

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микроэлектроники

**ФИЗИКА АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Методические указания и контрольные задания
по дисциплине «Физика активных элементов интегральных схем.
Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы»
для студентов специальности 42 01 02 «Микроэлектроника»
заочной и дистанционной форм обучения

Минск 2003

УДК 621.382.049.77 (075.8)

ББК 32.844.1 я 73

Ф 48

Составители:

Б.С. Колосницын, А.В. Короткевич

Ф 48

Физика активных элементов интегральных схем: Метод. указания и контрольные задания по дисц. «Физика активных элементов интегральных схем. Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы» для студ. спец. 42 01 02 «Микроэлектроника» заочной и дистанционной форм обучения./ Сост. Б.С. Колосницын, А.В. Короткевич. — Мн.: БГУИР, 2003 – 16 с.

Данная работа включает 4 темы. К каждой теме прилагаются основная и дополнительная литература, подробные методические указания и вопросы для самопроверки. Приведены задачи и вопросы, входящие в индивидуальное контрольное задание.

УДК 621.382.049.77 (075.8)

ББК 32.844.1 я 73

© Колосницын Б.С., Короткевич А.В.,
составление, 2003

© БГУИР, 2003

УДК 621.382.049.77 (075.8)

Содержание

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Тема 1. Электронно-дырочный переход

Тема 2. Невыпрямляющий (омический) контакт

Тема 3. Биполярные транзисторы

Тема 4. Полевые транзисторы

Контрольные задания

Вопросы и задачи

Библиотека БГУИР

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Изучение дисциплины «Физика активных элементов интегральных схем» следует вести последовательно по темам. После ознакомления с темой и методическими указаниями необходимо подобрать литературу и законспектировать основные положения темы. При возникновении вопросов следует обратиться на кафедру (устно или письменно).

Программа дисциплины соответствует учебному плану в объеме 51 лекционного часа.

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

Распределение дисциплины по темам

Наименование темы	Количество лекционных часов
Введение	2
1. Электронно-дырочный переход	18
2. Невыпрямляющий (омический) контакт	3
3. Биполярные транзисторы	16
4. Полевые транзисторы	12

Литература

Основная

1. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. - М.: Мир, 1989.
2. Колосницын Б.С. Элементы интегральных схем. Физические основы. - Мн.: БГУИР, 2001.

Дополнительная

1. Ферри Д., Эйкерс П., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем. – М.: Мир, 1991.
2. Ржевкин К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов. – М.: МГУ, 1986.
3. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы. - М.: Мир, 1985.

ТЕМА 1. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Образование электронно-дырочного (р-п) перехода. Резкий и плавный р-п переходы. Распределение объемного заряда, поля и потенциала в резком и плавном р-п переходах. Высота потенциального барьера и зависимость ее величины от различных факторов. Барьерная емкость.

Граничная концентрация неосновных носителей заряда в базе р-п перехода.

Электронно-дырочный переход при нарушении теплового равновесия: инжекция и экстракция. Распределение концентрации неосновных носителей в базе р-п перехода. Аналитические выражения вольт-амперных характеристик (ВАХ) «идеализированного» р-п перехода (диоды) при малых плотностях тока.

Генерация и рекомбинация носителей заряда в области пространственно-го заряда р-п перехода. Особенности работы р-п перехода при высоком уровне инжекции (при больших плотностях тока). Вольт-амперные характеристики р-п перехода (диода) при высоких уровнях инжекции. Диффузионная емкость диода.

Виды пробоя р-п перехода. Лавинный и туннельный пробой. Тепловой пробой как вторичный пробой биполярного транзистора. Возможности появления различных видов пробоя.

Переходные процессы в диоде при высоком и малом уровнях инжекции.

Зависимость величин основных параметров диода: обратного и прямого токов, прямого падения напряжения и барьерной емкости от температуры.

Литература

Основная

[1, с. 210-261, 267-307; 2, с. 4-40].

Дополнительная

[2, с. 69-80, 132; 3, с. 112-158].

Методические указания

Изучению физических явлений в р-п переходе уделите особое внимание, так как знание их необходимо для понимания принципа работы многих полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, тиристоров и т.д. Необходимо понять природу возникновения обедненного слоя (области пространственного заряда) в р-п переходе и иметь четкое представление о механизме образования потенциального барьера р-п перехода и о природе возникновения барьерной емкости.

При изучении распределения неосновных носителей в базе р-n перехода (диода) обратите внимание на соотношение, связывающее величины инжектированных неосновных носителей с концентрацией основных носителей при тепловом равновесии. Рассматривая аналитические выражения ВАХ идеализированного диода, обратите внимание на допущения, принятые при их выводе. Определите составляющие прямого и обратного токов диода. Уясните физическую сущность токов генерации и рекомбинации в р-n переходе и их влияние на величины обратного и прямого токов в зависимости от материала диода.

Внимательно проанализируйте три важнейших эффекта, к которым приводит высокий уровень инжекции (ВУИ). Обратите внимание на изменения в аналитических выражениях ВАХ при ВУИ.

Рассмотрите условия возникновения туннельного и лавинного пробоев, связав возможность их появления с концентрацией носителей, прилегающих к р-n переходу областей. Проанализируйте соотношения величин напряжений и напряженностей полей лавинного и туннельного пробоев, а также знак их температурных коэффициентов.

Выясните природу диффузионной емкости. Ознакомьтесь с эюрами напряжений и токов при работе диода на импульсах большой и малой плотностях токов, анализируя их при работе диода, как в режиме генератора тока, так и в режиме генератора напряжения.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какова природа поверхностного (объемного) заряда р-n перехода?
2. Какие вы знаете выражения для определения величины контактной разности потенциалов?
3. Объясните вольт-амперную характеристику диода.
4. Можно ли по распределению неосновных носителей в базе диода судить о величине плотности тока через диод? Почему?
5. Чем отличаются вольт-амперные характеристики диодов с толстой и тонкой базой?
6. Какая составляющая обратного тока является преобладающей в кремниевых диодах?
7. Объясните природу диффузионной емкости диода.
8. Какие явления надо учитывать при работе диода при высоком уровне инжекции?
9. Как изменяется пробивное напряжение диода при лавинном и туннельном пробоях с увеличением температуры?
10. Каковы особенности теплового пробоя в реальных р-n переходах?
11. Как изменяются частотные свойства диода при увеличении температуры?

ТЕМА 2. НЕВЫПРЯМЛЯЮЩИЙ (ОМИЧЕСКИЙ) КОНТАКТ

Контакт двух полупроводников с одним типом электропроводности.
Параметры и свойства омического контакта.
Энергетическая зонная диаграмма омического контакта.

Литература

Основная

[1, с. 186-192; 2, с. 47-49].

Дополнительная

[2, с. 68-80].

Методические указания

При рассмотрении физических явлений в контактах металл-полупроводник обратите внимание на причины, вызывающие искривление энергетических уровней полупроводника в приконтактной области. Выясните, при каких условиях контакт металл-полупроводник считается омическим.

Обратите внимание на свойства контактов n^+ - n и p^+ - p , особенно в аспекте возможности накопления неосновных носителей в слаболегированной области контакта.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Почему контакты n^+ - n и p^+ - p являются невыпрямляющими?
2. Почему для создания омического контакта необходимо до вырождения легировать поверхность полупроводника, граничащую с металлом?
3. Назовите параметры омического контакта и дайте их определения.

ТЕМА 3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Физические явления в биполярных транзисторах. Схема включения транзистора с общей базой и общим эмиттером.

Модель Эберса-Молла.

Распределение стационарных потоков носителей заряда. Коэффициент передачи тока и его составляющие для нормального и инверсного включения транзистора. Основные статистические параметры транзистора. Входные и выходные вольт-амперные характеристики транзистора, включенного по схеме с

общим эмиттером и с общей базой. Пробой транзистора. Смыкание коллекторного и эмиттерного переходов. Вторичный пробой.

Зависимость основных параметров транзисторов от температуры и режима смещения по постоянному току.

Схема малосигнальных параметров транзисторов. Физическая эквивалентная схема транзистора.

Низкочастотные параметры транзисторов, включенных по схемам с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором: k_i , k_u , k_p , $r_{вх}$, $r_{вых}$.

Отклонение от модели Эберса-Молла по току и напряжению: эффект Кирка, вытеснение тока эмиттера на край эмиттера, эффект Эрли и его следствия.

Переходные процессы и импульсные свойства транзистора. Анализ переходных процессов в транзисторе с общей базой и общим эмиттером. Частотные свойства транзистора. Характеристические частоты транзистора. Методы повышения величины частоты отсечки.

Литература

Основная

[1, с. 326-361, 378-401; 2, с. 50-90].

Дополнительная

[1, с. 113-165; 2, с. 142-198, 166-177; 3, с. 162-200].

Методические указания

Изучение биполярного транзистора целесообразно начать с ознакомления упрощенной (одномерной) его структуры. Вспомните, что такое эмиттер, база, коллектор, нормальное и инверсное включения транзистора.

Принцип действия биполярного транзистора рассмотрите на примере одномерной модели транзистора, включенного по схеме с общей базой (ОБ). Затем ознакомьтесь с двумя другими схемами включения транзистора – с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). Обратите внимание на величины коэффициентов передачи по току и напряжению.

Рассмотрите возможные стационарные потоки свободных носителей заряда в транзисторе. Определите составляющие базового тока и обратного тока коллектора. Обратите внимание на их знаки.

Ознакомьтесь с основными статистическими параметрами транзистора, работающего в трех режимах: активном, насыщения и отсечки. Сравните коэффициенты инжекции для нормального и инверсного включения транзистора, коэффициент переноса носителей через базу.

Изучая низкочастотные параметры транзисторов, обратите внимание на соотношения величин коэффициентов усиления по мощности схем ОБ и ОЭ, а также на величины входного и выходного сопротивлений схемы ОК.

Изучая входные и выходные характеристики транзисторов, включенных по схемам ОБ и ОЭ, обратите внимание на следующее: внешний вид, смещение кривых влево и вправо на входных характеристиках, особенности выходных характеристик (наличие кривых в другом квадранте, наклон характеристик). При рассмотрении явления пробоя транзистора обратите внимание на такие параметры, как напряжение пробоя в схеме ОЭ при отключенной базе, коэффициент передачи тока эмиттера с учетом лавинного умножения носителей в коллекторном переходе, напряжение смыкания.

Объясните характер зависимостей коэффициента передачи тока базы и обратного тока коллектора от температуры.

Рассмотрите причины зависимости коэффициента передачи тока эмиттера (базы) от величины тока эмиттера. Объясните, как влияют величины тока и сопротивления базы на эффект оттеснения тока эмиттера на край эмиттера. Обратите внимание на два следствия эффекта Эрли. Свяжите этот эффект с видом входных и выходных характеристик транзистора.

Изучение частотных свойств транзистора начните с рассмотрения физических факторов, ограничивающих верхний частотный предел работы транзистора. Дайте определения предельной и граничной частот усиления по току, максимальной частоте генерации, при этом обратите внимание на пути их повышения.

Ознакомьтесь с основными параметрами, характеризующими импульсные свойства транзистора, и особенностями временных зависимостей тока эмиттера (базы) и тока коллектора при включении транзистора по схеме с общей базой и с общим эмиттером.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Объясните принципы усиления по напряжению и току в биполярных транзисторах.
2. Чем вызвано наличие в базе транзистора электрического поля?
3. Почему напряжение лавинного пробоя в схеме ОБ намного больше, чем в схеме ОЭ, особенно если в схеме ОЭ отключена база?
4. Изобразите семейство входных и выходных характеристик транзисторов, включенных по схеме с общей базой и с общим эмиттером, и укажите на их особенности.
5. В чем состоит эффект Эрли?
6. Назовите основные статистические параметры транзистора, работающего в активном режиме, режимах насыщения и отсечки.
7. Почему схему включения с общим коллектором называют «эмиттерный повторитель»?

8. Почему конструкторы «борются» с эффектом отеснения тока эмиттера на край эмиттера?
9. Как и почему коэффициент передачи тока эмиттера зависит от величины постоянного тока эмиттера?
10. Дайте определение граничной частоты усиления по току (частоты отсечки). Какие еще существуют характеристические частоты транзистора?

ТЕМА 4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Общие сведения: области транзистора и их определения, разновидности, принципы модуляций сопротивления канала, сравнение с биполярными транзисторами.

Полевой транзистор с управляющим р-n переходом: принцип действия, статические ВАХ и их аналитические выражения, физическая эквивалентная схема и частотные свойства.

Идеальный конденсатор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Энергетические зонные диаграммы идеальных и реальных МДП (МОП)-структур. Поверхностные состояния в системе Si-SiO₂. Энергетические зонные диаграммы, поясняющие образование канала в р-канальных МОП-транзисторах, работающих в режиме обогащения (индуцированный канал). Аналитическое выражение для величины порогового напряжения и пути ее регулирования. Статические выходные и проходные (сток-затворные) характеристики. Аналитические выражения ВАХ для крутой и пологой частей выходной статической характеристики. Статические и дифференциальные параметры МОП-транзистора.

Физические эквивалентные схемы. Аналитические выражения для граничной частоты (частоты отсечки). Эффекты короткого канала. Анализ влияния эффектов короткого канала на величины основных параметров транзистора.

МОП-транзисторы, работающие в режиме обеднения (со встроенным каналом): структура, принцип работы, статические выходные и переходные характеристики.

Приборы с зарядовой связью: принцип работы, управление, ввод и вывод информации, частотные ограничения.

Литература

Основная

[1, с. 450-497, 503-527; 2, с. 95-136].

[1, с. 29-108; 3, с. 209-219, 224-254].

Методические указания

Изучение темы «Полевые транзисторы» начните с рассмотрения разновидностей (канальные и МОП-транзисторы) и типов (n- и p-канальные) полевых транзисторов и принципов модуляции сопротивления канала.

Рассмотрение полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом следует начать с повторения зависимости ширины обедненной области p-n перехода от величины и полярности приложенного к нему внешнего напряжения. При изучении выходной характеристики обратите внимание на три характерные области: крутую, пологую и область пробоя. Рассматривая переходную характеристику транзистора, обратите внимание на то, что кривые располагаются в одном квадранте. Дайте определение напряжения отсечки. Ознакомьтесь с эквивалентной схемой и частотными свойствами.

Изучение принципа работы полевого транзистора с изолированным затвором (МДП-транзистор) следует начать с рассмотрения идеального МДП-конденсатора. Ознакомьтесь с энергетическими зонными диаграммами идеальных МДП-структур. Уясните, к каким изменениям в энергетических зонных диаграммах приводит наличие поверхностных состояний и разности работы выхода металл-полупроводник. Ознакомьтесь с классификацией поверхностных состояний и зарядов.

Рассмотрите изменение сопротивления приконтактного (с диэлектриком) слоя полупроводника в зависимости от величины и полярности приложенного к такому диоду внешнего напряжения. Уясните особенности работы полевых транзисторов с индуцированным и встроенным каналами. Ознакомьтесь с выходной и проходной вольт-амперными характеристиками, параметрами МДП-транзисторов, понятием "пороговое напряжение" и рассмотрите возможные пути регулирования его величины. Рассмотрите эквивалентные схемы и частотные свойства МДП-транзисторов и укажите пути увеличения частотного диапазона их работы.

Рассмотрение эффектов короткого канала начните с определения понятия «короткоканальности» транзистора. Обратите внимание на зависимость величины порогового напряжения как от близости ОПЗ стока и истока, так и от эффекта «горячих» электронов в n- и p-канальных транзисторах.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В чем принципиальные отличия полевого транзистора от биполярного?
2. В чем заключаются принципы усиления в полевом канальном и МОП-транзисторах?

3. От каких параметров зависит величина порогового напряжения МОП-транзистора?
4. Когда в МОП-транзисторе наблюдаются «условия плоских зон»?
5. Чем определяется величина частоты отсечки МОП-транзистора?
6. Какие эффекты «короткого канала» Вы знаете?
7. На какие параметры и как влияют эффекты «короткого канала»?

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Каждый студент выполняет вариант контрольного задания, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в зачетной ведомости.

Номера вопросов и задач, составляющих контрольное задание для каждого варианта, указаны в таблице.

Номер варианта	Номера вопросов и задач	Номер варианта	Номера вопросов и задач	Номер варианта	Номера вопросов и задач
1	1, 24	10	10, 33	18	18, 41
2	2, 25	11	11, 34	19	19, 42
3	3, 26	12	12, 35	20	20, 43
4	4, 27	13	13, 36	21	21, 44
5	5, 28	14	14, 37	22	22, 45
6	6, 29	15	15, 38	23	23, 46
7	7, 30	16	16, 39	24	47, 51
8	8, 31	17	17, 40	25	48, 52
9	9, 32				

Вопросы и задачи

1. Чем обусловлены диффузионная и барьерная емкости р-п перехода?
2. В чем трудность получения идеального омического контакта?
3. Почему лавинный пробой возникает при больших напряжениях, чем туннельный, в то время как критическая напряженность электрического поля лавинного пробоя меньше? Как изменяются величины $U_{пр}$ обоих типов пробоя от температуры? Почему?
4. Начертите и объясните зависимости обратного тока р-п перехода (диода) от обратного напряжения для следующих условий: а) германиевый р-п переход, толстая база; б) германиевый р-п переход, тонкая база; в) кремниевый р-п переход, толстая база; г) кремниевый р-п переход, тонкая база.

5. Как изменяются частотные свойства р-п перехода с увеличением температуры при работе с высоким и малым уровнями инжекции? Почему?
6. Объясните, почему даже при равенстве площадей эмиттера и коллектора биполярный транзистор нельзя считать полностью обратимым прибором.
7. Каково соотношение между величинами обратных токов биполярного транзистора $I_{КБ0}$, $I_{КЭ0}$, $I_{КБК}$? Почему?
8. Определите h-параметры по статистическим характеристикам биполярных транзисторов.
9. Напишите выражения для коэффициентов передачи тока эмиттера и коллектора одномерной теоретической модели транзистора. Что такое эффективность коллектора и каковы пути ее увеличения?
10. Опишите основные статистические параметры биполярного транзистора для трех областей его работы.
11. Объясните характер зависимости h_{21} от температуры. В какой схеме включения транзистора с общей базой или с общим эмиттером этот параметр в большей степени зависит от температуры и почему?
12. Предположим, что площади эмиттера и коллектора равны. Какая из барьерных емкостей этих переходов больше и почему? Какая из этих емкостей сильнее влияет на работу транзистора и почему?
13. Объясните, что такое предельная и граничная частоты усиления по току и максимальная частота генерации. Каково соотношение между их величинами? Каковы пути их повышения?
14. Определите коэффициент инжекции, коэффициент переноса носителей через базу и коэффициент передачи тока для нормального и инверсного включения транзистора.
15. Объясните график зависимости коэффициента передачи тока базы от тока эмиттера.
16. Опишите преимущества и недостатки дрейфового транзистора (по сравнению с бездрейфовым).
17. Используя энергетические диаграммы МДП-структур, объясните принцип работы р-канального МДП-транзистора с индуцированным каналом.
18. Опишите эффект Эрли и два его следствия.
19. В чем причина вытеснения тока эмиттера на край эмиттера? Как "борются" с этим эффектом?
20. Почему время включения транзистора в схеме ОЭ в (β_N+1) больше, чем в схеме ОБ?
21. Что произойдет с величиной частоты отсечки (граничной частотой) биполярного транзистора при значительном увеличении плотности эмиттерного тока?
22. Опишите особенности работы полевых транзисторов (по сравнению с биполярными): управление, частотные свойства, технологичность, экономичность.
23. Из вольт-амперной характеристики, измеренной на внешних выводах реального диода с р-п переходами, следует, что при прямом токе 104 мА на-

клон характеристики равен $10,25 \text{ Ом}$, а при токе 10 мА напряжение (на выводах) равно $0,8 \text{ В}$. Рассчитайте: 1) сопротивление объема диода; 2) обратный ток насыщения.

24. Определите ток насыщения эмиттерного перехода в транзисторе, если коэффициент передачи тока $\alpha_N = 0,988$, сопротивление базы $r_B = 1,1 \text{ кОм}$, а ток коллектора $I_K = 1 \text{ мА}$ при напряжении $U_{ЭБ} = 0,8 \text{ В}$.
25. Кремниевый p-канальный МОП-транзистор с алюминиевым затвором имеет параметры: длина канала $L = 5 \text{ мкм}$, ширина канала $Z = 100 \text{ мкм}$, толщина подзатворного окисла SiO_2 $d = 100 \text{ нм}$, концентрация примеси в подложке $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность дырок в канале $\mu_p = 200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, плотность поверхностных состояний $N_{SS} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Температура $T = 300 \text{ К}$. Исток соединен с подложкой и заземлен. Определите: 1) пороговое напряжение идеального МОП-транзистора; 2) крутизну S в пологой области ВАХ при $U_{зи} = 2U_{пор}$.
26. Как изменится величина частоты отсечки (граничной частоты) биполярного транзистора при переходе его работы в микрорежим?
27. Опишите составляющие базового тока биполярного транзистора, дайте их определение и укажите на возможные пути уменьшения величины базового тока.
28. Как изменится величина порогового напряжения короткоканального МОП-транзистора по отношению к длинноканальному из-за близости ОПЗ стока и истока?
29. Виды пробоя МОП-транзисторов. В чем заключаются особенности пробоя короткоканального МОП-транзистора?
30. Способы ввода заряда в ПЗС.
31. Способы детектирования заряда в ПЗС.
32. Кремниевый диод. Резкий p-n переход. Концентрация примесей в эмиттере $N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, в базе - $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина базы - 10 мкм , толщина эмиттера - 5 мкм . Время жизни носителей в базе $\tau_p = 10^{-5} \text{ с}$, в эмиттере - $\tau_n = 10^{-8} \text{ с}$. Температура $T = 300 \text{ К}$. Площадь p-n перехода $S = 10^{-4} \text{ см}^2$. Определите: 1) ток насыщения, 2) барьерную емкость.
33. Полупроводниковый диод изготовлен из германия сплавлением. Эмиттер p-типа легирован бором до концентрации $N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. База n-типа легирована фосфором до концентрации $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Диффузионные длины неосновных носителей заряда в базе $L_p = 2,12 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, в эмиттере $L_n = 4,74 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Температура $T = 300 \text{ К}$. Определите зависимость токов рекомбинации и генерации в области p-n перехода от напряжения $I_R = f(U)$, $I_G = f(U)$.
34. При напряжении на выводах кремниевого диода $U = 0,8 \text{ В}$ прямой ток $I = 10 \text{ мА}$. Температура $T = 300 \text{ К}$. Сопротивление базы $R_B = 2,5 \text{ Ом}$. Определите величину тока насыщения.
35. Диод с p-n переходом изготовлен из материала, для которого $\sigma_p/\tau_n = 12$, а отношение толщин p- и n-областей равно $W_n/W_p = 10$. Найти отношение электронного тока к дырочному, когда диод смещен в прямом направлении

на 0,5 В (пренебрегите эффектами сильной инжекции, сопротивлением объема и утечки).

36. Кремниевый n-канальный транзистор с поликремниевым затвором p-типа: толщина подзатворного диэлектрика $d = 100$ нм, длина канала $L = 1,5$ мкм, концентрация примеси в подложке $N_a = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³; плотность поверхностных состояний $N_{SS} = 10^{10}$ см⁻²; эффективная подвижность в канале в 2,5 раза меньше, чем в объеме. Температура $T = 300$ К. Определите частоту отсечки f_T для $U_{зи} = 2U_{пор}$.

37. Показать, что дифференциальное сопротивление коллекторного перехода биполярного транзистора ($r_k = dU_{КБ}/dI_K$ при $I_E = \text{const}$) с учетом эффекта Эрли равно

$$R_k = R_K W_B (1 + \beta_k) / (2m x_{dk}),$$

где m – постоянная, равная 1/2 для резкого и 1/3 для плавного перехода, x_{dk} – ширина ОПЗ.

38. Кремниевый p⁺-n диод. Считая p-n переход резким и базу тонкой, определите отношение плотностей тока при высоком и малом уровнях инжекции для следующих условий: ширина базы – 5 мкм, удельное сопротивление базы $\rho_B = 0,3$ Ом·см, температура $T = 300$ К, диод полностью открыт, падение напряжения на базе равно нулю.

39. Кремниевый p-канальный МОП-транзистор с поликремниевым затвором p-типа: толщина подзатворного окисла $d = 70$ нм; ширина канала $Z = 40$ нм; длина канала $L = 4$ мкм; плотность поверхностных состояний $N_{SS} = 2 \cdot 10^{10}$ см⁻²; концентрация примесей в подложке $N_d = 10^{16}$ см⁻³; эффективная подвижность в канале в 2,5 раза меньше, чем в объеме. Температура $T = 300$ К. Определите частоту отсечки f_T для $U_{зи} = 2U_{пор}$.

40. Кремниевый диод: величина обратного тока $I_{обр} = 5 \cdot 10^{-12}$ А, величина тока генерации в p-n переходе $I_G = 4,98 \cdot 10^{-12}$. Температура $T = 300$ К. Считая, что диод полностью открыт, определите величину прямого тока. Падением напряжения в объеме базы пренебречь.

41. Кремниевый n-канальный МОП-транзистор с алюминиевым затвором: концентрация примесей в подложке $N_a = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³; плотность поверхностных состояний $N_{SS} = 10^{10}$ см⁻²; толщина подзатворного окисла $d = 60$ нм. Температура $T = 300$ К; эффективная подвижность носителей в канале в 2,5 раза меньше, чем в объеме; длина канала $L = 3,5$ мкм. Определите граничную частоту для $U_{зи} = 2U_{пор}$.

42. Кремниевый n-p-n транзистор: ширина базы – 5 мкм; ток коллектора $I_K = 1$ мА; сопротивление базы $r_B = 200$ Ом; коэффициент инжекции эмиттера $\gamma = 0,999$; время жизни неосновных носителей в базе $\tau_n = 10^{-8}$ с; концентрация примеси в базе около эмиттера $N_{БЭ} = 10^{18}$ см⁻³; дрейфовый коэффициент $m = 5$; напряжение на выводах эмиттер-база $U_{ЭБ} = 0,9$ В. Температура $T = 300$ К. Определите ток насыщения эмиттерного перехода.

43. Считая, что p-n переходы идеальные и все электрофизические параметры у них одинаковые, определить обратный ток кремниевого диода, если величина обратного тока аналогичного германиевого диода равна 10^{-7} А.

44. Определите входное сопротивление кремниевого биполярного транзистора на низкой частоте, включенного по схеме ОБ. Ток насыщения эмиттера $I_{ЭС} = 5 \cdot 10^{-13}$ А. Температура $T = 300$ К. Эмиттерный p-n переход полностью открыт. Падением напряжения на сопротивлении базы пренебречь.
45. Кремниевый n-канальный МОП-транзистор с поликремниевым затвором n-типа: толщина подзатворного окисла $d = 60$ нм; ширина канала $Z = 20$ мкм, длина канала $L = 3$ мкм; плотность поверхностных состояний $N_{SS} = 10^{10}$ см⁻². Концентрация примеси в подложке $N_a = 10^{16}$ см⁻³. Эффективная подвижность носителей в канале в 2 раза меньше, чем в объеме. Температура $T = 300$ К. Определить крутизну в пологой области выходной ВАХ для $U_{зи} = 2U_{пор}$.
46. Кремниевый диод полностью открыт, величина тока насыщения $I_S = 5 \cdot 10^{-13}$ А; ширина базы – 10 мкм; коэффициент диффузии неосновных носителей в базе $D_p = 12$ см²/с; время жизни неосновных носителей в базе $\tau_p = 10^{-6}$ с. Температура $T = 300$ К. Определить диффузионную емкость $C_{диф}$. Падением напряжения в объеме базы можно пренебречь.
47. Кремниевый n-p-n транзистор включен по схеме ОЭ, ток насыщения эмиттера $I_{ЭС} = 5 \cdot 10^{-13}$ А; ток коллектора $I_K = 2$ мА; температура $T = 300$ К; эмиттерный переход полностью открыт.
48. Кремниевый n-p-n транзистор включен по схеме ОЭ, напряжение Эрли $|U_A| = 80$ В, коэффициент переноса носителей через базу $\alpha_T = 0,997$, отношение удельных сопротивлений базы и эмиттера $\rho_B/\rho_E = 5 \cdot 10^3$, отношение ширины базы к диффузионной длине неосновных носителей в эмиттере W_B/L_p . Определите дифференциальное сопротивление коллекторного перехода для тока базы $I_B = 10$ мкА.
49. Кремниевый n-p-n транзистор включен по схеме ОЭ, концентрация примесей в базе $N_a = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha_N = 0,99$. Считая коллекторный p-n переход резким, определите граничное напряжение $U(L)_{кэо}$.
50. Кремниевый n-p транзистор: эмиттерный переход полностью открыт, площадь эмиттерного перехода $S_E = 10^{-4}$ см², ток насыщения эмиттера $I_{ЭС} = 10^{-13}$ А, ток коллектора $I_K = 2$ мА, сопротивление нагрузки $R_n = 3$ кОм, температура $T = 300$ К. Определите коэффициент усиления по мощности на низкой частоте для двух схем включения: ОБ и ОЭ.
51. Концентрация примесей в p⁺-n областях кремниевого диода с резким переходом составляет $N_a = 10^{19}$ см⁻³, $N_d = 10^{16}$ см⁻³ соответственно. Ширина эмиттера равна $W_E = 5$ мкм, базы – $W_B = 3$ мкм. Определите контактную разность потенциалов, ширину и коэффициент инжекции p⁺-n перехода.
52. Кремниевый диод с резким p⁺-n переходом площадью 10^{-4} см² имеет равновесную концентрацию неосновных носителей в базе $p_{no} = 4 \cdot 10^3$ см⁻³, время жизни неосновных носителей в эмиттере $\tau_p = 10^{-6}$ с. Определите ток диода при напряжении смещения $U = 0,6$ В и температуре $T = 300$ К, полагая, что $I_{Sn} \ll I_{Sp}$.

Учебное издание

ФИЗИКА АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Методические указания и контрольные задания
по дисциплине «Физика активных элементов интегральных схем.
Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы»
для студентов специальности 42 01 02 «Микроэлектроника»
заочной и дистанционной форм обучения

Составители:

Колосницын Борис Сергеевич,

Короткевич Александр Васильевич

Редактор Н.А. Бебель
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 28.04.2003.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,05.

Заказ 762.

Печать ризографическая.

Уч.-изд. л. 0,7.

Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times.

Тираж 100 экз.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП №156 от 30.12.2002.

Лицензия ЛВ №509 от 03.08.2001.

220013, Минск, П. Бровки, 6.