

Министерство науки и высшего образования и Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра промышленной электроники
и информационно-измерительной техники

М.Г. Петрушанский

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств

Оренбург
2019

УДК 621.382.33
ББК 32.853
П 31

Рецензент – доцент, кандидат технических наук М.М. Филяк

Петрушанский, М.Г.
П 31 Расчет параметров транзистора: методические указания /
М.Г. Петрушанский; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ,
2019. – 21 с.

В методических указаниях изложены требования к содержанию и оформлению курсовой работы, предусмотренной рабочими программами дисциплин «Электронные приборы» и «Электронная и полупроводниковая техника» в четвертом семестре обучения, приведены варианты индивидуальных заданий.

Методические указания предназначены для самостоятельной (внеаудиторной) работы обучающихся по образовательной программе бакалавриата по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств.

УДК 621.382.33
ББК 32.853

© Петрушанский М.Г., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

1 Задание на курсовую работу. Требования к оформлению пояснительной записки.	
Методика оценки работы.....	5
1.1 Задание на курсовую работу	5
1.2 Требования к содержанию пояснительной записки и изложению материала.....	10
1.3 Методика оценки работы обучающегося.....	11
2 Краткие теоретические сведения и рекомендации по выполнению курсовой работы	13
2.1 Краткие теоретические сведения	13
2.2 Расчет электрических параметров транзистора	16
2.3 Расчет зонной диаграммы транзистора.....	16
2.4 Выполнение чертёжа зонной диаграммы	20
Список использованных источников	21

Введение

Курсовая работа на тему «Расчет параметров транзистора» по дисциплинам «Электронные приборы» и «Электронная и полупроводниковая техника» направления подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств выполняется в четвертом семестре обучения. В предлагаемой курсовой работе исследуется связь между физической структурой элементов биполярного транзистора и его основными параметрами и рассматриваются соотношения полупроводниковой электроники, позволяющие по заданной структуре рассчитать указанные параметры. Целью выполнения курсовой работы является изучение методов практического расчёта конструктивных и электрических параметров полупроводниковых структур. В результате выполнения курсовой работы обучающийся должен показать способность применения методов практического расчёта конструктивных и электрических параметров биполярного транзистора, владение методами построения зонной диаграммы транзистора в равновесном состоянии и при приложении к нему напряжений смещения.

Методические указания предназначены для организации самостоятельной (внеаудиторной) работы обучающихся по образовательной программе бакалавриата по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств при выполнении курсовой работы и содержат варианты заданий, необходимые для их выполнения теоретические сведения и требования к содержанию пояснительной записки. Перед началом выполнения курсовой работы целесообразно просмотреть включенные в список использованных источников работы теоретического [1-5] и практического [6-9] характера.

1 Задание на курсовую работу. Требования к оформлению пояснительной записки. Методика оценки работы

1.1 Задание на курсовую работу

Заданы электрические и конструктивные параметры элементов биполярного транзистора определенной структуры. Соответствующие разным вариантам исходные данные для расчета параметров сплавного транзистора приведены в таблице 1, а для расчета параметров дрейфового транзистора – в таблице 2.

Таблица 1 – Номер варианта, значения электрических параметров и размеров для расчета параметров сплавного транзистора

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

Таблица 2 – Номер варианта, значения электрических параметров и размеров для расчета параметров дрейфового транзистора

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n	n-p-n	p-n-p	p-n-p	p-n-p	p-n-p	p-n-p
$U_K, В$	10	15	5	10	15	-5	-10	-15	-5	-10
$U_3, В$	-2	-3	-5	-7	-4	3	5	7	4	2
$I_3, мА$	6	10	3	9	12	5	8	12	6	7
$R_3, мкМ$	50	90	50	70	90	50	70	90	50	70
$R_6, мкМ$	50	90	50	70	90	50	70	90	50	70
$c, мкМ$	350	400	300	350	400	300	350	400	300	350
$b, мм$	200	300	130	200	250	200	250	300	200	250
$w, мкМ$	3	3	1	5	7	3	3,5	5	2	4
$h_1, мкМ$	25	25	17	20	20	15	17	20	17	20
$h_2, мкМ$	40	50	30	35	40	30	40	50	30	35
$h_3, мкМ$	220	220	200	250	300	150	200	250	100	180
$l = m, мм$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\rho_K, Ом см$	0,6	0,55	0,7	0,8	0,9	0,7	0,6	0,9	0,75	0,65
$\tau_K, мкс$	35	30	20	50	10	30	35	40	40	35
$N_3, см^{-3} \times 10^{18}$	8	7	5	3	7	5	10	8	3	1
$L_3, мкМ$	9	10	11	9	15	10	13	9	15	12
$N_6, см^{-3} \times 10^{17}$	1	0,7	6	1	3	1	3	1	7	3
$\tau_6, мкс$	5	10	5	10	15	10	15	5	20	15

На рисунке 1 изображена структура сплавного транзистора, а на рисунке 2 – структура дрейфового транзистора [6].

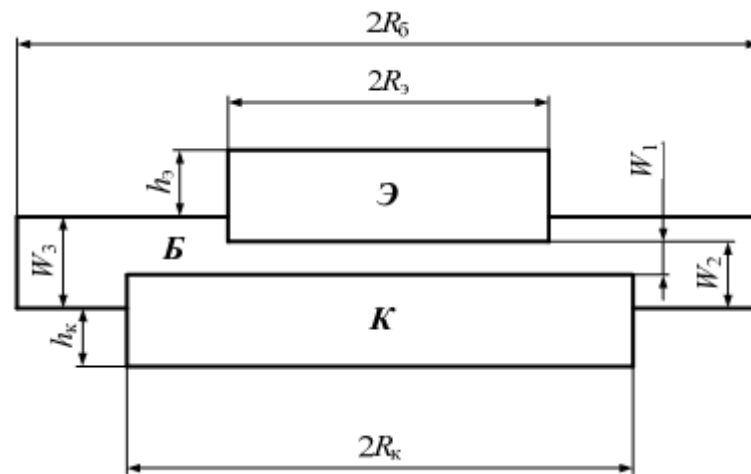


Рисунок 1 – Структура сплавного транзистора

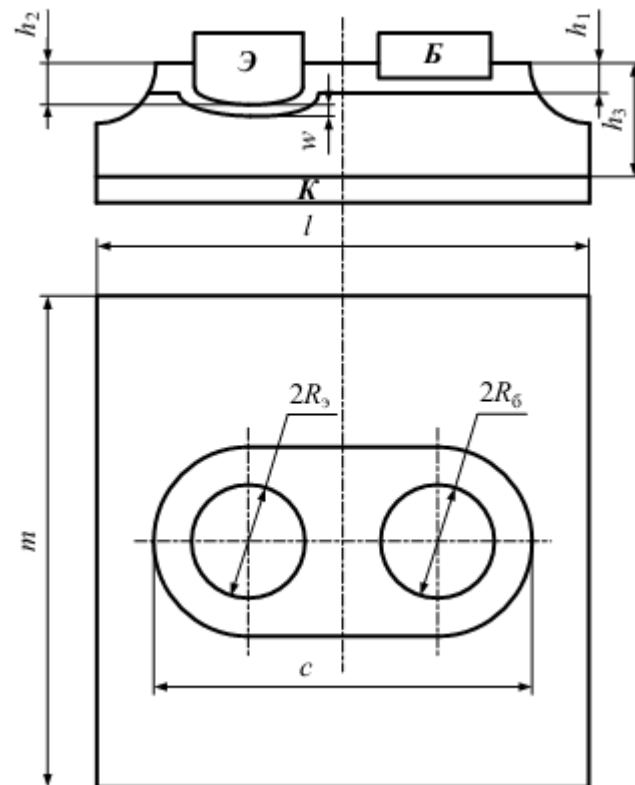


Рисунок 2 – Структура дрейфового транзистора

В таблицах 1 и 2 и на рисунках 1 и 2 использованы следующие обозначения:

– U_{κ} – напряжение на коллекторе, В;

– U_{ε} – напряжение на эмиттере, В;

- I_3 – ток эмиттера, мА;
- R_3 – размер области эмиттера, мм;
- R_k – размер области коллектора, мм;
- R_6 – размер области базы, мм;
- ρ_3 – удельное сопротивление области эмиттера, Ом·см;
- ρ_k – удельное сопротивление области коллектора, Ом·см;
- ρ_6 – удельное сопротивление области базы, Ом·см;
- w, w_1, w_2, w_3 – толщины различных областей базы, мкм;
- L_3 – диффузионная длина неосновных носителей заряда в эмиттере, мкм;
- L_k – диффузионная длина неосновных носителей заряда в коллекторе, мкм;
- τ_6 – среднее время жизни неосновных носителей заряда в базе, мкс;
- c, b – размеры фотолитографически выделенной области коллектора, мкм;
- h_1, h_2, h_3 – толщины различных областей дрейфового транзистора, мкм;
- $l = m$ – размеры полупроводникового кристалла, мм;
- τ_k – среднее время жизни неосновных носителей заряда в коллекторе, мкс;
- N_3 – концентрация примеси в эмиттере, см⁻³;
- N_6 – концентрация примеси в базе, см⁻³.

При выполнении курсовой работы необходимо решить следующие задачи:

1) рассчитать электрические параметры транзистора на основе заданных номером варианта исходных технических и конструкторских данных и требований. В случае расчета параметров сплавного транзистора вычисляются следующие величины:

- коэффициент передачи транзистора по току α ;
- сопротивления эмиттера r_3 , базы r_6 и коллектора r_k , Ом;
- диффузионные емкости коллекторного $C_{\partial k}$ и эмиттерного $C_{\partial 3}$ переходов и барьерные (зарядные) емкости коллекторного $C_{з k}$ и эмиттерного $C_{з 3}$ переходов, пФ;

- граничная частота транзистора f_{α} , Гц;
- максимальная частота генерации $f_{\max}$, Гц;
- обратные токи коллектора I_{ko} и эмиттера I_{eo} , мкА;
- пробивные напряжения лавинного $U_{\text{проб}}$ и туннельного (зинеровского) U_Z пробоев, прокола $U_{\text{прок}}$ и предельно допустимое напряжение U_{α} , соответствующее возрастанию коэффициента передачи транзистора по току α до единицы, В.

В случае расчета параметров дрейфового транзистора вычисляются следующие величины:

- дрейфовое поле транзистора $E_{\bar{b}}$, В/см;
- коэффициент передачи по току α ;
- сопротивления эмиттера r_e , базы r_b и коллектора r_k , Ом;
- барьерные (зарядные) емкости коллекторного $C_{зк}$ и эмиттерного $C_{зе}$ переходов, пФ;
- граничная частота транзистора f_{α} , Гц;
- обратный ток коллекторного перехода I_{ko} , мкА;
- пробивные напряжения лавинного $U_{\text{проб}}$ и туннельного (зинеровского) U_Z пробоев, прокола $U_{\text{прок}}$ и предельно допустимое напряжение U_{α} , соответствующее возрастанию коэффициента передачи транзистора по току α до единицы, В.

2) рассчитать зонную диаграмму транзистора для заданного номера варианта, определив положение уровня Ферми E_F относительно середины запрещенной зоны E_i для каждой области транзистора, эВ;

3) выполнить чертёж зонной диаграммы в равновесном состоянии и при приложении к р-п-переходам транзистора напряжений смещения, то есть при заданных в таблицах 1 и 2 значениях напряжений на коллекторе U_k и на эмиттере U_e .

1.2 Требования к содержанию пояснительной записки и изложению материала

Пояснительная записка к курсовой работе, в соответствии с требованиями СТО 02069024.101-2015 [10], должна содержать следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- задание на выполнение курсовой работы с исходными данными в соответствии с номером варианта;
- аннотацию;
- содержание;
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- список использованных источников.

Во введении следует определить цель курсовой работы и задачи, подлежащие решению для достижения указанной цели, а также привести краткую характеристику структуры пояснительной записки по разделам.

Основная часть должна содержать материал, отражающий пути достижения цели курсовой работы. Она должна включать:

- расчет электрических параметров транзистора на основе заданных номером варианта исходных технических и конструкторских данных и требований;
- расчет зонной диаграммы транзистора для заданного номера варианта;
- чертёж зонной диаграммы в равновесном состоянии и при приложении к р-п-переходам транзистора напряжений смещения. Чертежи выполняются на листах формата А4 или, при необходимости, А3;
- сводную таблицу соответствующих номеру варианта исходных данных и рассчитанных по ним параметров транзистора.

В заключении необходимо кратко изложить результаты, полученные при выполнении курсовой работы.

Для проведения расчетов рекомендуется использовать интегрированную систему решения математических, инженерно-технических и научных задач MathCAD.

1.3 Методика оценки работы обучающегося

Защита курсовой работы проводится в последнюю неделю четвертого семестра обучения. Дату и время проведения защиты назначает преподаватель (руководитель курсовой работы). Защита, как правило, проводится публично, в присутствии всех обучающихся группы.

На защиту обучающийся должен представить сброшюрованную пояснительную записку и подготовленный короткий доклад на 3 – 5 минут. Доклад должен сопровождаться демонстрацией презентации, выполненной в среде MS PowerPoint.

При выставлении оценки за курсовую работу учитывается:

- качество оформления пояснительной записки (соответствие требованиям СТО 02069024.101-2015 [10]);
- полнота и правильность выполнения задания;
- качество доклада и демонстрационного материала (презентации).

Курсовая работа оценивается по четырехбальной системе: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

Оценка **«отлично»** выставляется за курсовую работу, если пояснительная записка оформлена в полном соответствии с требованиями стандарта СТО 02069024.101-2015 [10], задание выполнено в полном объеме и результаты его выполнения грамотно (с инженерных позиций) представлены в пояснительной записке, во время защиты обучающийся уверенно отстаивал решения, принятые в работе.

Оценка **«хорошо»** выставляется за курсовую работу, если пояснительная записка в основном удовлетворяет требованиям СТО 02069024.101-2015 [10], но при этом имеют место незначительные отклонения от требований этого стандарта,

задание выполнено в полном объеме, но его результаты в пояснительной записке изложены некачественно (для понимания сути представленного материала требуются дополнительные пояснения), во время защиты обучающийся уверенно отстаивал решения, принятые в работе.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется за курсовую работу, если пояснительная записка в основном удовлетворяет требованиям СТО 02069024.101-2015 [10], но не выполнены одновременно несколько требований стандарта (например, форматирование абзаца и размера символов в формулах, форматирование размера шрифта в тексте и оформление библиографической записи и т. п.), задание выполнено не в полном объеме.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется за курсовую работу, если обучающийся не представил пояснительную записку на дату проведения защиты.

2 Краткие теоретические сведения и рекомендации по выполнению курсовой работы

2.1 Краткие теоретические сведения

Курсовая работа посвящена рассмотрению методов практического расчёта конструктивных и электрических параметров биполярных транзисторов. Необходимыми для проведения таких расчетов основными физическими параметрами полупроводниковых материалов и соотношениями полупроводниковой электроники являются концентрация и подвижность носителей заряда, положение уровня Ферми, удельные проводимость и сопротивление материала, соотношение Эйнштейна, закон действующих масс, а также связь длины диффузии с коэффициентом диффузии и временем жизни неосновных носителей заряда [6]. Сведения о величинах основных параметров рассматриваемых полупроводниковых материалов приведены в [3, 4, 6-9], а соответствующие выражения даны в [1-6, 9].

Концентрации носителей заряда определяются их эффективными массами, шириной запрещенной зоны полупроводника, его температурой и, при рассмотрении примесных полупроводников, концентрациями примесей. Закон действующих масс устанавливает неизменность произведения концентраций n и p соответственно электронов и дырок проводимости в полупроводниках в условиях термодинамического равновесия:

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

где индексом n обозначены параметры электронных полупроводников, индексом p – дырочных, а индексом i – собственных.

Подвижность носителей заряда μ определяется подвижностями μ_L и μ_I , обусловленными соответственно рассеянием носителей на фононах и на примесях:

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

На рисунке 3 представлены экспериментально полученные зависимости подвижностей электронов μ_n и дырок μ_p от концентрации примеси для разных полупроводниковых материалов [6].

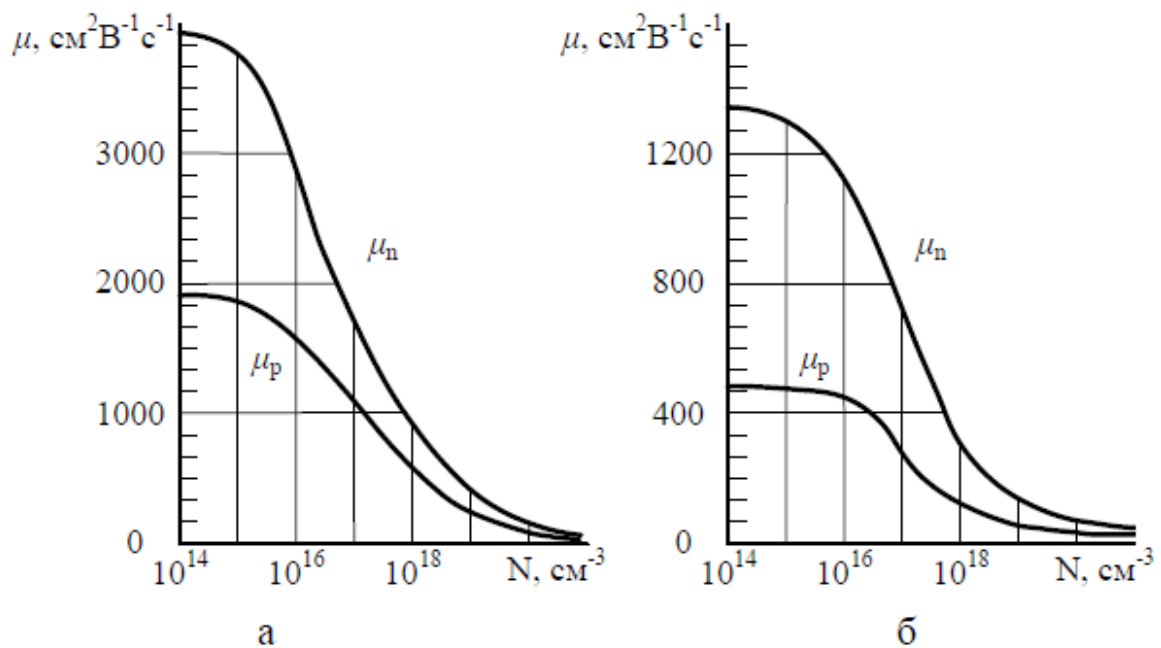


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости подвижностей от концентрации примеси при температуре $T = 300$ К для кремния (а) и германия (б)

Соотношение Эйнштейна связывает коэффициент диффузии D и подвижность μ носителей заряда при абсолютной температуре T :

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

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К – постоянная Больцмана.

Удельные проводимость σ и сопротивление ρ полупроводника зависят от концентраций электронов и дырок проводимости и их подвижностей:

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

На рисунке 4 представлены экспериментальные зависимости удельных сопротивлений некоторых полупроводников от концентрации примеси при температуре $T = 300 \text{ K}$ [9].

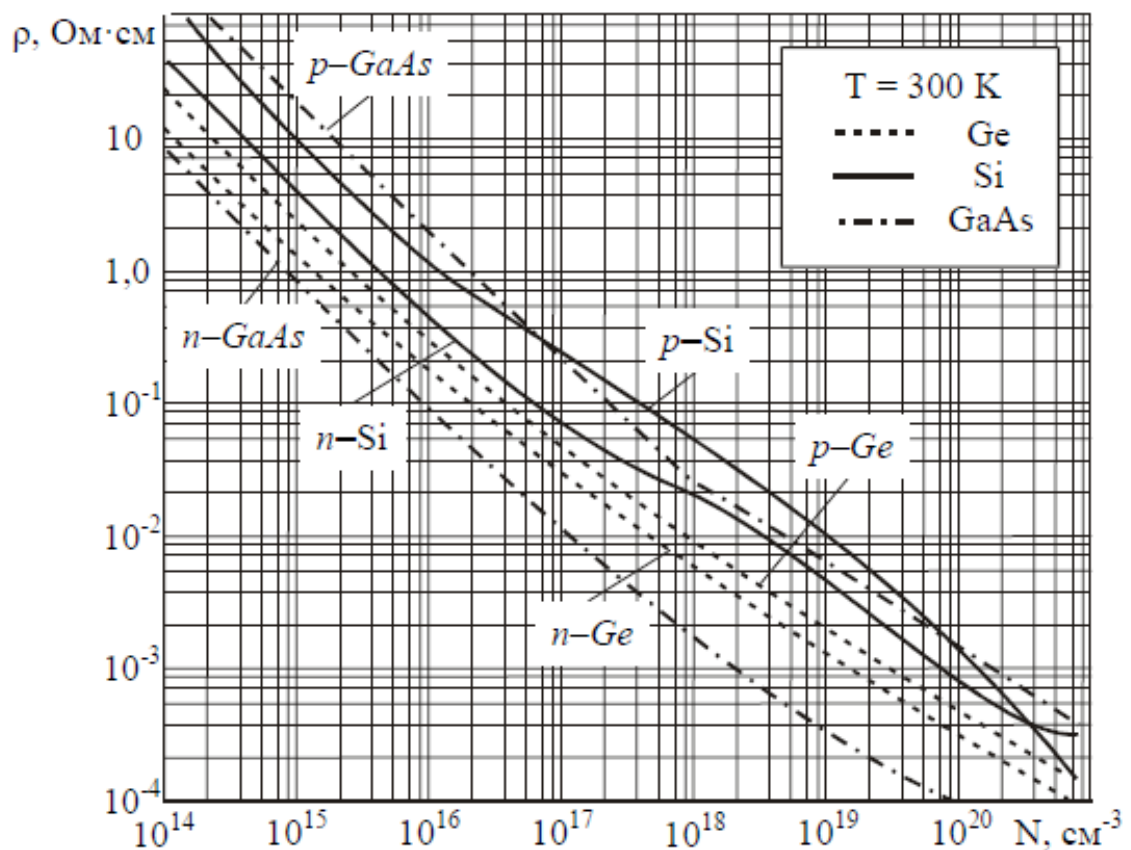


Рисунок 4 – Зависимости удельного сопротивления полупроводников от концентрации примеси

Диффузионная длина L связана со средним временем жизни неосновных носителей заряда τ следующим образом:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad (5)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}. \quad (6)$$

Теоретические сведения о положении уровня Ферми приведены далее при рассмотрении вопросов расчета и построения зонной диаграммы транзистора.

2.2 Расчет электрических параметров транзистора

Основными составляющими биполярного транзистора являются электронно-дырочные (или р-п-) переходы. При равномерном распределении примеси в обеих приграничных областях перехода он называется ступенчатым или резким, а при изменении концентрации примеси в соответствии с некоторой зависимостью – плавным.

В сплавном (бездрейфовом) транзисторе распределение примеси в области базы принимают равномерным и считают, что неосновные носители заряда проходят базу в результате диффузии. Сплавные транзисторы получают путем сплавления эмиттера и коллектора в полупроводниковый кристалл. Структура сплавного транзистора изображена на рисунке 1.

В дрейфовом транзисторе распределение примеси в области базы является неравномерным и там возникает электрическое поле, которое ускоряет перенос неосновных носителей заряда. База дрейфовых транзисторов создается с помощью диффузии, а эмиттерный переход формируется сплавлением. Структура такого спавно-диффузионного дрейфового транзистора приведена на рисунке 2.

Исходные данные для расчета параметров сплавного транзистора приведены в таблице 1, а для расчета параметров дрейфового транзистора – в таблице 2.

В таблице 3 приведен перечень рассчитываемых в рассматриваемой курсовой работе параметров сплавного транзистора и указаны используемые для этого формулы.

Таблица 3 – Параметры сплавного транзистора и формулы для их расчета

Параметр	Расчетные формулы
Коэффициент передачи транзистора по току α	(25) – (33) [6]
Сопротивление базы $r_{\bar{b}}$, Ом	(35) – (38) [6]
Сопротивление эмиттера r_3 , Ом	(39) – (41) [6]
Сопротивление коллектора r_k , Ом	(42), (43) [6]
Диффузионная емкость коллекторного $C_{\partial k}$ перехода, пФ	(47) [6]
Диффузионная емкость эмиттерного $C_{\partial \varepsilon}$ перехода, пФ	(48) [6]
Барьерная (зарядная) емкость коллекторного $C_{з k}$ перехода, пФ	(6), (7), (44), (45) [6]
Барьерная (зарядная) емкость эмиттерного $C_{з \varepsilon}$ перехода, пФ	(6), (7), (44), (45) [6]
Граничная частота транзистора f_{α} , Гц	(49) [6]
Максимальная частота генерации $f_{\max}$, Гц	(50) [6]
Обратный ток коллектора I_{ko} , мкА	(51), (53), (56), (57) [6]
Обратный ток эмиттера $I_{\varepsilon o}$, мкА	(52), (54), (55) [6]
Пробивное напряжение лавинного $U_{проб}$ пробоя, В	(21) – (24) [6]
Пробивное напряжение туннельного (зинеровского) U_Z пробоя, В	(20) [6]
Пробивное напряжение прокола $U_{прок}$, В	(58), (59) [6]
Предельно допустимое напряжение U_{α} , соответствующее возрастанию коэффициента передачи транзистора по току α до единицы, В	(60) [6]

Пример расчета параметров германиевого сплавного транзистора типа р-п-р представлен в [9, с. 202 – 217].

В таблице 4 приведен перечень рассчитываемых в рассматриваемой курсовой работе параметров дрейфового транзистора и указаны используемые для этого формулы.

Таблица 4 – Параметры дрейфового транзистора и формулы для их расчета

Параметр	Расчетные формулы
Дрейфовое поле транзистора $E_{\bar{\delta}}$, В/см	(61), (62) [6]
Коэффициент передачи транзистора по току α	(25) – (34), (63) – (65) [6]
Сопротивление базы $r_{\bar{\delta}}$, Ом	(66) [6]
Сопротивление эмиттера r_3 , Ом	(40) [6]
Сопротивление коллектора r_k , Ом	(67) [6]
Барьерная (зарядная) емкость коллекторного $C_{зк}$ перехода, пФ	(10), (69) [6]
Барьерная (зарядная) емкость эмиттерного $C_{зэ}$ перехода, пФ	(10), (69) [6]
Граничная частота транзистора f_{α} , Гц	(70), (71) [6]
Обратный ток коллекторного перехода $I_{ко}$, мкА	(72) – (76) [6]
Пробивное напряжение лавинного $U_{проб}$ пробоя, В	(21) – (24) [6]
Пробивное напряжение туннельного (зинеровского) U_Z пробоя, В	(20) [6]
Пробивное напряжение прокола $U_{прок}$, В	(58), (59) [6]
Предельно допустимое напряжение U_{α} , соответствующее возрастанию коэффициента передачи транзистора по току α до единицы, В	(60) [6]

Пример расчета параметров германиевого дрейфового транзистора типа р-п-р представлен в [9, с. 218 – 227].

2.3 Расчет зонной диаграммы транзистора

Расчет и построение зонной диаграммы биполярного транзистора выполняется на основе предварительно рассчитываемых зонных диаграмм эмиттерного и коллекторного р-п-переходов.

При выполнении условий термодинамического равновесия и отсутствия внешнего смещения уровень Ферми является общим для всех частей двух электронно-дырочных переходов биполярного транзистора. В этом случае высота потенциального барьера каждого р-п-перехода определяется контактной разностью потенциалов φ_k , зависящей от концентрации примесей в р- и п-областях этого р-п-перехода:

$$q \cdot \varphi_k = k \cdot T \cdot \ln \frac{p_p}{p_n} = k \cdot T \cdot \ln \frac{n_n}{n_p}. \quad (7)$$

При появлении внешнего напряжения смещения U высота потенциального барьера становится больше для обратного смещения или меньше для прямого смещения на величину $q \cdot U$.

Для полупроводника п-типа положение уровня Ферми E_F относительно середины запрещенной зоны E_i определяется выражением [4, 9]:

$$E_F - E_i = k \cdot T \cdot \ln \frac{n_n}{n_i}, \quad (8)$$

а для полупроводника р-типа – выражением:

$$E_i - E_F = k \cdot T \cdot \ln \frac{p_p}{p_i}. \quad (9)$$

Кроме того, положение уровня Ферми может быть определено относительно границ запрещенной зоны [3, 4, 9].

Для учета наклона энергетических уровней в базе дрейфового транзистора определение положения уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны в области базы следует проводить отдельно со стороны эмиттера и со стороны коллектора.

Примеры определения положения уровня Ферми транзистора представлены в [9, с. 211, с. 225 – 227].

2.4 Выполнение чертежа зонной диаграммы транзистора

Построение зонной диаграммы биполярного транзистора состоит в графическом изображении с учетом масштаба энергетических уровней, соответствующих положению уровня Ферми, середины запрещенной зоны, дна зоны проводимости и потолка валентной зоны всех частей эмиттерного и коллекторного электронно-дырочных переходов транзистора.

На построенной зонной диаграмме для каждого р-п-перехода должны быть указаны следующие параметры и их значения: ширина перехода, энергия, соответствующая контактной разности потенциалов и ширина запрещенной зоны.

Примеры построения зонной диаграммы транзистора представлены в [9, с. 211, с. 226].

Список использованных источников

- 1 Викулин, И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
- 2 Гуртов, В.А. Твердотельная электроника: учеб. пособие для вузов / В.А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2005. – 408 с.
- 3 Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов / С.М. Зи. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.
- 4 Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М.: Энергия, 1977. – 672 с.
- 5 Шалимова, К.В. Физика полупроводников: учебник для вузов / К.В. Шалимова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
- 6 Агеев, О.А. Твёрдотельная электроника: методические указания к выполнению курсовой работы / О.А. Агеев, А.С. Наумченко, Е.Ю. Гусев. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010. – 32 с.
- 7 Антипов, Б.Л. Материалы электронной техники: задачи и вопросы: учеб. для студентов вузов / Б.Л. Антипов, В.С. Сорокин, В.А. Терехов. – СПб.: Лань, 2003. – 208 с.
- 8 Кирдяшев, К.П. Электроника: методические указания по выполнению расчетных работ / К.П. Кирдяшев. – М.: МАИ, 2006. – 81 с.
- 9 Трутко, А.Ф. Методы расчета транзисторов / А.Ф. Трутко. – М.: Энергия, 1971. – 272 с.
- 10 СТО 02069024.101-2015. Работы студенческие. Общие требования и правила оформления. Введ. 2016-02-08. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 85 с.