

621.38(07)

М – 545

№ 4616



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“Южный федеральный университет”
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ В Г. ТАГАНРОГЕ**



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

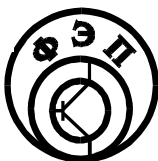
ТВЁРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Для студентов специальностей

210104 Микροэлектроника и твёрдотельная электроника

210201 Проектирование и технология РЭС

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры



Таганрог 2010

УДК 621.38:539.2(07.07)

Агеев О.А., Наумченко А.С., Гусев Е.Ю. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Твёрдотельная электроника». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 32 с.

В настоящих методических указаниях изложены теоретические основы расчета полупроводниковых диодов и транзисторов на *p-n*-переходах. Приведены варианты индивидуальных заданий по курсовой работе. Даны рекомендации по расчету электрических параметров и построению зонной диаграммы полупроводниковых приборов. Определены структура курсовой работы, объем пояснительной записки и перечень графического материала.

Пособие может использоваться студентами специальностей 210104 «Микроэлектроника и твёрдотельная электроника», 210201 «Проектирование и технология РЭС» при выполнении курсовой работы по дисциплинам «Твёрдотельная электроника» и «Физические основы микроэлектроники».

Табл. 5. Ил. 5. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент Е.Б. Лукьяненко, канд. техн. наук, доцент кафедры КЭС ТТИ ЮФУ.

Содержание

Введение.....	4
1. Теоретические основы расчётов электрических параметров полупроводниковых структур.....	5
1.1. Расчет полупроводниковых диодов.....	8
1.2. Расчет полупроводниковых транзисторов.....	13
1.3. Расчет и построение зонных диаграмм полупроводниковых структур.....	24
2. Задания к курсовой работе.....	25
3. Требования к оформлению.....	30
Библиографический список.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение функциональных возможностей и увеличение степени интеграции микроэлектронных устройств (ИМС, БИС, СБИС, ГИС, БГИС, МСБ, МКМ) предъявляют высокие требования к уровню развития микроэлектроники. На базе современной микроэлектронной технологии в настоящее время разрабатываются и изготавливаются микроэлектронные устройства высокой степени интеграции ($K_{\text{и}} \geq 10$). В этой связи к микроэлектронной технологии предъявляются довольно жесткие требования: разрешающая способность литографии менее 0,1 – 0,2 мкм, значительное увеличение числа слоёв коммутации (до 8), увеличение полезной площади одной ИМС, что связано с увеличением их схемотехнической и функциональной сложности.

В этих условиях важнейшей задачей является подготовка бакалавров, инженеров и магистров технических наук в области микроэлектроники на высоком уровне.

Настоящее пособие содержит теоретические и практические рекомендации, необходимые для выполнения курсовой работы по дисциплине «Твёрдотельная электроника» (для специальности 210104 и направления «Электроника и нанoeлектроника»). Дополнительную информацию в области конструирования и расчётов электрических параметров полупроводниковых структур можно найти в рекомендуемой литературе [1–5].

Курсовая работа является заключительным этапом изучения студентами специальности 210104 дисциплины «Твёрдотельная электроника».

Основными задачами курсовой работы являются:

1. Закрепление теоретических знаний в области разработки конструкций полупроводниковых приборов различных типов.
2. Приобретение навыков в теоретических расчётах конструктивных и электрических параметров полупроводниковых структур.
3. Приобретение навыков в оформлении технической документации.
4. Развитие навыков самостоятельной работы с технической литературой.

Структура курсовой работы

1. На основе ТЗ, технических и конструкторских данных и требований производятся расчеты электрических параметров полупроводниковых структур.
2. На основе ТЗ и заданной конструкции производится расчёт зонной диаграммы полупроводниковой структуры.

3. Выполняется чертёж зонной диаграммы в равновесном состоянии и при приложении напряжений смещения к полупроводниковой структуре. Чертежи выполняются на бумаге формата А4 (допускается А3).

Тематика курсовой работы сориентирована на выполнение расчётов электрических параметров как полупроводниковых диодов, так и полупроводниковых транзисторов.

Основные этапы выполнения курсового проекта по модулям

Модуль 1:

1. Ознакомление с ТЗ, методическими указаниями по курсовой работе и рекомендуемой литературой.
2. Ознакомление с теоретическими основами расчётов электрических параметров полупроводниковых структур.
3. Ознакомление с основами зонной теории полупроводниковых структур.

Модуль 2:

4. Расчет электрических параметров заданных конструкций полупроводниковых приборов.
5. Расчёт зонной диаграммы заданной полупроводниковой структуры.
6. Оформление пояснительной записки и чертежей.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЁТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Основные физические параметры полупроводников и соотношения полупроводниковой электроники, необходимые для расчета всех типов полупроводниковых структур, следующие: концентрация носителей заряда, положение уровня Ферми, подвижность носителей заряда, удельное сопротивление и проводимость полупроводника; соотношение Эйнштейна, закон действующих масс, а также связь длины диффузии и коэффициента диффузии и времени жизни неосновных носителей заряда.

Концентрация носителей заряда определяется шириной запрещенной зоны, температурой, а также эффективной массой носителей заряда в случае собственного полупроводника и дополнительно концентрацией примеси в примесном полупроводнике. Соответствующие выражения даны в [1–6]. Определение положения уровня Ферми рассматривается в подразд. 1.3.

Закон действующих масс определяет постоянство произведения концентрации электронов и дырок проводимости в полупроводниках:

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i^2, \quad (1)$$

где n и p – концентрации электронов и дырок в полупроводнике в условиях термодинамического равновесия, а индексы n , p и i – тип полупроводника с электронной, дырочной и собственной проводимостью соответственно.

Величина подвижности носителей μ определяется процессами рассеяния носителей заряда на *фононах*, на *ионизированных* и *нейтральных примесных центрах* и дислокациях:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}, \quad (2)$$

где μ_L – подвижность, обусловленная фоновым рассеянием; μ_I – подвижность, обусловленная рассеянием на примеси.

Подвижность носителей заряда μ связана с коэффициентом диффузии D соотношением Эйнштейна

$$\frac{\mu}{q} = \frac{D}{kT}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана,

T – абсолютная температура,

q – заряд электрона.

Экспериментальные данные по зависимости подвижности от концентрации примеси приведены на рис. 1.

Удельная проводимость σ (или удельное сопротивление ρ) зависит от концентрации электронов и дырок проводимости и от их подвижности

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (4)$$

где μ_n и μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно.

Зависимости удельных сопротивлений полупроводниковых материалов от концентрации примеси при комнатной температуре приведены на рис. 2.

Аналитические выражения для этих зависимостей даны в [1–3].

Среднее время жизни неосновных носителей заряда τ связано с диффузионной длиной L соотношением

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (L_p = \sqrt{D_p \tau_p}). \quad (5)$$

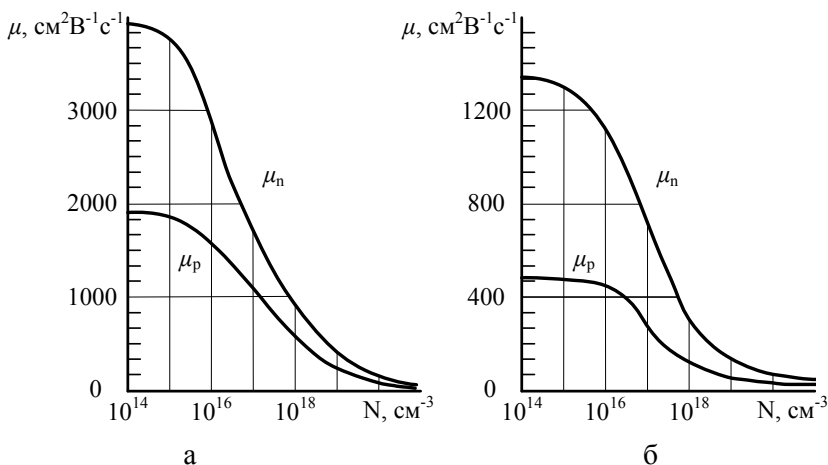


Рис. 1. Экспериментальные данные по зависимости дрейфовой подвижности от концентрации примеси при $T = 300\text{ K}$ в кремнии (а), германии (б)

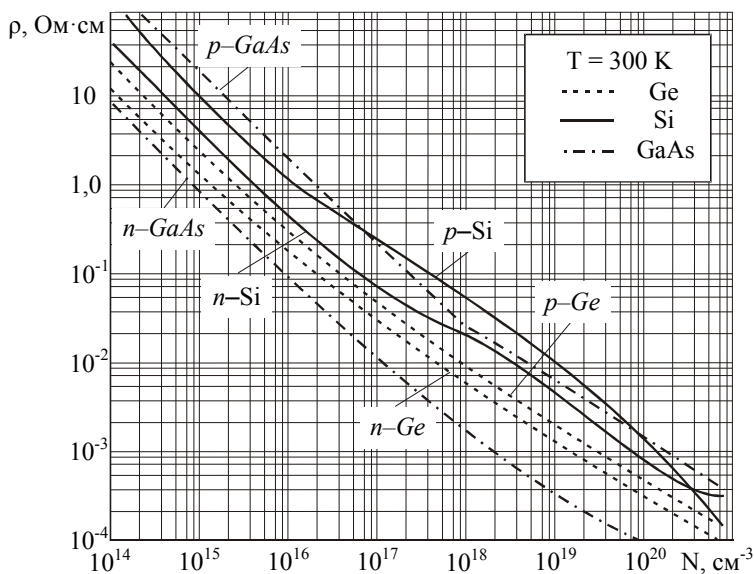


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления материалов от концентрации примеси

1.1. Расчет полупроводниковых диодов

Основным элементом полупроводниковых структур является электронно-дырочный переход (p - n -переход) (рис. 3). Характер изменения концентрации примеси определяет тип перехода: при равномерном ее распределении в обеих областях, прилегающих к границе, переход ступенчатый (резкий), при закономерном изменении – переход плавный. Резкие переходы получают вплавлением, а плавные – вытягиванием из расплава или диффузией. Переходы, в которых концентрация примеси одной из областей превосходит концентрацию в другой более чем на два порядка, принято называть несимметричными и обозначать n^+p или p^+n .

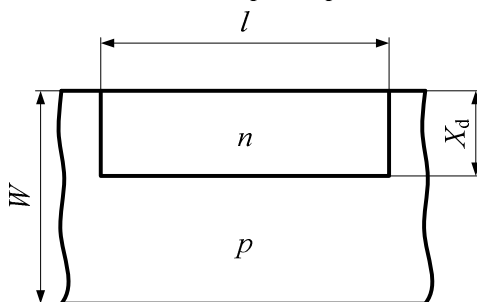


Рис. 3. Структура p - n -перехода

Основные параметры сплавного диода: ширина p - n -перехода, величина барьерной емкости, распределение электрического поля и контактной разности потенциалов в равновесном состоянии, обратные токи и вольт-амперная характеристика перехода, пробивные напряжения.

Поле, созданное контактной разностью потенциалов и приложенным к переходу внешним напряжением, приводит к обеднению переходной области подвижными носителями заряда, а заряд неподвижных ионизированных атомов в ней оказывается не скомпенсированным.

Распределение потенциала $\phi(x)$ и электрического поля, а также ширина p - n -перехода определяются в настоящей работе на основе решения одномерного уравнения Пуассона:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\lambda}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (6)$$

где $\lambda = q(N_D - N_A)$ – плотность объемного заряда, обусловленная концентрацией ионизированной примеси (индекс Д – донорной, А – акцепторной),

ε – диэлектрическая проницаемость материала полупроводника,

ε_0 – диэлектрическая постоянная,

при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} E(x_1) = -\frac{d\varphi}{dx}(x_1) = 0; \quad \varphi(x_1) = 0, \text{ или } [\varphi(x_1) = (\varphi_k - U) > 0], \\ E(x_2) = -\frac{d\varphi}{dx}(x_2) = 0; \quad \varphi(x_2) = -(\varphi_k - U) < 0, \text{ или } [\varphi(x_2) = 0], \end{aligned} \quad (7)$$

где x_1, x_2 – границы области объемного заряда в n - и p -областях соответственно,

$x = 0$ – плоскость инверсии знака заряда.

1. Необходимо самостоятельно решить систему уравнений (6) – (7), т.е. рассчитать распределения электрического поля $E(x)$ и потенциала $\varphi(x)$, а также ширину перехода $d = x_2 - x_1$, которые определяются характером распределения примеси в переходе, завися от технологии его формирования и различны для ступенчатого

$$N_D - N_A = \begin{cases} N_D & \text{при } x < 0, \\ -N_A & \text{при } x > 0 \end{cases} \quad (8)$$

и плавного переходов, характеризующегося линейным законом распределения примеси

$$N_D - N_A = -ax, \quad (9)$$

где a – модуль градиента концентрации примеси, или экспоненциальным

$$N(x) = N_0 \exp(-ax), \quad (9a)$$

где N_0 – концентрация примеси на границе источника,

a – показатель сосредоточенности примеси.

2. Барьерная (зарядовая) ёмкость определяется величиной заряда, накопленного в p - n -переходе как в равновесном состоянии, так и при изменении приложенного к нему напряжения, и для p - n -перехода с одинаковой концентрацией примесей по обе стороны контакта выражение для барьерной ёмкости будет иметь вид

$$C_3 = \frac{A\varepsilon\varepsilon_0}{d}, \quad (10)$$

где A – площадь перехода,

d – его ширина, определяемая решением (6) и (7).

3. Расчет вольт-амперной характеристики (ВАХ) p - n -перехода, т.е. зависимости тока, протекающего через p - n -переход, от величины приложенного к нему напряжения, включает расчет и построение идеальной и реальной ВАХ.

Расчет идеальной ВАХ p - n -перехода проводится при допущениях, приведенных в литературе [2. С. 32]. В частности, область объемного заряда считается узкой и соответственно пренебрегается процессом генерации носителей внутри перехода, а время пролета считается достаточно малым. При этом плотность общего тока через переход, равная сумме плотностей электронного и дырочного токов, выражается формулой

$$j = j_p + j_n = q \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \left(\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right), \quad (11)$$

где $j_s = q \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right)$ – плотность тока насыщения, тогда

$$j = j_s \left(\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right). \quad (12)$$

Для расчета плотности тока насыщения удобно пользоваться выражением [1]

$$j_s = \frac{b}{(b+1)^2} \frac{kT}{q} \sigma_i^2 \left(\frac{1}{\sigma_n L_p \operatorname{th} \left(\frac{w_n}{L_p} \right)} + \frac{1}{\sigma_p L_n \operatorname{th} \left(\frac{w_p}{L_n} \right)} \right), \quad (13)$$

где $\operatorname{th} \left(\frac{w}{L} \right) \approx \begin{cases} \frac{w}{L}, & w \ll L \\ 1, & w \gg L \end{cases}$ – гиперболический тангенс,

w – ширина базы.

Расчет реальной ВАХ включает учет обратного тока, обусловленного процессами генерации и рекомбинации как в объеме, так и на поверхности кристалла вблизи p - n -перехода (точнее в областях $\sim A \cdot L$, прилегающих к переходу).

Для такого расчёта пользуются эффективным временем жизни носителей $\tau_{\text{эф}}$, которое учитывает процессы объемной τ_v и поверхностной τ_s генерации и рекомбинации:

$$\frac{1}{\tau_{\text{эфф}}} = \frac{1}{\tau_V} + \frac{1}{\tau_S}, \quad (14)$$

где τ_S определяется величиной скорости поверхностной рекомбинации s и составляет $\tau_S = w/2s$ при $sw \ll D_6$.

Тогда эффективная диффузионная длина определяется выражением

$$L_{\text{эфф}} = \sqrt{D\tau_{\text{эфф}}}. \quad (15)$$

Учитывая (14) и (15), выражение для составляющей тока, обусловленного процессом поверхностной рекомбинацией, принимает вид [2]

$$j_{SR} = \frac{b}{(b+1)^2} \frac{kT}{q} \frac{\sigma_i^2}{\sigma_6} \pi w \left[1 + 2 \frac{R_3}{L_{\text{эфф}}} + \frac{1}{2} \left(\frac{R_3}{L_{\text{эфф}}} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Составляющая тока объемной рекомбинации определяется по выражению (13), т.е. $j_{VR} = j_S$.

С учетом генерационного тока в области пространственного заряда согласно [2] будем иметь

$$j_G = - \frac{q n_i}{\tau_p + \tau_n} d, \quad (17)$$

а также с учётом (15) и (16) полный ток через p - n -переход будет равен

$$j_{\text{полн}} = j_G + j_{VR} + j_{SR}. \quad (18)$$

При этом выражение (12) для ВАХ реального перехода примет вид

$$j_{\text{реал}} = j_{\text{полн}} \left(\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right). \quad (19)$$

В процессе расчета необходимо оценить вклады указанных составляющих полного тока.

4. Расчет пробивных напряжений перехода.

Основными механизмами электрического пробоя, т.е. резкого возрастания тока при приложении обратного напряжения к переходу, считаются туннельный (зинеровский) и лавинный (за счёт ударной ионизации).

Туннельный механизм обусловлен туннельными межзонными переходами электронов, вероятность которых возрастает с повышением напряженности поля и соответствующим искривлением энергетических зон.

Расчетные выражения для определения напряжения туннельного пробоя будут равны

$$\begin{aligned} U_Z &= 99\rho_n + 48\rho_p \text{ — для германия,} \\ U_Z &= 39\rho_n + 8\rho_p \text{ — для кремния.} \end{aligned} \quad (20)$$

Они получены для критического значение напряженности электрического поля, равного $2 \cdot 10^5$ В/см, и справедливы при удельных сопротивлениях полупроводника порядка десятых и сотых долей Ом·см [2].

Механизм ударной ионизации нейтральных атомов решетки быстрыми носителями заряда обусловлен генерацией электронно-дырочных пар, ростом концентрации носителей заряда и ростом тока.

Найдено выражение [2] для напряжения лавинного пробоя, которое имеет более слабую зависимость от удельного сопротивления

$$U_B = B\rho^k, \quad (21)$$

где $k < 1$.

В частности,

$$U_B(Ge) = \begin{cases} 52\rho_p^{0,61} \text{ для } n^+ - p, \\ 83,4\rho_n^{0,61} \text{ для } p^+ - n \end{cases} \text{ и } U_B(Si) = \begin{cases} 23\rho_p^{0,75} \text{ для } n^+ - p \\ 86\rho_n^{0,64} \text{ для } p^+ - n. \end{cases} \quad (22)$$

Аналитические выражения, определяющие приближенное значение напряжения лавинного пробоя, даны в [1]:

— для резкого перехода

$$U_B \approx 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}}, \quad (23)$$

— для плавного перехода

$$U_B \approx 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{\frac{6}{5}} \left(\frac{a/3}{10^{20}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (24)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, N_B — концентрация примеси в полупроводнике, a — градиент концентрации примеси.

5. Расчет и построение зонных диаграмм p - n -перехода см. в подразд. 1.3.

1.2. Расчет полупроводниковых транзисторов

1.2.1. Расчет бездрейфового транзистора

В бездрейфовом транзисторе неосновные носители заряда проходят область базы в результате диффузии. Распределение примесей в базе принимается равномерным.

Основным методом создания таких транзисторов является сплавление эмиттера и коллектора в полупроводниковый кристалл. Геометрическая структура сплавного транзистора представлена на рис. 4.

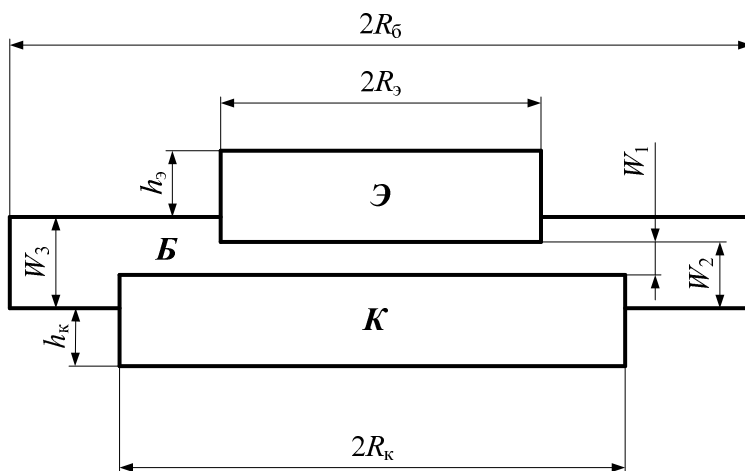


Рис. 4. Структура сплавного транзистора

Основные параметры транзистора: коэффициент передачи по току; сопротивления эмиттера, базы и коллектора; емкости переходов; граничные частоты; обратные токи; напряжения пробоя.

1. Коэффициент передачи по току транзистора с общей базой определяется отношением тока коллектора к току эмиттера

$$\alpha = \frac{i_k}{i_э} \Big|_{U_k = \text{const}}, \quad (25)$$

и определяется результирующим действием нескольких физических факторов:

$$\alpha = \beta \gamma \alpha_i, \quad (26)$$

где β – коэффициент переноса неосновных носителей заряда через базу,

γ – эффективность эмиттера,

α_i – эффективность коллектора.

Для расчета коэффициента передачи по току необходимо определить ширину квазинейтральной базы – действующую ширину базы, равную исходной технологической ширине базы w_1 за вычетом расширения области пространственного заряда коллекторного перехода в область базы $d_{\text{бк}}$:

$$w = w_1 - d_{\text{бк}}. \quad (27)$$

Определение $d_{\text{бк}}$ проводится на основе решения системы (6), (7).

Расширением эмиттерного перехода, в силу малых его значений, пренебрегаем.

Эффективность эмиттерного перехода γ характеризует способность эмиттера инжектировать неосновные носители заряда в область базы и определяется отношением тока неосновных носителей к полному току эмиттера:

$$\gamma = 1 - \frac{\mu_{p3} \mu_{n3} \sigma_6 \min(L_6, w)}{\mu_{n6} \mu_{p6} \sigma_3 L_3}. \quad (28)$$

Коэффициент переноса неосновных носителей заряда через базу β характеризует потери неосновных носителей при их движении от эмиттера к коллектору и определяется отношением составляющих, обусловленных неосновными носителями, тока коллектора к току эмиттера. Общее выражение для коэффициента переноса, учитывающее объемную и поверхностную рекомбинацию, имеет вид

$$\beta \approx 1 - \frac{s A_s w}{A_3 D_6} - \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_6} \right)^2, \quad (29)$$

где s – скорость рекомбинации,

A_s – эффективная площадь поверхности рекомбинации.

Эффективность коллектора α_i определяется умножением носителей заряда вследствие ударной ионизации в области пространственного заряда коллекторного перехода и изменением условий диффузии неосновных носителей заряда в коллекторной области

$$\alpha_i = M \cdot \alpha^*, \quad (30)$$

где M – коэффициент умножения,

α^* – собственный коэффициент усиления коллекторного перехода.

Коэффициент умножения определяется из выражения

$$M = 1 + \left(\frac{U}{U_B} \right)^n, \quad (31)$$

где U_B – напряжение лавинного пробоя,

n – показатель, равный [2]:

$$n(Ge) = \begin{cases} 6 & \text{для } n^+ - p, \\ 3 & \text{для } p^+ - n \end{cases} \text{ и } n(Si) = \begin{cases} 2 & \text{для } n^+ - p\text{-переходов,} \\ 3,5 & \text{для } p^+ - n\text{-переходов.} \end{cases} \quad (32)$$

Собственный коэффициент усиления коллекторного перехода α^* определяется по формуле

$$\alpha^* = 1 + \frac{\eta \rho_K^2}{2 \rho_i^2}, \quad (33)$$

где параметр η для транзисторов равен

$$\eta = \begin{cases} \frac{b}{(b+1)^2} & n-p-n\text{-типа,} \\ \frac{(b+1)^2}{b} & p-n-p\text{-типа,} \end{cases} \quad \text{где } b = \frac{\mu_n}{\mu_p}. \quad (34)$$

На основании выражений (25) – (33) может быть получен низкочастотный коэффициент передачи по току транзистора с общей базой.

2. Расчёт сопротивлений эмиттера, базы и коллектора сплавного транзистора.

Сопротивление базы будет равно

$$r'_6 = \left. \frac{dU_3}{dI_K} \right|_{I_3 = \text{const}} = r'_6 + r''_6, \quad (35)$$

где r'_6 – омическое сопротивление материала базовой области,

r''_6 – диффузионное сопротивление, обусловленное изменениями концентрации неосновных носителей в базе, вызванными эффектом Ирли, и характеризующее обратную связь за счет диффузионных процессов.

Эффект Ирли – изменение ширины слоя объемного заряда p - n -перехода при изменении напряжения в дрейфовых транзисторах проявляется слабо.

Омическое сопротивление базы r'_6 зависит от геометрии транзистора и определяется из выражения

$$r'_6 = \rho_6 \left[\frac{1}{8\pi w_1} + \frac{1}{2\pi w_2} \ln \frac{R_k}{R_3} + \frac{1}{2\pi w_3} \ln \frac{R_6}{R_k} \right], \quad (37)$$

где первое слагаемое выражает сопротивление активной области базы в виде диска толщиной w_1 под эмиттером, второе и третье – сопротивления промежуточной и пассивной области в виде колец толщиной w_2 и w_3 и шириной соответственно $R_k - R_3$ и $R_6 - R_k$.

Диффузионное сопротивление обусловлено перераспределением зарядов в базе, не зависит от удельного сопротивления и определяется по формуле

$$r''_6 = \frac{r'_3}{2(1-\beta) + (1-\gamma)}. \quad (38)$$

Сопротивление эмиттера будет равно

$$r_3 = \left. \frac{dU_3}{dI_3} \right|_{I_k = \text{const}}, \quad (39)$$

и без учета влияния эффекта Ирли ($U_k = \text{const}$)

$$r'_3 = \frac{kT}{qI_3}, \quad (40)$$

и с учетом этого эффекта и (38) будем иметь

$$r''_3 = r'_3 + r''_6 (1-\alpha). \quad (41)$$

Сопротивление коллектора равно

$$r_k = \left. \frac{dU_k}{dI_k} \right|_{I_3 = \text{const}} \quad (42)$$

обусловлено токами утечки и токами проводимости за счет изменения ширины слоя объемного заряда p - n -перехода при изменении напряжения. Пренебрегая токами утечки, а учитывая лишь влияние эффекта Ирли, коллекторное сопротивление можно определить по формуле

$$r_k = \left[\frac{I_3}{w} [\text{const}_1 (1-\beta) + (1-\gamma)] \frac{\partial w}{\partial U_k} \right]^{-1}, \quad (43)$$

$$\frac{\partial w}{\partial U_k} = \frac{1}{\text{const}_2 |U_k|},$$

где $\text{const}_1 = \text{const}_2 = 2$ для резкого перехода коллектор–база.

3. Расчёт емкостей p - n -переходов.

Емкость перехода определяется изменением накопленного заряда при изменении приложенного напряжения. В зависимости от

механизма накопления заряда различают зарядовую (барьерную) C_3 и диффузионную C_d емкости. Емкость C_3 обусловлена неподвижными зарядами ионизированных атомов примесей, а C_d – подвижными зарядами и соответственно токами через переход и временами жизни неосновных носителей заряда [1–3].

Зарядная емкость вычисляется по выражению для емкости плоского конденсатора

$$C_3 = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (44)$$

где A – площадь перехода, d – ширина области пространственного заряда, зависящая от падения напряжения, определяется решением (6) и (7).

Падение напряжения на переходе эмиттер–база рассчитывается при заданной величине эмиттерного тока

$$U_3 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{I_3 w_1}{A_3 D_6 q}}{\frac{n_i^2}{N_6}} \right), \quad (45)$$

где $\frac{I_3 w_1}{A_3 D_6 q}$ и $\frac{n_i^2}{N_6}$ – концентрации неосновных носителей в базе со стороны эмиттера и на границе эмиттер–база.

Таким образом, для расчета зарядовой емкости необходимо определить ширину ОПЗ при найденном из (45) напряжении U_3 .

Для обычного p - n -перехода полная диффузионная емкость равна сумме емкостей, обусловленных накоплением подвижных зарядов в p - и n -областях перехода.

В случае, когда размеры пассивных областей перехода много больше диффузионной длины неосновных носителей заряда ($L \ll W$), диффузионная емкость будет

$$C_d = C_{dp} + C_{dn} = \frac{q}{kT} \tau_p I_p + \frac{q}{kT} \tau_n I_n. \quad (46)$$

В транзисторе емкость, возникающая вследствие накопления заряда в базе под влиянием изменения напряжения на коллекторе, называется коллекторной диффузионной емкостью, она определяется как

$$C_{д.к} = \frac{\partial Q}{\partial U_k} \bigg|_{I_3 = \text{const}} = q p_3 \frac{\partial w}{\partial U_k} = I_3 \frac{w}{D_6} \frac{\partial w}{\partial U_k}. \quad (47)$$

Диффузионная емкость эмиттера, связанная с накоплением заряда в базе, определяется выражением

$$C_{Дэ} = \frac{\partial Q}{\partial U_э} \bigg|_{U_к = \text{const}} = \frac{q I_э}{2k T D_б} w^2. \quad (48)$$

Для сплавных транзисторов характерна бóльшая зарядная емкость коллекторного и диффузионная емкость эмиттерного переходов.

4. Граничные частоты транзистора.

Наибольшее влияние на работу транзистора на высокой частоте оказывает зависимость коэффициента усиления по току от частоты, определяемая в основном временем переноса неосновных носителей заряда через область базы диффузией.

Граничная частота коэффициента усиления по току в схеме с общей базой f_α – частота, на которой величина α снижается до 0,7 своего низкочастотного значения, а для плоских транзисторов f_α – частота, на которой $\alpha = 0,7$.

Для примерной оценки f_α пользуются следующими формулами:

$$f_\alpha \approx \frac{5D_б}{4\pi w^2} \text{ и } f_\alpha = \frac{qI_э}{2\pi k T C_{Дэ}}. \quad (49)$$

Более точное значение может быть получено на основании формул из [1–3].

Обычно эффективная работа транзистора возможна на частотах ниже f_α .

Для расчета наиболее высокой частоты $f_{\text{макс}}$, на которой можно добиться генерации, т.е. частотного предела действия транзистора, обычно пользуются выражением

$$f_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{\alpha_0 f_\alpha}{30 r'_б C_к}}. \quad (50)$$

5. Вычисление обратных токов проводится на основании выражений, полученных в подразд. 1.1.

Обратные токи, определяемые объемной рекомбинацией:

$$I_{к0}^v = \frac{kT}{q} \frac{b\sigma_i^2}{(1+b)^2} \left[\frac{(A_к - A_э)w_2}{\sigma_б L_б^2} + \frac{A_э w_1}{\sigma_б L_б^2} + \frac{A_к}{\sigma_к L_к} \right], \quad (51)$$

$$I_{\text{э0}}^{\text{v}} = \frac{kT}{q} \frac{A_{\text{э}} b \sigma_i^2}{(1+b)^2} \left[\frac{w_1}{\sigma_6 L_6^2} + \frac{1}{\sigma_3 L_3} \right]. \quad (52)$$

Обратные токи, определяемые поверхностной рекомбинацией:

$$I_{\text{к0}}^{\text{s}} = \frac{kT}{q} \frac{\sigma_i^2}{\sigma_6} \frac{b}{(1+b)^2} \pi w_1 \left[1 + \frac{2R_{\text{к}}}{L_{6.\text{эфф}}} + \frac{1}{2} \frac{R_{\text{к}}^2 - R_{\text{э}}^2}{L_{6.\text{эфф}}^2} \right], \quad (53)$$

$$I_{\text{э0}}^{\text{s}} = \frac{kT}{q} \frac{\sigma_i^2}{\sigma_6} \frac{b}{(b+1)^2} \pi w_1 \left[1 + \frac{2R_{\text{э}}}{L_{6.\text{эфф}}} \right]. \quad (54)$$

Общие обратные токи рекомбинации получим суммированием

$$I_{\text{к0}} = I_{\text{к0}}^{\text{v}} + I_{\text{к0}}^{\text{s}}, \quad I_{\text{э0}} = I_{\text{э0}}^{\text{v}} + I_{\text{э0}}^{\text{s}}. \quad (55)$$

Ток генерации в запорном слое коллектора:

$$I_{\text{rg}} = -q \frac{n_i}{2\tau_0} A_{\text{к}} d. \quad (56)$$

Полный обратный ток коллектора:

$$I_{\text{к0}} = I_{\text{к0}}^{\text{v}} + I_{\text{к0}}^{\text{s}} + I_{\text{rg}}. \quad (57)$$

6. Определение пробивных напряжений.

Напряжения туннельного и лавинного пробоя определяются по выражениям (21)–(24), полученным для p - n -перехода подразд. 1.1.

Кроме указанных типов пробоев p - n -перехода транзистора в нём наблюдаются такие специфические формы пробоя, как «прокол» базы и возрастание коэффициента усиления по току α до единицы.

Под проколом базы понимается смыкание областей объемного заряда эмиттера и коллектора вследствие уменьшения ширины базы w_1 при сравнительно больших напряжениях на коллекторе. Данный механизм пробоя определяет верхний предел удельного сопротивления исходного материала транзистора при заданном пробивном напряжении.

Для транзистора с резким коллекторным переходом, где прокол наиболее вероятен, напряжение пробоя будет равно

$$U_{\text{прок}} = \frac{1}{2\epsilon\epsilon_0\mu_6\rho_6} w_{\text{мин}}^2, \quad (58)$$

где $w_{\text{мин}} = (1/3 \dots 1/6)w_1$ – наименьшая ширина базы транзистора.

Для транзистора с плавным коллекторным переходом с $a = \text{const}$ при проколе $w = d/2$, поэтому

$$U_{\text{прок}} = \frac{2}{3} \frac{q a}{\epsilon \epsilon_0} w_{\text{мин}}^3. \quad (59)$$

Напряжение пробоя вследствие возрастания коэффициента усиления по току α до единицы без учета изменения ширины базы будет равно

$$U_{\alpha} = U_B \alpha_{\text{к.б.н}}^{-\frac{1}{n}} = U_B \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)^{\frac{-1}{n}}. \quad (60)$$

Значения n указаны в (32).

Условие $\alpha < 1$ из (60) при заданном пробивном напряжении определяет нижнюю границу для удельного сопротивления материала базы.

7. Построение зонной диаграммы.

Основы расчета и построения зонной диаграммы транзисторов даны в подразд. 1.3.

1.2.2. Расчет дрейфового транзистора

В базе с неравномерным распределением примеси возникает электрическое поле, ускоряющее процесс переноса неосновных носителей заряда. Уменьшение времени пролета, а также возможность получения тонкой базы в таких транзисторах обеспечивает повышение быстродействия.

Технология формирования – сплавно-диффузионная: базовая область формируется диффузией, а эмиттерный переход – вплавлением.

Структура сплавно-диффузионного дрейфового транзистора показана на рис. 5.

1. Расчет дрейфового поля транзистора.

Если положить, что подвижность носителей заряда не зависит от их концентрации и, следовательно, от x , то напряженность электрического поля в базе будет определяться выражением

$$E_{\delta}(x) = \pm \frac{kT}{q} \frac{1}{\rho_{\delta}} \frac{d\rho_{\delta}}{dx} = \pm \frac{kT}{q} \frac{d}{dx} (\ln N_{\delta}) = \pm \frac{kT}{q} \frac{1}{N_{\delta}} \frac{dN_{\delta}}{dx}, \quad (61)$$

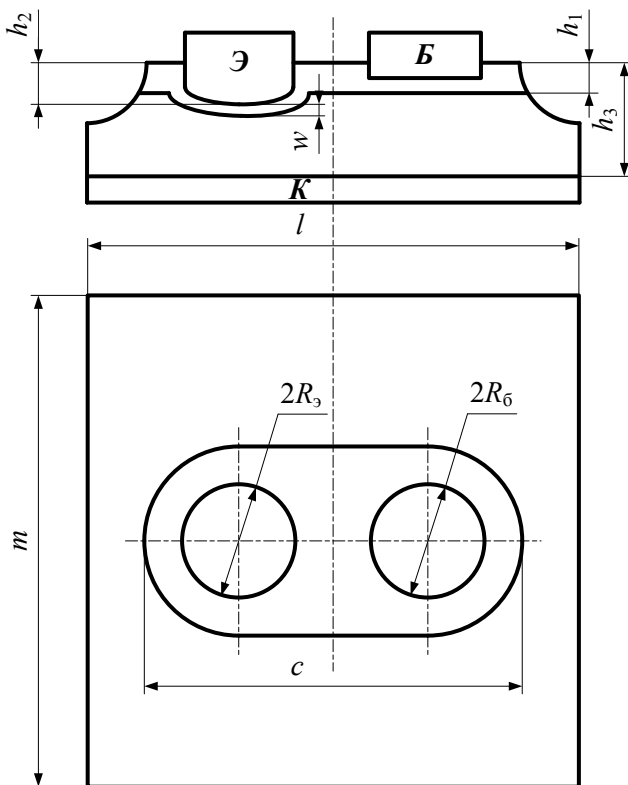


Рис. 5. Структура дрейфового транзистора

или, учитывая закон распределения примеси в базе (9а),

$$E_{\bar{6}} = \frac{kT}{q} a = \frac{kT}{q} \frac{\ln \frac{\rho_{\bar{6}к}}{\rho_{\bar{6}э}}}{w} = \frac{kT}{q} \frac{\ln \frac{N_{\bar{6}э}}{N_{\bar{6}к}}}{w}, \quad (62)$$

где плюс соответствует n - p - n , а минус – p - n - p -транзистору.

2. Расчет коэффициента передачи по току.

Эффективность эмиттера и коэффициент переноса неосновных носителей заряда через базу на низкой частоте определяется согласно [2]

$$\gamma_0 = 1 - \frac{\mu_{нэ} \mu_{пэ}}{\mu_{нб} \mu_{пб}} \frac{D_{б.сп} N_{\bar{6}} w}{D_3 N_3 L_3}, \quad (63)$$

$$\beta_0 = 1 - \frac{w}{a L_6^2} = 1 - \frac{w}{a D_{6, \text{cp}} \tau_6}, \quad (64)$$

где $D_{6, \text{cp}}$ – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда в базе, соответствующий среднему значению примеси в ней.

Учитывая закон распределения примеси (9а), т.е. $N_6(x) = N_{6, \text{э}} e^{-aw}$, запишем

$$D_{6, \text{cp}} = \left(A_1 + A_2 \frac{(1 - e^{-aw})^2}{2(aw - 1 + e^{-aw})} + A_3 \frac{3 - 4e^{-aw}(1 + aw) + e^{-2aw}(1 + 2aw)}{4(aw - 1 + e^{-aw})} \right)^{-1}, \quad (65)$$

$$A_1 = 1,32 \cdot 10^{-5} T^{1/3};$$

$$A_2 = \frac{0,785 N_{6, \text{э}} 10^{-13}}{T^{5/2}} (10,2 + \ln T - 0,33 \ln N_{6, \text{э}});$$

$$A_3 = 0,26 \cdot 10^{-13} \frac{N_{6, \text{э}}}{T^{5/2}}.$$

Расчет коэффициента передачи по току проводится по выражениям (26), (30) – (34), с учетом (63) – (65).

3. Расчет сопротивлений базы, коллектора и эмиттера.

Омическое сопротивление базы дрейфовых транзисторов определяется поперечным сопротивлением базы. Принимая распределение тока радиальным и учитывая, что растекание тока происходит в одну сторону, сопротивление базы под эмиттером в первом приближении будет равно

$$r'_{\text{б}} = \frac{R_{\text{поп.б}}}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \frac{a}{q\mu N_{6, \text{э}}}. \quad (66)$$

Пренебрегая токами утечки, а учитывая лишь влияние эффекта Ирли, коллекторное сопротивление можно определить как

$$r_{\text{к}} = \left[\frac{I_{\text{э}}}{w} [\text{const}_1 (1 - \beta) + (1 - \gamma)] \frac{\partial w}{\partial U_{\text{к}}} \right]^{-1}, \quad (67)$$

где
$$\frac{\partial w}{\partial U_{\text{к}}} = \frac{1}{\text{const}_2} \frac{d_{\text{кб}}}{|U_{\text{к}}|}$$

и значения const_1 и const_2 для резкого перехода коллектор–база равны 2 и 2, а линейного – 1 и 6 соответственно.

Сопротивление тела коллектора дрейфового транзистора без учета растекания тока определяется активной площадью коллектора

$$r'_k = \frac{\rho_k(h-h_2)}{A_{\text{к.активн}}} = \frac{\rho_k(h-h_2)}{\pi R_3^2}. \quad (68)$$

4. Расчет емкости p - n -переходов.

Зарядная емкость резкого эмиттерного перехода определяется по выражению (10), в котором необходимо учесть изменение ширины перехода $d(U)$. Падение напряжения на переходе эмиттер–база рассчитывается при заданной величине эмиттерного тока дрейфового транзистора соответственно как

$$U_3 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{I_3 w_1}{2A_3 D_{\text{б.ср}} q}}{\frac{n_i^2}{N_{\text{б.з}}}} \right), \quad (69)$$

где $\frac{I_3 w_1}{2A_3 D_{\text{б.ср}} q}$ и $\frac{n_i^2}{N_{\text{б.з}}}$ – концентрации неосновных носителей в базе со стороны эмиттера и на границе эмиттер–база.

При расчете зарядной емкости плавного перехода коллектор–база в (10) используют соответствующее выражение ширины такого перехода.

Для сплавно-диффузионных дрейфовых транзисторов характерна бóльшая зарядная емкость эмиттерного перехода.

5. Расчет граничных частот транзистора.

Предельная частота для плавного перехода, определяемая цепью эмиттера:

$$f_3 = (2\pi R_3 C_{3,3})^{-1}. \quad (70)$$

Предельная частота по току, определяемая механизмом переноса через базу, с учетом изменения подвижности носителей внутри базы вследствие изменения концентрации примеси:

$$f_\alpha = \frac{D_{\text{б.ср}}}{\pi w^2} \left[1 + 0,85 \left(\frac{q E_6 w}{2kT} \right)^{3/2} \right]. \quad (71)$$

Отличие обусловлено необходимостью учета, помимо диффузионной, так же и дрейфовой составляющей полного тока.

6. Расчет обратного тока коллекторного перехода.

Обратные токи коллекторного перехода могут быть получены из соответствующих выражений подразд. 1.1.

Составляющая обратного тока коллектора без учета поверхностной рекомбинации выразится следующим образом:

$$I_{\kappa 0}^{\nu} = \frac{q A (h - h_1) n_i^2 k T}{\tau_0 N_{\kappa}}, \quad (72)$$

где Ah – объем, в котором необходимо учитывать рекомбинацию.

При больших L необходимо учитывать всю площадь кристалла и, соответственно составляющая, обусловленная поверхностной рекомбинацией, примет вид

$$I_{\kappa 0}^s = \frac{q A_{\kappa} s n_i^2}{N_{\kappa}}. \quad (73)$$

Обратный ток рекомбинации в переходе получим сложением

$$I_{\kappa 0} = I_{\kappa 0}^{\nu} + I_{\kappa 0}^s. \quad (74)$$

Выражение для тока генерации в запорном слое имеет вид

$$I_{rg} = -q \frac{n_i}{2\tau_0} A_{\kappa} d. \quad (75)$$

Полный обратный ток коллектора равен

$$I_{\kappa 0} = I_{\kappa 0}^{\nu} + I_{\kappa 0}^s + I_{rg}. \quad (76)$$

7. Расчет пробивных напряжений переходов.

Определение напряжения пробоя переходов, а также напряжения, при котором $\alpha = 1$, проводится по выражениям, полученным ранее в подразд.1.1 и 1.2.1.

8. Расчет и построение зонной диаграммы.

Основы расчета и построения зонной диаграммы транзисторов даны в подразд. 1.3. В случае дрейфового транзистора необходимо учесть наклон энергетических уровней в базе. Для этого положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны определяется в базе со стороны эмиттера и со стороны коллектора.

1.3. Расчет и построение зонных диаграмм полупроводниковых структур

Электронно-дырочный переход является единственным элементом заданных в работе полупроводниковых структур. Соответственно расчет и построение зонных диаграмм проводится на его основе.

В условиях термодинамического равновесия в отсутствие внешнего смещения уровень Ферми общий в обеих частях p - n -перехода. При этом высота энергетического барьера соответствует контактной разности потенциалов в p - n -переходе, зависит от концентрации примесей в p - и n -областях и равна разности работ выхода

$$q\Phi_k = \chi_p - \chi_n = kT \ln \frac{p_p}{p_n} = kT \ln \frac{n_n}{n_p}. \quad (77)$$

При наличии внешнего смещения эта высота увеличивается (для обратного) или уменьшается (для прямого смещения) на величину qU , где U – напряжение смещения.

Положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны в примесном полупроводнике можно определить [1–4] так:

- 1) для полупроводника n -типа

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_n}{n_i}, \quad (78)$$

- 2) для полупроводника p -типа

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{p_p}{p_i}. \quad (79)$$

Положение уровня Ферми можно определить также относительно границ зон [1–4].

Построение зонной диаграммы p - n -перехода заключается в масштабном графическом исполнении распределений энергетических уровней Ферми, середины запрещенной зоны, дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, а также вакуума.

На полученную диаграмму необходимо нанести следующие параметры и их значения: ширину p - n -перехода, энергию, соответствующую контактной разности потенциалов, ширину запрещенной зоны, а также работы выхода p - и n -областей.

Расчет и построение зонных диаграмм транзисторных структур проводится аналогичным образом для эмиттерного и коллекторного переходов.

2. ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

2.1. Расчет параметров сплавного p - n -перехода

Структура сплавного p - n -перехода показана на рис. 3. Данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значения электрических параметров и размеров

Параметр	Вариант					
	1	2	3	4	5	6
l , мкм*	8,0	10	15	5,0	12	15
w , мкм	10	30	9	5	8	100
ρ_n , Ом·см	0,01	0,1	0,04	0,9	0,5	0,02
ρ_p , Ом·см	10	5	33	40	15	20
X_d , мкм	1,0	1,5	1,2	0,8	1,5	1,2
U_a , В	5	3	7	-5	-6	-3

*основание эмиттера – квадрат $l \times l$ или круг с радиусом $l/2$

Задание:

1. Рассчитать ширину p - n -перехода, барьерную емкость, распределение электрического поля в p - n -переходе и контактную разность потенциалов при $U_a = 0$ В.
2. Рассчитать ВАХ p - n -перехода. Самостоятельно выбрать и обосновать значение времени жизни неосновных носителей заряда.
3. Рассчитать пробивные напряжения p - n -перехода.
4. Построить энергетическую диаграмму перехода при $U_a = 0$ В и $U_a \neq 0$.

2.2. Расчет параметров сплавного транзистора

Структура дрейфового транзистора показана на рис. 4. Данные для расчета приведены в табл. 2.

Задание:

1. Рассчитать коэффициент передачи транзистора по току.
2. Рассчитать сопротивления эмиттера, коллектора, базы.
3. Рассчитать барьерные емкости p - n -переходов.
4. Рассчитать диффузионную емкость открытого p - n -перехода.
5. Вычислить граничную частоту транзистора.

6. Вычислить максимальную частоту генерации.
7. Рассчитать обратные токи переходов.
8. Определить пробивные напряжения переходов.
9. Определить положение уровня Ферми. Построить энергетическую диаграмму транзистора в равновесном состоянии и при заданных значениях U_K и U_3 .

Таблица 2

Значения электрических параметров и размеров

Параметр	Вариант								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Тип	p-n-p	p-n-p	p-n-p	p-n-p	p-n-p	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n
U_K , В	-5	-10	-15	-5	-10	5	10	15	5
U_3 , В	3	5	7	4	2	-3	-5	-6	-8
I_3 , мА	0,5	1,0	2,0	0,4	0,9	0,5	1,1	2,0	0,5
R_3 , мм	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,1
R_K , мм	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5
R_6 , мм	3	4	4	3	4	3	3	4	1
ρ_3 , Ом·см $\times 10^{-3}$	1	2	5	1	8	10	1	80	10
ρ_K , Ом·см $\times 10^{-3}$	1	50	80	100	100	50	8	100	50
ρ_6 , Ом·см	15	10	5	20	9	12	20	25	15
w_1 , мкм	15	100	50	10	50	10	50	100	40
w_2 , мкм	250	200	80	150	80	100	80	150	80
w_3 , мкм	400	300	150	200	150	150	150	200	150
L_3 , мкм	10	5	8	1	15	5	8	3	2
L_K , мкм	10	5	8	1	15	5	8	3	2
τ_6 , мкс	10	40	20	15	25	35	30	20	10

Примечание: значения U_3 в таблице указаны только для расчета и построения зонных диаграмм.

2.3. Расчет параметров дрейфового транзистора

Структура дрейфового транзистора показана на рис. 5. Данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения электрических параметров и размеров

№ вар.	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип транзистора	p-n-p	p-n-p	p-n-p	p-n-p	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n
$U_K, В$	-5	-10	-15	-5	10	15	5	10	15
$U_3, В$	3	5	7	4	-2	-3	-5	-7	-4
$I_3, мА$	5	8	12	6	7	10	3	9	12
$R_3, мкМ$	50	70	90	50	70	90	50	70	90
$R_6, мкМ$	50	70	90	50	70	90	50	70	90
$c, мкМ$	300	350	400	300	350	400	300	350	400
$b, мм$	200	250	300	200	250	300	130	200	250
$w_1, мкМ$	3	3,5	5	2	4	3	1	5	7
$h_3, мкМ$	150	200	250	100	180	220	200	250	300
$h_1, мкМ$	15	17	20	17	20	25	17	20	20
$l = m, мм$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$h_2, мкМ$	30	40	50	30	35	50	30	35	40
$\rho_K, Ом см$	0,7	0,6	0,9	0,75	0,65	0,55	0,7	0,8	0,9
$\tau_K, мкс$	30	35	40	40	35	30	20	50	10
$N_3, см^{-3} \times 10^{18}$	5	10	8	3	1	7	5	3	7
$L_3, мкМ$	10	13	9	15	12	10	11	9	15
$N_6, см^{-3} \times 10^{17}$	1	3	1	7	3	0,7	6	1	3
$\tau_6, мкс$	10	15	5	20	15	10	5	10	15

Примечание: значения U_3 в таблице указаны только для расчета и построения зонных диаграмм.

Задание:

1. Рассчитать величину дрейфового поля транзистора.
2. Рассчитать коэффициент передачи по току.
3. Рассчитать сопротивления эмиттера, базы, коллектора.

4. Рассчитать емкости p - n -переходов.
5. Рассчитать граничную частоту транзистора.
6. Рассчитать обратный ток коллекторного перехода.
7. Рассчитать пробивные напряжения переходов.
8. Рассчитать энергетическую диаграмму транзистора и положения уровня Ферми.
9. Построить энергетические диаграммы транзисторов в равновесном состоянии и при приложении напряжений смещения на p - n -переходы.

Общие замечания

При обнаружении неадекватного значения искомого или промежуточного параметра *по согласованию с преподавателем* в пояснительной записке:

- приводится соответствующая запись с обоснованием, в которой указывается параметр, его текущее значение и диапазон допустимых значений;
- даются рекомендации по изменению величин задающих параметров;
- проводится перерасчет на основе выбранных значений;
- делаются соответствующие выводы.

Выражения, приведенные в теоретической части, носят опорный характер. Расчет может проводиться на основе других выражений с указанием источников.

Необходимые для расчета значения фундаментальных постоянных представлены в табл. 4, основных свойств полупроводниковых материалов – в табл. 5.

Данные по времени жизни неосновных носителей заряда в германии и кремнии приведены в [2. С. 217–218], а также в [3–4].

Таблица 4

Фундаментальные постоянные

Постоянная, обозначение, размерность			Значение
Элементарный заряд (электрона)	q	Кл	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Постоянная Больцмана	k	Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
Диэлектрическая проницаемость вакуума	ε_0	Ф/см	$8,85 \cdot 10^{-14}$

Таблица 5

Основные свойства полупроводниковых материалов

Параметр, обозначение, размерность			Материал	
			Si	Ge
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	–	11,8	16
Работа выхода	χ	эВ	4,8	4,78
Ширина запрещенной зоны	E_g	эВ	1,12	0,67
Удельное сопротивление собственной проводимости	ρ_i	Ом·см	$2 \cdot 10^5$	47

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки согласно требованиям ГОСТ 7.32, ГОСТ 2.105, ГОСТ Р 7.0.5. Изложение должно быть выполнено на одной стороне листа формата А4 через полуторный межстрочный интервал шрифтом Time New Roman и кеглем 14 (заголовки Arial-14). Для представления нетекстовых данных (графиков, таблиц и т.п.) допускается использовать лист формата А3 (297х420).

Размеры полей: правое – 1 см, остальные – 2 см. При печати текстового материала следует использовать двухстороннее выравнивание (выключку) и автоматическую расстановку переносов слов (кроме заголовков, выполненных прописными буквами). Абзацы в тексте начинаются отступом 1 см.

Объем пояснительной записки должен составлять около 20 страниц (но не более 30). Номера страниц проставляются арабскими цифрами в центре нижней части листа.

Графический материал к работе представляет собой набор плакатов, раскрывающих сущность и результаты расчета и одновременно служащих иллюстративным материалом для защиты работы. Объем графических материалов к курсовой работе – не менее одного листа формата А4.

Пояснительная записка должна включать:

- титульный лист;
- задание на проектирование;
- реферат (аннотацию);
- содержание;

- перечень сокращений, условных обозначений символов единиц, терминов;
- введение;
- основную часть: теоретическую – рассмотрение основ заданной полупроводниковой структуры; практическую – собственно расчет (и промежуточные выводы);
- сводную таблицу исходных данных и рассчитанных параметров;
- заключение с выводами;
- список использованных источников;
- приложения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М.: Энергия, 1977. – 672 с.
2. Красилов А.В., Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 224 с.
3. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.
4. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. Т. 1. – 456 с. Т. 2. – 456 с.
5. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
6. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. – М.: Техносфера, 2008. – 510 с.
7. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.

**Агеев Олег Алексеевич
Наумченко Александр Серафимович
Гусев Евгений Юрьевич**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

по дисциплине

ТВЁРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск Наумченко А.С.

Редактор	Проценко И.А.
Корректор	Селезнева Н.И.

ЛР № 020565 от 23.06.1997 г.

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$.

Уч.-изд. л. – 1,9.

Заказ №

Подписано к печати

Печать офсетная.

Бумага офсетная.

Усл. п. л. – 2,0.

Тираж 75 экз.

«С»

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1