

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

***РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
И ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ (часть 4)***

Методические указания и контрольные задания
для студентов специальности I-42 01 01 «Микро- и наноэлектронные
технологии и системы» и I-42 01 03 «Квантовые информационные системы»
заочной и дистанционной форм обучения

Минск 2008

УДК 621.382 (076)
ББК 32.844.1 я 7
Р 24

Составитель
В. И. Пачинин

Расчет и проектирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных микросхем. Физика полупроводниковых приборов (часть 4) : метод. указания и контр. задания для студ. спец. I-42 01 01 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы» и I-42 01 03 «Квантовые информационные системы» заоч. и дист. форм обуч. / сост. В. И. Пачинин. – Минск : БГУИР, 2008. – 18 с.

В издании приведены содержание дисциплины, методические указания и вопросы для самопроверки, основная и дополнительная литература. Приведены задачи и вопросы, входящие в индивидуальное контрольное задание.

УДК 621.382 (076)
ББК 32.844.1 я 7

© Пачинин В. И., составление, 2008
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2008

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Рабочая программа дисциплины составлена на основе типовой программы для высших учебных заведений по специальности I-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы», утвержденной 24. 06. 2001 г., регистрационный №ТД – 41-02/тип.

Проведение занятий обеспечивает кафедра микро- и нанoeлектроники.

Изучение дисциплины «Расчет и проектирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных микросхем» следует вести по темам. После ознакомления с каждой темой и методическими указаниями необходимо подобрать литературу и законспектировать основные положения темы. При возникновении вопросов следует обратиться на кафедру в дни консультаций или письменно.

Программа дисциплины соответствует учебному плану в объеме 96 часов учебного материала.

В процессе изучения дисциплины студент выполняет одну контрольную работу. К экзамену студент допускается после зачета по контрольной работе.

Виды занятий	Количество часов
Установочная лекция	2
Обзорные лекции	4
Практические занятия	2
Лабораторные занятия	8
Самостоятельная работа	80

Дисциплина изучается на четвертом курсе, в девятом семестре.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель изучения дисциплины

Дисциплина предусматривает формирование необходимого объема знаний, достаточных для проведения студентом инженерных расчетов полупроводниковых приборов и элементов интегральных микросхем.

1.2. Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины «Расчет и проектирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных микросхем» студенты должны:

з н а т ь:

физические процессы, протекающие в полупроводниковых структурах и р-п-переходах;

конструкции дискретных полупроводниковых приборов и элементов ИС;
 специфические особенности технологии их изготовления;
 у м е т ь х а р а к т е р и з о в а т ь:
 области использования изучаемых приборов и элементов;
 перспективы развития инженерных методов расчета;
 п р и о б р е с т и н а в ы к и:
 применения инженерных методов расчета структур и полупроводниковых
 приборов и элементов интегральных микросхем.

1.3. Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо студентам для изучения данной дисциплины

Название дисциплины	Разделы (темы)
Высшая математика	Дифференциальное и интегральное исчисление, комплексные числа, специальные функции
Физика	Электричество, электромагнетизм
Физика твердого тела	Физика полупроводников, контактные и поверхностные явления
Физика активных элементов интегральных схем, мощных и сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов	Физические основы работы активных полупроводниковых приборов
Микроэлектроника	Разновидности и структуры полупроводниковых интегральных микросхем

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Установочная сессия

Темы лекционных занятий

Проектирование диодных структур и приборов на их основе. Биполярные транзисторы и методики проектирования оптимальной структуры. Проектирование полевых транзисторных структур. Выбор материалов и конструкции коммутационных элементов. Общие сведения о составе и изготовлении конструкторской документации.

2.1. Темы лекционных занятий и их содержание

Введение

Задачи курса, методологическое обеспечение. Основные этапы разработки полупроводниковых приборов и микросхем.

Маршруты проектирования полупроводниковых приборов и ИМС и их взаимосвязь с технологией создания структур [1, 2, 4].

Раздел 1. Дискретные биполярные полупроводниковые приборы

Тема 1.1. Полупроводниковые диоды

Порядок проектирования и расчета полупроводниковых выпрямительных диодов. Выбор структур, исходных полупроводниковых материалов. Расчет геометрических размеров, расчет электрических параметров [1–3, 6].

Тема 1.2. Проектирование структур на основе p-n-переходов

Методика оценки технологических параметров. Особенности расчета стабилитронов, варикапов, СВЧ-диодов и диодов Шоттки, фоточувствительных и светоизлучающих структур [1–3, 6].

Тема 1.3. Биполярные транзисторы. Проектирование транзисторных структур с оптимальными параметрами

Конструктивные разновидности транзисторов. Влияние конструктивно-технологического исполнения транзисторов на их параметры. Проектирование транзисторных структур с оптимальными параметрами [1, 9].

Тема 1.4. Методика проектирования транзисторов

Выбор структур, исходных полупроводниковых материалов, расчет геометрических размеров, расчет электрических параметров. Методика оценки технологических параметров [1, 2, 6, 8, 9].

Раздел 2. Элементы биполярных интегральных ИМС

Тема 2.1. Элементы полупроводниковых ИМС, их конструктивно-технологические отличия от дискретных полупроводниковых приборов

Методика оценки технологических параметров. Формирование интегральных диодных структур на базе интегральных транзисторов. Оценка их параметров [1, 3, 4, 9].

Тема 2.2. Полупроводниковые диоды в интегральном исполнении

Особенности расчета полупроводниковых диодов в интегральном исполнении. Выбор структуры прибора, исходных полупроводниковых материалов. Расчет геометрических размеров, расчет электрических параметров [1, 2, 6].

Тема 2.3. Биполярные интегральные транзисторы

Влияние конструктивно-технологического исполнения транзисторов на их параметры. Особенности проектирования продольных и поперечных транзисторных структур [1, 2, 4].

Тема 2.4. Проектирование транзисторных структур с оптимальными параметрами

Методика проектирования транзисторов. Выбор структур, исходных полупроводниковых материалов, расчет геометрических параметров, расчет электрических параметров. Методика оценки технологических параметров [1, 8].

Тема 2.5. Функционально-интегрированные элементы ИМС

Формирование структур, выполняющих несколько функций. Совмещение пассивных и активных областей транзисторов с резисторами, активные приборы в качестве нагрузочных элементов, RC-структуры. Конструкции, методы расчета [1, 3, 6].

Раздел 3. Структуры на основе полевых эффектов и приборы на их основе

Тема 3.1. Полевые транзисторы

Сравнительные характеристики и параметры. Пороговое напряжение и порядок его расчета. Вольт-амперные характеристики. Паразитные элементы в полевых структурах. Ограничения, накладываемые на проектирование полевых структур. Базовая и альтернативные технологии и параметры структур [1–4].

Тема 3.2. Полевые транзисторы в дискретном исполнении

Конструктивно-топологическое исполнение. Порядок расчета и проектирования дискретных полевых транзисторов. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом. Полевые транзисторы с управляемым р-n-переходом. Особенности расчета СВЧ- и мощных полевых транзисторов. Конструирование полевых транзисторов с барьером Шоттки [1, 2, 6, 8].

Тема 3.3. Интегральные полевые транзисторы

Конструктивно-топологические отличия от дискретных приборов. Порядок расчета структуры. Паразитные параметры интегральных структур [1, 3, 4, 8].

Тема 3.4. Инверторы на базе полевых структур с пассивной и активной нагрузкой

Инверторы с резистивной нагрузкой. Полевые транзисторы в качестве нагрузки. Конструкция КМОП-инвертора, его параметры. Особенности проектирования ИМС на основе КМОП-транзисторов [1–3, 6].

Раздел 4. Коммутационные элементы полупроводниковых ИМС

Тема 4.1. Выбор материалов и конструкции коммутационных элементов

Расчет межсоединений, омических контактов и контактных площадок. Выбор и расчет изоляции элементов ИМС. Выбор подложки и корпуса полупроводниковых приборов и ИМС. Расчет тепловых режимов подложки и корпуса [1, 3, 8].

Раздел 5. Конструкторская документация

Тема 5.1. Общие сведения о составе и изготовлении конструкторской документации

Требования ЕСКД. Автоматизация разработки конструкторской документации [1, 4, 8].

2.2. Темы лабораторных работ

1. Расчет технологических параметров операции легирования структур интегральных элементов интегральных схем.
2. Исследование параметров структур с р-п-переходом с использованием программного моделирования «Введение в микроэлектронику». Исследование PMOS (р-МОП) транзисторов.
3. Исследование параметров структур с р-п-переходом с использованием программного моделирования «Введение в микроэлектронику». Исследование n^+ -р-диодов и p^+ -п-диодов.
4. Исследование параметров структур с р-п-переходом с использованием программного моделирования «Введение в микроэлектронику». Исследование биполярных транзисторов.
5. Проектирование стандартной технологии формирования биполярного транзистора (ч. 1).
6. Проектирование стандартной технологии формирования биполярного транзистора (ч. 2).
7. Проектирование поверхностной геометрии транзистора.
8. Исследование технологических параметров формирования МОП-транзисторов.

2.3. Темы практических занятий

1. Выбор параметров исходных полупроводниковых материалов.
2. Проектирование и расчет диодных структур (диоды, стабилитроны, варикапы, фотодиоды и т.д.)
3. Проектирование биполярных транзисторов и расчет их параметров.
4. Проектирование полевых транзисторов и расчет их параметров.

2.4. Самостоятельная и исследовательская работа студентов

Включает подготовку к лекциям и практическим занятиям, усвоение материала лабораторных работ, выполнение индивидуальных заданий и написание отчета к каждой лабораторной работе.

2.5. Форма контроля за работой студентов

Защита контрольной работы, защита отчета по каждой лабораторной работе.

2.6. Контрольная работа

Каждый студент должен выполнить вариант контрольной работы, номер которого совпадает с порядковым номером фамилии студента в зачетной ведомости. Контрольная работа содержит задания (разд. 3) по основным темам лекционного курса в семестре.

Номера заданий, составляющих контрольную работу для каждого варианта, указаны в таблице.

Номер варианта	Номера вопросов и заданий	Номер варианта	Номера вопросов и заданий	Номер варианта	Номера вопросов и заданий
1	1, 26	9	9, 34	17	17, 42
2	2, 27	10	10, 35	18	18, 43
3	3, 28	11	11, 36	19	19, 44
4	4, 29	12	12, 37	20	20, 45
5	5, 30	13	13, 38	21	21, 46
6	6, 31	14	14, 39	22	22, 47
7	7, 32	15	15, 40	23	23, 48
8	8, 33	16	16, 41	24	24, 49
				25	25, 50

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем заключаются эффекты выпрямления на р-п-переходе и на барьере металл–полупроводник и чем они различаются?
2. Почему лавинный пробой р-п-перехода возникает при более высоких напряжениях, чем туннельный, хотя критическая напряженность электрического поля лавинного пробоя меньше? При каких условиях электрический пробой переходит в тепловой?
3. В чем особенности работы р-п-перехода на высокой частоте и при больших токах?
4. Почему для СВЧ-диодов применяются специальные конструкции корпусов? Каковы особенности расчета параметров диодов и их корпусов?
5. Какие физические принципы лежат в основе работы светоизлучающего диода? Каковы особенности выбора полупроводникового материала и примесей?
6. Поясните принципы работы биполярного транзистора в трех основных схемах его включения. Особенности входных и выходных характеристик транзистора в схеме с общей базой.
7. Поясните принципы работы биполярного транзистора в трех основных схемах его включения. Какие три области выделяют в семействе статических характеристик транзистора и почему?
8. В чем состоит особенность работы транзистора в режиме большого сигнала?
9. Как влияет высокий уровень инжекции на коэффициент передачи тока эмиттера?
10. В чем сущность эффекта вытеснения тока эмиттера и особенности учета этого эффекта при проектировании оптимальной структуры транзистора?
11. В чем состоят особенности оптимизации структуры мощных транзисторов и выбора корпусов для них?
12. Основные характерные особенности малошумящих транзисторов ВЧ и СВЧ. Основные параметры.
13. Что такое мезатранзисторы и планарные транзисторы? Какова роль эпитаксиального слоя и что такое активная база?
14. Проведите сравнительный анализ сопротивления открытых каналов п- и р-типов электропроводности двух полевых транзисторов с управляемым р-п-переходом при одинаковых геометрических размерах каналов.
15. Нарисуйте зависимость сопротивления канала от напряжения на затворе для транзисторов с переходом. Как изменится эта зависимость с увеличением температуры?
16. Приведите передаточные характеристики МДП-транзисторов со встроенным каналом р- и п-типов проводимости; с индуцированным каналом п- и р-типов.
17. Опишите устройство и принцип действия ПЗС. Применение ПЗС.
18. Объясните принципиальные различия в структуре и принципе работы инверторов на МОП-транзисторах с пассивной и активной нагрузкой.

19. Инверторы на основе КМОП-структур. Характеристики. Особенности расчета.

20. Основные принципы функциональной интеграции элементов при проектировании микросхем.

21. Особенности проектирования приборов, основанных на эффекте сильного поля.

22. Опишите основные режимы включения светочувствительных структур. Характеристики и параметры.

23. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы. Способы повышения их КПД.

24. Опишите принципы проектирования топологии интегральных микросхем. Конструкторская и технологическая документация.

25. Опишите принцип работы варикапа и его параметры. Особенности работы варикапов на высоких частотах.

26. При формировании скрытого слоя биполярного транзистора в кремниевую подложку внедряются ионы мышьяка посредством ионной имплантации. Максимальная концентрация имплантированных примесей, равная $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, должна быть получена на глубине 100 нм. После формирования скрытого слоя проводится операция эпитаксиального наращивания при температуре 1200°C . Концентрация примесей в газовой фазе при проведении операции эпитаксии равна $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Определите энергию имплантированных ионов и дозу имплантации.

Определите глубину n^+ - n -перехода при диффузионном перераспределении примесей из скрытого слоя, если операция эпитаксиального наращивания проводится в течение двух часов.

27. Для формирования скрытого слоя биполярного транзистора в кремниевую подложку внедряются ионы фосфора методом ионной имплантации. Максимальная концентрация имплантированных примесей, равная $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, должна быть получена на глубине 100 нм.

Определите энергию имплантированных ионов, дозу облучения и проективный пробег. Полагаем, что физическая плотность кремниевой подложки составляет 90 % от теоретической плотности кремния.

После формирования скрытого слоя проводится операция эпитаксиального наращивания при температуре 1200°C .

Определите глубину n^+ - n -перехода (отсчитываемую от поверхности исходной подложки) при диффузионном перераспределении примесей из скрытого слоя, если операция эпитаксиального наращивания проводится в течение 2-х часов.

Концентрация n -примесей в эпитаксиальном слое равна $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Получите профиль концентрации фосфора в скрытом слое после проведения операции эпитаксиального наращивания.

28. При формировании изолирующей области в n - p - n биполярном транзисторе проводится диффузия бора в эпитаксиальный слой толщиной 10 мкм, содержащий примесь n -типа (мышьяк) с концентрацией 10^{16} см^{-3} . Эффективная

концентрация примеси на поверхности обрабатываемого участка равна $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Определите время, необходимое для проведения этого процесса при температуре 1200°C .

29. При формировании изолирующей области в n-p-n биполярном транзисторе проводится диффузия бора в эпитаксиальный слой толщиной 10 мкм, содержащий примесь n-типа (мышьяк) с концентрацией 10^{16} см^{-3} . Эффективная концентрация примеси на поверхности обрабатываемого участка равна $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и остается постоянной в течение всего диффузионного процесса.

Рассчитайте время (в часах), необходимое для проведения этой диффузии при 1000, 1100 и 1200°C . Какова температура диффузионного процесса, необходимая для разгонки примеси в реальные времена?

Изобразите концентрационный профиль примесей бора, сформированный в результате диффузионной разгонки.

Предположим, что предварительное внедрение бора (перед проведением диффузионной разгонки) проводится посредством имплантации.

Определите энергию и дозу имплантированных ионов бора, чтобы на глубине, равной 0,3 мкм, максимальная концентрация бора была равна эффективной концентрации примеси на поверхности обрабатываемого участка ($5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Полагаем, что физическая плотность кремниевой подложки составляет 90 % от теоретической плотности кремния.

30. Легирование базы n-p-n биполярного транзистора проводится в два этапа.

На первом этапе проводится имплантация примеси p-типа (бор) в приповерхностную область предварительно выращенного эпитаксиального слоя с концентрацией примеси n-типа $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Доза имплантируемых примесей $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, энергия $E = 90 \text{ кэВ}$.

После имплантации проводится второй этап легирования – операция диффузионной разгонки примесей.

Определите температуру проведения второго этапа легирования базы при длительности этого технологического процесса равной 1,5 часа.

31. Опишите принцип работы варикапа и его параметры.

Спроектируйте варикап со следующими параметрами:

$$C_{\min} = 200 \text{ пФ при } U_{\max} = 12 \text{ В.}$$

$$C_{\max} = 600 \text{ пФ при } U_{\min} = 3 \text{ В.}$$

Максимально допустимое обратное напряжение – 40 В.

32. При изготовлении комплементарных МОП-приборов (КМОП) участок (карман) p-типа формируется в слаболегированной подложке n-типа ($N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Вместо предварительного нанесения применяется внедрение примесей бора посредством ионной имплантации. Имплантация проводится через тонкий слой двуокиси кремния толщиной 60 нм. Предполагается, что двуокись кремния по отношению к имплантируемым ионам ведет себя подобно кремнию. Кроме

того, можно положить, что количество ионов, застрявших в тонком слое SiO_2 , пренебрежимо мало по сравнению с общим количеством имплантируемых ионов. Доза облучения $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

После ионной имплантации проводится операция диффузионной разгонки примесей бора при температуре 1250°C в течение 1 часа.

Определите энергию имплантированных ионов бора, при которой максимум концентрации после имплантации будет расположен на глубине, равной утроенной толщине слоя двуокиси кремния. Чему будет равен максимум концентрации? При расчете профиля имплантированных ионов полагаем, что плотность мишени составляет 90 % от теоретической плотности кремния.

Определите глубину кармана р-типа после операции разгонки по положению р-n-перехода.

Найдите приповерхностную концентрацию бора после диффузии.

Определите, во сколько раз приповерхностная концентрация бора после диффузии меньше максимальной концентрации после имплантации.

Нарисуйте в полулогарифмическом масштабе профиль концентрации бора после проведения диффузии.

33. Опишите принцип работы выпрямительного диода и его параметры.

Спроектируйте диод со следующими параметрами:

- максимально допустимое обратное напряжение: 15 В;
- максимально допустимый прямой ток: 75 мА.

34. Опишите принцип работы туннельного диода и его параметры.

Спроектируйте диод со следующими параметрами:

- максимально допустимое обратное напряжение: 30 В;
- максимально допустимый прямой ток: 10 мА.

35. Опишите принцип работы высокочастотного диода и его параметры.

Спроектируйте диод со следующими параметрами:

- максимально допустимое обратное напряжение: 75 В;
- максимально допустимый прямой ток: 250 мА.

36. Опишите принцип работы стабилитрона и его параметры.

Произведите расчет стабилитронов со следующими параметрами:

- напряжение стабилизации: 18 В;
- токи стабилизации:
минимальный – 5 мА;
максимальный – 25 мА.

37. Опишите принцип работы стабилитрона и его параметры.

Произведите расчет стабилитронов со следующими параметрами:

- напряжение стабилизации: 24 В;
- токи стабилизации:
минимальный – 3 мА;
максимальный – 30 мА.

38. Опишите принцип работы стабилитрона и его параметры.

Произведите расчет стабилитронов со следующими параметрами:

- напряжение стабилизации: 48 В;
- токи стабилизации:

минимальный – 20 мА;
максимальный – 100 мА.

39. Используя типичные значения параметров проектируемого биполярного транзистора [9], оцените время пролета носителей через коллекторную ОПЗ t_x .

Постройте график зависимости $t_x(V_{CB})$. Диапазон изменения V_{CB} (5...40) В.

40. Используя типичные значения параметров проектируемого биполярного транзистора [9], оцените время зарядки коллекторной емкости t_c .

Постройте графики зависимостей $t_c = f(A_E)$ при $l = \text{var}$ ($l = 10, 12,5$ и 15 мкм). Диапазон изменения h (100...200) мкм.

Удельное сопротивление материала коллекторной области $r_c = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

41. Используя типичные значения параметров проектируемого биполярного транзистора [9], оцените время зарядки емкости ОПЗ эмиттера t_e .

Постройте графики зависимостей $t_e = f(A_E)$ при $l = \text{var}$ ($l = 10, 12,5$ и 15 мкм). Диапазон изменения h (100...200) мкм.

42. Опишите принцип работы варикапа и его параметры.

Спроектируйте варикап со следующими параметрами:

$C_{\min} = 20 \text{ pF}$ при $U_{\max} = 15 \text{ В}$.

$C_{\max} = 120 \text{ pF}$ при $U_{\min} = 5 \text{ В}$.

Максимально допустимое обратное напряжение: 38 В.

43. Опишите принцип работы стабилитрона и его параметры.

Произведите расчет стабилитрона со следующими параметрами:

- напряжение стабилизации: 75 В;

- токи стабилизации:

минимальный – 20 мА;

максимальный – 200 мА.

44. Проектирование транзисторных структур с оптимальными параметрами [9].

Выведите выражение для максимальной длины эмиттерной шины h_{\max} через параметры $\frac{kT}{q}$, $\frac{E_1}{h}$ и $R_S(\text{Me})$.

45. Формирование базы n-p-n биполярного транзистора проводится в два этапа. На первом этапе проводится имплантация примеси p-типа (бор) в приповерхностную область предварительно выращенного эпитаксиального слоя с концентрацией примеси n-типа $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Определите дозу имплантируемых ионов бора, энергию и проективный пробег при условии, что максимум концентрации бора $C_{\max} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ должен сформироваться на глубине, равной 0,3 мкм. Полагаем, что физическая плотность кремниевой подложки составляет 95 % от теоретической плотности кремния. После имплантации проводится второй этап легирования – операция диффузионной разгонки примесей.

Определите температуры проведения второго этапа легирования базы при длительностях этого технологического процесса 1, 2 и 3 часа, чтобы р-п-переход на границе раздела база–коллектор (эпитаксиальный слой) сформировался на глубине 1 мкм.

Указания: вначале найдите значение характеристического параметра $\sqrt{D_{2B} \cdot t_{2B}}$ посредством итерационной процедуры решения соответствующего трансцендентного уравнения, а затем при выбранной величине t_{2B} определите коэффициент диффузии бора D_{2B} и, наконец, из выражения для $D = f(T)$ определите соответствующее значение T_{2B} .

46. Следует провести диффузию бора в легированный мышьяком эпитаксиальный слой. Перед началом диффузии концентрация мышьяка в эпитаксиальном слое равна 10^{16} см^{-3} .

Определите время проведения диффузии, необходимое для получения слоевого сопротивления равного 200 Ом/кв, и глубину перехода $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

47. Считая, что ток в эмиттерной шине не зависит от положения, получаем выражение для максимальной длины эмиттерной шины h_{MAX} в следующем виде:

$$h_{\text{MAX}} = \left[\frac{kT}{q} \cdot \frac{l}{(I_{E1}/h) \cdot R_s(\text{Me})} \right]^{1/2} (2\beta_F)^{1/4}.$$

Полагая, что падение напряжения поперек базы V_R более чем $\frac{kT}{q} = 26 \text{ мВ}$ неприемлемо, постройте графики зависимостей $h_{\text{MAX}} = f(l)$ при $\beta_F = \text{var}$ (40, 50 и 60) и $\frac{I_{E1}}{h} = 0,25 \text{ мА/мкм}$. Диапазон изменения l (10...20) мкм.

Слоевое сопротивление слоя металлизации алюминия $R_s(\text{Al}) = 0,05 \text{ Ом/кв}$.

48. Определите ток в эмиттере I_{E1} , при котором значителен эффект вытеснения, используя данные, полученные в [9], и постройте зависимости $I_{E1}(h)$ при $l = \text{var}$ ($l = 10, 12,5$ и 15 мкм). Диапазон изменения h (100...200) мкм.

Удельное сопротивление материала базы $\rho_B = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

49. При изготовлении комплементарных МОП-приборов карман р-типа формируется в слаболегированной подложке п-типа ($N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) посредством введения бора имплантацией через предварительно выращенный слой двуокиси кремния толщиной 600 ангстрем.

Определите энергию имплантированных ионов бора, при которой максимум концентрации после имплантации будет расположен на глубине, равной утроенной толщине слоя двуокиси кремния.

После ионной имплантации проводится операция диффузионной разгонки примесей бора при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 часа.

Определите глубину кармана р-типа после операции разгонки по положению р-п-перехода. Найдите приповерхностную концентрацию бора после разгонки и слоевое сопротивление.

50. Постройте графики зависимостей тока в эмиттере при высоком уровне инжекции I_{E2} , используя данные, полученные в [9], при $l = \text{var}$ ($l = 10, 12,5$ и 15 мкм). Диапазон изменения h (100...200) мкм.

Удельное сопротивление материала базы $\rho_B = 0,2$ Ом·см.

4. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расчет ОПЗ р-n-переходов. Определение верхнего предела толщины базы диода.
2. Выбор структуры диодов. Особенности проектирования интегральных диодов.
3. Расчет частотных свойств диодных структур.
4. Выбор типа электропроводности и исходного полупроводника проектирования диодных структур.
5. Расчет прямой ветви ВАХ диода.
6. Расчет пробивного напряжения диодных структур при туннельном пробое.
7. Расчет пробивного напряжения диодных структур при тепловом пробое.
8. Расчет нижнего и верхнего пределов удельного сопротивления базы диода.
9. Расчет конструктивных параметров диодных структур.
10. Влияние температуры на прямую ветвь ВАХ диода. Особенности проектирования стабилитронов. Расчет параметров.
11. Принцип работы, конструкция, параметры и особенности проектирования фотоэлементов.
12. Принцип работы, конструкции, параметры и особенности проектирования диодов с барьером Шоттки.
13. Выбор корпуса диода и расчет его параметров.
14. Упрощенные правила проектирования элементов ИМС. Правила проектирования ИМС. Особенности проектирования геометрии биполярных транзисторов в плане.
15. Влияние конструкторско-технологических параметров на пробивное напряжение р-n-переходов.
16. Расчет частоты отсечки биполярного транзистора. Базовый технологический процесс создания биполярных ИМС. Особенности формирования дискретных БПТ.
17. Конструкции, принцип работы, особенности проектирования дискретных БПТ.
18. Одномерная модель биполярного транзистора. Расчет эффективности эмиттера.
19. Конструкции, параметры, особенности проектирования интегральных транзисторных структур.

20. Расчет числа Гумеля для базы биполярного транзистора.
21. Ограничения по напряжению, накладываемые на проектирование биполярного транзистора.
22. Расчет эффективной периферии эмиттера биполярного транзистора.
23. Факторы, влияющие на коэффициент переноса носителей через базу биполярного транзистора. Одномерная модель биполярного транзистора.
24. Расчет частотных характеристик биполярного транзистора.
25. Расчет числа Гумеля для эмиттера биполярного транзистора.
26. Влияние сильного легирования эмиттера на физические процессы в биполярном транзисторе.
27. Расчет полевых транзисторов с изолированным затвором. Ограничения на проектирование структур.
28. Проектирование МОП-инверторов. Статистический анализ МОП-инвертора с резистивной нагрузкой.
29. Сравнительные характеристики параметров полевых и биполярных транзисторов.
30. Расчет параметров КМОП-инверторов.
31. Порядок расчета МОП-транзистора со встроенным каналом.
32. Конструкция и порядок проектирования КМОП-инверторов.
33. Паразитные структуры в МОП-элементах, частотные свойства МОП-элементов. Паразитные параметры (R , L , C) металлизации.
34. Расчет и проектирование МОП-инверторов. Нагрузка с обогащением.
35. Основные параметры и характеристики полевых транзисторов. Расчет малосигнальных параметров МОП-транзисторов.
36. Анализ КМОП-инверторов. Паразитные структуры.
37. Пороговое напряжение МОП-транзисторов с индуцированным каналом. Особенности его расчета.
38. Расчет малосигнальных параметров полевых транзисторов с барьером Шоттки. Оптимизация частотных свойств.
39. Базовая технология и ее связь с проектированием МОП-транзисторов. Проектирование фотошаблонов.
40. Расчет и проектирование МОП-инверторов. Линейная нагрузка с обогащением.
41. Конструирование и технологические ограничения на проектирование полевых структур. Выбор параметров канала МОП-транзистора со встроенным каналом.
42. Расчет конструктивных параметров МОП-транзисторов со встроенным каналом. Выбор топологии транзисторов.
43. Расчет технологического и приборного параметров проводимости МОП-транзисторов.
44. Проектирование МОП-транзисторов. Ограничения технологические и конструктивные.
45. Функциональная интеграция элементов микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пачинин, В. И. Учебный электронно-методический комплекс по курсу «Расчет и проектирование полупроводниковых приборов и интегральных микросхем» / В. И. Пачинин. – Минск : БГУИР, 2006.
2. Березин, А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А. С. Березин, О. А. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1992.
3. Пономарев, М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА / М. Ф. Пономарев. – М. : Радио и связь, 1982.
4. Конструирование и технология микросхем / под ред. Л. А. Коледова. – М. : Высш. шк., 1984.
5. Бубенников, А. М. Физика и технология проектирования биполярных элементов Si-БИС / А. М. Бубенников, А. Д. Садовников. – М. : Радио и связь, 1990.
6. Крутякова, М. Г. Проектирование и расчет полупроводниковых приборов / М. Г. Крутякова, М. А. Чарыков, В. В. Юдин. – М. : Радио и связь, 1988.
7. Мелляр, Р. Элементы интегральных схем / Р. Мелляр, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989.
8. Матсон, Э. А. Справочное пособие по конструированию микросхем / Э. А. Матсон, Д. В. Крыжановский. – Минск : Выш. шк., 1982.
9. Компьютерное проектирование конструкторских и технологических параметров элементов интегральных схем (инженерно-физическое приближение) : метод. указания к лаб. практикуму по курсу «Расчет и проектирование полупроводниковых приборов и интегральных микросхем» / сост. В. В. Нелаев, В. И. Пачинин. – Минск : БГУИР, 1996.
10. Введение в микроэлектронику : учеб. пособие для курсов лекций и лабораторных работ по дисц. «Расчет и проектирование элементов интегральных схем и полупроводниковых приборов», «Основы САПР в микроэлектронике», «Моделирование технологических процессов и элементов интегральных схем», «Физика активных элементов интегральных схем» для студ. спец. Т. 07 01 «Микроэлектроника» / сост. В. В. Нелаев. – Минск : БГУИР, 1999.

Св. план 2007, поз. 92

Учебное издание

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
И ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ (часть 4)

Методические указания и контрольные задания
для студентов специальности I-42 01 01 «Микро- и наноэлектронные
технологии и системы» и I-42 01 03 «Квантовые информационные системы»
заочной и дистанционной форм обучения

Составитель

Пачинин Виталий Иванович

Редактор М. В. Тезина
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать 21.04.2008.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,0.

Формат 60×84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 50 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,28.
Заказ 688.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6

Библиотека БГУИР