $z_{\text{б}}$ базовой металлизации, 10^{-4} см	25,0; 62,0	24,8; 62,8	24,6; 63,6	24,4; 64,4	24,2; 65,2	24,0; 66,0	23,8; 66,8
Ширина зазоров Δ , 10^{-4} см	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1

n^+ -типа электропроводности. Границы эмиттерного и коллекторного p - n -переходов выходят на поверхность пластины под пассивирующей пленкой

диоксида кремния. Профиль диффузионного распределения примеси в активной области структуры задается выражением

$$\begin{aligned}
 N(x) &= N_2(x) - N_1(x) + N_0; \\
 N_2(x) &= N_{20} \exp(-k_2 x^2); \\
 N_1(x) &= N_{10} \exp(-k_1 x^2);
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

где N_{20} – поверхностная концентрация донорной примеси (фосфора); N_{10} – поверхностная концентрация акцепторной примеси (бора); N_0 – исходная концентрация донорной примеси в высокоомном эпитаксиальном слое коллектора.

Задано:1. Электрофизические параметры слоев кремния: концентрация легирующих примесей N_{20} , N_{10} , N_0 ; концентрация донорной примеси в n^+ -подложке $N_{\text{п}}$; время жизни неосновных носителей заряда в указанных слоях.

2. Геометрические размеры и топология структуры: глубина залегания эмиттерного $x_{\text{э}}$ и коллекторного $x_{\text{к}}$ p - n - переходов, толщина исходного эпитаксиального n -слоя $x_{\text{п}}$, толщина подложки $\omega_{\text{п}}$ (см. рис. А.9); длина $l_{\text{э}}$ и ширина $z_{\text{э}}$ эмиттерной полоски; длина $l_{\text{к}}$ и ширина $z_{\text{к}}$ коллектора; размеры полосок базовой металлизации $l_{\text{б}}$ и $z_{\text{б}}$. Будем считать, что все зазоры, определяющие базы, от края эмиттера до края коллектора и т.д. (см. рис. А.10) составляют Δ .

3. Рабочее напряжение на коллекторе $U_{\text{к}} = -5$ В, ток эмиттера $I_{\text{э}} = 1$ мА.

4. Температура $T = 300$ К.

Электрофизические параметры и геометрические размеры транзистора сведены в табл. 5.2.

Подвижность основных и неосновных носителей заряда уменьшается с ростом суммарной концентрации ионизированных атомов легирующей примеси $N^+(x)$ и может быть рассчитана по эмпирической формуле, приведенной в приложении, с параметрами табл. А.1. Величина $N^+(x)$ определяется модулем суммы положительных и отрицательных ионизированных атомов легирующей примеси: $N^+(x) = N_2(x) + N_1(x) + N_0$. Приведенные в табл. 5.2 значения времени жизни неосновных носителей заряда в областях структуры рассчитаны из условия, что рекомбинация электронов и

дырок происходит на рекомбинационных ловушках, образованных атомами золота, концентрация которых постоянна по всей структуре и составляет $N_t = N_{Au} = 0,1N_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При иной концентрации золота время жизни электронов и дырок может быть рассчитано по формулам

$$\tau_n = (N_{Au}\sigma_{n1}v_t)^{-1};$$

$$\tau_p = (N_{Au}\sigma_{p2}v_t)^{-1},$$

где $\sigma_{n1} = 6,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ – сечение захвата электрона и $\sigma_{p2} = 11,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ – сечение захвата дырки на рекомбинационную ловушку; $v_t \approx 10^7 \text{ см/с}$ – тепловая скорость носителей заряда при 300 К.

Определить:

1. Значения констант k_1 и k_2 , связанных с параметрами диффузии примеси. Рассчитать распределения примеси в структуре $N_2(x)$, $N_1(x)$, $N(x)$, $N^+(x)$.

2. Электрофизические параметры слоев полупроводника: зависимость подвижности носителей заряда от координаты; средние значения подвижности и диффузионной длины неосновных носителей заряда в слоях; среднее удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление каждого слоя.

3. Параметры эквивалентной схемы транзистора для большого сигнала.

4. Параметры физической T -образной эквивалентной схемы транзистора и h -параметры транзистора с общей базой и общим эмиттером.

5. Максимально допустимые параметры транзистора.

Порядок расчета:

В дополнение к данным табл. 5.2 примем концентрацию доноров в n^+ -подложке $N_{\text{II}} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и толщину подложки $\omega = 200 \text{ мкм}$.

1. Неизвестные коэффициенты k_1 и k_2 , входящие в выражение (5.1), можно найти из условия, что результирующая концентрация примеси при $x = x_{\text{э}}$ и $x = x_{\text{к}}$ равна нулю, т.е. из решения следующей системы уравнений:

$$N_{20} \exp(-k_2 x_{\text{э}}^2) - N_{10} \exp(-k_1 x_{\text{э}}^2) + N_0 = 0; \quad (5.2)$$

$$N_{20} \exp(-k_2 x_{\text{к}}^2) - N_{10} \exp(-k_1 x_{\text{к}}^2) + N_0 = 0. \quad (5.3)$$

При заданных значениях N_{20} , N_{10} , N_0 , $x_{\text{э}}$ и $x_{\text{к}}$ уравнения (5.2) и (5.3) представляют собой систему нелинейных алгебраических уравнений отно-

Электрофизические и геометрические параметры структуры транзистора

Параметр	Эмиттер n^+ -типа	База p -типа	Коллектор n -типа
Поверхностная или исходная концентрация примеси, см^{-3}	$N_{20} = 10^{20}$	$N_{10} = 5 \cdot 10^{18}$	$N_0 = 10^{16}$
Средняя концентрация примеси в слое (или ОНЗ), см^{-3}	$3,48 \cdot 10^{19}$	$4,79 \cdot 10^{16}$ (БА) $1,77 \cdot 10^{18}$ (БП)	10^{16}
Средняя концентрация ННЗ, см^{-3}	5,63	$4,09 \cdot 10^3$ (БА)	$1,96 \cdot 10^4$
Средняя подвижность ОНЗ, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	72	234 (БА) 49 (БП)	1050
Средняя подвижность ННЗ, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	77,5	639 (БА)	384
Средний коэффициент диффузии, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$16,6 \cdot 10^{-9}$	$30 \cdot 10^{-6}$	9,91
Время жизни ННЗ, с	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$15,8 \cdot 10^{-9}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$
Средняя диффузионная длина, см	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$5,10 \cdot 10^{-4}$	$2,94 \cdot 10^{-4}$
Средняя удельная проводимость слоя, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	401	1,79 (БА) 13,9 (БП)	1,68
Среднее удельное сопротивление слоя, $\text{Ом} \cdot \text{см}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	0,558(БА) $7,21 \cdot 10^{-2}$ (БП)	0,595
Удельное поверхностное сопротивление слоя, $\text{Ом}/\square$	13,8	$5,58 \cdot 10^3$ (БА) 257 (БП)	2380
Толщина слоя, см	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Примечание. БА – база активная, БП – база пассивная.			

сительно неизвестных k_1 и k_2 . Эта система может быть решена методом последовательных приближений. Найдем первое приближение для коэффициента k_1 . Концентрация $N_2(x)$, как следует из рис. А.9б, очень быстро спадает с ростом x , поэтому $N_2(x) \ll N_0$. Приравняв нулю два последних члена уравнения (5.3), получим

$$k_1^{(0)} = \frac{1}{x_k^2} \ln \frac{N_{10}}{N_0}. \quad (5.4)$$

Подставив численные значения величин, входящих в правую часть (5.4), получим $\kappa_1^0 = 0,79268 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Теперь можно найти приближенное значение коэффициента κ_2 с помощью уравнения (5.2):

$$\kappa_2 = \frac{1}{x_3^2} \ln \frac{N_{20}}{N_{10} \exp(-\kappa_1 x_3^2) - N_0}. \quad (5.5)$$

Значение коэффициента κ_1 можно уточнить, выражая κ_1 из уравнения (5.3):

$$\kappa_1 = \frac{1}{x_K^2} \ln \frac{N_{10}}{N_{20} \exp(-\kappa_2 x_K^2) + N_0}. \quad (5.6)$$

Рассчитанное по формуле (5.6) значение κ_1 позволяет уточнить значение κ_2 , найденное по формуле (5.5), и т.д. Итерационный процесс заканчиваем, когда первые 4-5 знаков коэффициентов κ_1 и κ_2 перестанут изменяться. Обычно для этого требуется 5-7 итераций. Окончательно для данного примера имеем $\kappa_1 = 0,790966 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; $\kappa_2 = 1,723686 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Распределение легирующих примесей в структуре $N_2(x)$, $N_1(x)$ и $N(x)$ рассчитываем по формуле (5.1). Результаты вычислений приведены в табл. 5.3.

2. Собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при $T = 300 \text{ К}$ находим из графика рис. А.4 или рассчитываем по формуле

$$n_i^2(T) = BT^3 e^{\Delta E/kT},$$

где $B = 3,1 \cdot 10^{32} \text{ К}^{-3} \cdot \text{см}^{-6}$; $\Delta E = 0,785 \text{ эВ}$ для германия; $B = 1,5 \cdot 10^{33} \text{ К}^{-3} \cdot \text{см}^{-6}$; $\Delta E = 1,21 \text{ эВ}$ для кремния; T – температура, К; k – постоянная Больцмана.

Получаем $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Подвижность электронов и дырок в функции координаты рассчитывалась по эмпирической формуле, приведенной в приложении А, с параметрами табл. А.1 с использованием суммарной концентрации легирующей примеси $N^+(x)$. Результаты расчета представлены на рис. А.11. Средние значения подвижностей основных и неосновных носителей заряда в слоях активной области структуры определялись как средние арифметические значения от подвижностей на границах каждого слоя и приведены в табл. 5.2. Например, средние значения подвижностей

**Распределение примесей и подвижности носителей заряда
по структуре**

x , МКМ	$N_2(x)$, см ⁻³	$N_1(x)$, см ⁻³	$N(x)$, см ⁻³	$N^+(x)$, см ⁻³	μ_n , см ² /(В·с)	μ_p , см ² /(В·с)
0	1,00E20	5,00E18	9,50E19	1,05E20	72	49
0,2	9,33E19	4,84E18	8,85E19	9,82E19	73	50
0,4	7,59E19	4,41E18	7,15E19	8,03E19	74	50
0,6	5,38E19	3,76E18	5,00E19	5,75E19	76	51
0,8	3,32E19	3,01E18	3,02E19	3,62E19	81	52
1,0	1,78E19	2,27E18	1,56E19	2,01E19	89	54
1,2	8,36E18	1,60E18	6,76E18	9,97E18	105	57
1,4	3,41E18	1,06E18	2,36E18	4,48E18	134	65
1,6	1,21E18	6,60E17	5,62E17	1,88E18	188	79
1,7	6,86E17	5,08E17	1,88E17	1,20E18	229	91
1,8	3,75E17	3,85E17	2,20E12	7,71E17	280	106
1,9	1,98E17	2,88E17	-7,92E16	4,96E17	342	125
2,0	1,01E17	2,11E17	-1,00E17	3,23E17	415	148
2,1	4,99E16	1,53E17	-9,28E16	2,13E17	496	175
2,2	2,38E16	1,09E17	-7,49E16	1,42E17	581	204
2,3	1,09E16	7,62E16	-5,52E16	9,71E16	667	235
2,4	4,88E15	5,25E16	-3,76E16	6,74E16	750	266
2,5	2,09E15	3,56E16	-2,36E16	4,77E16	827	295
2,6	8,70E14	2,38E16	-1,29E16	3,47E16	895	321
2,7	3,49E14	1,56E16	-5,31E15	2,59E16	952	344
2,8	1,35E14	1,01E16	0	2,03E16	998	362
2,9	5,06E13	6,46E15	3,59E15	1,65E16	1032	376
3,0	1,83E13	4,05E15	5,97E15	1,41E16	1058	387
3,2	2,16E12	1,52E15	8,48E15	1,15E16	1087	400
3,4	2,22E11	5,34E14	9,46E15	1,05E16	1100	404
3,6	1,99E10	1,77E14	9,82E15	1,02E16	1105	406

Примечание. Символом E обозначено основание 10 перед показателем степени, например 1,05E20 означает $1,05 \cdot 10^{20}$.

электронов и дырок в активной базе определялись как

$$\bar{\mu}_n \text{ б} = \frac{\mu_n(x_{\text{к}}) + \mu_n(x_{\text{э}})}{2};$$

$$\bar{\mu}_p \text{ б} = \frac{\mu_p(x_{\text{к}}) + \mu_p(x_{\text{э}})}{2}.$$

Среднее значение коэффициента диффузии определялось из соотношения Эйнштейна с использованием средней подвижности неосновных носителей заряда в каждом слое. Среднее значение диффузионной длины рассчитывалось по формуле $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$. Средние значения концентрации основных носителей заряда считались равными средним значениям результирующей концентрации примеси в каждом слое. Среднее значение концентрации основных носителей заряда в эмиттере

$$\bar{N}_3 = \frac{1}{x_3} \int_0^{x_3} N(x) dx. \quad (5.7)$$

С учетом (5.1) интегрирование последнего выражения позволяет записать

$$\bar{N}_3 = \frac{1}{x_3} \left[\frac{N_{20} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\kappa_2}} \operatorname{erf}(\sqrt{\kappa_2} x_3) - \frac{N_{10} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\kappa_1}} \operatorname{erf}(\sqrt{\kappa_1} x_3) + N_0 x_3 \right]. \quad (5.8)$$

Значения функций ошибок (erf-функции) приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Значения гиперболических функций e^z и $\operatorname{erfc}(z)$

z	e^z	$\operatorname{sh}(z)$	$\operatorname{ch}(z)$	$\operatorname{th}(z)$	$\operatorname{erfc}(z)$
0	1	0	1	0	1
0,2	1,221	0,201	1,020	0,198	0,777
0,4	1,492	0,411	1,081	0,380	0,572
0,6	1,822	0,637	1,185	0,537	0,396
0,8	2,226	0,888	1,337	0,664	0,258
1,0	2,718	1,175	1,545	0,762	0,157
1,2	3,320	1,510	1,811	0,834	$0,897 \cdot 10^{-1}$
1,4	4,055	1,904	2,151	0,885	$0,477 \cdot 10^{-1}$
1,6	4,953	2,376	2,578	0,922	$0,236 \cdot 10^{-1}$
1,8	6,050	2,942	3,108	0,947	$0,109 \cdot 10^{-1}$
2,0	7,389	3,627	3,762	0,964	$0,462 \cdot 10^{-2}$
2,2	9,025	4,457	4,568	0,976	$0,186 \cdot 10^{-2}$
2,4	11,023	5,466	5,556	0,984	$0,689 \cdot 10^{-3}$
2,6	13,464	6,695	6,769	0,989	$0,236 \cdot 10^{-3}$
2,8	16,445	8,192	8,253	0,993	$0,750 \cdot 10^{-4}$
3,0	20,086	10,018	10,068	0,995	$0,221 \cdot 10^{-4}$

3. Эти значения можно рассчитать с помощью приближенного выражения

$$\operatorname{erf}(\sqrt{k}x) \approx 1 - \exp[-(\sqrt{k}x + 0,3)^2].$$

Средняя концентрация примеси в активной и пассивной областях базы различаются (см. табл. 5.2). Средняя концентрация примеси в пассивной области базы рассчитывается по формуле

$$\bar{N}_{\text{БП}} = \left| \frac{1}{x_{\text{к}}} \int_0^{x_{\text{к}}} [-N_{10} \exp(-k_1 x^2) + N_0] dx \right| = \frac{N_{10} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{k_1} x_{\text{к}}} \operatorname{erf}(\sqrt{k_1} x_{\text{к}}) - N_0. \quad (5.9)$$

Средняя концентрация примеси в активной области базы

$$\bar{N}_{\text{БА}} = \frac{1}{\omega_{\text{б}}} \int_{x_{\text{э}}}^{x_{\text{к}}} N(x) dx = \frac{G}{\omega_{\text{б}}}.$$

В этой формуле величина G называется числом Гуммеля и определяется выражением

$$G = \frac{N_{20} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{k_2}} [\operatorname{erf}(\sqrt{k_2} x_{\text{к}}) - \operatorname{erf}(\sqrt{k_2} x_{\text{э}})] - \frac{N_{10} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{k_1}} [\operatorname{erf}(\sqrt{k_1} x_{\text{к}}) - \operatorname{erf}(\sqrt{k_1} x_{\text{э}})] + N_0 \omega_{\text{б}}. \quad (5.10)$$

В коллекторе полагаем, что среднее значение концентрации примеси равно N_0 . Средняя удельная проводимость и удельное сопротивление каждого слоя рассчитаны по формулам $\bar{\sigma} = q\mu_{\text{онз}}\bar{N}$, $\bar{\rho} = 1/\bar{\sigma}$, где $\mu_{\text{онз}}$ – среднее значение подвижности основных носителей заряда в данном слое. Удельное поверхностное сопротивление (сопротивление слоя) рассчитывалось как отношение среднего удельного сопротивления к толщине слоя. Например, в активной базе $\rho_{\text{СБА}} = \rho_{\text{БА}}/\omega_{\text{б}} = 0,558/10^{-4} = 5,58 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\square = 5,58 \text{ кОм}/\square$, в пассивной базе $\rho_{\text{СБП}} = \rho_{\text{БП}}/x_{\text{к}} = 7,21 \cdot 10^{-2}/2,8 \cdot 10^{-4} = 257 \text{ Ом}/\square$. Следует отметить, что расчет удельного сопротивления $\rho_{\text{СБА}}$ по независимо усредненным значениям подвижности и концентрации основных носителей заряда дает значение $\rho_{\text{СБА}}$ с погрешностью примерно 20% (точное значение $\rho_{\text{СБА}} = 7,17 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\square$), однако при оценочных расчетах такая ошибка допустима. Результаты расчета средних значений электрофизических параметров транзистора сведены в табл. 5.2.

В транзисторе, полученном методом диффузии примеси, расчет ширины ОПЗ эмиттерного и коллекторного p - n -переходов представляет сложную задачу и в общем случае требует привлечения численных методов. Однако в каждом конкретном случае можно найти удачные аппроксимации, позволяющие оценить ширину ОПЗ коллекторного и эмиттерного p - n -переходов.

Распределение примеси в активной области структуры, построенное по данным табл. 5.3, представлено на рис. А.12. Для оценки ширины ОПЗ и контактной разности потенциалов реальное распределение примеси вблизи координат $x_э$ и $x_к$ можно заменить линейным (кривые 1 и 2). Выражение для градиента концентрации примеси получим, дифференцируя (5.1) по x :

$$\begin{aligned} a(x) = dN/dx &= -2\kappa_2 x N_{20} \exp(-\kappa_2 x^2) + 2\kappa_1 x N_{10} \exp(-\kappa_1 x^2) = \\ &= -2\kappa_2 x N_2(x) + 2\kappa_1 x N_1(x). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Рассчитанные по этой формуле значения градиентов концентрации примеси в эмиттерном $a_э = |a(x_э)|$ и коллекторном $a_к = a(x_к)$ p - n -переходах представлены в табл. 5.5. Там же представлены значения контактной разности потенциалов эмиттерного и коллекторного переходов, рассчитанные по формуле $\varphi_к \approx \varphi_T [1, 16 \lg(3\varepsilon\varepsilon_0\varphi_T a^2/(qn_i^3)) + 0,8]$, и значения равновесной ширины ОПЗ этих переходов, рассчитанные по формуле $\delta = \sqrt[3]{12\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_к - U)/(qa)}$, в предположении линейной аппроксимации распределения примеси. Учитывая, что на эмиттерный p - n -переход в активном режиме подано прямое напряжение и ширина ОПЗ этого перехода меньше равновесной, аппроксимация распределения примеси линейной зависимостью дает небольшую погрешность при расчетах. Аппроксимация распределения примеси в коллекторном p - n -переходе линейной зависимостью (кривая 2), как следует из рис. А.12, является более грубым приближением при расчетах расширения ОПЗ.

Для уточненного расчета ширины ОПЗ коллектора заменим реальное распределение акцепторной примеси $N_1(x)$ некоторым экспоненциальным распределением

$$N_1^*(x) = N_{10}^* \exp(-\kappa_1^* x). \quad (5.12)$$

Будем считать, что аппроксимирующая кривая $N_1^*(x)$ совпадает с кривой $N_1(x)$ в точках с координатами $x_э$ и $x_к$. Это условие позволяет опреде-

Электrofизические и геометрические параметры p - n -переходов

Параметр	Эмиттерный p - n -переход	Коллекторный p - n -переход
Градиент концентрации примеси, a , см ⁻⁴	$1,23 \cdot 10^{22}$	$4,34 \cdot 10^{20}$
Контактная разность потенциалов ϕ_k , В	0,829	0,709
Расширение ОПЗ в область базы при $U = 0$, линейная аппроксимация, см	$0,0875 \cdot 10^{-4}$	$0,253 \cdot 10^{-4}$
Ширина ОПЗ при $U = 0$, см	$0,175 \cdot 10^{-4}$	$0,507 \cdot 10^{-4}$
Глубина p - n -перехода, см	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Длина l , см	$10 \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$
Ширина z , см	$50 \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$
Периметр Π , см	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
Площадь плоской части, см ²	$5 \cdot 10^{-6}$	$49 \cdot 10^{-6}$
Площадь боковой части, см ²	$3,39 \cdot 10^{-6}$	$12,3 \cdot 10^{-6}$
Полная площадь A , см ²	$8,39 \cdot 10^{-6}$	$61,3 \cdot 10^{-6}$
Плотность обратного тока насыщения, А/см ²	$0,9 \cdot 10^{-10}$	$1,46 \cdot 10^{-10}$
Обратный ток насыщения, А	$0,756 \cdot 10^{-15}$	$8,95 \cdot 10^{-15}$
Барьерная емкость в режиме $I_{\text{Э}} = 1$ мА, $U_K = -5$ В, пФ	0,990	0,556

ЛИТЬ

$$\kappa_1^* = \frac{1}{(x_k - x_{\text{э}})} \ln \frac{N_1(x_{\text{э}})}{N_1(x_k)}, \quad (5.13)$$

$$N_{10}^* = N_1(x_{\text{э}}) \exp(\kappa_1^* x_{\text{э}}).$$

Расчет с использованием значений $N_1(x_{\text{э}}) = 3,85 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $N_1(x_k) = 1,01 \cdot 10^{16}$ см⁻³ по табл.5.3 позволяет определить $\kappa_1^* = 3,64 \cdot 10^4$ см⁻¹; $N_{10}^* = 2,7 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Таким образом, мы заменили реальное распределение примеси $N(x)$, определенное выражением (5.1), в районе коллекторного перехода приближенным экспоненциальным распределением

$$N^*(x) = -N_{10}^* \exp(-\kappa_1^* x) + N_0. \quad (5.14)$$

Это распределение примеси нанесено на рис. А.12 штриховой линией (кривая 3) и достаточно близко к реальному распределению примеси.

Для p - n -перехода с экспоненциальным распределением примеси, соот-

ветствующим выражению (5.14), теория дает следующее трансцендентное уравнение, связывающее в неявном виде полную ширину ОПЗ p - n -перехода δ с приложенным напряжением U :

$$F(\kappa \delta) = \frac{(\kappa \delta)^2}{2} \operatorname{cth} \left(\frac{\kappa \delta}{2} \right) - \kappa \delta = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \kappa^2 (\varphi_\kappa - U)}{q N_0}. \quad (5.15)$$

При малых $\kappa \delta < 2$ функция $F(\kappa \delta) \approx (\kappa \delta)^3/12$. Если обозначить правую часть уравнения (5.15) через $B = \varepsilon \varepsilon_0 \kappa^2 (\varphi_\kappa - U)/q N_0$, то можно определить

$$\kappa \delta \approx \sqrt[3]{12 B}. \quad (5.16)$$

Это решение соответствует аппроксимации экспоненциального распределения примеси вблизи точки x_κ линейной зависимостью и дает погрешность менее 5% при $B < 0,6$. При больших $\kappa \delta > 4 \operatorname{cth}(\kappa \delta/2) \approx 1$, и поэтому

$$F(\kappa \delta) \approx (\kappa \delta)^2/2 - \kappa \delta = B. \quad (5.17)$$

Решение полученного квадратного алгебраического уравнения относительно $\kappa \delta$ дает

$$\kappa \delta \approx 1 + \sqrt{1 + 2B}. \quad (5.18)$$

При $B > 100$ величина $\kappa \delta \approx \sqrt{2B}$ с погрешностью не более 7%, что соответствует аппроксимации распределения примеси в p - n -переходе ступенчатой зависимостью. В диапазоне $0,6 < B < 100$ p - n -переход является плавным, и наилучшие результаты получаются при расчете значений $\kappa \delta$ с помощью модифицированного выражения

$$\kappa \delta \approx 1 + \sqrt{2B}. \quad (5.19)$$

Это выражение при $B > 0,6$ дает погрешность не более 5%. График зависимости $F(\kappa \delta)$ в соответствии с выражением (5.15) и аппроксимации этой зависимости приведены на рис. А.13.

Для коллекторного p - n -перехода величина κ , входящая в уравнение (5.15), равна κ_1^* , а величина δ определяет ширину ОПЗ коллектора δ_κ . По заданному значению U можно с помощью графика, изображенного на рис.А.13, или по формулам (5.16)-(5.19) определить произведение $\kappa \delta_\kappa$, а затем найти δ_κ . Например, для коллекторного p - n -перехода при $U = 0$

правая часть уравнения (5.15) имеет вид

$$B = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 k (\varphi_k - U)}{qN_0} = \frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} (3,64 \cdot 10^4)^2 0,709}{1,6 \cdot 10^{-19} 10^{16}} = 0,624.$$

Из графика рис. А.13 находим соответствующее значение $k_1^* \delta_k = 2$ и рассчитываем $\delta_k = 2/k_1^* = 2/3,64 \cdot 10^4 = 0,549 \cdot 10^{-4}$ см = 0,549 мкм. Это значение несколько больше значения 0,507 мкм, полученного при замене распределения примеси линейным. Расширение ОПЗ коллектора в область p -базы δ_{1k} и в область n -коллектора δ_{2k} связано с полной шириной ОПЗ соотношениями

$$\begin{aligned} k_1^* \delta_{1k} &= \ln \frac{k_1^* \delta}{1 - \exp(-k_1^* \delta)}; \\ k_1^* \delta_{2k} &= \ln \frac{\exp(+k_1^* \delta) - 1}{k_1^* \delta}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Значения δ_{1k} и δ_{2k} можно рассчитать по приведенным формулам или определить из графика рис. А.13: $k\delta_{1k} = 0,84$; $k\delta_{2k} = 1,16$, откуда $\delta_{1k} = 0,23$ мкм; $\delta_{2k} = 0,32$ мкм. Определенные по данной методике значения δ_k , δ_{1k} и δ_{2k} в функции обратного напряжения смещения коллекторного перехода приведены в табл. 5.6. Эмиттерный p - n -переход состоит из плос-

Таблица 5.6

К расчету расширения ОПЗ коллектора

$U_k, \text{В}$	B	$k\delta_k$	$\delta_k, \text{мкм}$	$\delta_{1k}, \text{мкм}$	$\delta_{2k}, \text{мкм}$
0	0,62	2,02	0,549	0,230	0,320
-1	1,50	2,81	0,769	0,302	0,467
-2	2,38	3,25	0,892	0,335	0,558
-4	4,14	3,95	1,08	0,385	0,701
-5	5,02	4,25	1,17	0,393	0,755
-6	5,90	4,50	1,24	0,412	0,810
-8	7,66	5,04	1,38	0,450	0,934
-10	9,42	5,46	1,50	0,467	1,03
-20	18,2	7,12	1,95	0,539	1,42
-30	27,0	8,42	2,31	0,585	1,73
-40	35,8	9,52	2,61	0,619	1,99
-50	44,6	10,5	2,88	0,646	2,24
-60	53,4	11,4	3,13	0,668	2,46

кой части, размеры которой совпадают с размерами окна в пленке окисла, созданного методом фотолитографии для диффузии эмиттерной приме-

си, и боковых частей, связанных с боковой диффузией примеси. Будем считать, что боковая поверхность p - n -перехода представляет собой часть цилиндрической поверхности с радиусом, равным глубине залегания p - n -перехода. Геометрические размеры p - n -переходов представлены в табл.5.5.

Площадь плоской части эмиттера

$$A_{\text{эпл}} = lz = 10 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2.$$

Площадь боковой части эмиттера

$$A_{\text{эбок}} = \pi x(l + z) = 3,39 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2.$$

Полная площадь эмиттера

$$A_{\text{э}} = A_{\text{эпл}} + A_{\text{эбок}} = 8,39 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2.$$

Аналогично рассчитывается площадь коллекторного p - n -перехода. Результаты расчета сведены в табл. 5.5.

3. Для проведения расчетов коэффициентов передачи тока необходимо определить ширину квазиэлектронейтральной базы с учетом расширения ОПЗ p - n -переходов. Расширение ОПЗ коллектора в базу при $U_K = -5$ В (рабочий режим) приведено в табл. 5.6 и составляет $\delta_{1к} = 0,393$ мкм. Расчет расширения ОПЗ эмиттера в базу $\delta_{2э}$ осложнен тем обстоятельством, что прямое напряжение на эмиттере неизвестно. В рабочем режиме в цепи эмиттера задан прямой ток $I_{\text{э}} = 1$ мА. Напряжение на эмиттере можно вычислить по формуле

$$U_{\text{э}} = \varphi_T \ln(1 + j/j'_{\text{э}0}). \quad (5.21)$$

Номинальная плотность тока эмиттера $j_{\text{э}} \approx I/A = 10^{-3}/8,39 \cdot 10^{-6} = 120$ А/см². Величина $j'_{\text{э}0}$ пока неизвестна, но ее можно оценить, учитывая, что обратный ток эмиттера определяется в основном электронной составляющей, которую можно рассчитать с учетом данных табл. 5.2:

$$j_{\text{э}ns} = \frac{q\bar{D}_n\bar{n}_{p0\text{б}}}{\bar{\omega}_\text{б}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 13,4 \cdot 4,09 \cdot 10^3}{0,607 \cdot 10^{-4}} = 1,44 \cdot 10^{-10} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

В отличие от данного в табл. 5.2, значение коэффициента диффузии

усреднено в диапазоне x от 1,8 до 2,407 мкм. Окончательно по формуле (5.21) находим $U_{\text{Э}} = 0,710$ В, полагая $j'_{\text{Э}0} \approx j_{\text{Э}ns}$.

Расширение ОПЗ эмиттера в область базы

$$\delta_{2\text{Э}} = \delta_{2\text{Э}0}(1 - U_{\text{Э}}/\varphi_{\text{КЭ}})^{1/3} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}.$$

Методика расчета коэффициента переноса состоит из двух этапов. На первом этапе с помощью численного интегрирования в соответствии с выражением

$$\Delta n(x) = n(x) - n_{p0}(x) = \frac{j_{\text{К}n}}{qN(x)} \int_{\omega}^x \frac{N(x)}{D_n} dx = \frac{I_{\text{К}n}}{A_{\text{Э}}qN(x)} \int_x^{\omega} \frac{N(x)}{D_n} dx$$

находим распределение концентрации неосновных носителей заряда в квазинейтральной базе в пределах от $x_{2\text{Э}} = 1,845$ мкм до $x_{1\text{К}} = 2,407$ мкм. Вычисление интеграла показано в табл. 5.7. Разделим интервал интегрирования на 10 частей. Интегрирование удобно вести по методу трапеций, вычисляя значение интеграла по формуле

Таблица 5.7

К расчету интеграла (5.22)

Номер шага	x , мкм	$N(x)$, см^{-3}	$N^+(x)$, см^{-3}	$D_n(x)$, $\text{см}^2/\text{с}$	$N(x)/D_n(x)$, $\text{см}^{-5} \cdot \text{с}$	$\Delta n(x)$, см^{-3}
0	2,4070	-3,654E16	6,574E16	19,5	1,873E15	0
1	2,3508	-4,589E16	8,048E16	18,3	2,505E15	1,675E15
2	2,2946	-5,551E16	9,772E16	17,2	3,231E15	3,199E15
3	2,2384	-6,727E16	1,227E17	15,8	4,244E15	4,592E15
4	2,1822	-7,841E16	1,528E17	14,6	5,370E15	6,093E15
5	2,1260	-8,872E16	1,914E17	13,4	6,642E15	7,762E15
6	2,0698	-9,670E16	2,408E17	12,1	7,959E15	9,774E15
7	2,0136	-10,016E16	3,045E17	11,0	9,117E15	1,243E16
8	1,9574	-9,598E16	3,869E17	9,88	9,712E15	1,641E16
9	1,9012	-7,975E16	4,935E17	8,85	9,008E15	2,338E16
10	1,845	-4,556E16	6,315E17	7,91	5,760E15	4,749E16

$$J = H(y_0/2 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + y_n/2), \quad (5.22)$$

где H – шаг интегрирования, в данном случае равный 0,0562 мкм; y_0 и y_n

– начальное и конечное значения функции.

Интегрирование можно вести по методу трапеций, но большую точность дает метод парабол (метод Симпсона), в соответствии с которым

$$J = \frac{H}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + \dots + 4y_{n-2} + 2y_{n-1} + y_n). \quad (5.23)$$

На этой стадии можно уточнить значение тока $j_{\text{энс}}$. По аналогии с формулой

$$I_{\text{Эн}} = \frac{A_{\text{э}} q n_i^2}{\varkappa_N \int_0^{\omega} \frac{N(x)}{D_n} dx} = (e^{U_{\text{э}}/\varphi_T} - 1) = I_{\text{Энс}}(e^{U_{\text{э}}/\varphi_T} - 1)$$

можем записать

$$j_{\text{энс}} = q n_i^2 / [\varkappa_N \int N(x)/D_n(x) dx].$$

По методу парабол вычислим $\int [N(x)/D(x)] dx = 3,489 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-5} \cdot \text{с}$. Окончательно $j_{\text{энс}} = 0,899 \cdot 10^{10} \text{ А/см}^2$. В данном случае метод трапеций дает ошибку менее 3%. При расчете $\Delta n(x)$ задавалось значение $j_{\text{нк}} = 10^3 \text{ А/см}^2$.

На втором этапе по вычисленной зависимости $\Delta n(x)$ находим значение тока объемной рекомбинации электронов в базе на основании формул

$$I_V = A_{\text{э}} \int_0^{\omega} \frac{q \Delta n(x)}{\tau_{\text{нб}}} dx = \frac{Q_n}{\tau_{\text{нб}}}. \quad (5.24)$$

Вычисление по методу трапеций дает $\int \Delta n(x) dx = 5,967 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а по методу парабол – $5,99 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В соответствии с формулой (5.24)

$$j_V = \frac{q}{\tau_{\text{нб}}} \int \Delta n(x) dx = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,99 \cdot 10^{11}}{15,8 \cdot 10^{-9}} = 6,07 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

В соответствии с формулой

$$\varkappa_N = \frac{I_{\text{Кн}}}{I_{\text{Эн}}} = \frac{I_{\text{Кн}}}{I_{\text{Кн}} + I_V} = \frac{1}{1 + I_V/I_{\text{Кн}}}$$

найдем коэффициент переноса для нормального режима

$$\varkappa_N = (1 + 6,07 \cdot 10^{-3})^{-1} \approx 1 - 6,07 \cdot 10^{-3} = 0,99393.$$

Если бы коэффициент инжекции был равен единице, то коэффициент передачи тока базы был бы равен $\beta_{\kappa} = \kappa_N / (1 - \kappa_N) = 165$.

Вычисление коэффициента инжекции γ_N представляет сложную задачу, решение которой в общем случае требует применения численных методов. В данном расчете рассмотрим оценочный метод, позволяющий оценить γ_N . Начнем с оценочного расчета тока дырок $j_{\text{эп}}$, инжектированных в квазиэлектронейтральную область n^+ -эмиттера. Дырки, инжектированные в эмиттер, попадают в сильное тормозящее электрическое поле, обусловленное неравномерным распределением доноров в эмиттере. Напряженность этого поля на левой границе ОПЗ эмиттера при $x = x_{1\text{э}} = 1,8 - 0,045 = 1,755$ мкм определяется выражением

$$\varepsilon(x_{1\text{э}}) = -\frac{\varphi_T}{N(x_{1\text{э}})} \frac{dN}{dx} \Big|_{x_{1\text{э}}}.$$

Значение $N(x_{1\text{э}}) = 7,63 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ вычисляем по формуле (5.1). Значение $a_{\text{э}} = a(x_{1\text{э}}) = dN/dx$ при $x = x_{1\text{э}}$ вычисляем по формуле (5.11): $a = -1,85 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}$. Поэтому $\mathcal{E}(x_{1\text{э}}) = 6,25 \cdot 10^3 \text{ В/см}$.

Таким образом, дырки в эмиттере диффундируют против электрического поля. Как известно из физики полупроводников, в этом случае для описания распределения дырок от координаты следует пользоваться не диффузионной длиной, а *длиной затягивания*, или *диффузионной длиной против поля*

$$L^* = L_{p\text{э}} / (\eta_{\text{э}} + \sqrt{\eta_{\text{э}}^2 + 1}). \quad (5.25)$$

В этой формуле величина $\eta_{\text{э}} = \mathcal{E}(x_{1\text{э}})L_{p\text{э}} / (2\varphi_T)$ называется фактором поля. Полагая, что $\mu_{p\text{э}} = 100 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ (см. рис. А.11), $D_{n\text{э}}(x_{1\text{э}}) = 2,6 \text{ см}^2\text{с}^{-1}$; $L_{p\text{э}} = 1,5 \text{ мкм}$, вычисляем $\eta_{\text{э}} = 18,2$; $L^* = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 4,13 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$.

Дырочный ток эмиттера на границе ОПЗ

$$j_{\text{эп}} = \frac{qL^* p_{n0\text{э}}(x_{1\text{э}})}{\tau_{p\text{э}}} [\exp(U_{\text{э}}/\varphi_T) - 1]. \quad (5.26)$$

Предэкспоненциальный множитель определяет плотность дырочного тока насыщения эмиттера. Учитывая, что $p_{n0\text{э}}(x_{1\text{э}}) = n_i^2 / N(x_{1\text{э}}) =$

$2,57 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, можно рассчитать

$$j_{\text{эps}} = \frac{qL_{EPn0\text{э}}(x_{1\text{э}})}{\tau_{p\text{э}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,13 \cdot 10^{-6} \cdot 2,57 \cdot 10^3}{8,7 \cdot 10^{-9}} = 1,95 \cdot 10^{-13} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

При оценке значения тока $j_{\text{эps}}$ считалось, что диффузия дырок против поля происходит в постоянном электрическом поле напряженностью, равной $\mathcal{E}(x_{1\text{э}})$. Реально напряженность тормозящего электрического поля спадает практически линейно к поверхности кристалла. Поэтому в среднем влияние поля $\mathcal{E}(x_{1\text{э}})$ слабее и значения токов $j_{\text{эp}}$ и $j_{\text{эps}}$ несколько больше. Тем не менее, сохраняя полученные оценочные значения, найдем коэффициент инжекции по формуле

$$\gamma_N = \frac{j_{\text{эн}}}{j_{\text{э}}} = \frac{j_{\text{эн}}}{j_{\text{эн}} + j_{\text{эp}}} = \frac{1}{1 + j_{\text{эp}}/j_{\text{эн}}} = \frac{1}{1 + j_{\text{эps}}/j_{\text{эns}}}. \quad (5.27)$$

Используя полученное ранее значение $j_{\text{эns}} = 0,899 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$, получаем $j_{\text{эps}}/j_{\text{эns}} = 2,17 \cdot 10^{-3}$, и величина $\gamma_N \approx (1 + 2,17 \cdot 10^{-3})^{-1} = 0,99784$. Если бы коэффициент \varkappa_N был равен единице, то коэффициент передачи тока базы был бы равен $\beta_\gamma = \gamma_N/(1 - \gamma_N) = 461$. С учетом ранее вычисленного значения \varkappa_N величина $\alpha_N = \gamma_N \varkappa_N = 0,99175$, а $\beta_N = \alpha_N/(1 - \alpha_N) = 121$.

Таким образом, в данном случае коэффициент передачи тока базы β_N в большей степени определяется значением коэффициента переноса. При большем, чем в данном примере, времени жизни электронов в базе коэффициент β_N в большей степени будет определяться коэффициентом инжекции γ_N .

Составляющие плотности тока насыщения эмиттерного p - n -перехода рассчитаны ранее. Полная плотность тока насыщения эмиттера

$$j'_{\text{э0}} = j_{\text{эns}} + j_{\text{эps}} = 0,899 \cdot 10^{-10} + 1,95 \cdot 10^{-10} = 0,900 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2.$$

С учетом полной площади эмиттера (см. табл. 5.5) найдем ток насыщения эмиттера

$$I'_{\text{э0}} = A_{\text{э}} j'_{\text{э0}} = 8,39 \cdot 10^{-6} \cdot 0,900 \cdot 10^{-10} = 0,756 \cdot 10^{-15} \text{ А/см}^2.$$

Как и в транзисторе с однородной базой, составляющая тока насыщения коллектора, обусловленная термогенерацией неосновных носителей заряда

(электронов) в базе, $j_{ns} = j_{ns} = 0,899 \cdot 10^{-10}$ А/см².

Дырочная составляющая тока насыщения, обусловленная термогенерацией дырок в квазиэлектронейтральном коллекторе, определяется формулой

$$I_{kps} = A_k \frac{qD_{nk}n_{p0k}}{L_{nk}} \operatorname{th} \frac{\omega_k}{L_{nk}},$$

если в ней заменить индекс n на p и наоборот. Тогда плотность тока j_{kps} можно рассчитать по формуле

$$j_{kps} = \frac{qD_{pk}p_{n0k}}{L_{pk}} \operatorname{th} \frac{\omega_k}{L_{pk}}. \quad (5.28)$$

Полагая, что начальная ширина n -области коллектора $\omega_{кт} = 2,5$ мкм (табл. 5.2) и в рабочем режиме при $U_k = -5$ В $\delta_{2к} = 0,755$ мкм (табл. 5.6), получаем ширину квазиэлектронейтральной области коллектора: $\omega_k = \omega_{кт} - \delta_{2к} = 2,5 - 0,755 = 1,745$ мкм. В соответствии с данными табл. 5.2 $\omega_k/L_{pk} = 1,745 \cdot 10^{-4}/2,94 \cdot 10^{-4} = 0,594$. При данном значении аргумента в соответствии с табл. А.1 приложения А имеем $\operatorname{th} 0,594 \approx 0,531$.

На основании этих данных получаем

$$j_{kps} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,91 \cdot 1,96 \cdot 10^4}{2,94 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,531 = 0,561 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2.$$

Плотность тока насыщения коллектора

$$j'_{k0} = j_{kns} + j_{kps} = 0,899 \cdot 10^{-10} + 0,561 \cdot 10^{-10} = 1,46 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2.$$

Ток насыщения коллектора с учетом полной площади коллектора (см. табл. 5.5),

$$I'_{k0} = A_k j'_{k0} = 61,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,46 \cdot 10^{-10} = 8,95 \cdot 10^{-15} \text{ А/см}^2.$$

Сопротивление активной области базы рассчитаем по формуле, используя данные табл. 5.2:

$$r_{BA} = \frac{1}{8} \rho_{sBA} \frac{l}{z} = \frac{5,58 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 50 \cdot 10^{-4}} = 140 \text{ Ом}.$$

Сопротивление пассивной области базы

$$r_{\text{БП}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{сБП}} \frac{(y_2 - y_1)}{z} = \frac{257 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-4}} = 26 \text{ Ом.}$$

Сопротивление растекания базового контакта рассчитаем по формуле

$$r'_{\text{БМ}} = \frac{\sqrt{\rho_{\text{сБП}} \rho_{\text{с}}}}{z} \text{cth} \left(\sqrt{\frac{\rho_{\text{сБП}}}{\rho_{\text{с}}}} y \right). \quad (5.29)$$

Примем

$$\rho_{\text{с}} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; \quad y = y_3 - y_2 = 10 \text{ мкм.}$$

Аргумент гиперболического котангенса в формуле (5.29) $\sqrt{\rho_{\text{сБП}}/\rho_{\text{с}}} y_{\text{м}} = \sqrt{257/3 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 2,93$, соответственно, $\text{cth } 2,93 \approx 1$ и сопротивление

$$r'_{\text{БМ}} = \sqrt{\rho_{\text{сБП}} \rho_{\text{с}}}/z = \sqrt{257 \cdot 3 \cdot 10^{-5}}/50 \cdot 10^{-4} = 17,6 \text{ Ом.}$$

Контактное сопротивление $r_{\text{БМ}} = r'_{\text{БМ}}/2 = 8,8 \text{ Ом.}$

Сопротивление базы транзистора

$$r_{\text{Б}} = r_{\text{БА}} + r_{\text{БП}} + r_{\text{БМ}} \approx 140 + 26 + 9 = 175 \text{ Ом.}$$

Сопротивление тела коллектора имеет две составляющие, первая из которых определяется падением напряжения на сопротивлении высокоомного слоя коллектора n -типа электропроводности, а вторая – падением напряжения на сопротивлении низкоомной подложки n^+ -типа с концентрацией примеси $N_n = 10^{20} \text{ см}^{-3}$, удельным сопротивлением $\rho_{\text{п}} = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной $\omega_{\text{п}} = 200 \text{ мкм}$. Первая составляющая

$$r_{\text{кк1}} \approx \rho_{\text{к}} \omega_{\text{к}}/A_{\text{э}} = 0,595 \cdot 2,18 \cdot 10^{-4}/5 \cdot 10^{-6} \approx 26 \text{ Ом.}$$

Толщина квазиэлектронейтрального n -коллектора рассчитывалась при $U_{\text{К}} = 0$. С учетом данных табл. 5.6 при этом $\delta_{2\text{к}} = 0,32 \text{ мкм}$ и $\omega_{\text{к}} = \omega_{\text{кТ}} - \delta_{2\text{к}} = 2,5 - 0,32 = 2,18 \text{ мкм}$.

Вторая составляющая

$$r_{\text{кк}2} \approx \rho_{\text{п}} \omega_{\text{п}} / A = 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^{-4} / 5 \cdot 10^{-6} \approx 3,5 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление тела коллектора

$$r_{\text{кк}} = r_{\text{кк}1} + r_{\text{кк}2} = 26 + 3,5 = 29,5 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем удельную барьерную емкость эмиттера при $U_{\text{Э}} = 0$ (ширина ОПЗ дана в табл. 5.5):

$$C'_{\text{Э бар}} = \varepsilon \varepsilon_0 / \delta_{\text{Э}0} = 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} / 0,175 \cdot 10^{-4} = 6,07 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Барьерная емкость эмиттера при $U_{\text{Э}} = 0$

$$C'_{\text{Э бар}} = AC'_{\text{Э бар}} = 8,39 \cdot 10^{-6} \cdot 6,07 \cdot 10^{-8} = 0,509 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 0,509 \text{ пФ.}$$

В рабочем режиме при $I_{\text{Э}} = 1 \text{ мА}$ имеем $U_{\text{Э}} = 0,71 \text{ В}$; $\delta_{\text{Э}} = 0,09 \text{ мкм}$ и барьерная емкость эмиттера $C_{\text{Э бар}} = 0,99 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 0,99 \text{ пФ}$.

Удельную и полную барьерную емкость коллектора рассчитываем при $U_{\text{К}} = -5 \text{ В}$ (при этом $\delta_{\text{К}} = 1,17 \text{ мкм}$, как следует из табл. 5.6):

$$C'_{\text{К бар}} = 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} / 1,17 \cdot 10^{-4} = 0,908 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$C_{\text{К бар}} = AC'_{\text{К бар}} = 61,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,908 \cdot 10^{-8} = 0,556 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 0,556 \text{ пФ.}$$

4. Рассчитаем параметры Т-образной эквивалентной схемы для малого сигнала в рабочей точке. Дифференциальное сопротивление эмиттера $r_{\text{Э}}$ в соответствии с формулой

$$r_{\text{Э}} = \left. \frac{dU_{\text{Э}}}{dI_{\text{Э}}} \right|_{U_{\text{К}}=\text{const}} = \left. \frac{u_{\text{Э}}}{i_{\text{Э}}} \right|_{u_{\text{К}}=0} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{Э}} + I'_{\text{Э}0}}$$

при $I_{\text{Э}} = 1 \text{ мА}$ составляет 25,8 Ом.

Рассчитаем первую составляющую дифференциальной выходной проводимости $g'_{\text{К}}$ в рабочей точке $I_{\text{Э}} = 1 \text{ мА}$; $U_{\text{К}} = -5 \text{ В}$. Так как величина α_N и ширина ОПЗ определялись численными методами, расчет $g'_{\text{К}}$ надо вести

с использованием формулы

$$g'_k = I_{\text{Э}} \frac{d\alpha}{dU_K} = I_{\text{Э}} \left| \frac{d\alpha}{d\omega} \right| \left| \frac{d\delta_{k1}}{d\delta_k} \right| \left| \frac{d\delta_k}{dU_K} \right|.$$

Проведенный ранее расчет показал, что при $I_{\text{Э}} = 1$ мА; $U_K = -5$ В величина $\varkappa_N = 1 - 6,07 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_N = 1 - 2,17 \cdot 10^{-3}$; $\alpha_N = 1 - 8,24 \cdot 10^{-3}$; $\beta_N = 121,4$ (такая форма записи предпочтительнее для сохранения точности значения параметров). По уже приведенной численной методике надо повторить все расчеты при изменении напряжения на коллекторе, например, на 1 В. Задавая $U_K = -6$ В, получаем $\varkappa_N = 1 - 5,88 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_N = 1 - 2,15 \cdot 10^{-3}$; $\alpha_N = 1 - 8,03 \cdot 10^{-3}$; $\beta_N = 124,5$.

Окончательно

$$g'_k = I_{\text{Э}} d\alpha_N / dU_K = 10^{-3} \text{А} \cdot 0,21 \cdot 10^{-3} / 1 \text{В} = 0,21 \cdot 10^{-6} \text{Ом}^{-1}.$$

Если бы эта составляющая была единственная, то дифференциальное сопротивление коллектора базы было бы равно $r_k = 1/g'_k = 4,76$ МОм.

Для определения второй составляющей проводимости коллектора g'_k необходимо рассчитать ток генерации носителей в ОПЗ коллектора, определяемый формулой

$$I_{RGK}^- = A_k q n_i \delta_k(U_K) / (2\tau_{0k}), \quad (5.30)$$

где $\tau_{0k} = 7,26 \cdot 10^{-8}$ с – генерационное время жизни носителей заряда в $p-n$ - переходе.

Воспользовавшись данными табл. 5.6 при $U_K = -5$ В, получим $\delta_k = 1,17$ мкм; $I_{RGK}^- = 1,106 \cdot 10^{-10}$ А, а при $U_K = -6$ В получим $\delta_k = 1,24$ мкм; $I_{RGK}^- = 1,172 \cdot 10^{-10}$ А. На основании этих данных вычисляем

$$g''_k = dI_{RGK}^- / dU_K = 1,172 \cdot 10^{-10} - 1,106 \cdot 10^{-10} = 6,6 \cdot 10^{-12} \text{Ом}^{-1}.$$

Таким образом, $g''_k \ll g'_k$, и поэтому дифференциальное сопротивление коллектора $r_k = 4,76$ МОм.

Рассчитываем коэффициент обратной связи по напряжению, определяемый формулой

$$\mu_{\text{ЭК}} = \left. \frac{dU_{\text{Э}}}{dU_K} \right|_{I_{\text{Э}}=\text{const}} = \left. \frac{u_{\text{Э}}}{u_K} \right|_{i_{\text{Э}}=0}.$$

В соответствии с граничными условиями для концентрации неосновных носителей

$$\Delta n(x_{2\text{э}}) = n_{p0\text{б}}(x_{2\text{э}})[\exp(U_{\text{э}}/\varphi_T) - 1]. \quad (5.31)$$

Выразим из этого выражения напряжение

$$U_{\text{э}} = \varphi_T \ln[\Delta n(x_{2\text{э}})/n_{p0\text{б}}(x_{2\text{э}}) + 1]. \quad (5.32)$$

Зададим напряжение на коллекторе $U_{\text{К}} = -5$ В. При этом из табл. 5.7 имеем $\Delta n_{\text{э}1} = \Delta n(x_{2\text{э}}) = 4,749 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $x_{\text{э}} = 1,845$ мкм. Увеличим обратное напряжение коллектора на 1 В до $U_{\text{К}} = -6$ В. Проводя вычисления $\Delta n(x)$ по изложенной ранее методике, получаем $\Delta n_{\text{э}2} = \Delta n(x_{2\text{э}}) = 4,704 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Пренебрегая в формуле (5.32) единицей, находим

$$\Delta U_{\text{э}} = U_{\text{э}1} - U_{\text{э}2} \approx \varphi_T \ln(\Delta n_{\text{э}1}/\Delta n_{\text{э}2}) = 2,456 \cdot 10^{-4} \text{ В}.$$

Так как изменение напряжения $\Delta U_{\text{К}}$ составляет 1 В, то

$$\mu_{\text{эК}} = dU_{\text{э}}/dU_{\text{К}} = \Delta U_{\text{э}}/\Delta U_{\text{К}} = 2,456 \cdot 10^{-4}.$$

Сопротивление базы и коэффициенты передачи тока базы рассчитаны ранее.

5. Первоначально оценим напряжение пробоя коллекторного перехода, аппроксимируя распределение примесей в нем линейным законом с градиентом $a_{\text{К}} = 4,34 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$. Расчет по формуле

$$U_{\text{К проб}}(B) \approx 60 \left(\frac{\Delta E}{1,1} \right)^{1,2} \left(\frac{a}{3 \cdot 10^{20}} \right)^{-0,4}, \quad (5.33)$$

где a – градиент концентрации примеси в p - n -переходе, см^{-4} , дает $U_{\text{К проб}} \approx 52$ В. Это грубая оценка. Номограммы, основанные на точных расчетах напряжения лавинного пробоя, представлены в книге [7] и приведены в приложении на рис. А.14. По этим номограммам можно уточнить значение $U_{\text{К проб}} = 65$ В.

Напряжение лавинного пробоя эмиттерного p - n -перехода можно также оценить по формуле (5.33). Оценка дает $U_{\text{э проб}} \approx 14$ В.

Данные табл. 5.6 показывают, что напряжение смыкания $U_{\text{с МК}}$ значительно превышает напряжение лавинного пробоя коллектора.

Пробивное напряжение коллектора транзистора с общим эмиттером при нулевом токе базы можно оценить по формуле $U_\alpha = U_{K \text{ проб}} \sqrt[n]{1 - \alpha_{N0}}$, полагая $n = 3$, $\beta_{N0} = 121$ и $U_{K \text{ проб}} = 65$ В:

$$U_{KЭ \text{ проб}} = U_\alpha = 65 / \sqrt[3]{121 + 1} \approx 16 \text{ В.}$$

Надо отметить, что полученное значение пригодно только в качестве очень грубой оценки.

Будем считать, что для кремниевого транзистора максимальная температура перехода $T_{j \text{ max}} = 150$ °С. Тепловое сопротивление переход-корпус, учитывая малые размеры эмиттера и боковое растекание тепла, можно оценить по формуле

$$R_{T \text{ п-к}} \approx 1 / (2\lambda \sqrt{A_\Theta}) = 1 / (2 \cdot 1,45 \sqrt{5 \cdot 10^{-6}}) = 154 \text{ К/Вт.}$$

Выберем корпус с тепловым сопротивлением $R_{T \text{ к-с}} = 300$ К/Вт. Тогда полное сопротивление $R_{T \text{ п-с}} = R_{T \text{ п-к}} + R_{T \text{ к-с}} = 454$ °С/Вт. При температуре окружающей среды $T_0 = 25$ °С максимальная мощность, рассеиваемая коллектором:

$$P_{K \text{ max}} = (T_{j \text{ max}} - T_0) / R_{T \text{ п-с}} = (150 - 25) / 454 = 0,286 \text{ Вт.}$$

Задание № 6

Расчет основных параметров тиристора

Расчет параметров тиристорov более сложен, чем расчет параметров биполярных транзисторов. Рассмотрим пример упрощенного оценочного расчета, включающий определение некоторых геометрических размеров p - n - p -структуры, электрофизических характеристик отдельных слоев и ряда основных электрических параметров тиристора. Будем считать, что в рассматриваемом приборе базовые и эмиттерные области равномерно легированы и площади всех p - n -переходов равны. Его структура аналогична представленной на рис. А.15. Параметры структуры для каждого варианта расчета приведены в табл. 6.2.

Задано: 1. Материал исходной пластины – кремний n -типа электропроводности.

2. Электрофизические характеристики и геометрические размеры областей структуры:

Таблица 6.1

Параметры структуры тиристора

Параметр	p_1 -база	p_2 -эмиттер	n_1 -эмиттер
N , см ⁻³	$3 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$
ω , мкм	50	100	50
τ , мкс	1,0	0,03	0,001

3. Электрические параметры: средний ток в открытом состоянии $I_{пр\ max} = 10$ А; максимально допустимое повторяющееся напряжение $U_{повт} = 600$ В; ток управляющего электрода $I_y = 0$.

Определить: 1. Электрофизические параметры базовой области n_2 ; концентрацию донорной примеси N_{n2} ; удельное сопротивление ρ_{n2} ; время жизни неосновных носителей заряда τ_p^{n2} .

2. Геометрические размеры структуры: толщину базы n -типа ω_{n2} ; площади p - n -переходов A .

3. Электрофизические параметры тиристора: ток включения $I_{\text{вкл}}$, ток выключения $I_{\text{выкл}}$ и остаточное напряжение $U_{\text{откр}}$.

Таблица 6.2

Варианты заданий

Параметр	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Концентрация в p_1 -базе N , см^{-3}	$1,0 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$4,0 \cdot 10^{16}$	$3,0 \cdot 10^{16}$	$5,0 \cdot 10^{16}$	$6,0 \cdot 10^{16}$	$7,0 \cdot 10^{16}$
Концентрация в p_2 -эмиттере N , см^{-3}	$1,7 \cdot 10^{20}$	$1,8 \cdot 10^{20}$	$1,9 \cdot 10^{20}$	$2,0 \cdot 10^{20}$	$2,1 \cdot 10^{20}$	$2,2 \cdot 10^{20}$	$2,3 \cdot 10^{20}$
Концентрация в n_1 -эмиттере N , см^{-3}	$4,7 \cdot 10^{20}$	$4,8 \cdot 10^{20}$	$4,9 \cdot 10^{20}$	$5,0 \cdot 10^{20}$	$5,1 \cdot 10^{20}$	$5,2 \cdot 10^{20}$	$5,3 \cdot 10^{20}$
Время жизни ННЗ в p_1 -базе τ , мкс	1,1	1,2	1,3	1,0	1,4	1,5	1,6
Время жизни ННЗ в p_2 -эмиттере τ , мкс	0,009	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Время жизни ННЗ в n_1 -эмиттере τ , мкс	0,0011	0,0012	0,0013	0,001	0,0014	0,0015	0,0016
Толщина p_1 -базы ω , мкм	47	48	49	50	51	52	53
Толщина p_2 -эмиттера ω , мкм	97	98	99	100	101	102	103
Толщина n_1 -эмиттера ω , мкм	47	48	49	50	51	52	53

Порядок расчета

1. Расчет начинаем с определения электрофизических параметров базовой n -области. Для выбора удельного сопротивления исходной пластины

кремния используем условие запаса

$$U_{\text{повт}} = 0,75U_{\text{проб}}; \quad U_{\text{проб}} = U_{\text{повт}}/0,75 = 600/0,75 = 800 \text{ В.}$$

По кривой зависимости напряжения лавинного пробоя от концентрации донорной примеси (см. рис. А.1) находим концентрацию доноров в базе n -типа $N_{n2} = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Удельное сопротивление исходной пластины кремния $\rho_{n2} = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (см. рис. А.2). Марка такого кремния 2А КЭФ 15/0,1, т.е. $L_p = 0,01 \text{ см}$ и

$$\tau_p^{n2} = L_p^2 = 0,01^2/12 = 8 \text{ мкс.}$$

2. Определяем геометрические размеры структуры. Толщину n -базы тиристора обычно принимают в 1,5 раза большей ширины ОПЗ коллекторного перехода при напряжении $U_{\text{проб}}$:

$$\delta_{n2} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{проб}}}{qN_{n2}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 800}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{14}}} \approx 60 \text{ мкм.}$$

Тогда $\omega_{n2} = 1,5$; $\delta_{n2} = 1,5 \cdot 60 \approx 90 \text{ мкм}$. Принимаем $\omega_{n2} = 100 \text{ мкм}$.

Площадь структуры определяем на основании допустимой плотности тока для кремниевых приборов $j_{\text{max}} = 10^2 \text{ А/см}^2$, откуда

$$A = I_{\text{прmax}}/j_{\text{max}} = 10/10^2 = 0,1 \text{ см}^2.$$

3. Для определения токов включения и выключения воспользуемся графоаналитическим методом. Отметим, что нет необходимости строить ВАХ тиристора, так как эти параметры легко находятся на основании зависимости $F(I) = I(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$.

Построение начинаем с расчета токовых зависимостей коэффициентов передачи составных транзисторов

$$\alpha_1(I) = \gamma_1(I)\varkappa_1; \quad \alpha_2(I) = \gamma_3(I)\varkappa_2.$$

Коэффициенты переноса носителей через базы определим согласно формулам, считая их не зависящими от тока эмиттера:

$$\varkappa_1 = \text{sech} \frac{\omega_{p1}}{L_n} = \frac{2}{\exp(\omega_{p1}/L_n) + \exp(-\omega_{p1}/L_n)};$$

$$\alpha_2 = \operatorname{sech} \frac{\omega_{n2}}{L_p} = \frac{2}{\exp(\omega_{n2}/L_p) + \exp(-\omega_{n2}/L_p)}.$$

Диффузионная длина электронов в p -базе

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n^{p1}} = \sqrt{36 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 6 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ мкм.}$$

Диффузионная длина дырок в n -базе $L_p = 0,01 \text{ см} = 100 \text{ мкм}$. Коэффициент переноса электронов через p -базу

$$\alpha_1 = \frac{2}{\exp(50/60) + \exp(-50/60)} = 0,73.$$

Коэффициент переноса дырок через n -базу

$$\alpha_2 = \frac{2}{\exp(100/100) + \exp(-100/100)} = 0,65.$$

Зависимость коэффициента инжекции от тока, протекающего через тиристор, выражается формулой

$$\gamma(I) = \frac{\sqrt{1 + I/I_0} - 1}{\sqrt{1 + I/I_0} + 1},$$

где $I_0 = I_{R0}^2/4I_s$.

$$I_{R0} = A \frac{qn_i \varphi_T \delta_0}{\varphi_K \sqrt{\tau_{n0} \tau_{p0}}}; \quad \delta_0 = \frac{2\varepsilon \varepsilon_0 \varphi_K}{qN};$$

$$\varphi_K = \varphi_T \ln \frac{N_n N_p}{n_i^2}.$$

Дырочный и электронный токи насыщения эмиттерных переходов:

$$I_{ps} = A \frac{qD_p P_{n0}}{L_p \operatorname{th}(\omega_{n2}/L_p)};$$

$$I_{ns} = A \frac{qD_n P_{p0}}{L_n \operatorname{th}(\omega_{p1}/L_n)}.$$

Вычислим значения всех величин, имеющих в расчетных формулах:

$$\operatorname{th}(\omega_{n2}/L_p) = \frac{\exp(100/100) - \exp(-100/100)}{\exp(100/100) + \exp(-100/100)} = 0,76;$$

$$\text{th}(\omega_{p1}/L_n) = \frac{\exp(50/60) - \exp(-50/60)}{\exp(50/60) + \exp(-50/60)} = 0,69;$$

$$p_{n0} = n_i^2/n_{p0} = n_i^2/N_{n2} = (1,9 \cdot 10^{10})^2/3 \cdot 10^{14} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3};$$

$$n_{p0} = n_i^2/p_{n0} = n_i^2/N_{p1} = (1,9 \cdot 10^{10})^2/3 \cdot 10^{16} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}.$$

Токи насыщения:

$$I_{ps3} = 0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 1,2 \cdot 10^6/100 \cdot 10^{-4} \cdot 0,76 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ А};$$

$$I_{ns1} = 0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 36 \cdot 1,2 \cdot 10^4/60 \cdot 10^{-4} \cdot 0,69 = 1,7 \cdot 10^{-12} \text{ А}.$$

Контактные разности потенциалов для переходов П1 и П3:

$$\varphi_{к1} = \varphi_T \ln \frac{N_{n1}N_{p1}}{n_i^2} = 2,3 \cdot 0,025 \lg \frac{5 \cdot 10^{20} \cdot 3 \cdot 10^{16}}{(1,9 \cdot 10^{10})^2} = 0,95 \text{ В};$$

$$\varphi_{к3} = \varphi_T \ln \frac{N_{n2}N_{p2}}{n_i^2} = 2,3 \cdot 0,025 \lg \frac{3 \cdot 10^{14} \cdot 2 \cdot 10^{20}}{(1,9 \cdot 10^{10})^2} = 0,82 \text{ В}.$$

Ширина ОПЗ эмиттерных переходов:

$$\delta_{01} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{к1}}{qN_{p1}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 0,95}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{16}}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см};$$

$$\delta_{03} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{к3}}{qN_{n2}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 0,82}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{14}}} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Произведения $\sqrt{\tau_{n0}\tau_{p0}}$ для эмиттерных переходов:

$$\sqrt{\tau_p^{n1}\tau_n^{p1}} = \sqrt{0,001 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 0,03 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 0,03 \text{ мкс};$$

$$\sqrt{\tau_p^{n2}\tau_n^{p2}} = \sqrt{0,03 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 0,5 \text{ мкс}.$$

Характеристические токи генерации-рекомбинации:

$$I_{R01} = A \frac{qn_i\varphi_T\delta_{01}}{\phi_{к1}\sqrt{\tau_p^{n1}\tau_n^{p1}}} = 0,1 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,9 \cdot 10^{10} \cdot 0,025 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{0,95\sqrt{3 \cdot 10^{-8}}} =$$

$$= 5,3 \cdot 10^{-9} \text{ А};$$

$$I_{R03} = A \frac{qn_i \varphi_T \delta_{01}}{\phi_{к3} \sqrt{\tau_p^{n2} \tau_n^{p2}}} = 0,1 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,9 \cdot 10^{10} \cdot 0,025 \cdot 1,9 \cdot 10^{-5}}{0,82 \sqrt{5 \cdot 10^{-7}}} =$$

$$= 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ А};$$

$$I_{01} = I_{R01}^2 / 4I_{ns} = (5,3 \cdot 10^{-9})^2 / 4 \cdot 1,7 \cdot 10^{-12} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 4 \text{ мкА};$$

$$I_{03} = I_{R03}^2 / 4I_{ps} = (3,5 \cdot 10^{-9})^2 / 4 \cdot 3 \cdot 10^{-11} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ А} = 0,1 \text{ мкА}.$$

Рассчитав токовые зависимости коэффициентов инжекции, построим график функции $F(I) = I(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$ (рис. А.16).

Ток выключения находим по точке пересечения функции $F(I)$ с осью ординат: $I_{\text{выкл}} = 55 \text{ мкА}$. Ток включения соответствует максимуму функции: $I_{\text{вкл}} = 15 \text{ мкА}$.

Для определения напряжения в открытом состоянии тиристора при токе $I = 10 \text{ А}$ необходимо знать ВАХ тиристора в открытом состоянии. Анодное напряжение $U_A = U_1 - U_2 + U_3$.

Полный ток через тиристор в открытом состоянии равен токам через все p - n -переходы: $I = I_1 = I_2 = I_3$. При прямом направлении напряжения на переходе для $U \gtrsim 0,5 \text{ В}$ токами рекомбинации в ОПЗ можно пренебречь, поэтому для коллекторного перехода $I_{s2} = I_{ps2} + I_{ns2}$. Так как $N_{p1} \gg N_{n2}$, то $I_{s2} = I_{ps2} = I_{ps3} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ А}$;

$$I_2 = I_{ps2} \exp(U_2 / \varphi_T) = 3 \cdot 10^{-11} \exp(U_2 / \varphi_T).$$

Логарифмируя и преобразуя зависимости токов от напряжений на p - n -переходах, получаем

$$U_1 = 2,3\varphi_T \lg \frac{I_1}{1,7 \cdot 10^{-12}};$$

$$U_2 = 2,3\varphi_T \lg \frac{I_2}{3 \cdot 10^{-11}}; \quad U_3 = 2,3\varphi_T \lg \frac{I_3}{3 \cdot 10^{-11}}.$$

Анодное напряжение

$$U_A = U_1 - U_2 + U_3 = U_1 = 2,3\varphi_T \lg \frac{I}{1,7 \cdot 10^{-12}}.$$

Напряжение в открытом состоянии тиристора

$$U_{\text{откр}} = U_1(I_1 = 10) = 2,3 \cdot 0,025 \lg \frac{10}{1,7 \cdot 10^{-12}} = 0,735 \text{ В}.$$

Заключение

Представленные в данном пособии учебные задания по расчету параметров основных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и тиристоров) носят рекомендательный характер и не отражают всего многообразия методов и подходов к расчету и проектированию полупроводниковых приборов.

Современные методы расчета и проектирования ориентированы на широкое использование компьютерных средств поддержки, так называемых САД-систем. Применение их позволяет ускорить и автоматизировать некоторые этапы проектирования полупроводниковых приборов.

Однако в основу указанных систем положены принципы, основанные на классических математических и физических моделях полупроводниковых приборов, методах их получения, кратко рассмотренные в данном пособии.

Литература

1. Викулин И. М., Стафеев В. М. Физика полупроводниковых приборов. — М. : Радио и связь, 1990. — 264 с.
2. Зи С. Физика полупроводников: в 2 кн. Кн.1. — М. : Мир, 1984. — 456 с.
3. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 488 с.
4. Брук В. А., Гаршенин В. В., Курносое А. И. Производство полупроводниковых приборов. — М. : Высшая школа, 2006. — 264 с.
5. Крутякова М. Г., Чарыков Н. А., Юдин В. В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. — М. : Радио и связь, 1983. — 352 с.
6. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. — М. : Наука, 1977. — 672 с.
7. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках. — Л. : Энергия, 1980. — 152 с.

Приложение А

Справочные графики и таблицы

Эмпирическая формула для подвижности носителей заряда

Подвижность носителей заряда уменьшается с ростом концентрации легирующей примеси из-за дополнительного рассеяния носителей заряда на ионизированных атомах примеси. Зависимость подвижности электронов и дырок в кремнии и германии при температуре 300 К от суммарной концентрации ионизированных атомов легирующей примеси может быть представлена следующей эмпирической зависимостью:

$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_2}{1 + (N^+/N_0)^\alpha},$$

где N^+ – суммарная концентрация рассеивающих центров. Остальные параметры представлены в табл. А.1

Таблица А.1

Параметры полупроводников

Полупроводник	$\mu_1, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_2, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$N_0, \text{см}^{-3}$	α
Для электронов				
Кремний	65	1265	$8,5 \cdot 10^{16}$	0,72
Для дырок				
	48	447	$6,3 \cdot 10^{16}$	0,76
Для электронов				
Германий	50	3850	$8,1 \cdot 10^{16}$	0,48
Для дырок				
	42	1860	$1,4 \cdot 10^{17}$	0,43

Физические постоянные

Скорость света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$
Число Авогадро	$N_0 = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Заряд электрона	$q = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-1}$
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Г} \cdot \text{м}^{-1}$
Энергия фотона с длиной волны $\lambda = 1 \text{ мкм}$	$E = 1,24 \text{ эВ}$

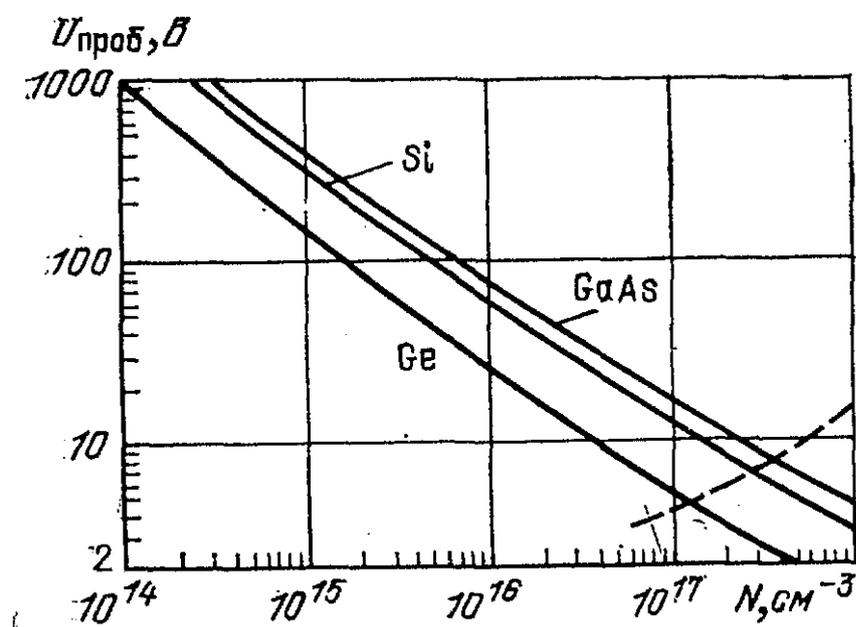


Рис. А.1. Зависимость напряжения лавинного пробоя от концентрации примеси для резких p - n -переходов в германии, кремнии и арсениде галлия при 300 К

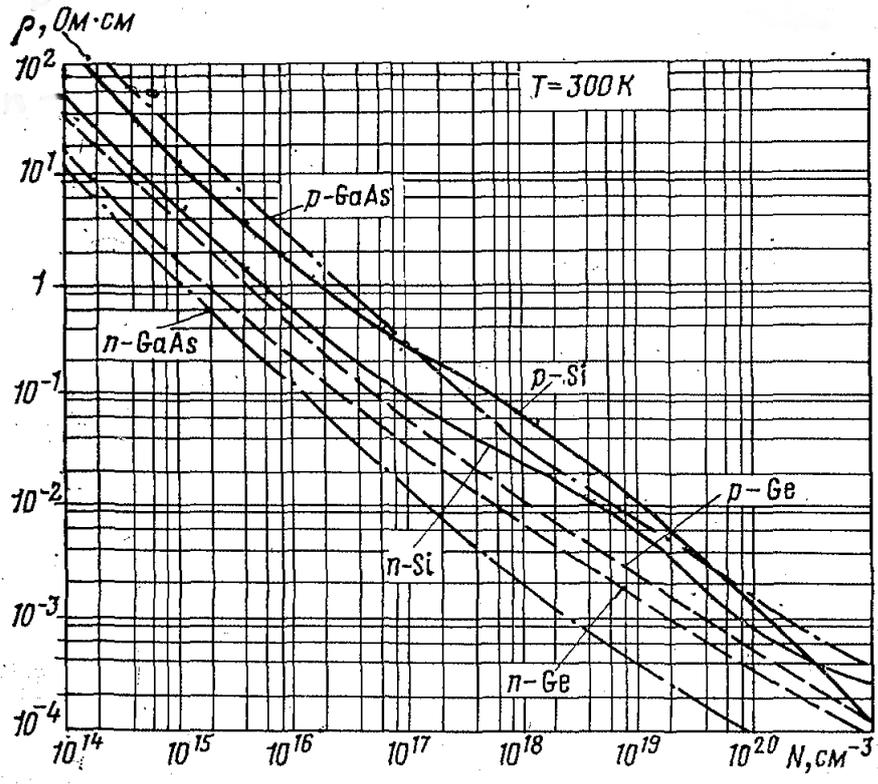


Рис. А.2. Зависимость удельного сопротивления германия, кремния и арсенида галлия от концентрации примеси

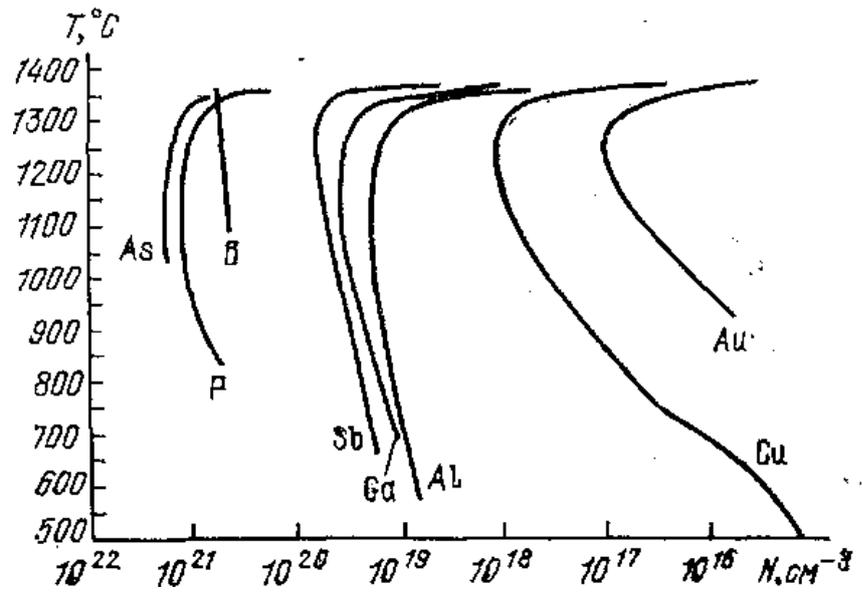


Рис. А.3. Зависимость предельной растворимости примесных элементов в кремнии от температуры

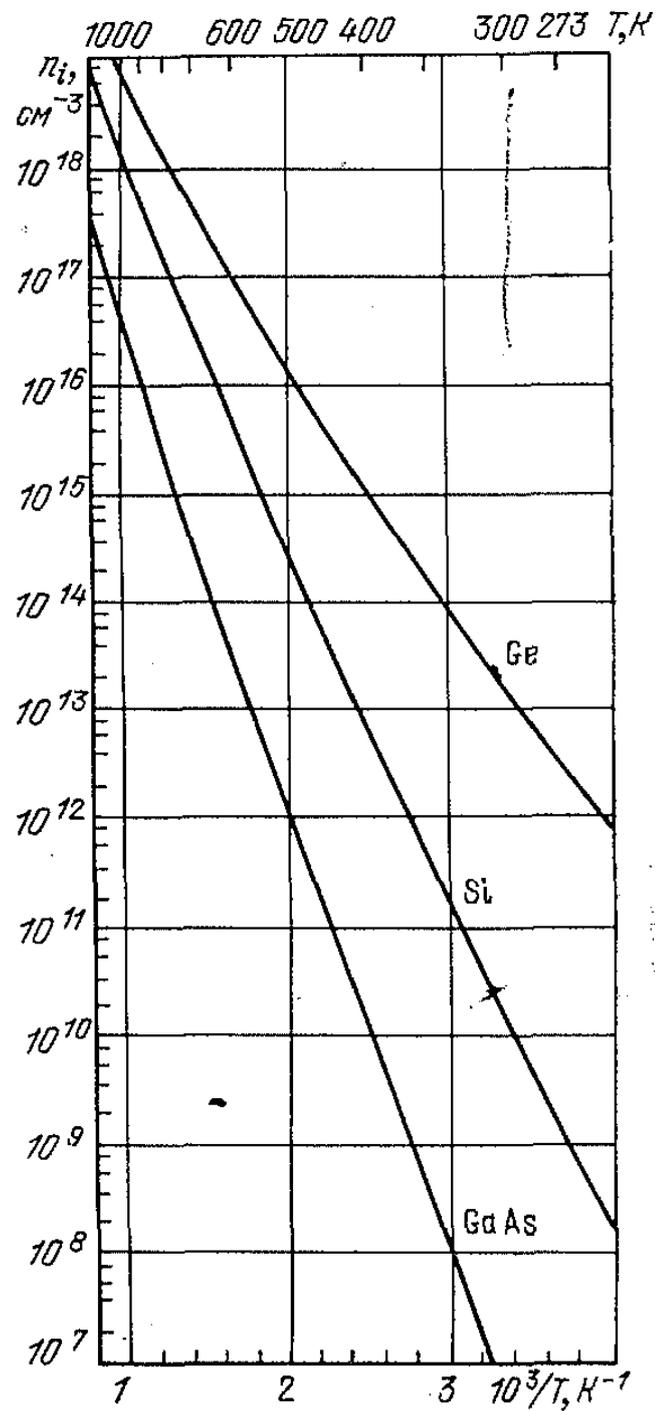


Рис. А.4. Зависимость собственной концентрации носителей заряда в германии, кремнии и арсениде галлия от температуры

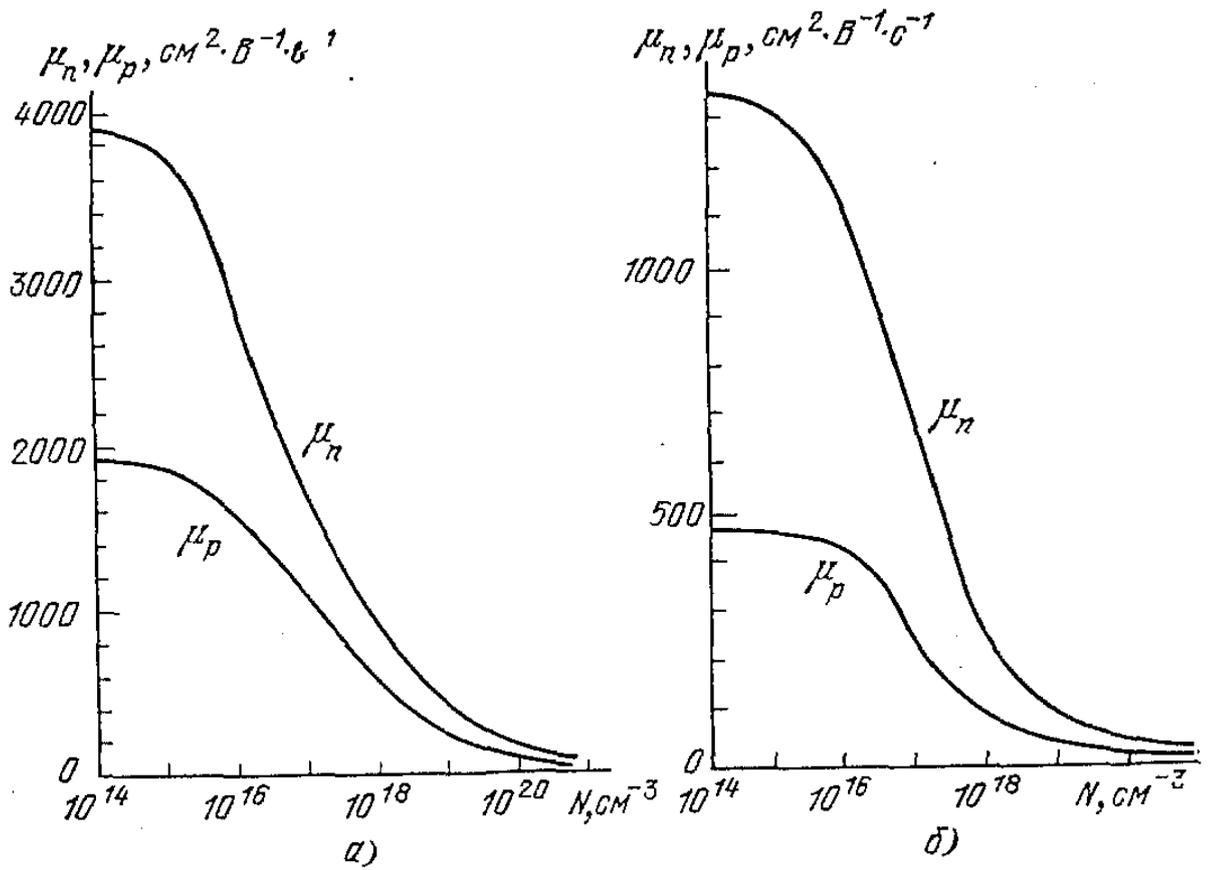


Рис. А.5. Зависимость подвижности электронов и дырок от концентрации примеси в германии (а) и кремнии (б) при 300 К

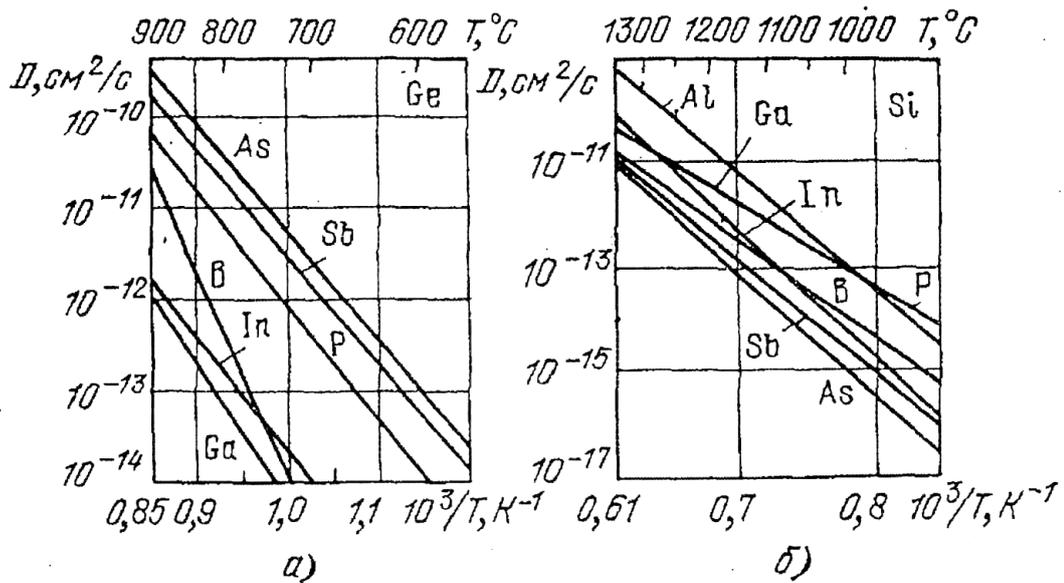


Рис. А.6. Температурная зависимость коэффициента диффузии акцепторных и донорных примесей в германии (а) и кремнии (б) от температуры

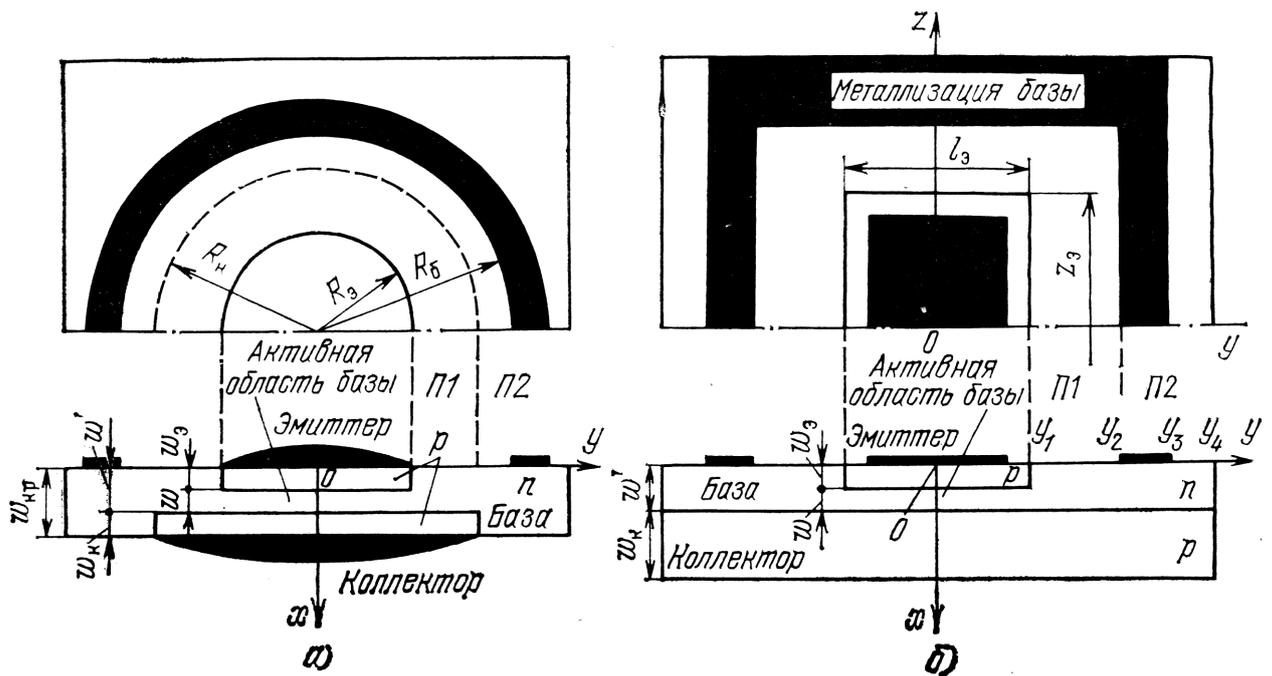


Рис. А.7. Структура сплавленного (а) и планарного (б) транзисторов. Вверху показана часть топологии структуры

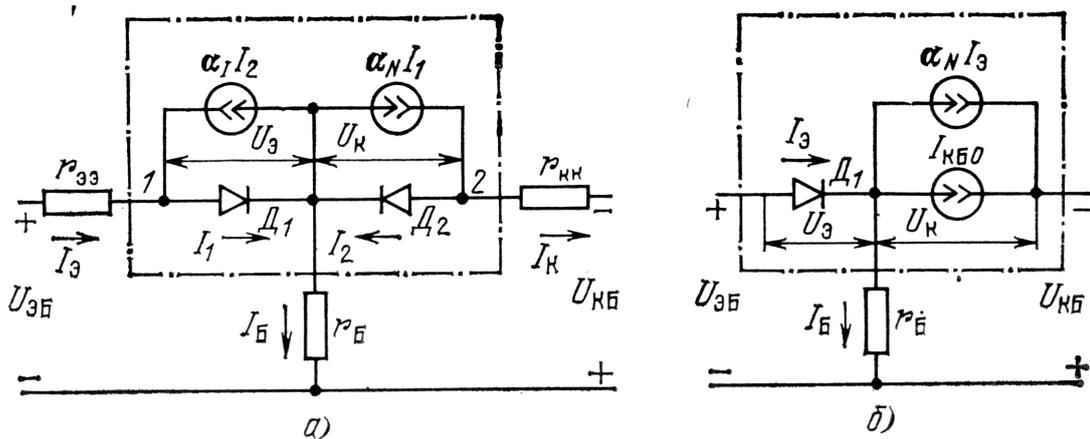


Рис. А.8. Эквивалентная схема транзистора для большого сигнала: а – общая; б – для нормального активного режима

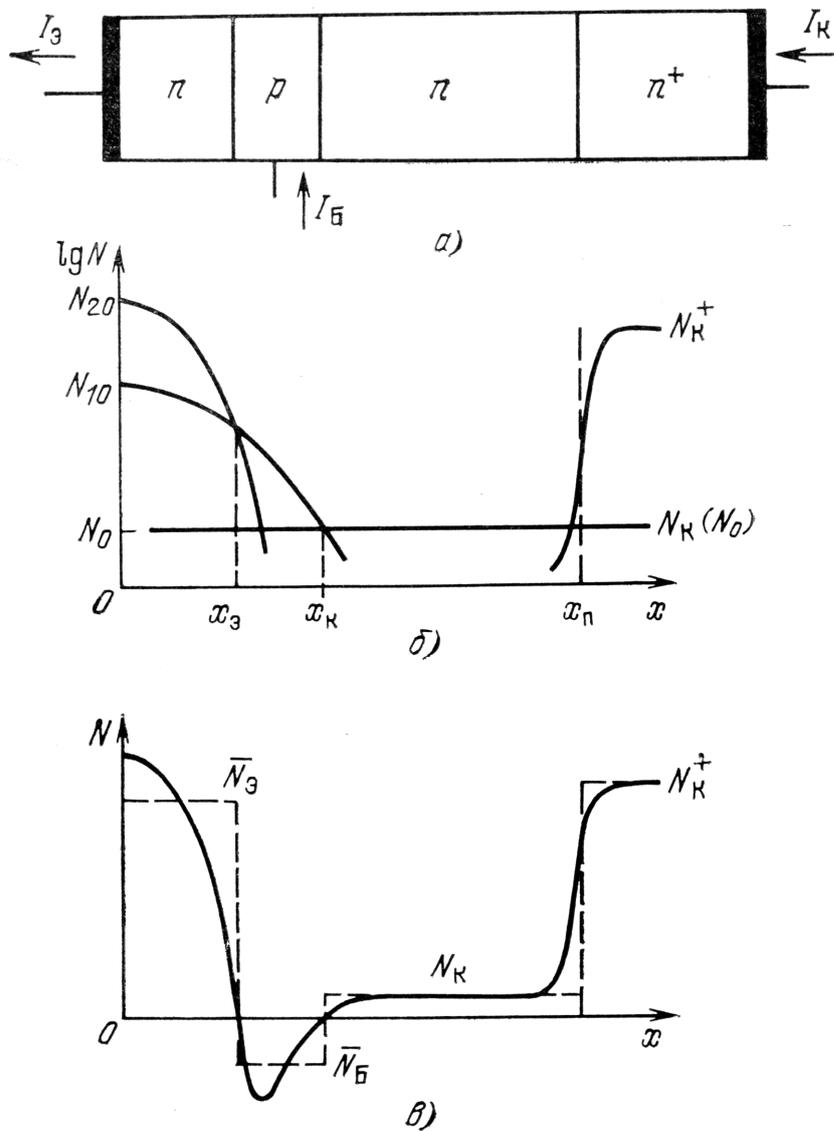


Рис. А.9. Структура планарно-эпитаксиального транзистора (а) и распределение легирующей примеси, представленное в полулогарифмическом (б) и линейном (в) масштабах

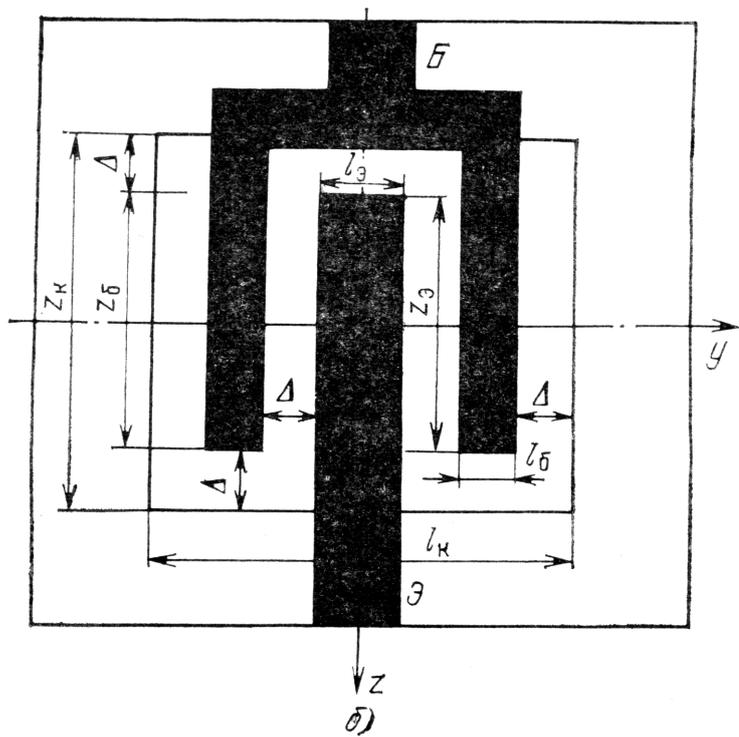
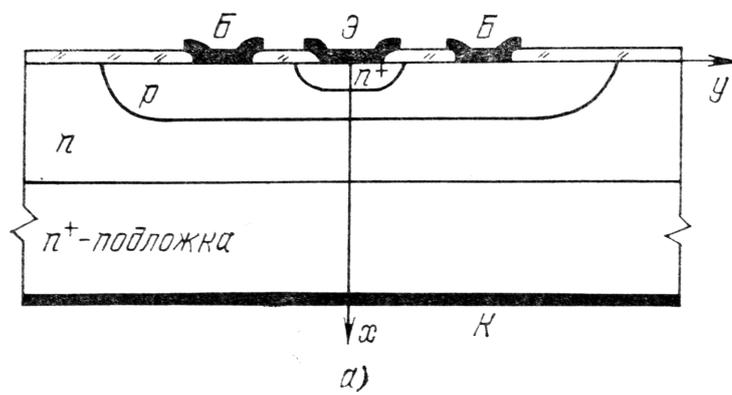


Рис. А.10. Планарно-эпитаксиальный $n-p-n$ -транзистор: а – структура; б – топология

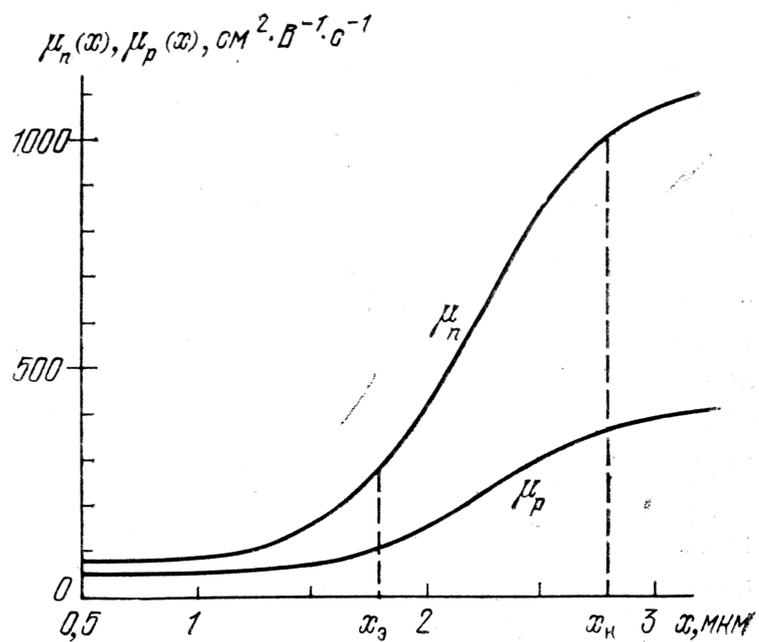


Рис. А.11. Зависимость подвижности электронов и дырок от координаты в активной области структуры транзистора

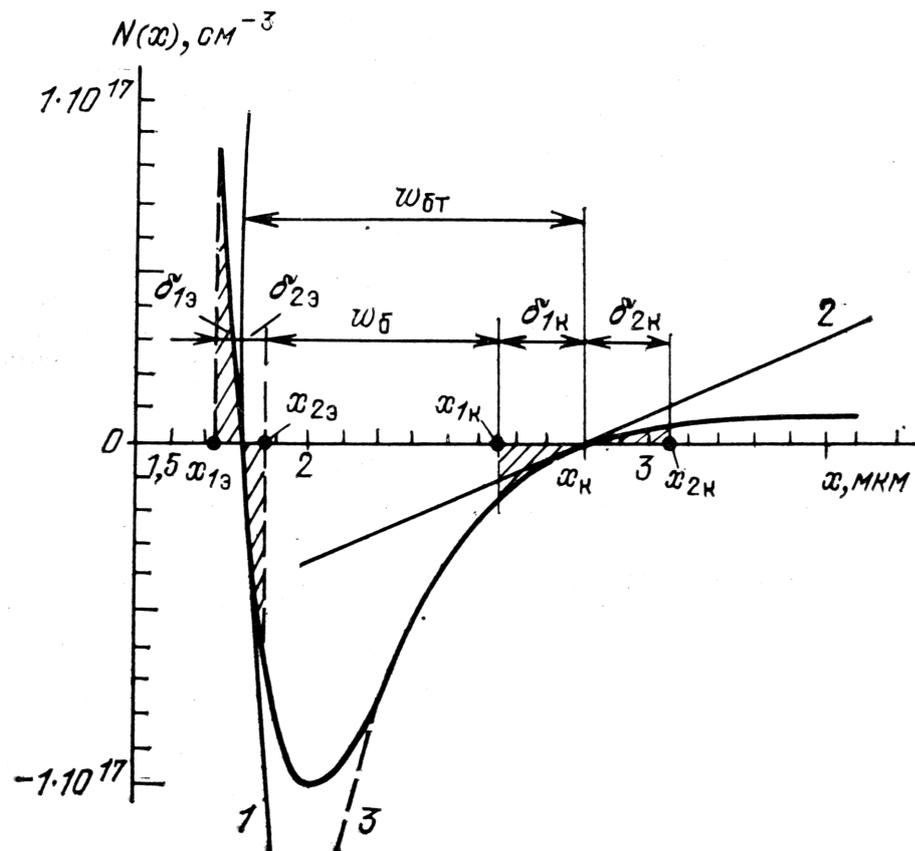


Рис. А.12. Зависимость концентрации легирующей примеси от координаты в активной области структуры транзистора

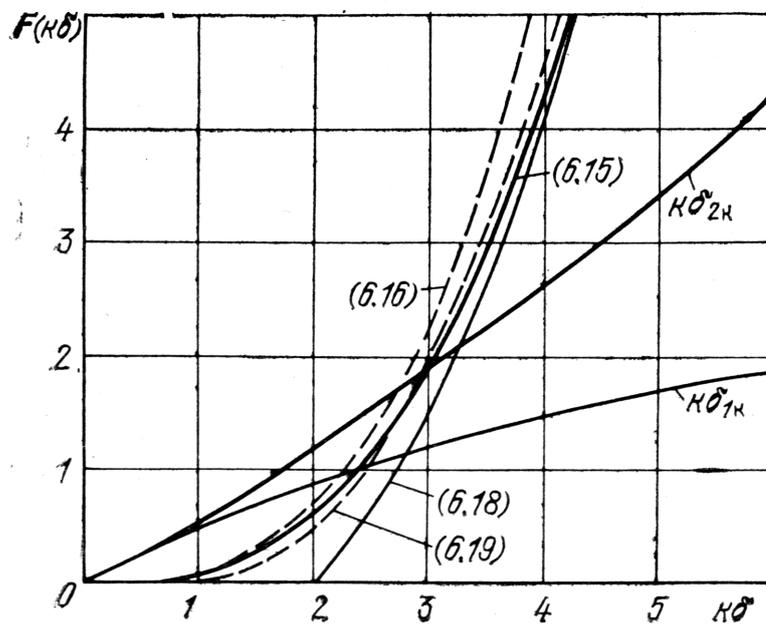


Рис. А.13. Номограмма для расчета расширения ОПЗ-коллектора p - n -перехода

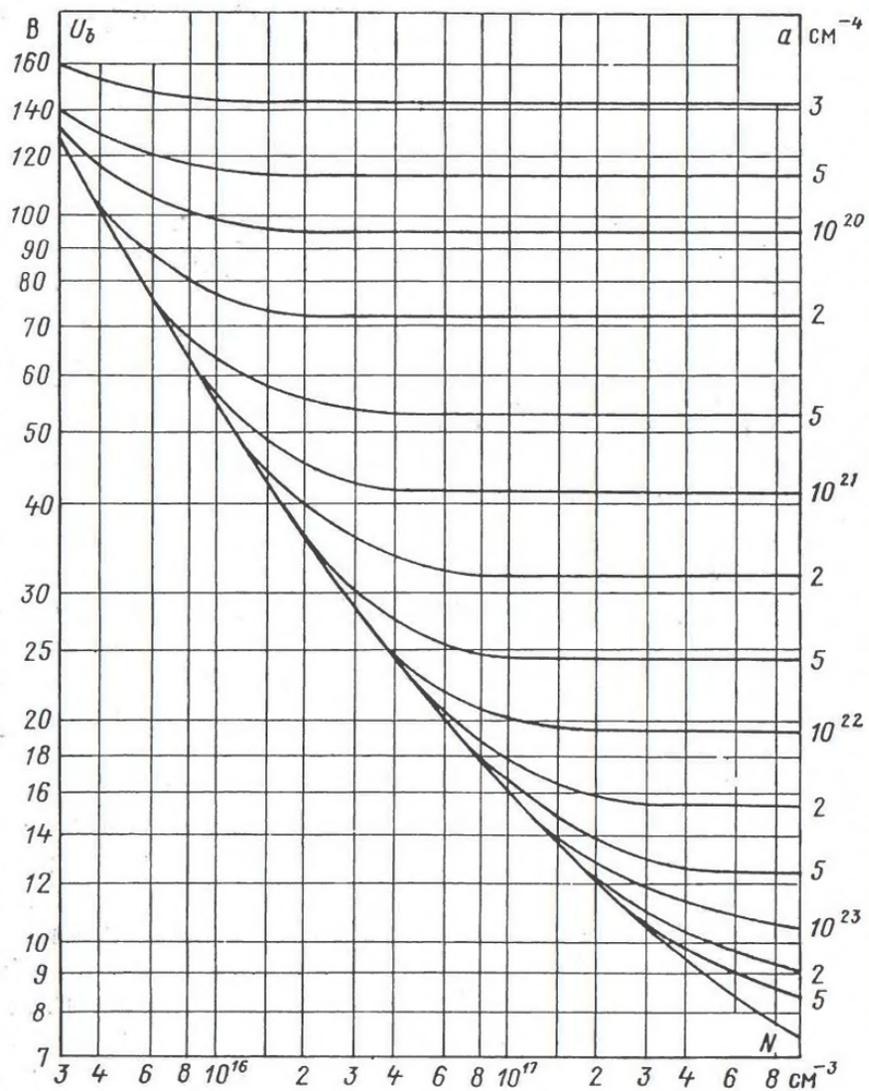


Рис. А.14. Зависимость напряжения пробоя диффузионных $p-n$ -переходов от концентрации примеси в исходном кристалле кремния

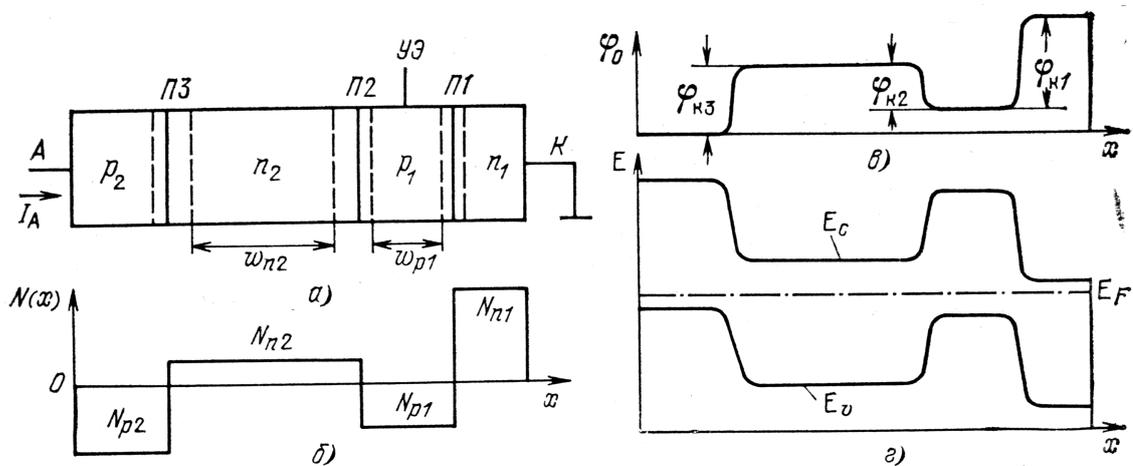


Рис. А.15. Структура тиристора (а), распределение концентрации примесей (б) и потенциала (в), диаграмма энергетических зон (г) в состоянии термодинамического равновесия

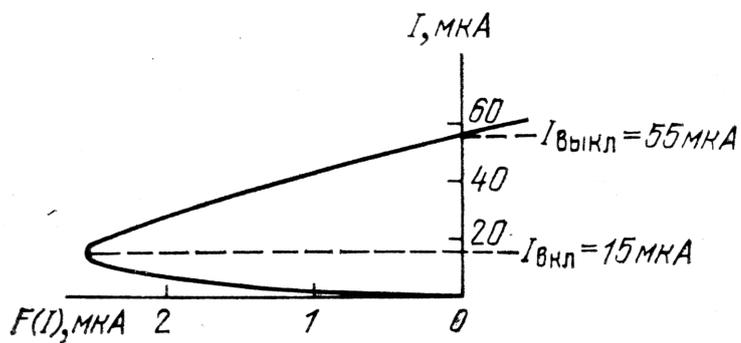


Рис. А.16. График функции $F(I) = I(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$

Учебное издание

Новиков С. Г., Елисеева С. В.

Расчетные задания по дисциплине
«Проектирование полупроводниковых приборов»

Учебно-методическое пособие

Директор Издательского центра *Т. В. Филиппова*
Оригинал макет подготовлен *С. В. Елисеевой*
Редактор *Г. И. Петрова*

Подписано в печать 2.06.14. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,6. Уч.-изд. л. 4,0
Тираж 100 экз. Заказ № 52/

Оригинал-макет подготовлен в Издательском центре
Ульяновского государственного университета
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42

Отпечатано с оригинал-макета в Издательском центре
Ульяновского государственного университета
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42