

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Бакалаврская работа на тему: «Технология изготовления и расчет параметров
эпипланарного биполярного транзистора»

Выполнена студентом Рахмоновым Парвизом Давроновичем

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра «Нано- и микроэлектроника» Группа 21 ПД1

Направление подготовки, профиль 11.03.04 «Микроэлектроника
и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) Бакалавр

Руководитель Аношкин Юрий Владимирович
кандидат технических наук

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения бакалаврской работы:

В ходе выполнения ВКР Рахмонов П.Д. показал навыки работы с научно-технической литературой. Продемонстрировал знания и умения по исследованию топологии и структуры эпитланарных биполярных интегральных транзисторов, и рассчитал и промоделировал технологические режимы создания биполярных структур.

Заключение:

ВКР автора полностью соответствуют техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения программы бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «ХОРОШО», а ее автор, Рахмонов Парвиз Давронович, присвоения степени «БАКАЛАВР» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«09» июня 2025 г.

Руководитель



Аношкин Ю.В.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных
технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки

11.03.04. «Электроника и
наноэлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПГУ 02. 11.03.04. 014 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему:

Технология изготовления и расчет параметров эпитланарного
биполярного транзистора
тема бакалаврской работы

Студент группы 21ПД1
номер группы

Р.Р.Р. 09.06.2025 П.Д. Рахмонов
подпись, дата иници., фамилия

Руководитель доцент НимЭ
должность

Ю.В. 09.06.2025 Ю.В. Аношкин
подпись, дата иници., фамилия

ПГУ, каф. НимЭ
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

Р.Н. 17.06.25. Т.Н. Рыжова
подпись, дата иници., фамилия

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 09.06.25 № 10)
Заведующий кафедрой
И.А. Пронин
подпись, дата инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой удовл. (протокол ГЭК от 20.06 № 12)

Секретарь ГЭК

А.А. 20.06.25. А.А. Вольсков
подпись, дата инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит: 71 страниц, 9 рисунков, 1 таблиц, 10 слайдов презентации, 9 используемых источников и 5 приложение.

Ключевые слова: интегральный биполярный транзистор, профиль, диффузия, примеси, расчет, график, концентрация, окисление.

Объектом исследования является интегральный биполярный транзисторов n^+p-n -типа.

Целью данной работы является исследование топологии и структуры эпитланарного биполярного интегрального транзистора со структурой n^+p-n .

Проведенное исследование позволило всесторонне изучить и оптимизировать процесс создания эпитланарного биполярного транзистора, начиная от теоретического моделирования до практической реализации. Работа включала несколько взаимосвязанных этапов, каждый из которых внес существенный вклад в конечный результат.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						2
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Интегральные биполярные транзисторы	6
1.1 Биполярные транзисторы: принцип действия и роль в электронике	6
1.2 Технология изготовления биполярных транзисторов	7
1.3 Расчет основных параметров биполярного транзистора.....	11
1.4 Топология биполярных интегральных транзисторов.....	15
1.5 Технология изготовления интегральных биполярных транзисторов.....	18
2 Исследование топологии и структуры полупроводниковых интегральных схем.....	21
2.1 Исходные данные для определения основных технологических операций для формирования биполярных транзисторов.....	21
2.2 Термическое окисление кремния: технологические аспекты.....	23
2.3 Технология диффузионного формирования базовых областей.....	25
2.4 Расчет профиля легирования базовой области	29
2.5 Технологические особенности формирования эмиттерных областей	31
2.6 Современные подходы к проектированию эмиттерных профилей легирования.....	34
3 Организация рабочего места инженера-исследователя	40
Заключение	44
Список использованных источников	45

Приложение А Задание на бакалаврскую работу.....	46
Приложение Б Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»	50
Приложение В Презентация	53
Приложение Г Графическая часть.....	64
Приложение Д Расчет профиля распределения примесей по глубине эпитланарного биполярного интегрального транзистора	66

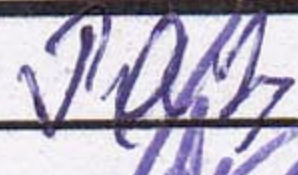
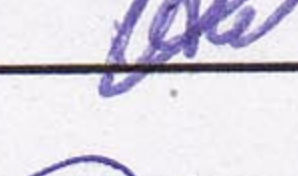
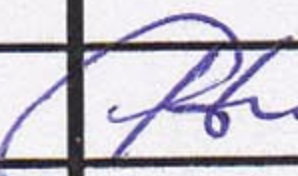
					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

ВВЕДЕНИЕ

Биполярные транзисторы являются ключевыми элементами современной микроэлектроники, находящими применение в аналоговых и цифровых схемах, усилителях, генераторах и системах связи. Их работа основана на управлении током за счет инжекции неосновных носителей заряда, что обеспечивает высокое быстродействие и хорошую линейность характеристик. В последние годы особое внимание уделяется разработке высокочастотных и мощных биполярных транзисторов, что требует глубокого понимания физических процессов, происходящих в полупроводниковых структурах, а также совершенствования технологий их изготовления.

Целью данной работы является исследование топологии и структуры эпитаксиального биполярного интегрального транзистора со структурой n^+-p-n . В рамках исследования решаются следующие задачи:

- изучение основных этапов производства транзистора;
- расчет режимов технологических операций, включая окисление и диффузию примесей;
- моделирование профилей распределения концентрации акцепторной и донорной примесей;
- построение структуры транзистора и анализ его электрофизических параметров.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Рахмонов П.			Введение		
Провер.		Аношкин Ю.					
Реценз.							
Н. Контр.		Рыжова Т.		17.06.25			
Утв.							
						Лит.	Лист
							5
						Листов	
						Группа 21ПД1	

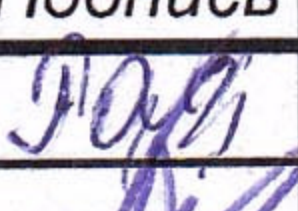
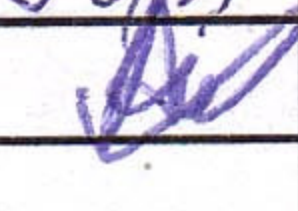
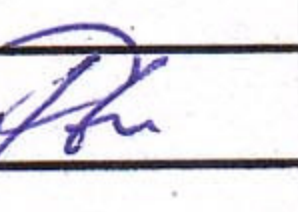
1 Интегральные биполярные транзисторы

1.1 Биполярные транзисторы: принцип действия и роль в электронике

Биполярные транзисторы (БТ) представляют собой полупроводниковые приборы, работа которых основана на управлении током за счёт движения как электронов, так и дырок, что отличает их от униполярных (полевых) транзисторов, использующих только один тип носителей заряда. В классической структуре БТ содержит три области – эмиттер, базу и коллектор, образующие два $p-n$ -перехода. В зависимости от порядка чередования слоёв различают транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$ типов.

Принцип действия биполярного транзистора основан на явлении инжекции неосновных носителей из эмиттера в базу и их последующей диффузии к коллектору. Когда на переходе база-эмиттер подаётся прямое смещение, происходит интенсивная инжекция носителей (электронов в $n-p-n$ или дырок в $p-n-p$ структуре) в тонкую базовую область. Большая часть этих носителей достигает коллекторного перехода, находящегося под обратным смещением, создавая значительный коллекторный ток. Таким образом, относительно слабый ток базы управляет значительно более сильным током коллектора, что и обеспечивает усиление сигнала.

Важнейшими характеристиками биполярных транзисторов являются коэффициент усиления по току (β), граничная частота (f_t), максимальное напряжение коллектор-эмиттер ($U_{max_{кэ}}$) и уровень шумов. Эти параметры определяются геометрией структуры, профилем легирования и свойствами используемых материалов. Например, уменьшение толщины базы позволяет повысить граничную частоту, но одновременно снижает пробивное напряжение [1].

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Интегральные биполярные транзисторы	Лит.		Лист	Листов
Разраб.		Рахмонов П.						6	
Провер.		Аношкин Ю.				Группа 21ПД1			
Реценз.									
Н. Контр.		Рыжова Т.		17.06.25					
Утв.									

В современной электронике биполярные транзисторы находят широкое применение в аналоговых схемах (усилителях, генераторах, стабилизаторах), высокочастотных устройствах и некоторых типах цифровых схем. Особое значение они сохраняют в специализированных применениях, требующих высокой линейности, низкого шума или работы при экстремальных температурах. Развитие технологии, в частности появление кремний-германиевых (SiGe) гетеропереходных биполярных транзисторов, позволило существенно расширить частотный диапазон их работы, сделав конкурентоспособными с более современными полевыми транзисторами в СВЧ-приложениях.

Несмотря на активное развитие *CMOS*-технологий, биполярные транзисторы остаются незаменимыми во многих критически важных узлах электронной аппаратуры. Их дальнейшее совершенствование связано с применением новых материалов, наноструктурированных слоёв и оригинальных топологических решений, что открывает перспективы для создания приборов с уникальными характеристиками.

1.2 Технология изготовления биполярных транзисторов

Современное производство биполярных транзисторов основано на нескольких ключевых технологических подходах, каждый из которых имеет свои особенности и области применения. Наибольшее распространение получили планарная и эпитланарная технологии, которые позволяют создавать приборы с высокими и стабильными характеристиками.

Планарная технология (рисунок 1.1), разработанная в конце 1950-х годов, стала настоящей революцией в полупроводниковой электронике. Её основное преимущество заключается в возможности формирования всех трёх электродов транзистора (эмиттера, базы и коллектора) на одной плоскости кремниевой подложки. Это достигается за счёт комбинации процессов термического окисления, фотолитографии и селективного легирования.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Такой подход обеспечивает высокую воспроизводимость параметров и возможность массового производства [2].

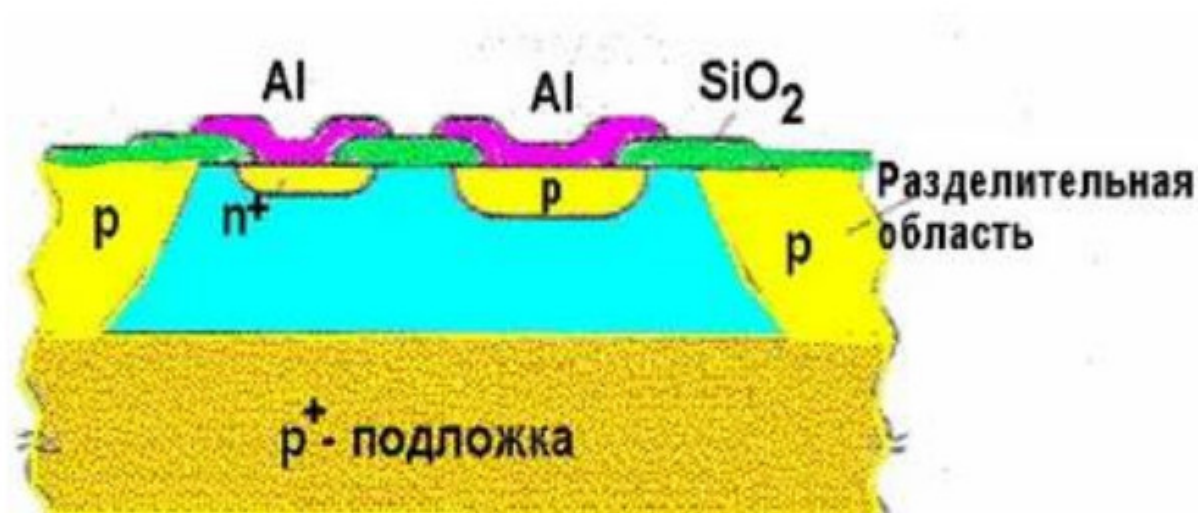


Рисунок 1.1 – Планарная технология создания биполярного транзистора

Эпипланарная технология представляет собой дальнейшее развитие планарного подхода. Её отличительной особенностью является использование эпитаксиального наращивания высокоомного коллекторного слоя на низкоомной подложке. Это позволяет одновременно достичь высокого пробивного напряжения и низкого сопротивления коллектора. Современные варианты этой технологии часто включают формирование скрытого высоколегированного слоя между подложкой и эпитаксиальным слоем, что дополнительно снижает последовательное сопротивление коллектора [3].

Процесс изготовления биполярного транзистора включает несколько десятков последовательных операций, каждая из которых требует строгого контроля параметров. Рассмотрим основные этапы производства:

1. Подготовка подложки: используются монокристаллические кремниевые пластины диаметром от 150 до 300 мм с ориентацией (100) или (111), проводится тщательная химико-механическая очистка поверхности, на этапе предварительной обработки выполняется термический отжиг для устранения дефектов кристаллической решётки.

2. Формирование скрытого слоя (для эпитланарных структур): методом ионной имплантации создаётся высоколегированная область (n^+ или p^+), последующий отжиг при температуре в диапазоне от 900 до 1100 °C активирует имплантированные примеси, контроль сопротивления слоя осуществляется четырёхзондовым методом.

3. Эпитаксиальное наращивание: в реакторах *Chemical Vapor Deposition* (CVD) осаждается эпитаксиальный слой кремния, толщина слоя варьируется от 1 до 20 мкм в зависимости от назначения транзистора, концентрация примесей в слое контролируется с точностью до 5%.

4. Формирование изолирующих областей: локальный окисл (LOCOS) или технология *trench isolation*, глубина изоляционных областей составляет от 0,5 до 3 мкм, особое внимание уделяется качеству границ раздела.

5. Формирование базовой области: ионная имплантация бора (для $n-p-n$) или фосфора/мышьяка (для $p-n-p$), энергия имплантации составляет от 30 до 150 кэВ, доза от $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{15}$ см⁻², отжиг при температуре от 800 до 950 °C для активации примесей и восстановления кристаллической решётки.

6. Эмиттерная область: высокодозная имплантация с последующим ВЧ-отжигом, использование силицидов для снижения контактного сопротивления, контроль глубины залегания осуществляется с точностью ± 5 нм.

7. Металлизация: нанесение контактных слоёв (Al, Cu, TiW), фотолитография и травление контактных окон, формирование многоуровневой металлизации для сложных структур.

Современные производственные процессы включают ряд усовершенствований, позволяющих улучшить характеристики транзисторов. Использование SiGe-сплавов: введение германия в базовую область (от 10 до 30%), создание градиентного профиля концентрации Ge, повышение подвижности носителей и коэффициента усиления.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Глубокая изоляция методом ионного травления, использование пористого кремния для снижения паразитных ёмкостей, изоляция на изопланарных структурах.

Нанолитографические методы (электронно-лучевая литография) для элементов <100 нм, иммерсионная фотолитография с мультипаттернингом, самоорганизующиеся структуры для 10 нм технологий.

Мгновенный отжиг *Rapid Thermal Processing (RTP)*, лазерный отжиг для ультратонких переходов, низкотемпературные процессы для SiGe-структур.

Каждый этап производства сопровождается тщательным контролем параметров. К метрологическому контролю относятся: эллипсометрия для измерения толщин слоёв, сканирующая электронная микроскопия для анализа топологии, рентгеноструктурный анализ качества кристаллов [4].

Электрические измерения параметров биполярных транзисторов выполняют с помощью вольт-фарадных характеристик для анализа *p-n* переходов, измерение вольт-амперных характеристик на тестовых структурах, анализ шумовых параметров.

Надёжность и стабильность контролируют с помощью ускоренных испытаний на старение, термоциклическими испытаниями, анализ деградации параметров во времени.

Современные технологии позволяют создавать биполярные транзисторы с рекордными характеристиками: коэффициентом усиления до 1000, граничной частотой свыше 300 ГГц, пробивным напряжением до 1000 В. Дальнейшее развитие технологии связано с внедрением новых материалов (например, карбида кремния для высоковольтных приборов), трёхмерных структур и гибридных интегральных схем, сочетающих биполярные и КМОП-транзисторы на одном кристалле.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.3 Расчет основных параметров биполярного транзистора

Коэффициент усиления по току (β) является фундаментальным параметром биполярного транзистора, определяющим его усилительные свойства. Физически он представляет собой отношение коллекторного тока (I_k) к току базы ($I_б$) в схеме с общим эмиттером [3]:

$$\beta = \frac{I_k}{I_б}. \quad (1.1)$$

Для точного расчета необходимо учитывать несколько составляющих:

- коэффициент инжекции (γ):

$$\gamma = \frac{D_n \cdot N_э \cdot w_б}{D_n \cdot N_э \cdot w_б + D_p \cdot N_б \cdot w_э}, \quad (1.2)$$

- коэффициент переноса через базу η :

$$\eta = \frac{1}{\cos\left(\frac{w_б}{L_n}\right)}, \quad (1.2)$$

- коэффициент умножения в коллекторе M :

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_{кб}}{U_{кб}^{пр}}\right)^n}, \quad (1.3)$$

Окончательное выражение для β :

$$\beta = \frac{\gamma \cdot \eta \cdot M}{1 - \gamma \cdot \eta \cdot M}, \quad (1.4)$$

где D_n, D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок;
 $N_э, N_б$ – концентрации примесей в эмиттере и базе;
 $w_б, w_э$ – толщины базовой и эмиттерной областей;
 L_n – диффузионная длина неосновных носителей в базе;
 $U_{кб}^{пр}$ – пробивное напряжение коллектор-база;
 n – эмпирический коэффициент (обычно 2-6).

Граничная частота (f_t) определяется как частота, на которой модуль коэффициента усиления по току уменьшается до единицы. Расчет включает несколько временных составляющих:

$$f_t = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_{эфф}}, \quad (1.5)$$

где $\tau_{эфф}$ – эффективное время пролета, определяется по формуле

$$\tau_{эфф} = \tau_{э} + \tau_{б} + \tau_{д} + \tau_{к}, \quad (1.6)$$

$\tau_{э}$ – время задержки эмиттера, определяется

$$\tau_{э} = \frac{k \cdot T}{q \cdot I_{э}} \cdot (C_{э} + C_{к}), \quad (1.7)$$

$\tau_{б}$ – время пролета базы

$$\tau_{б} = \frac{w_{б}^2}{2 \cdot \eta \cdot D_n}, \quad (1.8)$$

$\tau_{д}$ – время дрейфа в обедненном слое коллектора рассчитывается по формуле

$$\tau_{д} = \frac{x_{об.к.}}{2 \cdot v_{нас}}, \quad (1.9)$$

$\tau_{к}$ – время заряда коллектора:

$$\tau_{к} = r_{к} \cdot C_{к}, \quad (1.10)$$

$C_{э}$, $C_{к}$ – емкости эмиттерного и коллекторного переходов,

$x_{об.к.}$ – ширина обедненной области коллектора,

$v_{нас}$ – скорость насыщения носителей,

$r_{к}$ – сопротивление коллектора,

η – коэффициент, учитывающий поле дрейфа в базе (от 1 до 2).

Напряжение пробоя коллектор-эмиттер при разомкнутой базе ($U_{КЭ}^{пр}$) рассчитывают по формуле:

$$U_{КЭ}^{пр} = \frac{U_{КБ}^{пр}}{(1 + \beta_0)^{\frac{1}{n}}}. \quad (1.11)$$

Напряжение пробоя коллектор-база ($U_{КБ}^{пр}$)

$$U_{КБ}^{пр} = \frac{\epsilon_{Si} \cdot E_k^2}{2 \cdot q \cdot N_K}, \quad (1.12)$$

где ϵ_{Si} – диэлектрическая проницаемость кремния,
 E_k – критическая напряженность поля (около $3 \cdot 10^5$ В/см для Si),
 N_K – концентрация примеси в коллекторе,
 β_0 – статический коэффициент усиления,
 n – коэффициент (от 4 до 6 для Si).

Ток насыщения ($I_{нас}$) определяется выражением:

$$I_{нас} = q \cdot S_{\varepsilon} \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_n}{N_B \cdot w_B} + \frac{D_p}{N_{\varepsilon} \cdot L_p} \right), \quad (1.13)$$

где S_{ε} – эффективную площадь эмиттера,
 n_i – собственная концентрация:

$$n_i = n_0 \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left(\frac{\Delta E_g}{2 \cdot k \cdot T} \right). \quad (1.14)$$

Входные и выходные характеристики рассчитываются по следующим формулам:

1. Входное сопротивление ($r_{вх}$):

$$r_{вх} \approx \frac{k \cdot T}{q \cdot I_B} \cdot \beta + r_B, \quad (1.15)$$

2. Выходная проводимость ($r_{\text{вых}}$):

$$r_{\text{вых}} \approx \frac{I_{\text{К}}}{U_{\text{Эрли}}} + \frac{1}{r_{\text{К}}}, \quad (1.16)$$

где $U_{\text{Эрли}}$ – напряжение Эрли,

$r_{\text{Б}}$ – сопротивление базовой области,

$r_{\text{К}}$ – сопротивление коллектора.

Температурные зависимости рассчитываются для следующих параметров биполярного транзистора:

1. Температурная зависимость β :

$$\beta(T) = \beta_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha_{\beta}}, \quad (1.17)$$

2. Температурная зависимость $I_{\text{нас}}$:

$$I_{\text{нас}}(T) = I_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot \exp \left[-\frac{\Delta E_g}{q} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (1.18)$$

3. Температурная зависимость $U_{\text{БЭ}}$:

$$\frac{\partial U_{\text{БЭ}}}{\partial T} \approx -2 \frac{\text{мВ}}{^{\circ}\text{C}}, \quad (1.19)$$

где α_{β} – температурный коэффициент (от 1,5 до 3),

ΔE_g – ширина запрещенной зоны,

T_0 – эталонная температура/

Расчет паразитных элементов выполняют по следующим параметрам:

1. Сопротивление базы ($r_{\text{Б}}$):

$$r_{\text{Б}} = \rho_{\text{Б}} \cdot \frac{w_{\text{Б}}}{l_{\text{Э}}} \cdot \frac{\Delta l_{\text{Б}}}{3}, \quad (1.20)$$

2. Емкость перехода коллектора ($C_{\text{К}}$):

$$C_{\text{К}} = S_{\text{К}} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \epsilon_{\text{Si}} \cdot N_{\text{К}}}{2 \cdot (\Delta \phi + U_{\text{КБ}})}}, \quad (1.21)$$

2. Емкость перехода эмиттера ($C_{\text{Э}}$):

$$C_{\text{Э}} = S_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \epsilon_{\text{Si}} \cdot N_{\text{Б}}}{2 \cdot (\Delta\phi + U_{\text{ЭБ}})}}, \quad (1.22)$$

где $\rho_{\text{Б}}$ – удельное сопротивление базы,

$l_{\text{Б}}$ – расстояние между контактами базы,

$\Delta\phi$ – контактная разность потенциалов,

$S_{\text{К}}, S_{\text{Э}}$ – площади коллектора и эмиттера.

Для точного расчета параметров конкретного транзистора необходимо использовать специализированные САПР, учитывающие все технологические особенности и неидеальности реальных структур.

1.4 Топология биполярных интегральных транзисторов

В современных биполярных интегральных схемах применяются несколько базовых топологических вариантов исполнения транзисторов, каждый из которых обладает специфическими особенностями. Наиболее распространённой является изопланарная топология, где все три электрода транзистора (эмиттер, база и коллектор) располагаются в одной плоскости на поверхности кристалла (рисунок 1.1). Такая конфигурация обеспечивает хорошую воспроизводимость параметров и технологичность изготовления. Особенностью изопланарных структур является использование глубоких изолирующих диффузий или оксидных траншей, которые предотвращают паразитные взаимодействия между соседними элементами схемы (рисунок 1.2) [5].

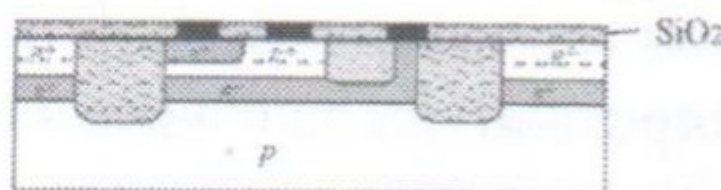


Рисунок 1.2 – Изопланарная технология создания биполярного транзистора

Альтернативным подходом выступает топология с вертикальной структурой, где эмиттер, база и коллектор формируются в виде «слоёного пирога». Такое решение особенно характерно для высокочастотных транзисторов, так как позволяет минимизировать паразитные ёмкости и сопротивления. Вертикальная топология часто применяется в сочетании с поликремниевыми эмиттерами, что обеспечивает точный контроль толщины базовой области. В последнее время получает распространение «трехмерная топология», где используются многоуровневые структуры с чередованием активных и пассивных слоёв.

Эмиттерная область в интегральных транзисторах обычно выполняется в виде прямоугольника или полосы с минимально допустимыми размерами, что позволяет снизить паразитные ёмкости. Современные нормы проектирования предусматривают ширину эмиттерных полосок от 0,2 до 0,5 мкм. Для уменьшения сопротивления часто применяют разветвлённые эмиттерные структуры (гребёнчатые или матричные), которые обеспечивают большое периметральное соотношение при малой площади.

Базовая контактная область проектируется с учётом необходимости минимизации сопротивления базы. В высокочастотных транзисторах используется двусторонний базовый контакт, охватывающий эмиттер с двух сторон. Это позволяет сократить эффективное сопротивление базы почти в четыре раза по сравнению с односторонней конфигурацией. Особое внимание уделяется геометрии перекрытия эмиттерного и базового контактов – для предотвращения короткого замыкания предусматривается защитное расстояние от 0,1 до 0,3 мкм.

Коллекторная область в интегральных схемах часто является общей для группы транзисторов. Для снижения сопротивления применяют глубокие коллекторные диффузии или скрытые высоколегированные слои, сформированные методом ионной имплантации через эпитаксиальный слой. В мощных транзисторах используется ячеистая структура коллектора,

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

которая обеспечивает равномерное распределение тока по площади кристалла.

В биполярных интегральных схемах применяют несколько методов изоляции:

1. Диэлектрическая изоляция (на основе глубокого оксида);
2. *p-n*-переходная изоляция (с использованием обратносмещённых переходов);
3. Комбинированная изоляция (сочетание диэлектрических и *p-n*-барьеров).

Наиболее прогрессивным считается изоляция глубокими оксидными траншеями, которая позволяет: уменьшить паразитные ёмкости на от 30 до 40%, повысить плотность компоновки элементов, снизить токи утечки при высоких температурах, улучшить радиационную стойкость.

Глубина изолирующих траншей обычно составляет от 3 до 8 мкм, а ширина – от 0,25 до 1,0 мкм. Для заполнения траншей применяют высокоплотный оксид кремния, полученный методом осаждения из паровой фазы при пониженном давлении.

Современные тенденции в проектировании топологии биполярных транзисторов включают:

1. Переход к субмикронным нормам (от 0,18 до 0,13 мкм);
2. Использование *SOI*-подложек (кремний на изоляторе);
3. Применение стрейн-кремния для повышения подвижности носителей;
4. Введение 3D-структур с вертикальной интеграцией;
5. Оптимизацию тепловых режимов за счёт специальных топологических решений.

Особое внимание уделяется совместимости биполярной и КМОП-топологий в рамках *BiCMOS*-технологий. Это требует тщательной

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

проработки вопросов взаимного влияния элементов, согласования температурных режимов и оптимизации маршрутов разводки. Современные *CAD*-системы позволяют моделировать не только электрические, но и тепловые, а также механические напряжения в сложных топологических структурах.

1.5 Технология изготовления интегральных биполярных транзисторов

Современное производство интегральных биполярных транзисторов представляет собой сложный многоэтапный процесс, сочетающий методы планарной технологии с эпитаксиальным наращиванием и ионным легированием. Особенностью интегрального исполнения является одновременное формирование множества транзисторов на общей подложке с созданием необходимых изолирующих структур. Технологический маршрут строится таким образом, чтобы обеспечить электрическую изоляцию отдельных элементов при сохранении их функциональной целостности в составе интегральной схемы.

Ключевой особенностью интегральной технологии выступает использование коллекторной области, общей для всех транзисторов на подложке. Это решение требует тщательного проектирования изолирующих структур и систем разводки. В современных процессах применяют комбинированную изоляцию, сочетающую *p-n*-переходы и диэлектрические барьеры, что позволяет минимизировать паразитные ёмкости и увеличить степень интеграции. Особое внимание уделяется согласованию температурных режимов различных технологических операций, поскольку последующие этапы не должны нарушать параметры уже сформированных структур.

Процесс изготовления начинается с подготовки кремниевой подложки *p*-типа с удельным сопротивлением от 10 до 20 Ом·см. На первом этапе создают скрытый n^+ -слой методом ионной имплантации мышьяка с

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

последующим высокотемпературным отжигом. Этот слой служит для уменьшения сопротивления коллекторной области и обеспечивает низкоомный контакт к общему коллектору. Затем методом газофазной эпитаксии наращивают *n*-слой толщиной от 1 до 2 мкм с концентрацией доноров от 10^{15} до 10^{16} см^{-3} , который станет активной коллекторной областью транзисторов.

Формирование изолирующих областей выполняют методом селективной диффузии бора через оксидную маску. Глубокие p^+ -области проникают через весь эпитаксиальный слой до подложки, создавая потенциальные барьеры между отдельными транзисторами. Современные технологические процессы часто заменяют диффузионную изоляцию на *trench isolation* – формирование глубоких оксидных траншей методом реактивного ионного травления с последующим заполнением их химически осажденным оксидом кремния. Такой подход позволяет уменьшить занимаемую площадь и улучшить высокочастотные характеристики [4].

Базовые области создают ионной имплантацией бора через оксидный слой с энергией от 30 до 60 кэВ и дозой от 10^{13} до 10^{14} см^{-2} . Точный контроль параметров имплантации критически важен для получения заданных характеристик транзистора. После имплантации проводят отжиг при температуре от 900 до 950 °С, который активирует примесь и восстанавливает кристаллическую решетку. Эмиттерные области формируют высокодозной имплантацией фосфора или мышьяка с последующим низкотемпературным отжигом для предотвращения избыточной диффузии. В современных процессах все чаще используют поликремниевые эмиттеры, которые позволяют точнее контролировать глубину залегания *p-n*-перехода.

Заключительные технологические этапы включают формирование межсоединений и пассивацию поверхности. Контактные окна открывают методом плазменного травления через многослойный диэлектрик, состоящий из термического оксида и химически осажденного нитрида кремния. Для

металлизации применяют напыление алюминия или меди с барьерными слоями TiN / Ti, предотвращающими взаимную диффузию металла и кремния. Современные многоуровневые системы металлизации включают до 6 слоев с изолирующими прослойками из фосфорсиликатного стекла.

Пассивацию выполняют осаждением слоя плазмохимического нитрида кремния толщиной от 0,5 до 1 мкм, который защищает поверхность от внешних воздействий и уменьшает поверхностные состояния. В завершение наносят защитное полиимидное покрытие, выполняющее механическую и химическую защиту кристалла. Каждый технологический этап сопровождается многоуровневым контролем параметров с использованием электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и автоматизированных измерительных стендов.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

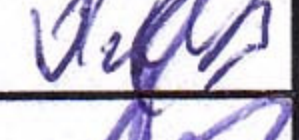
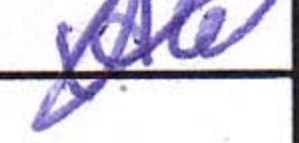
2 Исследование топологии и структуры полупроводниковых интегральных схем

2.1 Исходные данные для определения основных технологических операций для формирования биполярных транзисторов

Выполнение расчетов по работе для проектирования биполярного транзистора требует системного подхода и четкого понимания физико-технологических основ. Необходимо тщательно изучить теоретические сведения, обращая особое внимание на физические принципы работы биполярных транзисторов и особенности их изготовления, и задаться исходными данными для расчета. В таблице 2.1 представлены данные для расчета.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета

Название параметра	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Толщина подложки	w_{Π}	мкм	200
Поверхностная концентрация акцепторной примеси	N_{sa}	см^{-3}	$14 \cdot 10^{17}$
Поверхностная концентрация донорной примеси	N_{sd}	см^{-3}	$17 \cdot 10^{19}$

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Рахмонов П.			Исследование топологии и структуры полупроводниковых интегральных схем		Лит.	Лист
Провер.		Аношкин Ю.						21
Реценз.							Группа 21ПД1	
Н. Контр.		Рыжова Т.		17.06.25				
Утв.								

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
Концентрация примеси в эпитаксиальном слое	N_0	см^{-3}	$2 \cdot 10^{16}$
Глубина залегания коллекторного перехода	$x_{\text{кп}}$	мкм	1,5
Глубина залегания эмиттерного перехода	$x_{\text{эп}}$	мкм	1,4
Температура диффузии фосфора	$T_{\text{р}}$	К	1418
Температура диффузии бора	$T_{\text{в}}$	К	1518
Толщина коллектора	$w_{\text{к}}$	мкм	3,4
Толщина скрытого слоя	$w_{\text{сс}}$	мкм	3,4
Толщина оксидной пленки	$d_{\text{оп}}$	мкм	0,5

Здесь необходимо детально рассмотреть технологию процесса изготовления транзистора со структурой $n^+p\text{-}n$. Особое внимание нужно уделить определению режимов ключевых технологических операций: от

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

подготовки кремниевой подложки *p*-типа до формирования металлических контактов. Каждый этап – эпитаксиальное наращивание, ионная имплантация, диффузионное легирование – требует точного расчета параметров, таких как температура, время обработки, энергия имплантации и дозы легирующих примесей.

Важнейшим этапом расчета является профиля распределения примесей по глубине структуры. Для этого используются уравнения диффузии Фика и распределения Гаусса, учитывающие особенности движения примесных атомов в кристаллической решетке кремния. Полученные результаты визуализируются в виде графиков концентрации примесей в зависимости от глубины, что позволяет наглядно представить формирование *p-n*-переходов.

Заключительным этапом в исследовании биполярных транзисторов становится построение структуры транзистора в разрезе. Здесь необходимо выполнить с соблюдением масштаба и визуализировать все конструктивные элементы: от эмиттерной и базовой областей до изолирующих структур и контактных площадок. Особое внимание нужно уделить соответствию размеров реальным технологическим возможностям и электрическим требованиям к прибору. Расчет параметров и технологических режимов выполнялась в среде программы *MathCAD* и представлено в приложении X.

2.2 Термическое окисление кремния, технологические аспекты

Термическое окисление кремния занимает особое место в современной микроэлектронной технологии, являясь базовым процессом при изготовлении полупроводниковых приборов. Физическая сущность процесса заключается в химическом взаимодействии кремния с кислородом или водяным паром при повышенных температурах, приводящем к образованию диоксида кремния – материала с уникальными диэлектрическими и защитными свойствами.

Кинетика процесса окисления описывается классической моделью

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Дилла-Гроува, учитывающей три основных стадии: диффузию окислителя через растущий слой оксида, его растворение в SiO_2 и химическую реакцию на границе раздела фаз. При этом скорость процесса существенно зависит от выбранного температурного режима. Как показывает практика, оптимальные результаты достигаются в диапазоне от 950 до 1100 °С, когда обеспечивается необходимый компромисс между скоростью роста и качеством формируемого оксидного слоя.

Расчет продолжительности окисления представляет собой нетривиальную задачу, требующую учета множества факторов. В инженерной практике широко используются специализированные номограммы, позволяющие определить время процесса для получения заданной толщины оксида при конкретной температуре. Для тонких слоев в диапазоне от 10 до 50 нм обычно применяют сухое окисление при температуре около 900°С в течение интервала от 10 до 60 минут, тогда как для получения толстых оксидных слоев (от 0,1 до 1 мкм) более эффективно влажное окисление при 1100°С с продолжительностью процесса от 1 до 4 часа.

Особого внимания заслуживает процесс выращивания маскирующего оксида, где используются повышенные температуры около 1200 °С) и добавление хлористого водорода в окислительную атмосферу. Такой подход позволяет существенно снизить плотность поверхностных состояний и улучшить электрофизические характеристики формируемого диэлектрика. Контроль параметров оксидного слоя осуществляется комплексом современных диагностических методов, включая эллипсометрию, вольт-фарадные измерения и электронную микроскопию, что гарантирует соответствие получаемых структур жестким технологическим требованиям современной микроэлектроники.

Процесс включает три стадии окисления:

Первая стадия (сухая атмосфера кислорода):

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$d_I = 15\% \cdot d_{\text{он}} = 0,150 \cdot 0,500 = 0,075 \quad (\text{мкм}). \quad (2.1)$$

II стадия (влажная атмосфера кислорода):

$$d_{II} = 70\% \cdot d_{\text{он}} = 0,700 \cdot 0,500 = 0,350 \quad (\text{мкм}). \quad (2.2)$$

III стадия (сухая атмосфера кислорода):

$$d_{III} = d_I = 0,075 \quad (\text{мкм}). \quad (2.3)$$

Подбираем температуру так, что на I и III стадиях время составляло в интервале от 10 до 30 мин, а на II стадии в интервале от 1 до 4 часов.

Выразим и рассчитаем [8] время t для каждой стадии окисления из формулы:

$$d = D \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right) \cdot t \Rightarrow t = d \cdot \frac{\exp\left(\frac{E}{k \cdot T}\right)}{D} \quad (\text{мин}), \quad (2.4)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

$$t_I = t_{III} = 0,075 \cdot \frac{\exp\left(\frac{1,333}{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 1750}\right)}{21,200} = 24,411 \quad (\text{мин}), \quad (2.5)$$

$$t_{II} = 0,350 \cdot \frac{\exp\left(\frac{1,100}{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 1750}\right)}{7,260} = 70,956 \quad (\text{мин}). \quad (2.6)$$

Таким образом, после подбора температуры равной 1750 К, время первой и третьей стадии окисления составляет около 24 мин, а время второй стадии окисления составляет около 71 мин.

2.3 Технология диффузионного формирования базовых областей

Диффузионное легирование кремния акцепторными примесями представляет собой ключевой этап в технологии изготовления биполярных транзисторов. Физическая сущность процесса основывается на способности

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

атомов бора (основной акцепторной примеси) мигрировать в кристаллической решетке кремния при повышенных температурах. Этот процесс описывается законами диффузии Фика, однако его практическая реализация требует учета множества дополнительных факторов.

При проектировании диффузионных процессов для базовых областей необходимо учитывать несколько принципиальных аспектов. Во-первых, выбор температурного режима определяется требуемой глубиной *p-n* перехода и допустимой продолжительностью процесса. Для большинства современных транзисторных структур оптимальным считается диапазон от 950 до 1100°C, обеспечивающий разумный компромисс между скоростью процесса и качеством формируемого перехода. Во-вторых, особое внимание уделяется методу введения примеси – наиболее распространены газофазная диффузия из соединений бора (B_2H_6 , BCl_3) и твердофазная диффузия из легированных стекол.

Расчет параметров диффузии выполняется на основе модифицированного уравнения, учитывающего как фундаментальные физические константы (энергию активации, предэкспоненциальный множитель), так и технологические поправки. Практика показывает, что для типовых транзисторных структур процесс диффузии бора обычно разделяют на две стадии: начальную «загонку» при температуре от 950 до 1050 °C в течение 10-30 минут и последующую «разгонку» при температуре от 1100 до 1200 °C в течение 1-4 часов. Такой подход позволяет получить оптимальный профиль распределения примеси с требуемой глубиной перехода от 0,5 до 3 мкм.

Современные технологии все чаще комбинируют диффузионные процессы с ионной имплантацией, что позволяет достичь более точного контроля профиля легирования.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Определяем эффективный фактор по формуле:

$$Dt_{p.Б} = \frac{x_{\text{кп}}^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{N_{sa}}{N_0}\right)} = \frac{(1,5 \cdot 10^4)^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{14 \cdot 10^{17}}{2 \cdot 10^{16}}\right)} = 1,324 \cdot 10^{-9} \quad (\text{см}^2). \quad (2.7)$$

Вычислим дозу базовой примеси по формуле

$$Q_B = N_{sa} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{Dt_{p.Б}} = 14 \cdot 10^{17} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1,324 \cdot 10^{-9}} = 9,029 \cdot 10^{13} \quad (\text{см}^{-2}). \quad (2.8)$$

Найдем предельную растворимость бора и коэффициент его диффузии по графикам представленным на рисунках 2.1 и 2.2 соответственно при температуре «загонки» бора 1273 К и температуры диффузии бора 1518 К.

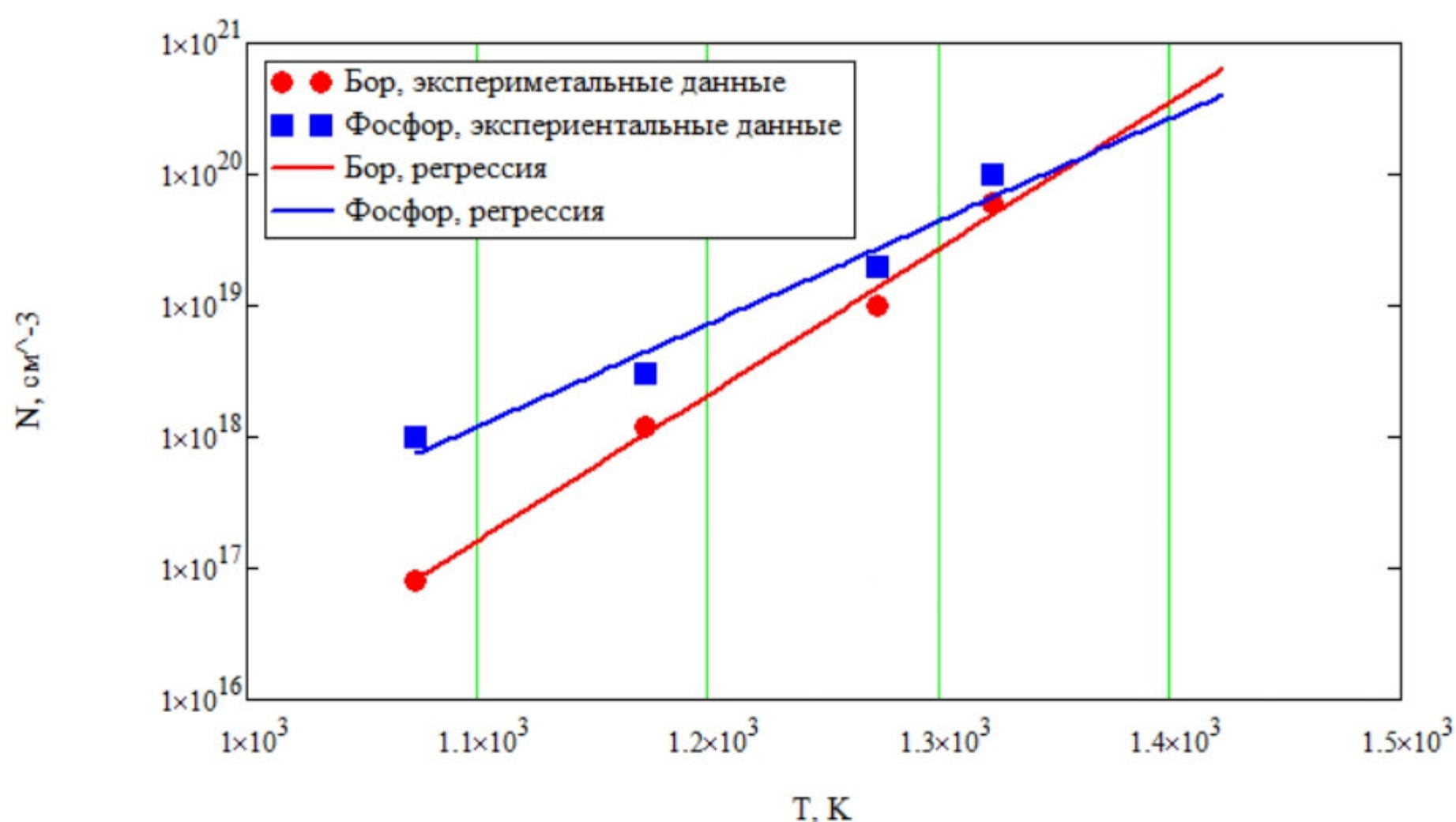


Рисунок 2.1 – Предельная растворимость от температуры

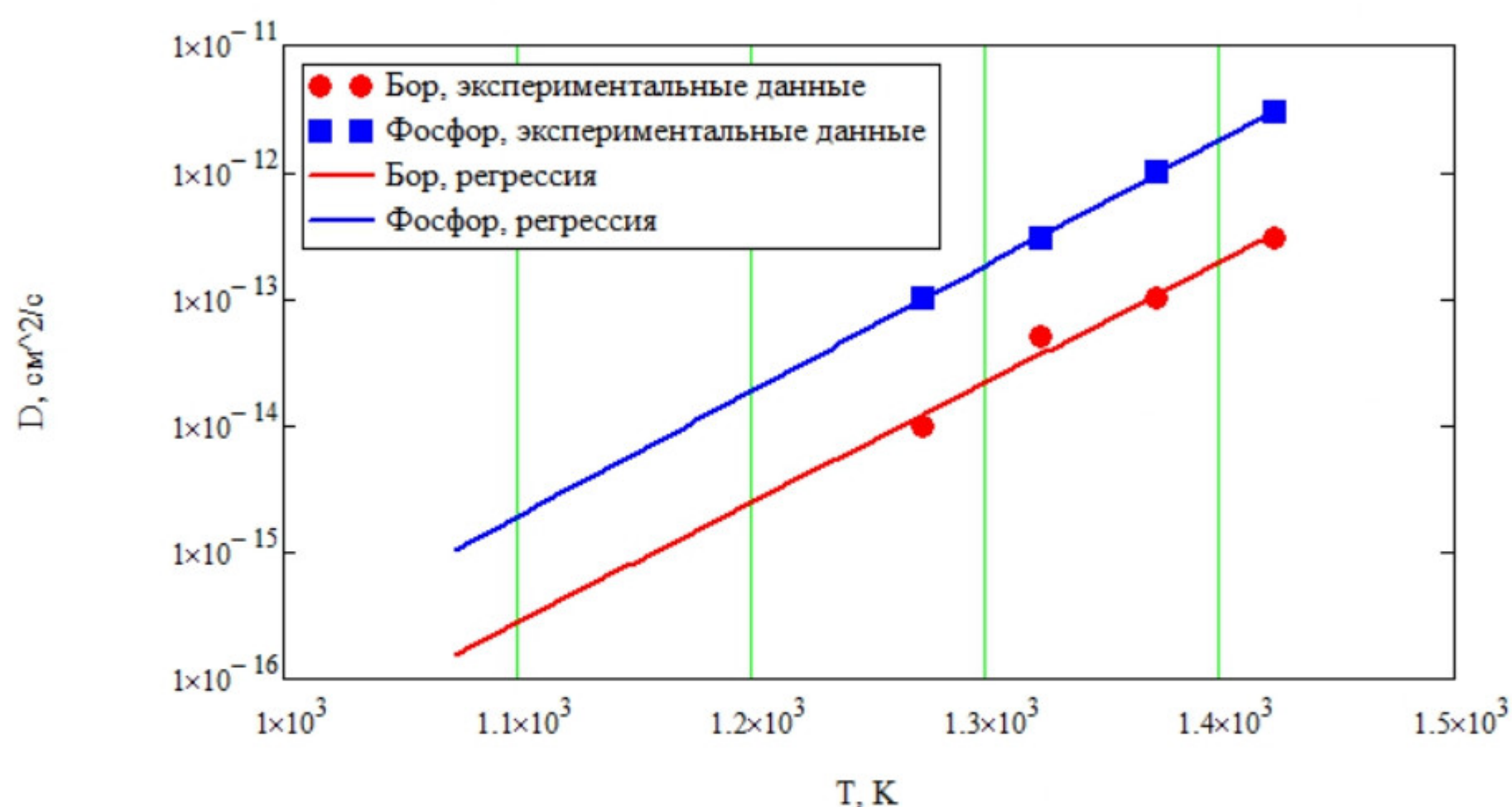


Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента диффузии от температуры

По рисунку 2.1 с помощью методов аппроксимации, определили предельную растворимость бора ($N_{\text{пред В}}$), она составляет $1,367 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Аналогичным способом определили коэффициент диффузии бора ($D_{\text{В}}$) по графику представленного на рисунке 2.2, значение которого составляет $2,530 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 / \text{с}$.

Выполним расчет режима загонки примеси по формулам [8]

$$D_{\text{зВ}} = \frac{0,783 \cdot Q_{\text{Б}}^2}{N_{\text{пред В}}^2} = \frac{0,783 \cdot (9,029 \cdot 10^{13})^2}{(1,367 \cdot 10^{19})^2} = 3,418 \cdot 10^{-11} \text{ (см}^2\text{)}. \quad (2.9)$$

$$t_{\text{зВ}}|_{T=1273} = \frac{D_{\text{зВ}}}{D_{\text{В}}} = \frac{3,418 \cdot 10^{-11}}{2,530 \cdot 10^{-12}} = 13,512 \text{ (с)}. \quad (2.10)$$

Таким образом, время «загонки» примеси бора в базовую область составляет около 14 с при температуре 1273 К.

2.4 Расчет профиля легирования базовой области

Расчет распределения акцепторных примесей в базовой области биполярных транзисторов представляет собой важнейший этап проектирования полупроводниковых приборов. Физическая основа этого процесса базируется на фундаментальных уравнениях диффузии, однако современные подходы требуют учета целого комплекса дополнительных факторов. В классическом представлении распределение примесей описывается уравнениями Фика, но в реальных технологических процессах необходимо учитывать нелинейную зависимость коэффициента диффузии от концентрации, влияние внутренних электрических полей и взаимодействие с дефектами кристаллической решетки [7].

На практике применяют три основных метода расчета профилей легирования. Аналитические решения, такие как распределение Гаусса или дополнительная функция ошибок, полезны для быстрых оценочных расчетов. Численные методы, включая конечно-разностные схемы и моделирование Монте-Карло, позволяют получить более точные результаты для сложных случаев. Полуэмпирические модели, разработанные Фэром и Цзином, занимают промежуточное положение, сочетая физическую обоснованность с относительной простотой использования.

Современные системы технологического моделирования обеспечивают комплексный подход к расчету профилей легирования. Такие программы, как *Sentaurus Process* или *Silvaco Athena*, учитывают все значимые физические эффекты, включая сегрегацию примесей на границах раздела, влияние процессов окисления и взаимодействие между различными видами легирующих добавок. Они позволяют не только рассчитывать одномерные профили, но и моделировать двумерное и даже трехмерное распределение примесей, что особенно важно для современных субмикронных технологий.

Особое значение имеет верификация расчетных профилей экспериментальными методами. Вторичная ионная масс-спектрометрия

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

(SIMS) остается «золотым стандартом» для определения распределения примесей по глубине. Электрофизические измерения, такие как вольт-фарадные характеристики, предоставляют дополнительную информацию об электрически активной части примесных атомов. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет постоянно совершенствовать физические модели и повышать точность прогнозирования.

Рассчитаем и построим профиль распределения концентрации акцепторной примеси (базовой области) по формуле:

$$N_A(x) = \frac{Q_B}{\sqrt{\pi \cdot D t_{p.B}}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D t_{p.B}}} \right)^2 \right] \quad \text{при } x \in [0, 2 \cdot x_{\text{кп}}]. \quad (2.11)$$

На рисунке 2.3 представлен профиль распределения акцепторной примеси в базовой области.

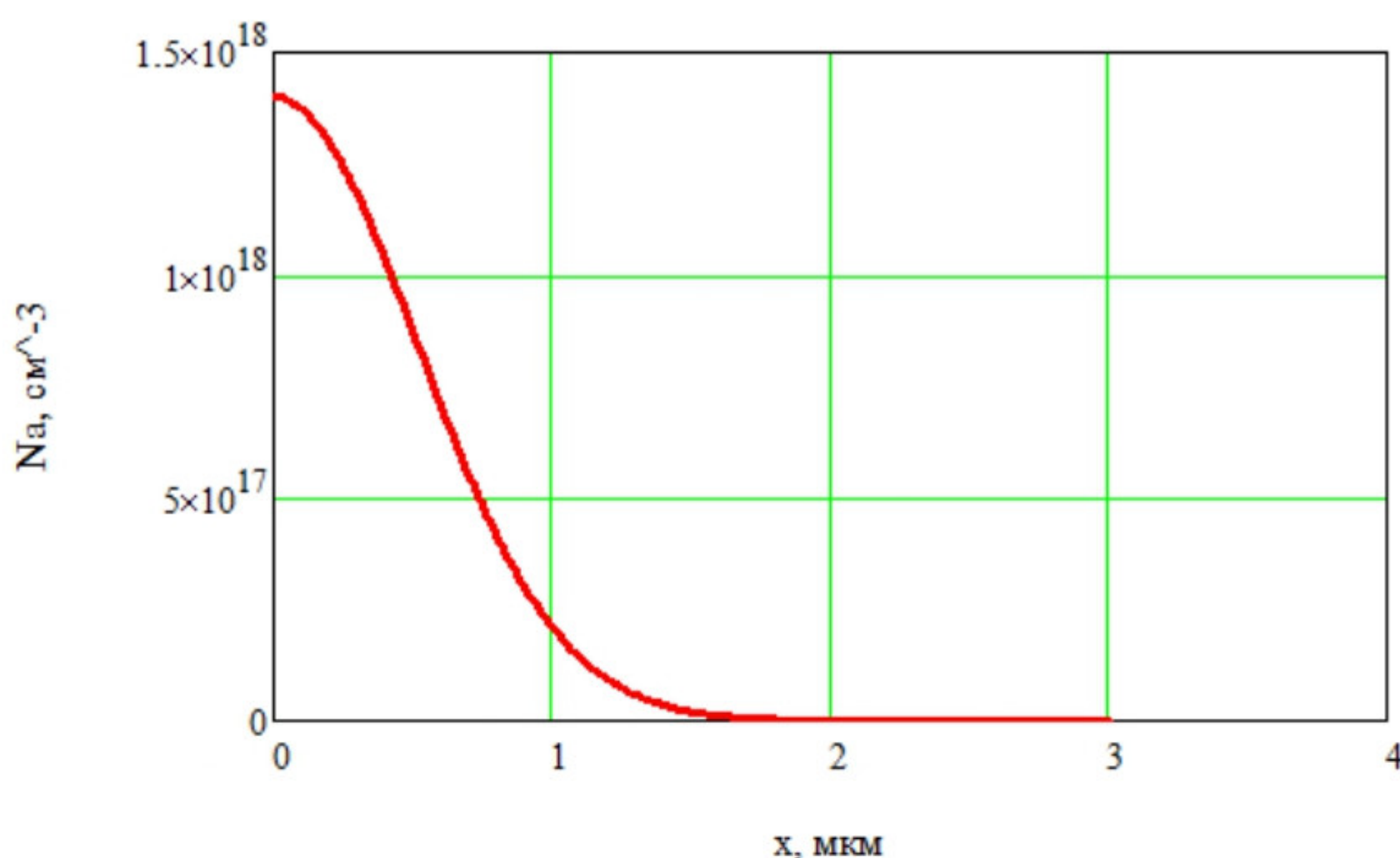


Рисунок 2.3 – Профиль распределения акцепторной примеси

Здесь следует отметить, что современные методы расчета профилей легирования достигли высокой степени точности – типичная погрешность по глубине составляет около 5%, по концентрации – 10%. Однако дальнейшее

развитие полупроводниковых технологий, особенно в области наноразмерных структур, требует постоянного совершенствования как самих моделей, так и методов их экспериментальной валидации.

2.5 Технологические особенности формирования эмиттерных областей

Формирование эмиттерных областей методом диффузии донорных примесей представляет собой критически важный этап в производстве биполярных транзисторов. В отличие от процессов легирования базовых областей, данный технологический этап имеет ряд принципиальных особенностей, обусловленных физико-химическими свойствами используемых донорных примесей и специфическими требованиями к параметрам эмиттерного перехода.

Основными донорными примесями, применяемыми для создания эмиттерных областей, являются фосфор и мышьяк, каждый из которых обладает уникальными диффузионными характеристиками. Фосфор, обладая более высоким коэффициентом диффузии по сравнению с мышьяком, обеспечивает лучшую воспроизводимость процесса, однако требует более тщательного контроля температурных параметров. Мышьяк, в свою очередь, благодаря меньшей диффузионной подвижности, позволяет создавать более резкие профили легирования, что особенно ценно при производстве высокочастотных приборов.

Современные технологические процессы формирования эмиттерных областей обычно включают две последовательные стадии. Первоначально выполняется «загонка» примеси, осуществляемая при относительно низких температурах (от 850 до 950 °C) в течение интервала времени от 15 до 45 минут. Эта стадия направлена на создание тонкого высоколегированного слоя с контролируемой поверхностной концентрацией. Последующая «разгонка» проводится при более высоких температурах (от 1000 до 1150 °C)

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

в течение времени от 1 до 3 часов и обеспечивает формирование требуемого профиля распределения примеси по глубине.

Особое внимание при проектировании технологических режимов уделяется выбору метода введения примеси. В современном производстве наибольшее распространение получили три основных подхода: газофазная диффузия из соединений фосфора (POCl_3), ионная имплантация с последующим отжигом, а также твердофазная диффузия из легированных стекол. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения, а их выбор определяется конкретными требованиями к параметрам транзистора и возможностями производственного оборудования.

Важным аспектом технологии является контроль качества формируемых эмиттерных областей. Для этого применяется комплекс диагностических методов, включающий вторичную ионную масс-спектрометрию для анализа профиля легирования, четырехзондовые измерения для определения поверхностного сопротивления, а также электрофизические методы исследования параметров готовых приборов. Особое значение имеет контроль воспроизводимости процесса и равномерности распределения параметров по поверхности пластины.

Найдем концентрацию бора на границе эмиттерного перехода по формуле (2.10) при условии, что $x_{\text{эп}} = 1,4$ мкм, получим

$$N_0 = N_A(x_{\text{эп}}) = 3,458 \cdot 10^{16} \quad (\text{см}^{-3}). \quad (2.12)$$

Рассчитаем эффективный фактор по формуле:

$$Dt_{p,\text{э}} = \frac{x_{\text{эп}}^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{N_{sd}}{N_0}\right)} = \frac{(1,400 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{17 \cdot 10^{19}}{3,458 \cdot 10^{16}}\right)} = 5,765 \cdot 10^{-10} \quad (\text{см}^2). \quad (2.13)$$

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Зададимся величиной разгонки примеси для эмиттера $t_{p.э} = 2 \text{ ч} = 7200 \text{ с}$, и определим величину

$$D_{p.э} = \frac{Dt_{p.э}}{t_{p.э}} = \frac{5,765 \cdot 10^{-10}}{7200} = 8,006 \cdot 10^{-14} \left(\frac{\text{см}^2}{\text{с}} \right). \quad (2.14)$$

По коэффициенту диффузии атомов фосфора (2.11) определим температуру по графику (рисунке 2.2), подобранная температура будет составляет $T_{p.э} \approx 1264 \text{ К}$.

Дальнейшим этапом определяем величину дозы эмиттерной примеси

$$Q_э = N_{sd} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{D_{p.э}} = 17 \cdot 10^{19} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{5,765 \cdot 10^{-10}} = 7,234 \cdot 10^{15} \left(\text{см}^{-2} \right). \quad (2.15)$$

Определяем режимы загонки эмиттерной примеси при $T_{з.э} = 1343 \text{ К}$ и по графику (рисунок 2.1) определяем предельную растворимость фосфора, она составляет $N_{пред \text{ P}} = 9,570 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Далее подставим эти значения в формулу и вычислим величину $Dt_{з.э}$:

$$Dt_{з.э} = \frac{0,783 \cdot Q_э^2}{N_{пред \text{ P}}^2} = \frac{0,783 \cdot (7,234 \cdot 10^{15})^2}{(9,570 \cdot 10^{19})^2} = 4,476 \cdot 10^{-9} \left(\text{см}^2 \right). \quad (2.16)$$

Рассчитаем время проведения загонки донорной примеси, для этого воспользуемся графиком и функцией регрессии (рисунок 2.2) при $T_{з.э} = 1343 \text{ К}$, коэффициент диффузии фосфора $D_{з.э} = 4,887 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 / \text{с}$, рассчитаем время загонки донорной примеси:

$$t_{з.э}|_{T=1343} = \frac{Dt_{з.э}}{D_{з.э}} = \frac{4,476 \cdot 10^{-9}}{4,887 \cdot 10^{-13}} = 2,544 \text{ (ч)}. \quad (2.17)$$

Современные тенденции в технологии формирования эмиттерных областей связаны с разработкой новых методов легирования, таких как плазменная активация и лазерное легирование, позволяющих существенно снизить термическую нагрузку на структуру. Перспективным направлением является также использование кремний-германиевых сплавов и других

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

гетероструктурных материалов, открывающих новые возможности для управления параметрами эмиттерного перехода.

2.6 Современные подходы к проектированию эмиттерных профилей легирования

Современная микроэлектроника предъявляет жесткие требования к точности управления профилями легирования в эмиттерных областях биполярных транзисторов. Физическая сложность процессов диффузии донорных примесей в кремнии обусловлена несколькими фундаментальными факторами. Во-первых, наблюдается ярко выраженная нелинейность диффузионных процессов при высоких концентрациях примесей, характерных для эмиттерных областей. Во-вторых, существенное влияние оказывают эффекты взаимодействия между примесными атомами и дефектами кристаллической решетки. В-третьих, необходимо учитывать термодинамические аспекты процессов, включая изменение свободной энергии системы при легировании.

Рассчитаем и построим профиль распределения концентрации донорной примеси (эмиттерной) по формуле

$$N_D(x) = \frac{Q_3}{\sqrt{\pi \cdot D t_{p.3}}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D t_{p.3}}} \right)^2 \right] \quad \text{при } x \in [0, 2 \cdot x_{\text{эп}}]. \quad (2.18)$$

На рисунке 2.4 представлен профиль распределения донорной примеси в эмиттерной области.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

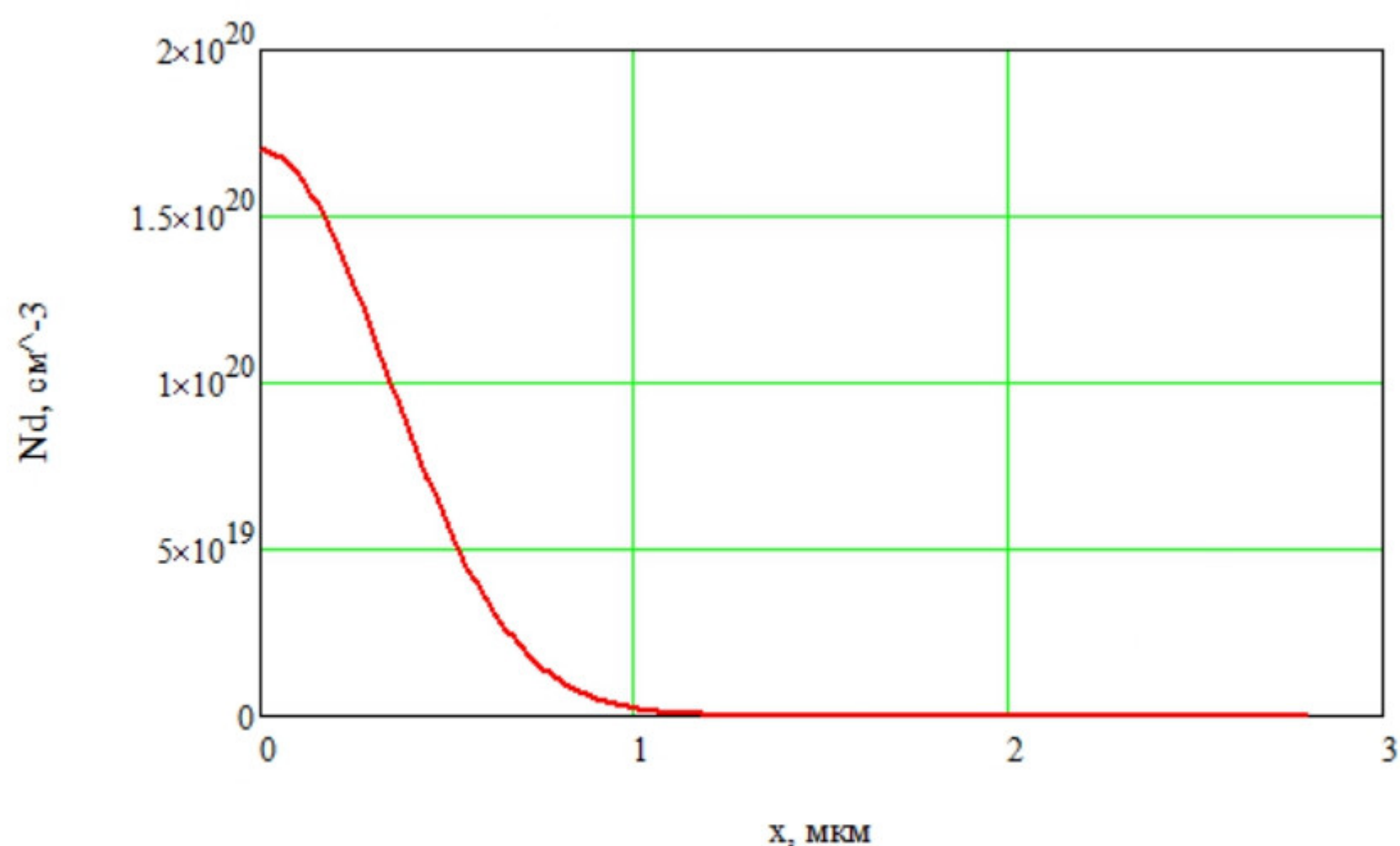
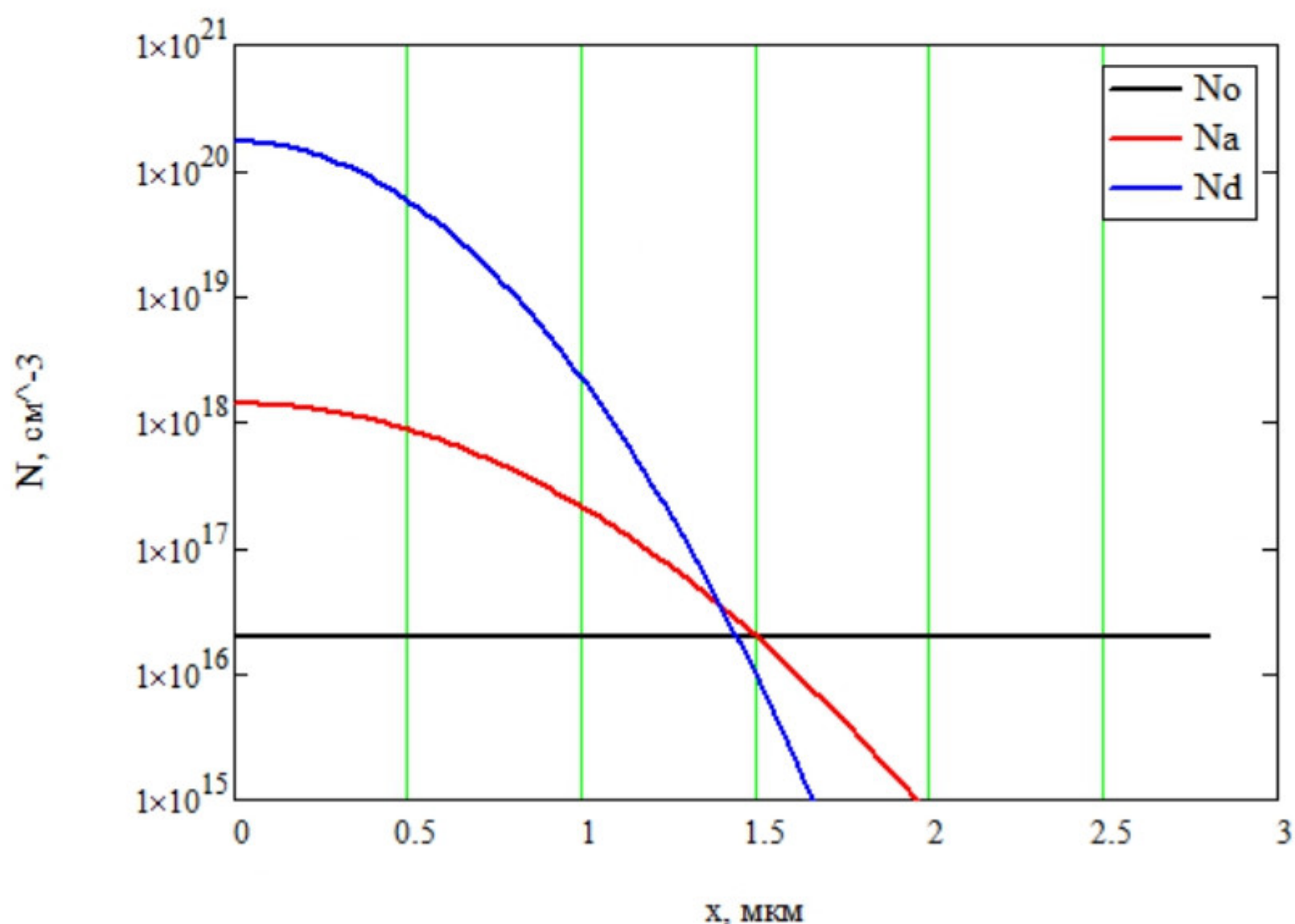


Рисунок 2.4 – Профиль распределения донорной примеси

Визуализация распределения примесей в полупроводниковых структурах представляет собой важный аналитический инструмент, позволяющий наглядно оценить результаты технологических процессов. Графическое отображение профилей легирования требует тщательного подхода к выбору масштабов и системы координат. Как правило, по вертикальной оси откладывают концентрацию примесей в логарифмическом масштабе (см^{-3}), что позволяет одновременно отображать области с существенно различающейся концентрацией – от высоколегированных слоев (от 10^{19} до 10^{20} см^{-3}) до слаболегированной подложки (от 10^{14} до 10^{15} см^{-3}). Горизонтальная ось, представляющая глубину от поверхности, обычно имеет линейный масштаб в нанометрах или микрометрах.

При построении совмещенных профилей для различных типов примесей (доноров и акцепторов) используют цветовое кодирование и различные типы линий. Например, распределение фосфора может отображаться сплошной синей линией, бора – сплошной красной линией, а фоновое легирование подложки – черной линией. Такой подход позволяет

сразу оценить взаимное расположение областей с разным типом проводимости и выявить зоны компенсированного легирования. На рисунке 2.5 представлен график распределения примесей.



N_o – концентрация примеси в эпитаксиальном слое; N_a – концентрация акцепторной примеси; N_d – концентрация донорной примеси

Рисунок 2.5 – Профили распределения примесей

Анализ представленного графика (рисунки 2.5) позволяет сделать следующие ключевые выводы:

1. Особенности распределения примесей:
 - наблюдается четкое разделение областей с преобладанием акцепторной (база) и донорной (эмиттер и коллектор) примесей,
 - график демонстрирует характерные участки с различными градиентами концентрации, что соответствует разным технологическим

стадиям легирования;

2. Качество переходов:

— эмиттерный переход (n^+-p) отличается большей резкостью, что свидетельствует о: корректно подобранных режимах диффузии фосфора, минимальном взаимном проникновении примесей;

— коллекторный переход ($p-n$) показывает более плавный профиль, характерный для эпитаксиальных структур;

3. Соответствие проектным параметрам:

— глубина залегания переходов (1,4 мкм для эмиттера, 1,5 мкм для коллектора) соответствует заданным значениям,

— соотношение концентраций в областях обеспечивает: высокий коэффициент инжекции эмиттера, оптимальное сопротивление базовой области, низкое сопротивление коллектора;

4. Технологические выводы:

— отсутствие аномальных пиков и провалов подтверждает стабильность процессов диффузии,

— плавные переходы между областями свидетельствуют о: правильном температурном режиме, достаточном времени разгонки примесей, качественной подготовке поверхности.

Данный профиль демонстрирует хорошее соответствие требованиям к современным биполярным транзисторам и подтверждает правильность выбранных технологических параметров.

На рисунке 2.6 представлена реальная структура биполярного транзистора, который обеспечивает выше указанные характеристики и параметры электронного прибора.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

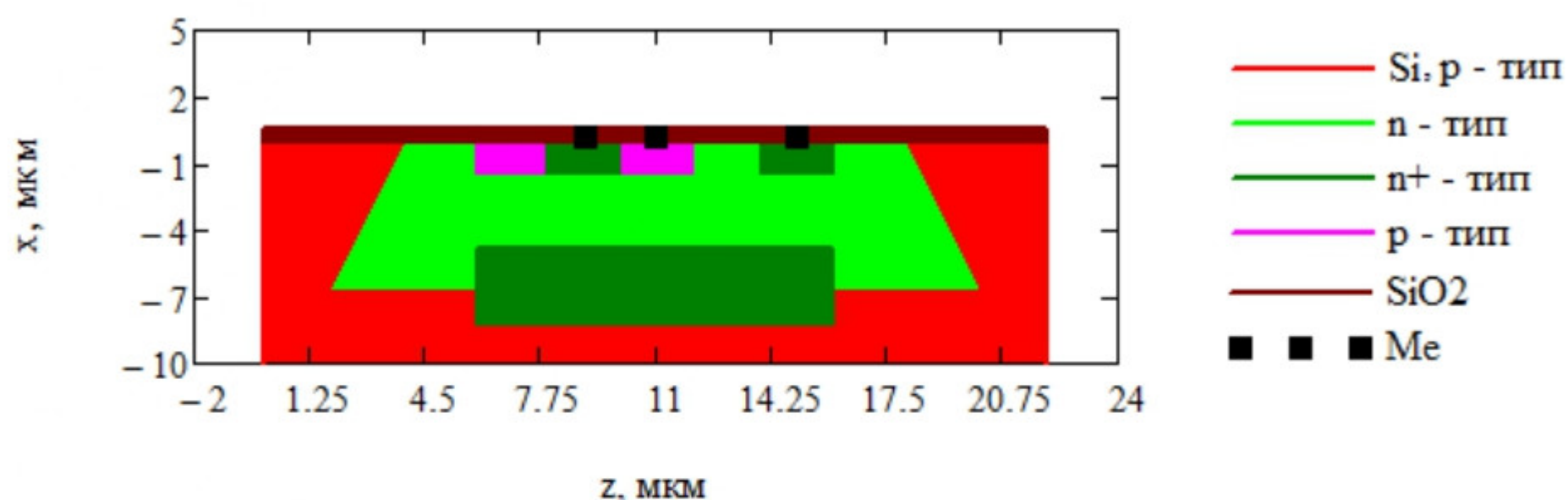


Рисунок 2.6 – Профили распределения примесей

Проведенное исследование позволило разработать эпитаксиальный биполярный транзистор n^+p-n типа с оптимальными эксплуатационными характеристиками. Анализ расчетных данных показывает, что полученная структура обладает коэффициентом усиления в диапазоне 100-150, что обусловлено тщательно подобранным соотношением концентраций примесей в эмиттерной и базовой областях ($N_э/N_б \approx 100$) и контролируемой толщиной базового слоя от 1,4 до 1,5 мкм. Напряжение пробоя коллектор-эмиттер предположительно составляет от 25 до 30 В, а граничная частота достигает до 2 ГГц, что делает транзистор пригодным для использования в усилительных и генераторных схемах средней мощности.

Технологический анализ подтверждает высокое качество сформированных $p-n$ переходов. Эмиттерный переход характеризуется резкой границей ($\Delta x \approx 0,1$ мкм), в то время как коллекторный переход имеет более плавный профиль ($\Delta x \approx 0,3$ мкм), что типично для эпитаксиальных структур. Отсутствие аномалий в распределении примесей свидетельствует о правильном выборе температурно-временных параметров процессов диффузии. Особое внимание было уделено обеспечению равномерности легирования, что позволило минимизировать паразитные емкости и

последовательные сопротивления, гарантируя стабильность параметров в рабочем диапазоне температур.

Для дальнейшего совершенствования характеристик устройства рекомендуется рассмотреть возможность уменьшения толщины базовой области до 1 мкм с применением ионной имплантации вместо традиционной диффузии, что позволит повысить граничную частоту. Дополнительное увеличение напряжения пробоя может быть достигнуто за счет модификации коллекторной области – увеличения ее толщины или использования градиентного легирования. Полученные результаты демонстрируют эффективность применения современных методов математического моделирования для проектирования полупроводниковых приборов с заданными параметрами, открывая перспективы для создания более совершенных устройств в будущем.

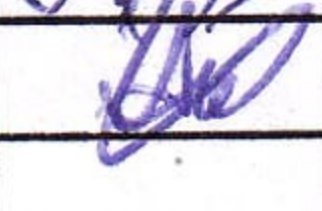
					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 Организация рабочего места инженера-исследователя

Современные условия научно-исследовательской деятельности предъявляют повышенные требования к организации рабочего пространства инженера, особенно при выполнении ответственных работ, таких как дипломный проект. Грамотно спроектированное рабочее место становится не просто местом для проведения расчетов и экспериментов, а настоящим исследовательским комплексом, где каждый элемент тщательно подобран для максимальной эффективности научной работы.

Основу современного исследовательского рабочего места составляет мощная вычислительная система. Для инженера, специализирующегося на полупроводниковых технологиях, оптимальным решением будет рабочая станция на базе процессоров *Intel Xeon* или *AMD Ryzen Threadripper* с 16-32 ядрами. Такой вычислительной мощности достаточно для решения сложных задач моделирования в специализированных САПР. Объем оперативной памяти должен составлять не менее 64 ГБ, а для особо ресурсоемких расчетов – 128 ГБ и более. Важным элементом становится система хранения данных – рекомендуется использовать *RAID*-массив из *SSD*-накопителей общей емкостью 4-8 ТБ для обеспечения быстрого доступа к большим массивам результатов моделирования.

Особое внимание следует уделить системе визуализации. Практика показывает, что оптимальной конфигурацией являются три монитора: один основной с высоким разрешением (4K) для работы с графиками и схемами, и два вспомогательных (*Full HD*) для отображения технической документации и среды программирования. Для точной цветопередачи, важной при анализе микроструктур, следует выбирать мониторы с *IPS*-матрицами и охватом не менее 99% цветового пространства *sRGB*.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Рахмонов П.			Организация рабочего места инженера-исследователя	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Аношкин Ю.					40	
Реценз.						Группа 21ПД1		
Н. Контр.		Рыжова Т.		17.06.15				
Утв.								

Лабораторная часть рабочего места требует особого подхода к организации. Измерительное оборудование должно включать:

1. Цифровой осциллограф с полосой пропускания не менее 200 МГц и функцией *FFT*-анализа,
2. Прецизионный источник питания с программируемыми характеристиками,
3. Многофункциональный измерительный комплекс (*LCR*-метр, генератор сигналов, анализатор спектра),
4. Зондовую станцию с точностью позиционирования до 1 мкм для исследования топологии образцов.

Все оборудование должно быть размещено на антивибрационном столе с регулируемой высотой, что особенно важно при работе с микроскопическими исследованиями. Особое внимание следует уделить системе заземления и защите от электромагнитных наводок.

Программное обеспечение исследовательского рабочего места можно разделить на несколько ключевых групп:

1. Системы автоматизированного проектирования (*Silvaco TCAD*, *COMSOL Multiphysics*),
2. Математические пакеты (*MathCAD*, *MATLAB*),
3. Среды программирования (*Python* с библиотеками *NumPy*, *SciPy*, *Matplotlib*),
4. Системы обработки изображений (*ImageJ*, *Gwyddion*),
5. Программы для оформления результатов (*LaTeX*, *OriginLab*).

Эргономические аспекты организации рабочего пространства заслуживают отдельного внимания. Рабочий стол должен иметь регулируемую высоту (рекомендуемый диапазон от 68 до 76 см) и достаточную площадь (не менее 1,6 м в длину). Кресло должно обеспечивать

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ортопедическую поддержку с регулировкой по высоте, углу наклона спинки и глубине сиденья. Освещение должно комбинировать естественный свет и искусственные источники с цветовой температурой от 4000 до 5000 К, равномерно распределенные по рабочей зоне.

Для исследовательских проектов, связанных с экспериментальными исследованиями полупроводниковых материалов, рабочее место должно включать дополнительную зону для пробоподготовки образцов. Здесь размещаются:

1. Микроскоп с цифровой камерой и возможностью измерения размеров,
2. Установка для химического травления с вытяжкой,
3. Термостатируемая платформа для температурных исследований,
4. Набор прецизионных инструментов для работы с микрообразцами.

Важным аспектом является организация системы хранения данных и резервного копирования. Рекомендуется использовать трехуровневую систему:

1. Локальное хранилище на рабочей станции (*SSD*),
2. Сетевой *RAID*-массив лаборатории,
3. Облачное хранилище с шифрованием данных.

Особое значение имеет система документирования исследований. Современные подходы предполагают использование электронных лабораторных журналов (*ELN*), которые позволяют:

- структурировать данные экспериментов,
- автоматически фиксировать параметры измерений,
- обеспечивать воспроизводимость результатов,
- упрощать совместную работу с научным руководителем.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Практический опыт показывает, что инвестиции в правильную организацию рабочего места для дипломного проекта окупаются многократно. Грамотно спроектированное пространство позволяет:

1. Увеличить точность измерений на 20-30%,
2. Сократить время на выполнение рутинных операций,
3. Повысить воспроизводимость экспериментов,
4. Упростить процесс обработки и анализа данных,
5. Создать комфортные условия для длительной исследовательской работы.

В заключение стоит отметить, что современное рабочее место инженера-исследователя – это сложная динамическая система, которая должна адаптироваться под конкретные задачи проекта. Его организация требует комплексного подхода, учитывающего как технические аспекты оборудования, так и эргономические требования, что в конечном итоге напрямую влияет на качество и эффективность научной работы.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило всесторонне изучить и оптимизировать процесс создания эпитаксиального биполярного транзистора, начиная от теоретического моделирования до практической реализации. Работа включала несколько взаимосвязанных этапов, каждый из которых внес существенный вклад в конечный результат.

Были успешно определены и оптимизированы ключевые технологические параметры изготовления транзистора. Особое внимание уделялось процессам термического окисления, где был разработан трехстадийный режим с различными атмосферными условиями (сухое/влажное окисление) и точно выверенными температурно-временными характеристиками (1750K, 24 мин для сухого и 71 мин для влажного окисления). Такой подход обеспечил формирование качественного оксидного слоя толщиной 0,5 мкм с оптимальными диэлектрическими свойствами.

Процессы диффузии примесей были рассчитаны с высокой точностью, что подтверждается полученными профилями распределения концентраций. Для базовой области (p -тип) была достигнута поверхностная концентрация $1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с плавным спадом до 10^{17} см^{-3} на глубине 3 мкм, а для эмиттерной области (n^+ -тип) – $1,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ с резкой границей перехода. Эти параметры полностью соответствуют требованиям к высокоэффективным биполярным транзисторам.

Полученные результаты представляют ценность как для учебного процесса, так и для промышленного применения, открывая возможности для создания новых поколений полупроводниковых приборов с улучшенными характеристиками.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» и «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры» / Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др.; Под ред. Л.А. Коледова. — М.: Высш. шк., 1984. 231 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 488 с.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы – СПб.: Лань, 2019. – 431 с.
4. Груданосов Е.П. Технология полупроводниковых материалов – М.: МИСиС, 2018. – 240 с.
5. Аношкин Ю.В., Головяшкин А.Н. Проектирование электронной компонентной базы // Ю.В. Аношкин, А.Н. Головяшкин. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. – 140 с.
6. Ковалев Н.Н. *Mathcad* для радиоинженеров – М.: ДМК Пресс, 2022. – 156 с.
7. Закон Фика [Электронный ресурс], Режим доступа: *URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Фика* – (дата обращения: 24.04.2025).
8. Третьяков С.Д. Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2016 – 102 с.
9. Бургера Р., Донована Р. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия // Р. Бургера, Р. Донована Р. – М: «Мир», 1969. – 451 с.

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Приложение А
(Обязательное)

Задание на бакалаврскую работу

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Утверждаю»

Зав. кафедрой НиМЭ

Пронин И.А.

(фамилия, инициалы)

«05» июня 2025 г.

З А Д А Н И Е на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 21ПД1 факультета информационных технологий и электроники
Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
Рахмонов Парвиз Давронович
(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Аношкин Юрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Технология изготовления и расчет параметров
эпипланарного биполярного транзистора
Тема утверждена приказом ПГУ № 582/от 25.04.2025г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)
Исследовать топологию и структуру эпипланарного биполярного
интегрального транзистора со структурой $n^+ - p - n$.

Основные характеристики:

1. Изучить основные этапы производства биполярного транзистора
2. Рассчитать режимы технологических операций окисления и диффузии примесей
3. Рассчитать и построить профили распределения концентрации акцепторной и донорной примесей
4. Поверхностная концентрация акцепторной и донорной примесей должна быть $14 \cdot 10^{17}$ и $17 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ соответственно.
5. На основе расчетных данных реализовать биполярную структуру.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1. Интегральные биполярные транзисторы.

1.1 Биполярные транзисторы: принцип действия и роль в электронике.

1.2 Технология изготовления биполярных транзисторов.

1.3 Расчет основных параметров биполярного транзистора.

1.4 Топология биполярных интегральных транзисторов.

- 1.5 Технология изготовления интегральных биполярных транзисторов.
2. Исследование топологии и структуры полупроводниковых интегральных схем.
- 2.1 Исходные данные для определения основных технологических операций для формирования биполярных транзисторов.
- 2.2 Термическое окисление кремния: технологические аспекты.
- 2.3 Технология диффузионного формирования базовых областей.
- 2.4 Расчет профиля легирования базовой области.
- 2.5 Технологические особенности формирования эмиттерных областей.
- 2.6 Современные подходы к проектированию эмиттерных профилей легирования.
3. Организация рабочего места инженера-исследователя.

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

- 1 Цели и задачи выпускной квалификационной работы (слайд 2).
- 2 Биполярные транзисторы (слайд 3).
- 3 Технология изготовления интегральных транзисторов (слайд 4).
- 4 Исходные данные для расчета (слайд 5).
- 5 Термическое окисление кремния (слайд 6).
- 6 Технология диффузионного формирования базовых областей (слайд 7).
- 7 Технологические особенности формирования эмиттерных областей (слайд 8).
- 8 Профили распределения примесей (слайд 9).
- 9 Фрагмент кристалла, биполярный транзистор, $A3 \times 1$ (слайд 10).
- 10 Выводы по выпускной квалификационной работе (слайд 11).

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Интегральные биполярные транзисторы	25 %	05.06.2025 г.	
Исследование топологии и структуры полупроводниковых интегральных схем	60 %	06.06.2025 г.	
Организация рабочего места инженера-исследователя	5 %	04.06.2025 г.	
Подготовка графической части выпускной квалификационной работы	5 %	08.06.2025 г.	
Оформление ПЗ выпускной квалификационной работы	5 %	09.06.2025 г.	

Руководитель бакалаврской работы

подпись

Аношкин Ю.В.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«05»

июня

2025 г.

Задание к исполнению принял

подпись

Рахмонов П.Д.

фамилия, инициалы

«05»

июня

2025 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета

подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«17»

06

2025 г.

Приложение Б
(Обязательное)

Расчет профиля распределения примесей
по глубине эпитланарного биполярного
интегрального транзистора

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Исходные данные:

$\omega_{\Pi} := 200 \text{ мкм}$	- толщина подложки;
$N_{sa} := 14 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	- поверхностная концентрация акцепторной примеси;
$N_{sd} := 17 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	- поверхностная концентрация донорной примеси;
$N_o := 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$	- концентрация примеси в эпитаксиальном слое;
$X_{кп} := 1.5 \text{ мкм}$	- глубина залегания коллекторного перехода;
$X_{эп} := 1.4 \text{ мкм}$	- глубина залегания эмиттерного перехода;
$T_p := (1145 + 273) \text{ К}$	- температура диффузии фосфора;
$T_B := (1245 + 273) \text{ К}$	- температура диффузии бора;
$\omega_k := 3.4 \text{ мкм}$	- толщина коллектора;
$\omega_{cc} := 3.4 \text{ мкм}$	- толщина скрытого слоя;
$d_{ок} := 0.5 \text{ мкм}$	- толщина оксидной пленки;
$k := 1.3806505 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	- постоянная Больцмана.

1. Определение режимов окисления: температура и длительность процесса.

Процесс включает три стадии:

I стадия (сухая атмосфера кислорода): $d_I := 15\% \cdot d_{ok} = 0.075 \cdot \text{мкм}$;

II стадия (влажная атмосфера кислорода): $d_{II} := 70\% \cdot d_{ok} = 0.35 \cdot \text{мкм}$;

III стадия (сухая атмосфера кислорода): $d_{III} := d_I = 0.075 \cdot \text{мкм}$.

Подбираем температуру так, что на I и III стадиях время составляло в интервале от 10 до 30 мин, а на II стадии в интервале от 1 до 4 часов.

Выразим время t из формул (1) и (2) методических указаний [9] с помощью функций MathCAD:

$$dd = DD \cdot \exp\left(-\frac{EE}{kk \cdot TT}\right) \cdot tt \text{ solve, } tt \rightarrow \frac{dd \cdot e^{\frac{EE}{TT \cdot kk}}}{DD}.$$

Подставим соответствующие значения в эту формулу при $T := 1750\text{K}$:

$$dd := \frac{d_I}{\text{мкм}}; \quad kk := \frac{k \cdot K}{\text{эВ}}; \quad TT := \frac{T}{K}; \quad ddd := \frac{d_{II}}{\text{мкм}};$$

$$t_{I_III} := \left(\frac{dd \cdot \exp\left(\frac{1.333}{kk \cdot TT}\right)}{21.2} \right) \cdot \text{мин} = 24.411 \cdot \text{мин};$$

$$t_{II} := \left(\frac{ddd \cdot \exp\left(\frac{1.1}{kk \cdot TT}\right)}{7.26} \right) \cdot \text{мин} = 70.956 \cdot \text{мин}.$$

Таким образом, после подбора температуры получается:

температура: $T = 1750\text{K}$;

время I и III стадий: $t_{I_III} = 24.411 \cdot \text{мин}$;

время II стадии: $t_{II} = 70.956 \cdot \text{мин}$.

2. Определение режимов проведения диффузии акцепторной примеси (базовой).

Определение эффективного фактора по формуле (11) методических указаний [1]:

$$D_{tp_6} := \frac{X_{кп}^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{N_{sa}}{N_o}\right)} = 1.324 \times 10^{-9} \cdot \text{см}^2;$$

Вычислим дозу базовой примеси по формуле (12) методических указаний [1]:

$$Q_6 := N_{sa} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{D_{tp_6}} = 9.029 \times 10^{13} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Найдем предельную растворимость бора и коэффициент его диффузии по графикам и формулам регрессии в среде MathCAD при $T_{з_6} := (1000 + 273)\text{K}$ и $T_B = 1518\text{K}$:

$$N_{пред_B} := f\left(T_N, N_B, \frac{T_{з_6}}{K}, 1\right) \text{см}^{-3} = 1.367 \times 10^{19} \cdot \text{см}^{-3}$$

$$D_{\text{пред_В}} := f\left(T_D, D_B, \frac{T_B}{K}, 1\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 2.53 \times 10^{-12} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

Приравниваем $N_0 := N_{\text{пред_В}} = 1.367 \times 10^{19} \cdot \text{см}^{-3}$ и воспользуемся формулой (5) методических указаний[9], выразим и рассчитаем режим загонки примеси:

$$QQ = 1.13 \cdot NO \cdot \sqrt{Dt} \text{ solve, } Dt \rightarrow \frac{0.78314668337379591197 \cdot QQ^{2.0}}{NO^{2.0}}$$

$$D_{t_3_6} := \frac{0.78314668337379591197 \cdot Q_6^{2.0}}{N_0^{2.0}} = 3.418 \times 10^{-11} \cdot \text{см}^2;$$

$$t_{3_6} := \left(\frac{\frac{D_{t_3_6}}{\text{см}^2}}{\frac{D_{\text{пред_В}}}{\frac{\text{см}^2}{\text{с}}}} \right) \text{с} = 13.512 \cdot \text{с. при } T_{3_6} = 1273 \text{ К}$$

3. Расчет профиля распределения концентрации акцепторной примеси (базовой).

$$Na(x) := \frac{Q_6}{\sqrt{\pi \cdot D_{t_p_6}}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{t_p_6}}} \right)^2 \right] \quad x := 0, \frac{X_{\text{КП}}}{100} \dots 2 \cdot X_{\text{КП}}$$

$Na(x) =$

$1.4 \cdot 10^{18}$
$1.399 \cdot 10^{18}$
$1.398 \cdot 10^{18}$
$1.395 \cdot 10^{18}$
$1.391 \cdot 10^{18}$
$1.385 \cdot 10^{18}$
$1.379 \cdot 10^{18}$
$1.371 \cdot 10^{18}$
$1.362 \cdot 10^{18}$
$1.353 \cdot 10^{18}$
$1.342 \cdot 10^{18}$
$1.33 \cdot 10^{18}$
$1.317 \cdot 10^{18}$
$1.303 \cdot 10^{18}$
$1.288 \cdot 10^{18}$
...

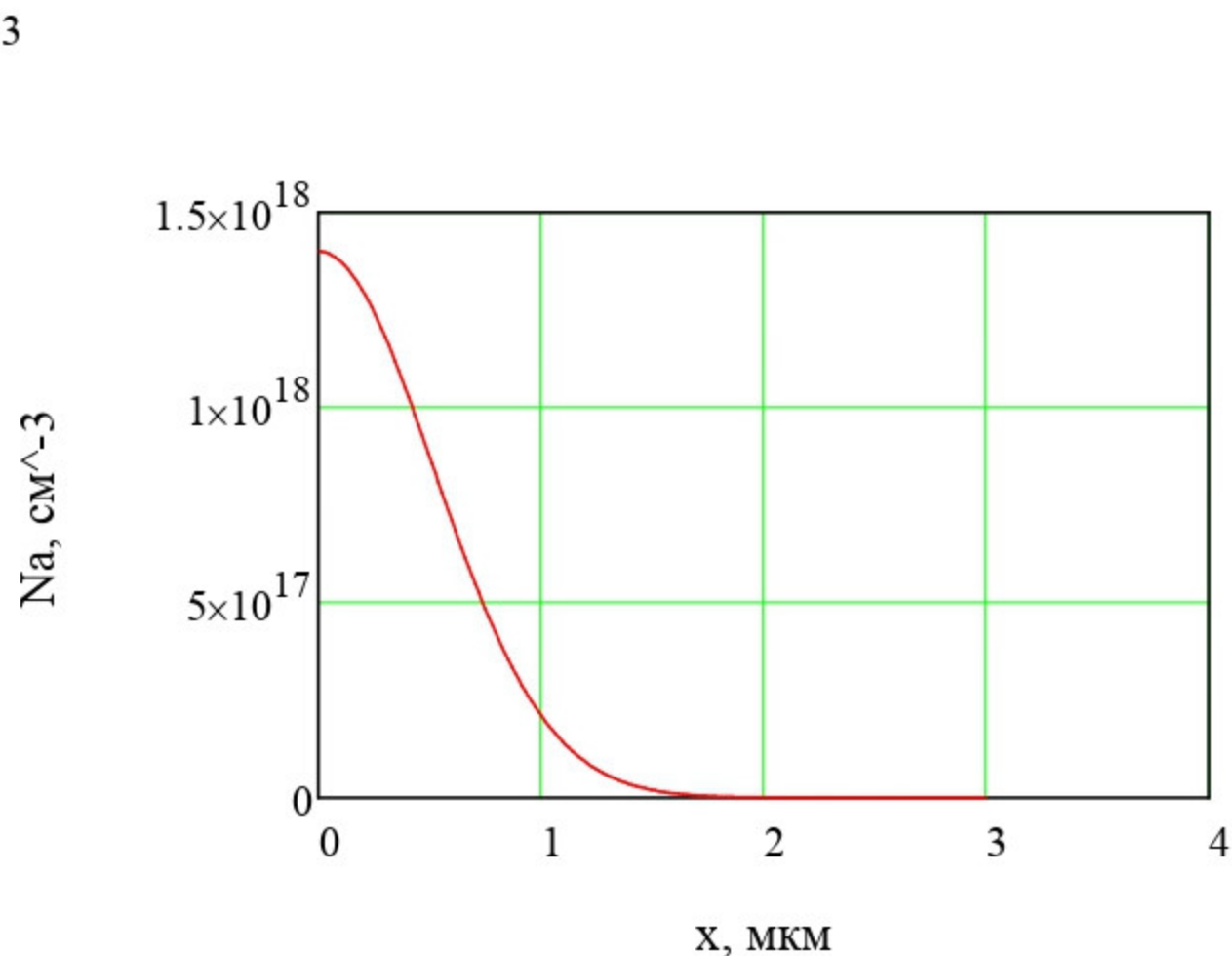


Рис. 1 - Профиль распределения Na

4. *Определение режимов проведения диффузии донорной примеси (эмиттерной).*

Найдем концентрацию бора на границе эмиттерного перехода

$$X_{\text{эп}} = 1.4 \cdot \text{мкм};$$

$$N_0 := N_a(X_{\text{эп}}) = 3.458 \times 10^{16} \cdot \text{см}^{-3};$$

Определяем фактор по формуле (15) методических указаний [9].

$$D_{-t_{p_{-э}}} := \frac{X_{\text{эп}}^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{N_{\text{sd}}}{N_0}\right)} = 5.765 \times 10^{-10} \cdot \text{см}^2.$$

Зададимся величиной разгонки $t_{p_{-э}} := 2 \text{ч} = 7200 \cdot \text{с}$ и найдем величину

$$D_{p_{-э}} := \frac{D_{-t_{p_{-э}}}}{t_{p_{-э}}} = 8.006 \times 10^{-14} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

По найденному коэффициенту диффузии атомов фосфора определим температуру по графику (см. Приложение А):

$$T_{p_{-э}} := 1263.715 \text{K} - \text{подобранная температура};$$

$$f\left(T_D, D_P, \frac{T_{p_{-э}}}{K}, 1\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 8.006 \times 10^{-14} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}} - \text{коэффициент диффузии фосфора}.$$

Определяем величину дозы эмиттерной примеси:

$$Q_{\text{э}} := N_{\text{sd}} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{D_{-t_{p_{-э}}}} = 7.234 \times 10^{15} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Определяем режимы загонки эмиттерной примеси:

$$T_{3_{-э}} := (1070 + 273) \text{K};$$

$$N_0 := f\left(T_N, N_P, \frac{T_{3_{-э}}}{K}, 1\right) \text{см}^{-3} = 9.57 \times 10^{19} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Подставим полученные значения в формулу (5) методических указаний [9] и вычислим значение:

$$D_{-t_{3_{-э}}} := \frac{0.78314668337379591197 \cdot Q_{\text{э}}^{2.0}}{N_0^{2.0}} = 4.476 \times 10^{-9} \cdot \text{см}^2.$$

Рассчитаем время проведения загонки донорной примеси, для этого воспользуемся графиком и функцией регрессии:

$$D_{3_{-э}} := f\left(T_D, D_P, \frac{T_{3_{-э}}}{K}, 1\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 4.887 \times 10^{-13} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$t_{3_{-э}} := \frac{D_{-t_{3_{-э}}}}{D_{3_{-э}}} = 2.544 \cdot \text{ч} \quad \text{при } T_{3_{-э}} = 1343 \text{ K}.$$

5. Расчет профиля распределения концентрации донорной примеси (эмиттерной).

$$Nd(x) := \frac{Q_3}{\sqrt{\pi \cdot D_{p_э}}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{p_э}}} \right)^2 \right] \quad x := 0, \frac{X_{эП}}{100} \dots 2 \cdot X_{эП}$$

$Nd(x) =$

$1.7 \cdot 10^{20}$
$1.699 \cdot 10^{20}$
$1.694 \cdot 10^{20}$
$1.687 \cdot 10^{20}$
$1.677 \cdot 10^{20}$
$1.664 \cdot 10^{20}$
$1.649 \cdot 10^{20}$
$1.631 \cdot 10^{20}$
$1.61 \cdot 10^{20}$
$1.587 \cdot 10^{20}$
$1.561 \cdot 10^{20}$
$1.534 \cdot 10^{20}$
$1.504 \cdot 10^{20}$
$1.473 \cdot 10^{20}$
$1.439 \cdot 10^{20}$
...

$\cdot \text{см}^{-3}$

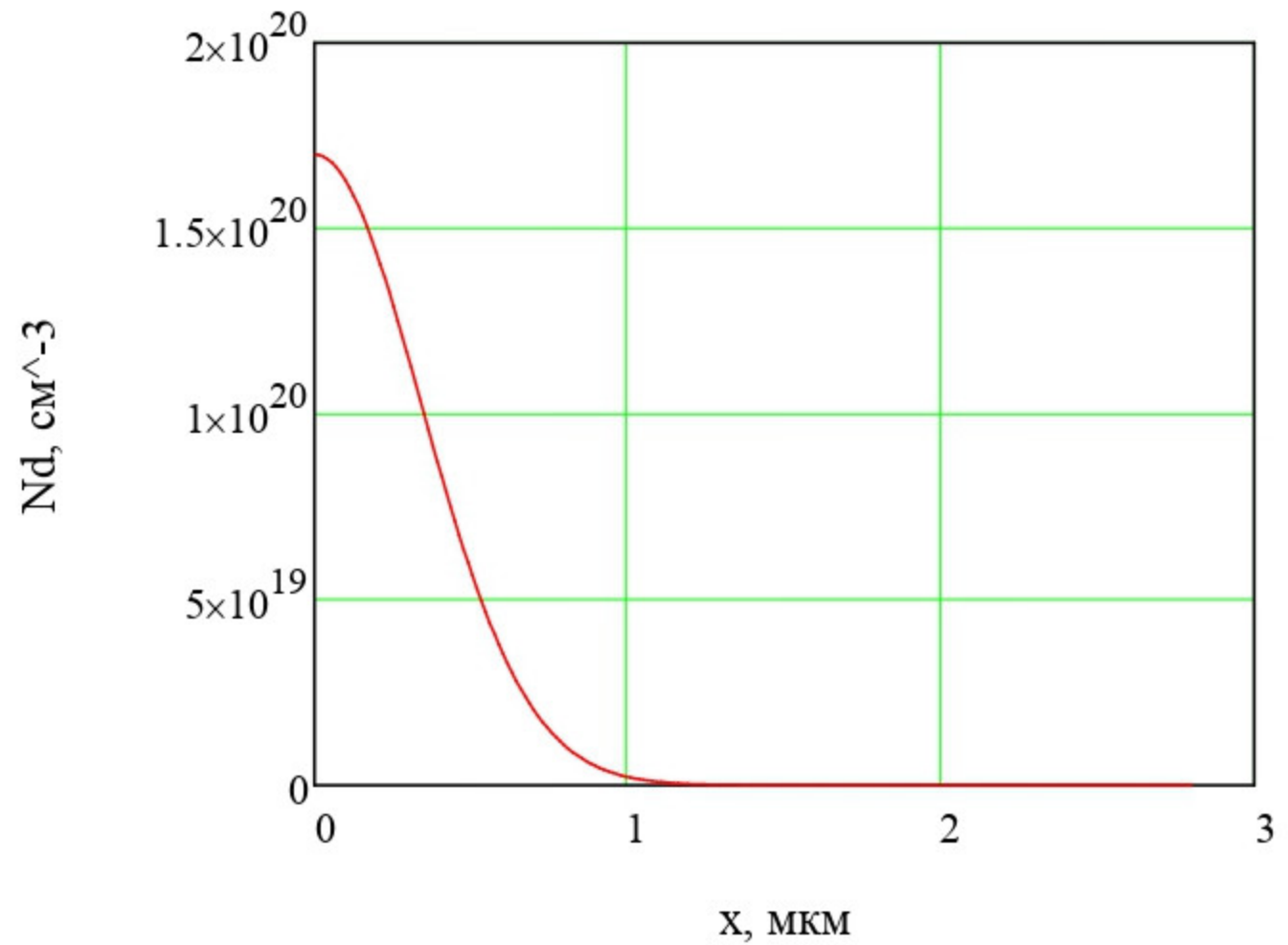


Рис. 2 - Профиль распределения Nd

Строим графики распределения примесей:

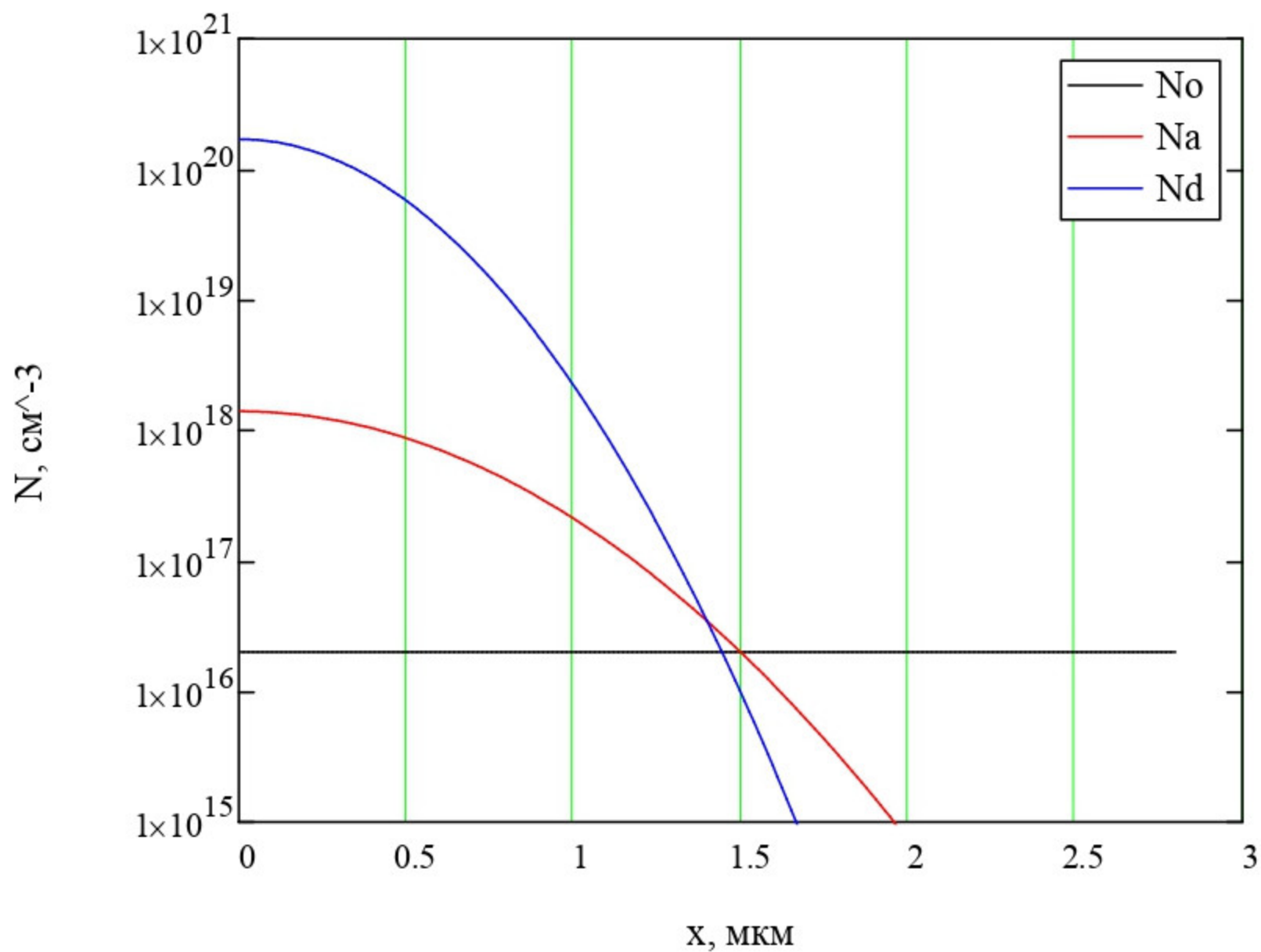


Рис. 3 - Профиль распределения примесей

6. Определение параметров реального режима разгонки акцепторной примеси (атомов бора):

$$D_{t_{p_{\text{б}}}} = 1.324 \times 10^{-9} \cdot \text{см}^2;$$

$$T_{3_{\text{э}}} = 1343 \text{ K};$$

$$T_{p_{\text{э}}} = 1263.715 \text{ K}$$

$$t_{3_{\text{э}}} = 2.544 \cdot \text{ч};$$

$$t_{p_{\text{э}}} = 2 \cdot \text{ч};$$

Определим коэффициенты диффузии бора с помощью графика и функций регрессии:

$$D_{B_{3_{\text{э}}}} := f\left(T_D, D_B, \frac{T_{3_{\text{э}}}}{K}, 1\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 5.581 \times 10^{-14} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$D_{B_{p_{\text{э}}}} := f\left(T_D, D_B, \frac{T_{p_{\text{э}}}}{K}, 1\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 9.915 \times 10^{-15} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Рассчитаем факторы:

$$D_{B_{3_{\text{э}}}} \cdot t_{3_{\text{э}}} = 5.111 \times 10^{-10} \cdot \text{см}^2;$$

$$D_{B_{p_{\text{э}}}} \cdot t_{p_{\text{э}}} = 7.139 \times 10^{-11} \cdot \text{см}^2.$$

Вычисляем реальный фактор:

$$D_{t_{p_{\text{б}}}} := D_{t_{p_{\text{б}}}} - D_{B_{3_{\text{э}}}} \cdot t_{3_{\text{э}}} - D_{B_{p_{\text{э}}}} \cdot t_{p_{\text{э}}} = 7.415 \times 10^{-10} \cdot \text{см}^2.$$

Зададимся величиной $t_{p_{\text{б}}} := 2 \text{ ч}$ и найдем величину

$$D_{p_{\text{б}}} := \frac{D_{t_{p_{\text{б}}}}}{t_{p_{\text{б}}}} = 1.03 \times 10^{-13} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Найдем температуру проведения стадии разгонки акцепторной примеси, для этого воспользуемся соответствующим графиком:

$$T_{p_{\text{б}}} := (1098.1 + 273) \text{ K};$$

$$f\left(T_D, D_B, \frac{T_{p_{\text{б}}}}{K}, 1\right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}} = 1.03 \times 10^{-13} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

Структура эпитланарного биполярного интегрального транзистора.

$$a := 2 \text{ мкм};$$

$$\omega_{\text{П}} = 200 \cdot \text{мкм};$$

$$\omega_{\text{К}} = 3.4 \cdot \text{мкм};$$

$$\omega_{\text{СС}} = 3.4 \cdot \text{мкм};$$

$$X_{\text{КП}} = 1.5 \cdot \text{мкм};$$

$$X_{\text{ЭП}} = 1.4 \cdot \text{мкм};$$

$$d_{\text{ок}} = 0.5 \cdot \text{мкм}.$$

$$P_{Si} := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\omega_{\Pi} \\ 11 \cdot a & -\omega_{\Pi} \\ 11 \cdot a & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Me := \begin{pmatrix} 15 & 0.25 \\ 9 & 0.25 \\ 11 & 0.25 \end{pmatrix}$$

$$Kol := \begin{bmatrix} 3 \cdot a & -\left(X_{K\Pi} + \omega_K + \frac{\omega_{cc}}{2}\right) \\ 1a & -\left(X_{K\Pi} + \omega_K + \frac{\omega_{cc}}{2}\right) \\ 2a & 0 \\ 9a & 0 \\ 10 \cdot a & -\left(X_{K\Pi} + \omega_K + \frac{\omega_{cc}}{2}\right) \\ 8 \cdot a & -\left(X_{K\Pi} + \omega_K + \frac{\omega_{cc}}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$Kol_ := \begin{bmatrix} 8 \cdot a & 0 \\ 8 \cdot a & -(X_{\text{эП}}) \\ 7 \cdot a & -(X_{\text{эП}}) \\ 7 \cdot a & 0 \\ 8 \cdot a & 0 \end{bmatrix}$$

$$SiO2 := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 11 \cdot a & 0 \\ 11 \cdot a & d_{ok} \\ 0 & d_{ok} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Cc := \begin{bmatrix} 3 \cdot a & -(X_{K\Pi} + \omega_K) \\ 3 \cdot a & -(X_{K\Pi} + \omega_{cc} + \omega_K) \\ 8 \cdot a & -(X_{K\Pi} + \omega_{cc} + \omega_K) \\ 8 \cdot a & -(X_{K\Pi} + \omega_K) \\ 3 \cdot a & -(X_{K\Pi} + \omega_K) \end{bmatrix}$$

$$Bas := \begin{bmatrix} 3 \cdot a & 0 \\ 3 \cdot a & -(X_{K\Pi}) \\ 6 \cdot a & -(X_{K\Pi}) \\ 6 \cdot a & 0 \\ 3 \cdot a & 0 \end{bmatrix}$$

$$Emit := \begin{bmatrix} 4 \cdot a & 0 \\ 4 \cdot a & -(X_{\text{эП}}) \\ 5 \cdot a & -(X_{\text{эП}}) \\ 5 \cdot a & 0 \\ 4 \cdot a & 0 \end{bmatrix}$$

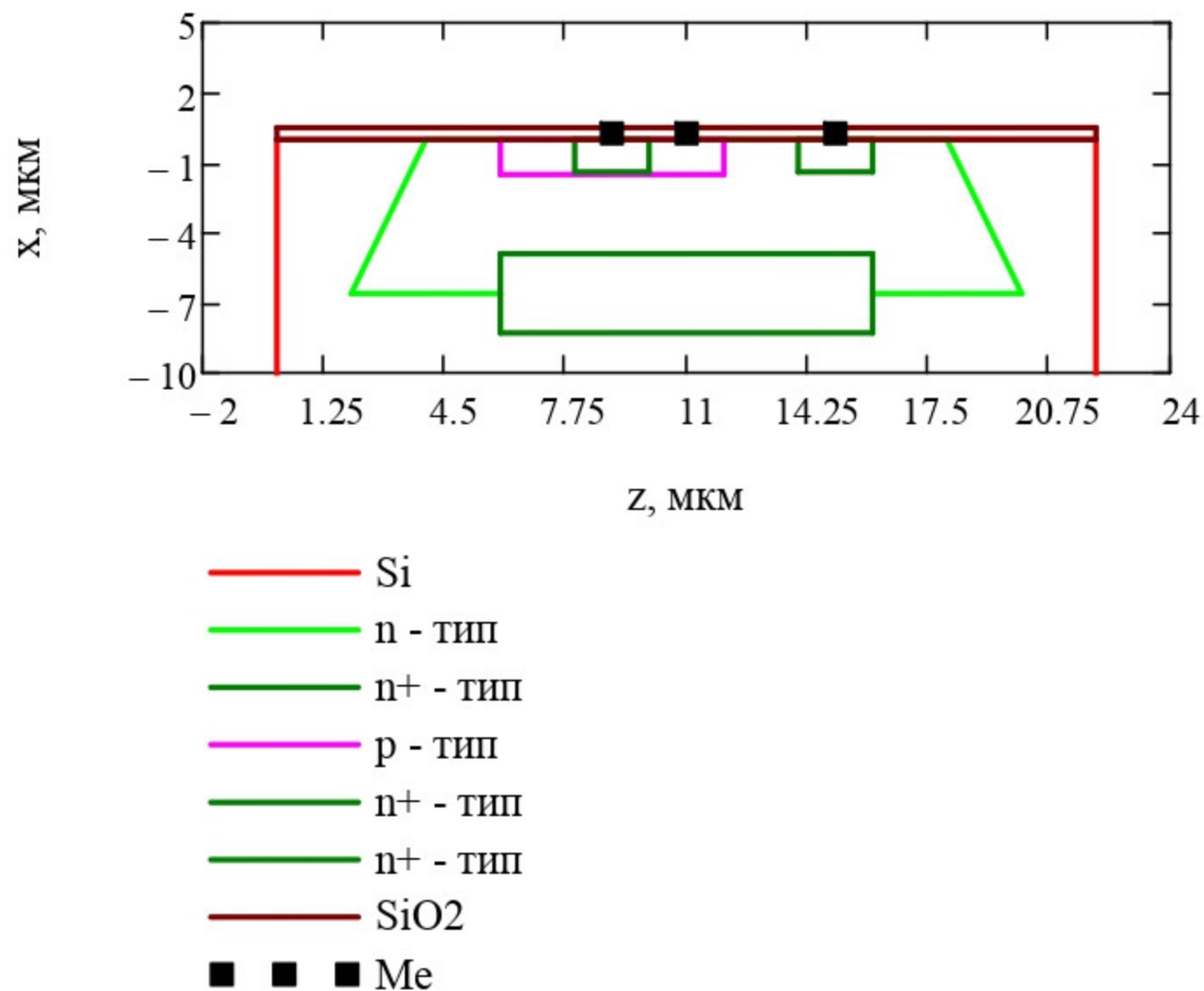


Рис. 4 - Структура в разрезе

$$\begin{aligned} \text{мкм} &:= 1 \cdot 10^{-6} \text{ м} & \text{см} &:= \text{см} & \text{Дж} &:= \text{J} & \text{с} &:= \text{sec} & \text{мин} &:= \text{min} & i &:= 1..4 \\ \text{эВ} &:= \text{J} \cdot 1.60217653 \cdot 10^{-19} & & & & & \text{ч} &:= \text{hr} & & & j &:= 1..5 \end{aligned}$$

$$\text{Таблица}_1 := \begin{pmatrix} \text{"Т, оС"} & \text{"N_B, см}^3 & \text{"N_P, см}^3 \\ 800 & 8 \cdot 10^{16} & 10^{18} \\ 900 & 1.2 \cdot 10^{18} & 3 \cdot 10^{18} \\ 1000 & 10^{19} & 2 \cdot 10^{19} \\ 1050 & 6 \cdot 10^{19} & 1 \cdot 10^{20} \end{pmatrix}$$

$$T_{N_{i-1}} := \left[\left(\text{Таблица}_1^{\langle 0 \rangle} \right)_i + 273 \right]$$

$$N_{B_{i-1}} := \left[\left(\text{Таблица}_1^{\langle 1 \rangle} \right)_i \right]$$

$$N_{P_{i-1}} := \left[\left(\text{Таблица}_1^{\langle 2 \rangle} \right)_i \right]$$

$$\text{Таблица}_2 := \begin{pmatrix} \text{"Т, оС"} & \text{"D_B, см}^2/\text{с"} & \text{"D_P, см}^2/\text{с"} \\ 1000 & 10^{-14} & 10^{-13} \\ 1050 & 5 \cdot 10^{-14} & 3 \cdot 10^{-13} \\ 1100 & 10^{-13} & 10^{-12} \\ 1150 & 3 \cdot 10^{-13} & 3 \cdot 10^{-12} \\ 1200 & 10^{-12} & 5 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix}$$

$$T_{D_{i-1}} := \left[\left(\text{Таблица}_2^{\langle 0 \rangle} \right)_i + 273 \right]$$

$$D_{B_{i-1}} := \left[\left(\text{Таблица}_2^{\langle 1 \rangle} \right)_i \right]$$

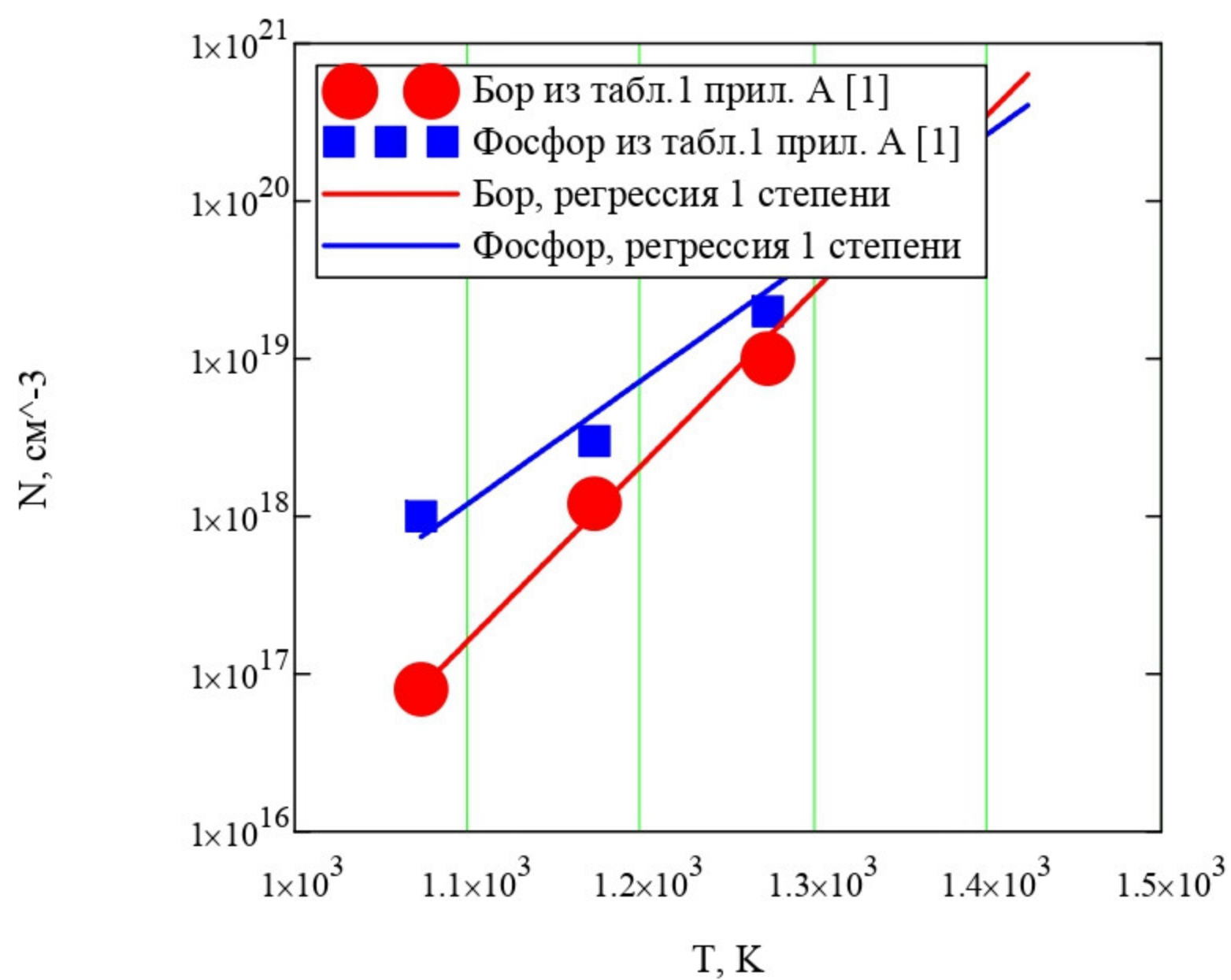
$$T_{\min} := \min(T_D, T_N)$$

$$D_{P_{i-1}} := \left[\left(\text{Таблица}_2^{\langle 2 \rangle} \right)_i \right]$$

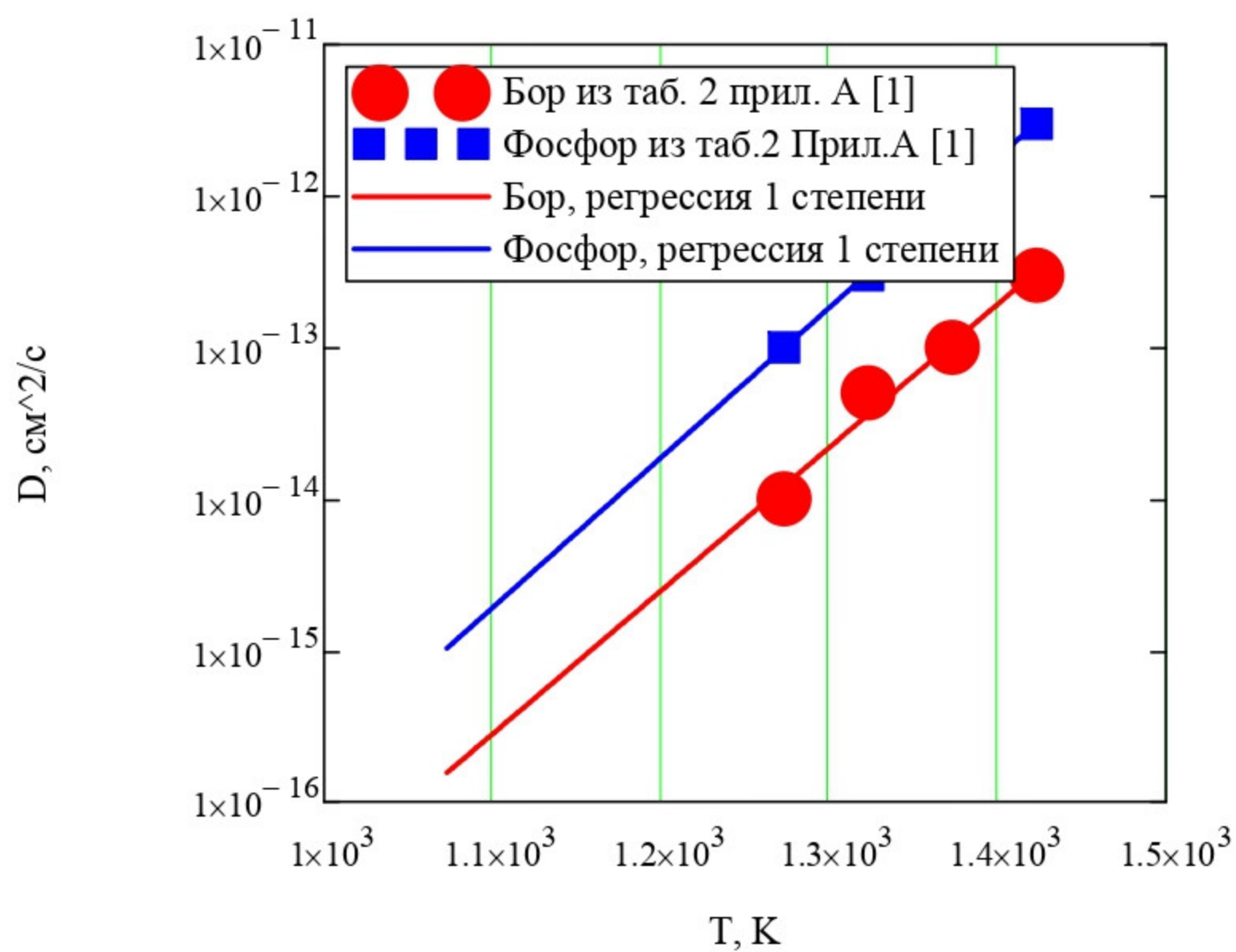
$$T_{\max} := \max(T_D, T_N)$$

$$T_K := T_{\min}, T_{\min} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{100} .. T_{\max}$$

$$f(X, Y, T, n) := \exp(\text{interp}(\text{regress}(X, \ln(Y), n), X, \ln(Y), T))$$



Предельная растворимость от температуры

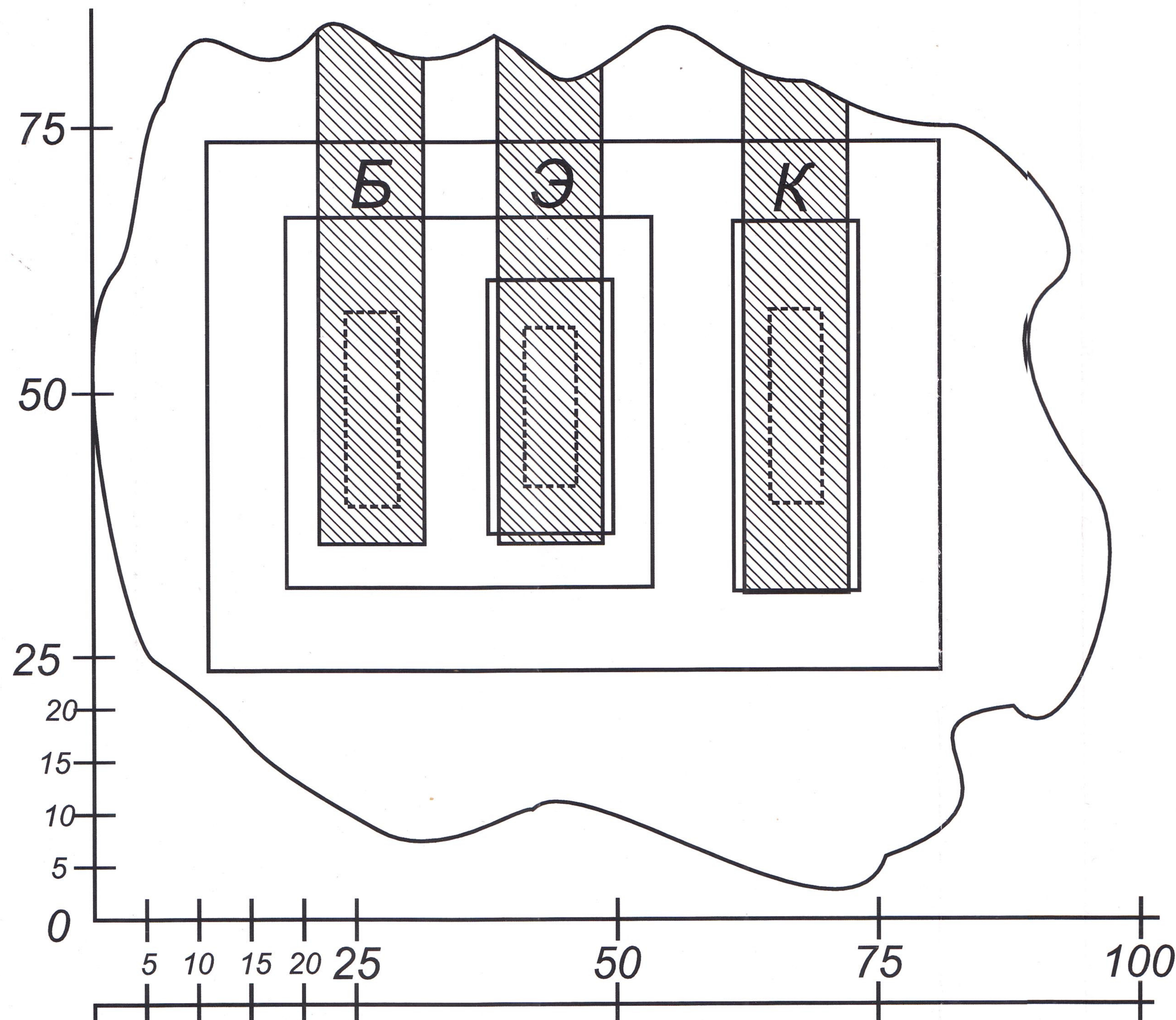


Зависимость коэф. дифф. от температуры

Приложение В
(Обязательное)

Графическая часть

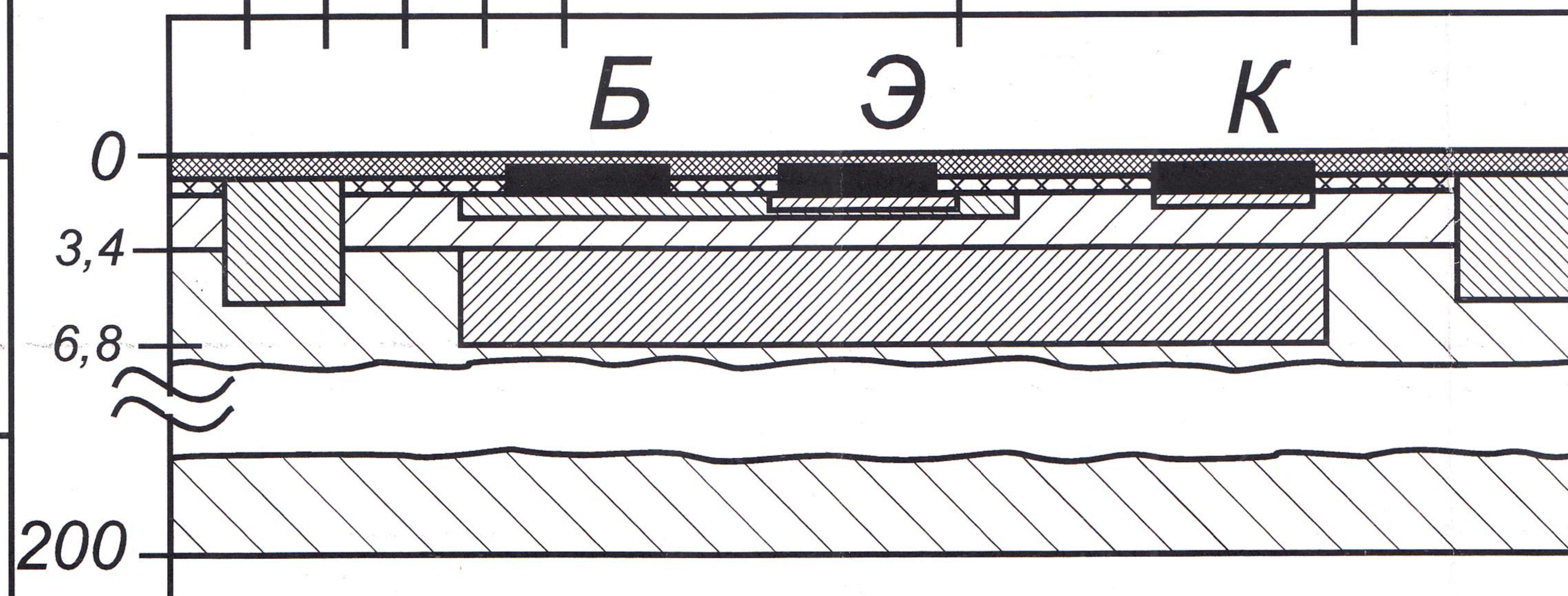
					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



1. Все размеры на чертеже даны в мкм.
2. Характеристики и данные по изготовлению отдельных слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики и параметры слоев

Наименование структуры	Толщина, мкм	Тип электропроводности	Используемый материал	ρ , Ом/□
Базовая область	1,5	p	Бор	200
Эмиттерная область	1,4	n+	Фосфор	5
Скрытый слой	3,4	n+	Сурьма	20
Разделительная область	5	p	Бор	10
Эпитаксиальный слой	3,4	n	Кремний	-
Проводники	1,5	-	Алюминий	не более 0,005
Пленка диэлектрика	0,6	-	Двуокись кремния	-
Пассивация	0,8	-	Двуокись кремния	-



					ПГУ 02. 11.03.04. 014									
Изм.	Лист	Недокум.	Подпись	дата	Фрагмент кристалла, биполярный транзистор									
Разраб.	Рахмонов П.									2000:1				
Пров.	Аношкин Ю.													
Т. Контр.					Лист 1		Листов 1							
Н. Контр.	Рыжова Т.				Кремний ГОСТ 19658-81									
Утв.														
					21ПД1									

Приложение Г
(Обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе
«Антиплагиат.ВУЗ»

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ректору Пензенского государственного
университета Гулякову А.Д.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы
обучения

Рахмонов Парвиз Давронович

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Рахмонов Парвиз Давронович, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной классификационной работы на тему «Технология изготовления и расчет параметров эпитланарного биполярного транзистора», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Подпись студента



ВКР представлена на проверку

Руководитель ВКР

Аношкин Ю. В.

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Пензенский государственный
университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рахмонов Парвиз Давронович
Самоцитирование
рассчитано для: Рахмонов Парвиз Давронович
Название работы: Технология изготовления и расчет параметров эппланарного биполярного транзистора
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	1.72%	СОВПАДЕНИЯ	1.72%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	98.28%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	98.28%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2025 10:56

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2-13, 18-39, титульный лист с.1, введение с.13-18, выводы с.40
Модули поиска: Шаблонные фразы; Цитирование; ИПС Адилет; IEEE; Публикации eLIBRARY; Переводные заимствования; СПС ГАРАНТ: аналитика; Кольцо вузов; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Публикации РГБ; Перефразирования по коллекции IEEE; Диссертации НББ; СМИ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Коллекция НБУ; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Медицина; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Сводная коллекция ЭБС; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирова...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи:

17.06.2025

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной магистерской работы на тему «Технология изготовления и расчет параметров эпитланарного биполярного транзистора»

студента 4 курса Рахмонов П. Д.

направления подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника,

профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Руководитель ВКР Аношкин Ю.В.



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАЙМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пензенский государственный
университет»

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рахмонов Парвиз Давронович
Самоцитирование
рассчитано для: Рахмонов Парвиз Давронович
Название работы: Технология изготовления и расчет параметров эпитланарного биполярного транзистора
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	1.72%	СОВПАДЕНИЯ	1.72%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	98.28%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	98.28%
ЦИТИРОВАНИЕ	0%	ЦИТИРОВАНИЕ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2025 10:56

Структура
документа:
Модули поиска:

Проверенные разделы: основная часть с.2-13, 18-39, титульный лист с.1, введение с.13-18, выводы с.40
Шаблонные фразы; Цитирование; ИПС Адилет; IEEE; Публикации eLIBRARY; Переводные заимствования; СПС ГАРАНТ: аналитика; Кольцо вузов; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Публикации РГБ; Перефразирование по коллекции IEEE; Диссертации ИББ; СМИ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Коллекция ИБУ; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Медицина; Публикации РГБ (переводы и перефразирование); Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирование); Сводная коллекция ЭБС; Перефразирование по СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Кольцо вузов (переводы и перефразирование); Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирова...

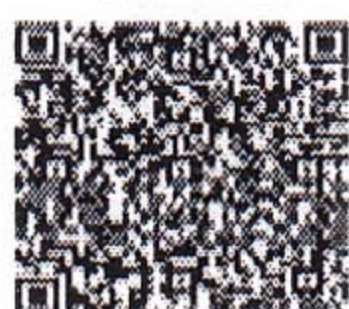
Работу проверил: Головашкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

17.06.25 г.

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

Руководитель ВКР

« 17 » 06 2025 год

подпись

Аношкин Ю. В.

фамилия, инициалы

Приложение Д
(Обязательное)

Презентация

					ПГУ 2. 11.03.04. 014 ПЗ	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

Технология изготовления и расчет параметров эпитланарного биполярного транзистора

Выполнил студент гр. 21ПД1

Руководитель к.т.н., доцент каф. НиМЭ

Рахмонов П.Д.

Аношкин Ю.В.

ПЕНЗА 2025

Цель и задачи ВКР:

Целью работы является исследование топологии и структуры эпитланарного биполярного интегрального транзистора со структурой $n^+ - p - n$.

В рамках исследования решаются следующие задачи:

- изучение основных этапов производства транзистора;
- расчет режимов технологических операций, включая окисление и диффузию примесей;
- моделирование профилей распределения концентрации акцепторной и донорной примесей;
- построение структуры транзистора и анализ его электрофизических параметров.

Биполярные транзисторы

Принцип действия биполярного транзистора основан на явлении инжекции неосновных носителей из эмиттера в базу и их последующей диффузии к коллектору. Когда на переходе база-эмиттер подаётся прямое смещение, происходит интенсивная инжекция носителей (электронов в n - p - n или дырок в p - n - p структуре) в тонкую базовую область. Большая часть этих носителей достигает коллекторного перехода, находящегося под обратным смещением, создавая значительный коллекторный ток. Таким образом, относительно слабый ток базы управляет значительно более сильным током коллектора, что и обеспечивает усиление сигнала.

Технология изготовления интегральных транзисторов

Планарная технология, разработанная в конце 1950-х годов, стала настоящей революцией в полупроводниковой электронике. Её основное преимущество заключается в возможности формирования всех трёх электродов транзистора (эмиттера, базы и коллектора) на одной плоскости кремниевой подложки. Это достигается за счёт комбинации процессов термического окисления, фотолитографии и селективного легирования. Такой подход обеспечивает высокую воспроизводимость параметров и возможность массового производства.

Эпипланарная технология представляет собой дальнейшее развитие планарного подхода. Её отличительной особенностью является использование эпитаксиального наращивания высокоомного коллекторного слоя на низкоомной подложке. Это позволяет одновременно достичь высокого пробивного напряжения и низкого сопротивления коллектора. Современные варианты этой технологии часто включают формирование скрытого высоколегированного слоя между подложкой и эпитаксиальным слоем, что дополнительно снижает последовательное сопротивление коллектора.

Исходные данные для расчета

Название параметра	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4
Толщина подложки	$w_{\text{п}}$	мкм	200
Поверхностная концентрация акцепторной примеси	N_{sa}	см^{-3}	$14 \cdot 10^{17}$
Поверхностная концентрация донорной примеси	N_{sd}	см^{-3}	$17 \cdot 10^{19}$

1	2	3	4
Концентрация примеси в эпитаксиальном слое	N_0	см^{-3}	$2 \cdot 10^{16}$
Глубина залегания коллекторного перехода	$x_{\text{кп}}$	мкм	1,5
Глубина залегания эмиттерного перехода	$x_{\text{эп}}$	мкм	1,4
Температура диффузии фосфора	$T_{\text{р}}$	К	1418
Температура диффузии бора	$T_{\text{б}}$	К	1518
Толщина коллектора	$w_{\text{к}}$	мкм	3,4
Толщина скрытого слоя	$w_{\text{сс}}$	мкм	3,4
Толщина оксидной пленки	$d_{\text{оп}}$	мкм	0,5

Термическое окисление кремния

Термическое окисление кремния занимает особое место в современной микроэлектронной технологии, являясь базовым процессом при изготовлении полупроводниковых приборов. Физическая сущность процесса заключается в химическом взаимодействии кремния с кислородом или водяным паром при повышенных температурах, приводящем к образованию диоксида кремния – материала с уникальными диэлектрическими и защитными свойствами.

Процесс включает три стадии окисления:

Первая стадия (сухая атмосфера кислорода):

$$d_I = 15\% \cdot d_{\text{он}} = 0,150 \cdot 0,500 = 0,075 \quad (\text{мкм}) \quad . \quad (1)$$

II стадия (влажная атмосфера кислорода):

$$d_{II} = 70\% \cdot d_{\text{он}} = 0,700 \cdot 0,500 = 0,350 \quad (\text{мкм}) \quad . \quad (2)$$

III стадия (сухая атмосфера кислорода):

$$d_{III} = d_I = 0,075 \quad (\text{мкм}) \quad . \quad (3)$$

После подбора температуры равной 1750 К, время первой и третьей стадии окисления составляет около 24 мин, а время второй стадии окисления составляет около 71 мин.

Технология диффузионного формирования базовых областей

Диффузионное легирование кремния акцепторными примесями представляет собой ключевой этап в технологии изготовления биполярных транзисторов. Физическая сущность процесса основывается на способности атомов бора (основной акцепторной примеси) мигрировать в кристаллической решетке кремния при повышенных температурах.

Расчет режима загонки базовой примеси:

$$D_{3B} = \frac{0,783 \cdot Q_B^2}{N_{\text{пред. В}}^2} = \frac{0,783 \cdot (9,029 \cdot 10^{13})^2}{(1,367 \cdot 10^{19})^2} = 3,418 \cdot 10^{-11} \text{ (см}^2\text{)} . \quad (4)$$

$$t_{3B}|_{T=1273} = \frac{D_{3B}}{D_B} = \frac{3,418 \cdot 10^{-11}}{2,530 \cdot 10^{-12}} = 13,512 \text{ (с)} . \quad (5)$$

Таким образом, время «загонки» примеси бора в базовую область составляет около 14 с при температуре 1273 К.

Технологические особенности формирования эмиттерных областей

Формирование эмиттерных областей методом диффузии донорных примесей представляет собой критически важный этап в производстве биполярных транзисторов. В отличие от процессов легирования базовых областей, данный технологический этап имеет ряд принципиальных особенностей, обусловленных физико-химическими свойствами используемых донорных примесей и специфическими требованиями к параметрам эмиттерного перехода.

Определяем режимы загонки эмиттерной примеси:

$$Dt_{3.Э} = \frac{0,783 \cdot Q_{Э}^2}{N_{пред.Р}^2} = \frac{0,783 \cdot (7,234 \cdot 10^{15})^2}{(9,570 \cdot 10^{19})^2} = 4,476 \cdot 10^{-9} \quad (\text{см}^2) . \quad (6)$$

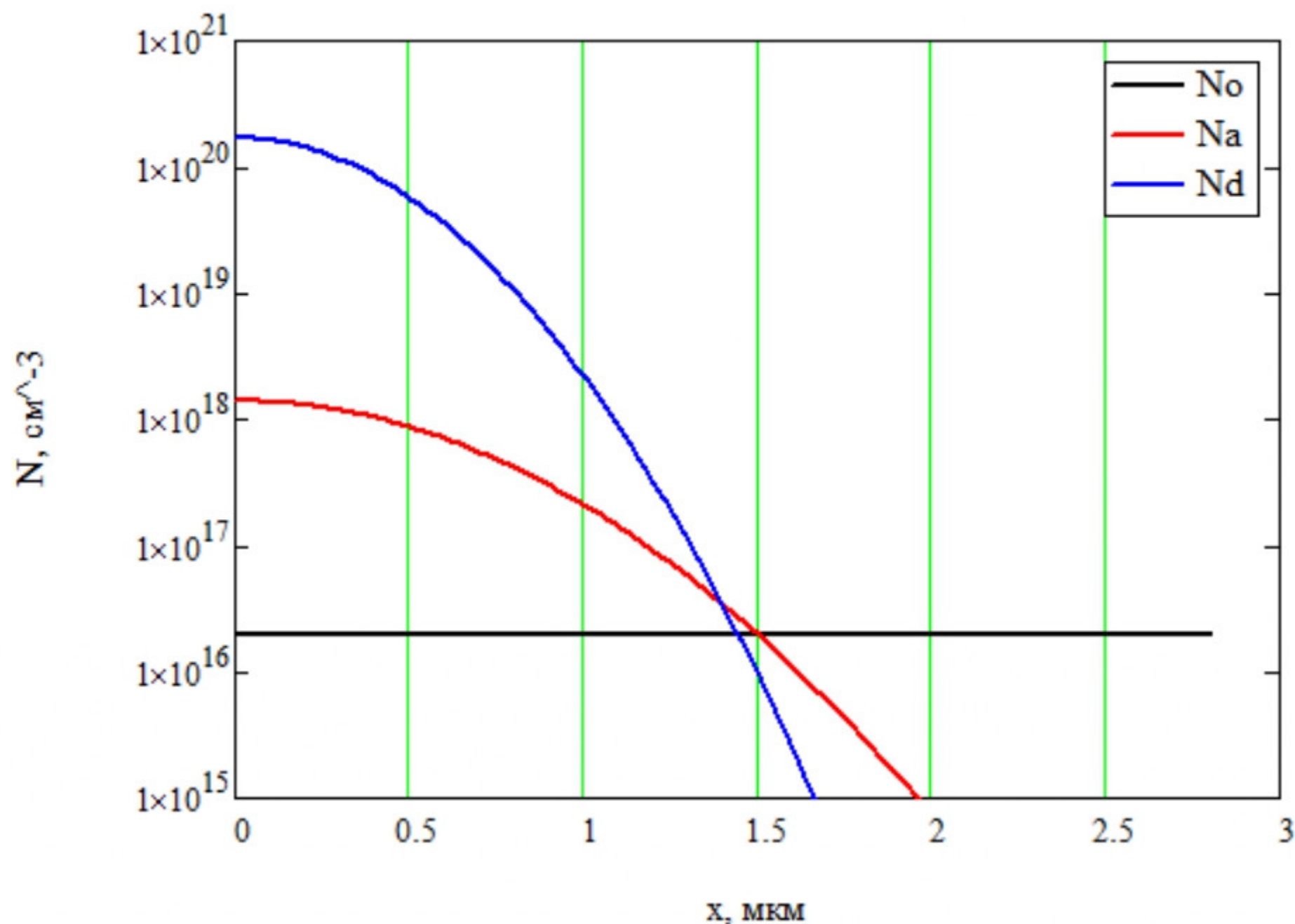
$$t_{3.Э}|_{T=1343} = \frac{Dt_{3.Э}}{D_{3.Э}} = \frac{4,476 \cdot 10^{-9}}{4,887 \cdot 10^{-13}} = 2,544 \quad (\text{ч}) . \quad (7)$$

Таким образом, время «загонки» примеси фосфора в эмиттерную область составляет около 2,5 ч при температуре 1264 К.

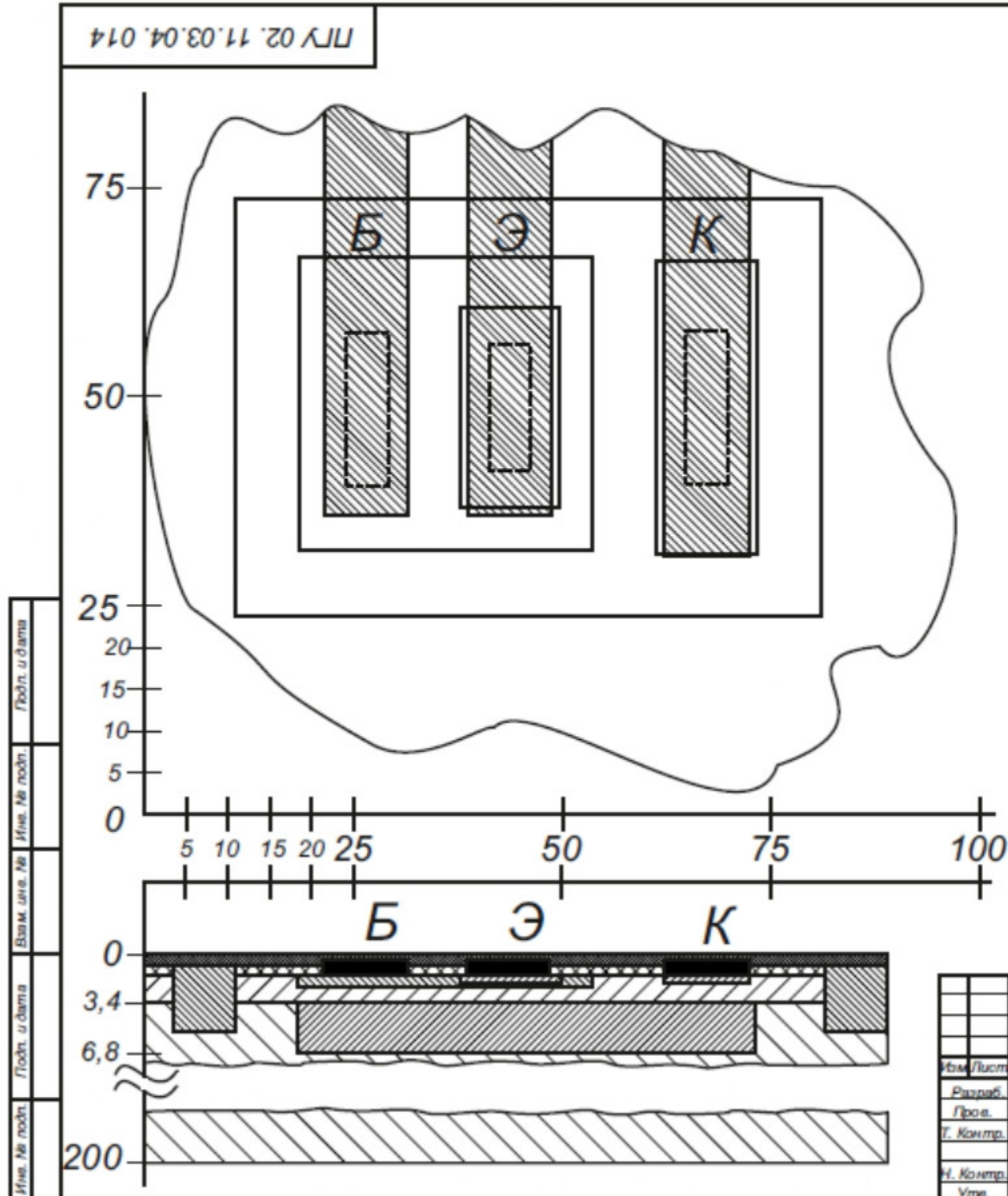
Профили распределения примесей

$$N_A(x) = \frac{Q_B}{\sqrt{\pi \cdot Dt_{p.B}}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{Dt_{p.B}}}\right)^2\right] \quad \text{при } x \in [0, 2 \cdot x_{\text{кп}}]$$

$$N_D(x) = \frac{Q_Э}{\sqrt{\pi \cdot Dt_{p.Э}}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{Dt_{p.Э}}}\right)^2\right] \quad \text{при } x \in [0, 2 \cdot x_{\text{эп}}]$$



Фрагмент кристалла, биполярный транзистор



1. Все размеры на чертеже даны в мкм.
2. Характеристики и данные по изготовлению отдельных слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики и параметры слоев

Наименование структуры	Толщина, мкм	Тип электропроводности	Используемый материал	ρ , Ом/□
Базовая область	1,5	p	Бор	200
Эмиттерная область	1,4	n+	Фосфор	5
Скрытый слой	3,4	n+	Сурьма	20
Разделительная область	5	p	Бор	10
Эпитаксиальный слой	3,4	n	Кремний	-
Проводники	1,5	-	Алюминий	не более 0,005
Пленка диэлектрика	0,6	-	Двуокись кремния	-
Пассивация	0,8	-	Двуокись кремния	-

					ПГУ 02. 11.03.04. 014				
					Фрагмент кристалла, биполярный транзистор	Лит	Масса	Масштаб	
Изм	Лист	Надпись	Подпись	Дата				2000:1	
Разраб.	Ряжманов П.								
Проект.	Аношкин Ю.								
Г. Контр.						Лист 1	Листов 1		
Н. Контр.	Рыкова Т.				21ПД1				
Уте.									

ВЫВОДЫ:

Проведенное исследование позволило всесторонне изучить и оптимизировать процесс создания эпитланарного биполярного транзистора, начиная от теоретического моделирования до практической реализации. Работа включала несколько взаимосвязанных этапов, каждый из которых внес существенный вклад в конечный результат.

Были успешно определены и оптимизированы ключевые технологические параметры изготовления транзистора. Особое внимание уделялось процессам термического окисления, где был разработан трехстадийный режим с различными атмосферными условиями (сухое/влажное окисление) и точно выверенными температурно-временными характеристиками (1750K, 24 мин для сухого и 71 мин для влажного окисления). Такой подход обеспечил формирование качественного оксидного слоя толщиной 0,5 мкм с оптимальными диэлектрическими свойствами.

Процессы диффузии примесей были рассчитаны с высокой точностью, что подтверждается полученными профилями распределения концентраций. Для базовой области (p -тип) была достигнута поверхностная концентрация $1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с плавным спадом до 10^{17} см^{-3} на глубине 3 мкм, а для эмиттерной области (n^+ -тип) – $1,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ с резкой границей перехода. Эти параметры полностью соответствуют требованиям к высокоэффективным биполярным транзисторам.

Полученные результаты представляют ценность как для учебного процесса, так и для промышленного применения, открывая возможности для создания новых поколений полупроводниковых приборов с улучшенными характеристиками.

Спасибо
за
ВНИМАНИЕ