

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский технический университет связи и информатики

Кафедра электроники и микроэлектронных средств телекоммуникаций



Учебно-методическое пособие

по дисциплине

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

для студентов-заочников 2 курса

(направление 11.03.02)

Москва 2016

Учебно-методическое пособие
по дисциплине
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Составитель В.И.Николотов

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ИЭЭФ

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ИЗДАТЕЛЬСТВО

Издание стереотипное. Утверждено на заседании кафедры.

Рецензент В.П.Власов

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Дисциплина "Физические основы электроники" должна обеспечить базовую подготовку студентов, необходимую для успешного изучения специальных дисциплин и последующего решения производственных, проектных и исследовательских задач.

Изучение дисциплины опирается на содержание курсов "Физика", "Теория электрических цепей", "Высшая математика".

1. Цели и задачи дисциплины

Целью данной учебной дисциплины является изучение студентами физических эффектов и процессов, лежащих в основе принципов действия полупроводниковых, электровакуумных и оптоэлектронных приборов.

Основные задачи учебной дисциплины:

- ознакомление с современным уровнем развития физических основ полупроводниковой электроники с учетом использования перспективных полупроводниковых материалов;
- изучение физических процессов образования свободных носителей заряда в полупроводниках;
- изучение физических процессов, происходящих на границе двух полупроводников, на границе металл-полупроводник, на границе диэлектрик-полупроводник;
- изучение электрических параметров и характеристик, электрических контактов и структур полупроводниковой и электровакуумной электроники.

2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины. В итоге изучения дисциплины студент должен:

знать:

- физические явления и эффекты, определяющие принципы действия основных электронных приборов;
- формулы плотности дрейфового и диффузионного токов в полупроводниках и контактной разности потенциалов р-п-перехода;
- уравнение ВАХ идеализированного р-п-перехода и влияние на нее ширины запрещенной зоны (материала), температуры и концентрации примесей;
- физический смысл основных параметров р-п-перехода;
- причины инерционности р-п-переходов и полупроводниковых структур;
- причины нарушения равновесного состояния в полупроводниковых структурах;
- зонные диаграммы собственных и примесных полупроводников, р-п-перехода, контакта металл-полупроводник и простейшего гетероперехода;
- физические процессы в структурах с взаимодействующими р-п-переходами; и в структурах металл-диэлектрик-полупроводник;
- взаимосвязь между физической реализацией полупроводниковых структур и их электрическими характеристиками и параметрами;
- влияние температуры на физические процессы в структурах и их характеристики;

уметь:

- находить значения электрофизических параметров полупроводниковых материалов (кремния, германия, арсенида галлия) в учебной и справочной литературе для оценки их влияния на параметры структур;
- оценивать значения концентраций основных и неосновных носителей

полупроводников при различных концентрациях примесей и различных температурах;

- изображать структуры с различными контактными переходами, объяснять их принцип действия и составлять электрические и математические модели этих структур;

иметь навыки:

- экспериментально определять статические характеристики и параметры различных структур.

3. Объем дисциплины, виды учебной работы и бюджет времени (в часах)

Заочная форма обучения					
Аудиторная работа			Самостоятельная работа		
Лекции	Лабораторные работы	Итого	Изучение курса	Выполнение контрольной работы	Итого
10	4	14	68	20	88

Вид итогового контроля - зачет в 5-ом семестре.

Дистанционная форма обучения		
Вид учебной работы	Всего часов	Семестр
Общая трудоемкость дисциплины	102	5
Лабораторные работы	4	5
Подготовка к лабораторным работам	12	5
Контрольная работа	20	5
Самостоятельная работа	64	5
Вид итогового контроля	Зачет	5

По дисциплине "Физические основы электроники" предусмотрен зачет, на котором студент должен ответить на ряд теоретических вопросов и на вопросы по контрольной работе.

Дальнейший материал призван облегчить студенту подготовку к зачету и выполнению им контрольной работы.

Список литературы

а) основная литература:

1. Физические основы электроники. Учебное пособие (электронный конспект лекций). Николотов В.И. – М.: МТУСИ, 2003г.
2. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов/Под ред. Н.Д. Федорова. - М.: Радио и связь. 1998. - 560 с.
3. Аваев И.А., Наумов Ю.В. Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1991. -288 с.

б) дополнительная литература:

- Степаненко И.П. Основы микроэлектроники; Учебное пособие для вузов. - М.: Советское радио, 1980.-424 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ КУРСА

Несмотря на то, что заочный общетехнический факультет (ЗОТФ) МТУСИ организует для студентов - заочников групповые консультации (очные виды занятий), а студенты дистанционной формы обучения консультируются, используя средства телекоммуникаций, основной формой обучения курса является самостоятельная работа с электронным конспектом лекций по дисциплине "Физические основы электроники" и рекомендованной литературой.

Предлагаемые методические указания должны помогать именно этой работе. Обращаясь к методическим указаниям, можно выяснить, какую роль играет данный раздел дисциплины, на что следует обратить внимание при его изучении, как в рекомендованной литературе излагается основной материал.

При самостоятельном изучении литературы следует вести краткий конспект, а после каждого раздела ответить на контрольные вопросы (с. 8-9).

Из перечисленной литературы наиболее полно охватывает комплекс изучаемых вопросов [1], [2], в которой содержится важная часть информации по вопросам, изучаемым в курсе "Физические основы электроники"

4. Содержание дисциплины по программе.

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п.	Раздел дисциплины	Литература
1	Введение	[1], 1., с.8
2	Введение в физику полупроводников	[1], 1.1. с.8
3	Концентрации носителей заряда в полупроводниках	[1], 1.2., 1.3., с. 13-17
4	Кинетика носителей зарядов в полупроводниках и токи	[1], 1.4., с.17,15, с.22
5	Физические процессы при контакте металл - полупроводник	[2], 3.9.2, с.59
6	Физические процессы при идеализированном контакте полупроводников n- и p- типа с одинаковой шириной запрещенной зоны	[1], 2, с.32-46
7	Отличие реальных электронно-дырочных переходов от идеализированного	[1], 2.7, с. 49, 28, с. 51
8	Физические процессы при контактах полупроводников с различной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы)	[2], 3.9.2, с.60
9	Физические процессы в структуре с двумя взаимодействующими переходами	[1], 3с. 56-64, 4.3, с.67-72, 4.6., с. 75-81
10	Физические процессы в структуре металл - диэлектрик - полупроводник	[2], 7.4, с.157
11	Физические основы управления током в приборах с МДП структурой	[2], 7.5, с.166

12	Физические основы управления током канала с помощью управляющего электрического перехода	[2],7.3,с.156
13	Фотоэлектрические и пьезоэлектрические явления в полупроводниках	[2],14.4,с.359
14	Термоэлектрические и гальваномагнитные явления в полупроводниках	[1],2.9,с.55
15	Физические основы электровакуумных приборов	[2],13.1, 13.2, с.301-306

4.2.Содержание разделов дисциплины

1.Введение.

Смысл термина "электроника". Области электроники. Цели и задачи дисциплины.

2.Введение в физику полупроводников.

Зонная модель твердых тел. Классификация твердых тел (металлы, полупроводники, диэлектрики). Кристаллическая решетка полупроводников. Собственный полупроводник. Энергетическая (зонная) диаграмма собственного полупроводника. Электроны и дырки. Примесные полупроводники. Доноры и акцепторы. Проводимости n - и p -типа. Зонные диаграммы, уровни доноров и акцепторов. Компенсированные полупроводники.

3.Концентрации носителей заряда в полупроводниках.

Генерация и рекомбинация носителей. Равенство скоростей генерации и рекомбинации - условие термодинамического равновесия. Связь равновесных концентраций электронов и дырок в состоянии термодинамического равновесия. Условие электрической нейтральности. Плотность электрических уровней в зонах. Функция распределения Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Положение уровня Ферми на зонных диаграммах собственного полупроводника и полупроводников с проводимостью n - и p -типа. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации примесей и температуры. Распределение носителей в зонах по энергетическим уровням. Вырожденные полупроводники. Неравновесные носители заряда. Причины дополнительной генерации свободных носителей (избыточной концентрации). Рекомбинация носителей. Время жизни неравновесных носителей. Механизмы рекомбинации, межзонная и ступенчатая рекомбинация через центры рекомбинации (ловушки). Поверхностная рекомбинация. Эффективное время жизни.

4.Кинетика носителей заряда в полупроводниках и токи.

Движение носителей в электрическом поле. Дрейфовая скорость, подвижность, плотность дрейфового тока. Эффективная масса. Удельная проводимость. Насыщение дрейфовой скорости в сильных полях. Диффузионное движение носителей. Плотность диффузионного тока. Коэффициент диффузии. Зависимость подвижности и коэффициента диффузии от типа носителей заряда и материала. Связь подвижности и коэффициента диффузии.

5.Физические процессы при контакте металл-полупроводник.

Разновидности контактов в полупроводниковой электронике. Зонные диаграммы металла и полупроводника до контакта и структуры после контакта в

состоянии равновесия. Работа выхода электронов и контактная разность потенциалов, распределение носителей заряда и поля. ВАХ. Условие получения омического контакта.

6. Физические процессы при идеализированном контакте полупроводников n - и p -типа с одинаковой шириной запрещенной зоны.

Электронно-дырочный переход в состоянии равновесия. Контактная разность потенциалов, ее зависимость от ширины запрещенной зоны, концентрации примесей и температуры. Ширина обедненной области.

Неравновесное состояние p - n -перехода. Прямое и обратное включение. Вольт - амперная характеристика (ВАХ) идеализированного перехода и ее уравнение. Зависимость ВАХ от концентрации примесей и температуры.

Параметры p - n -перехода и его электрическая модель. Дифференциальное сопротивление. Барьерная и диффузионная емкости. Зависимость параметров от величины и знака напряжения (смещения). Причины, вызывающие инерционность процессов в p - n -переходе.

7. Отличие реальных электронно-дырочных переходов от идеализированного.

Учет генерации и рекомбинации носителей заряда в обедненной области перехода, учет омических сопротивлений p - и n -областей. Учет электрического (лавинного, туннельного) и теплового пробоев при обратном включении перехода и коррекция математического описания ВАХ. Возможность появления отрицательного дифференциального сопротивления.

8. Физические процессы при контакте полупроводников с различной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы).

Зонная диаграмма гетероперехода, образование скачков и разрывов в диаграмме и их влияние на движение носителей через переход.

9. Физические процессы в структуре с двумя взаимодействующими переходами.

Взаимодействующие переходы - основа биполярного транзистора. Варианты полярностей напряжения на переходах. Физические процессы при прямом включении эмиттерного и обратном коллекторного переходов, движение носителей через переходы и базовую область, коэффициенты инжекции, переноса, лавинного умножения, составляющие токов электродов, коэффициент передачи входного тока, математические связи токов электродов. Статическая модель Эберса-Молла - отражение процессов в переходах и взаимосвязи переходов. Возможность расчета токов электродов и статических характеристик структуры в любых режимах работы и схемах включения. Идеализированные характеристики, отражение эффекта модуляции толщины базовой области (эффект Эрли) на статических характеристиках структуры. Физические явления и факторы, обуславливающие инерционность структуры (частотные и импульсные свойства), отражение на электрической модели Эберса-Молла.

10. Физические процессы в структуре металл-диэлектрик полупроводник (МДП-структура).

Зонные диаграммы материалов до контакта и всей структуры МДП в состоянии термодинамического равновесия, эффект поля и возможности инверсии типа проводимости полупроводника. Понятие поверхностного потенциала. Емкость МДП - структуры.

11. Физические основы управления током в приборах с МДП - структурой.

Создание проводящего канала и дрейфового тока в нем (исток, сток): МДП -

транзистор со встроенным и индуцированным каналом. Механизм управления величиной тока в канале. Пороговое напряжение, напряжение отсечки, напряжение насыщения, идеализированные статические характеристики.

12. Физические основы управления током канала с помощью управляющего электрического перехода.

Влияние напряжения на управляющем переходе на процессы в канале при использовании р-п-перехода и перехода контакта металл-полупроводник. Идеализированные статические характеристики структур с управляющим переходом.

13. Фотоэлектрические и пьезоэлектрические явления в полупроводниках.

Фотопроводимость (внутренний фотоэффект). Взаимодействие света с носителями заряда в р-п-переходе, фотодиодный режим, фотоэдс. Вольт-амперная характеристика и параметры. Понятие о прямом и обратном пьезоэлектрическом эффекте в полупроводниках.

14. Термоэлектрические и гальваномагнитные явления в полупроводниках.

Краткая характеристика термоэлектрических явлений (эффекты Зеебека, Пельтье, Томсона), гальваномагнитного эффекта Холла и магниторезистивного эффекта.

15. Физические основы электровакуумных и газоразрядных приборов.

Раздел дисциплины	Контрольные вопросы
1,2,3,4	1. Какой тип электропроводности имеет собственный (чистый) полупроводник? 2. Объясните характер температурной зависимости электрической проводимости для чистого и примесного полупроводников. В чем состоит необходимость использования примесных полупроводников? 3. Как возникают дрейфовый и диффузионный токи в полупроводнике? 4. Что такое условие электрической нейтральности?
5,6,7	1. Как возникает р-п-переход при идеальном контакте полупроводников с разным типом электропроводности? 2. Существует ли движение носителей через р-п-переход при отсутствии внешнего напряжения? 3. Каково соотношение между токами дрейфа и диффузии при прямом и обратном напряжениях на р-п-переходе? 4. Как рассчитать по теоретической вольтамперной характеристике р-п-перехода величину его дифференциального сопротивления? 5. Почему величина барьерной емкости зависит от приложенного напряжения? 6. Какова физическая природа диффузионной емкости р-п-перехода? Почему ее величина зависит от прямого тока? 7. Чем отличаются различные механизмы электрического пробоя (лавинный, туннельный) и тепловой?
9	1. Из каких составляющих образован ток эмиттера I_E ? 2. Из каких составляющих образован ток базы I_B ? 3. Из каких составляющих образован ток коллектора I_C ? 4. Что характеризует коэффициент передачи тока в биполярной структуре с двумя взаимодействующими переходами? 5. Назовите причину неравенства $\alpha < 1$. 6. Как влияет температура на статические характеристики германиевых и кремниевых транзисторов? 7. Изобразите линейную модель биполярного транзистора. 8. Как графически определяются h-параметры транзистора по его статическим характеристикам? 9. Какие физические причины в биполярной структуре уменьшают усиление в биполярном транзисторе сигналов высокой частоты? 10. Дайте определение $f_{\beta 21b}$, f_{max} ? 11. Изобразите нелинейную модель биполярного транзистора? 12. Какие можно рекомендовать способы улучшения частотных свойств

10,11,12	<p>биполярного транзистора?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Назовите основные разновидности полевых транзисторов. Нарисуйте их условные графические обозначения? 2. Объясните принцип работы полевого транзистора с управляющим р-п-переходом. 3. Что характеризуют параметры S, R_i, μ? 4. Для какой цели может использоваться начальный крутой участок выходных характеристик полевого транзистора? 5. Объясните принцип МДП-транзистора с индуцированными и встроенными каналами. Дайте определение $U_{пор}$, $U_{отс}$. 6. Как отличить по виду статических характеристик полевой транзистор с управляющим р-п-переходом от транзистора с изолированным затвором? 7. Почему у полевых транзисторов большая величина $R_{вх}$? 8. Как влияет температура на статические характеристики полевого транзистора? 9. Почему при повышении частоты входного сигнала уменьшается усиление полевого транзистора? 10. Какие существуют способы улучшения частотных свойств полевого транзистора? 11. Нарисуйте статическую модель полевого транзистора с управляющим р-п-переходом. 12. Нарисуйте малосигнальную модель полевого транзистора с управляющим р-п-переходом.
----------	--

СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИЙ

Лекция 1. Электрические свойства полупроводников. Электропроводность собственных и примесных полупроводников. Диффузионное и дрейфовое движения носителей заряда. Состояние р-п перехода в условиях равновесия, при прямом и обратном смещениях.

Лекция 2. Вольтамперная характеристика р-п-перехода. Пробой р-п-перехода. Дифференциальное сопротивление, барьерная и диффузионная емкости.

Лекция 3. Принцип работы полупроводниковой структуры с двумя взаимодействующими р-п-переходами. Физические процессы в структуре р-п-р. Схемы включения.

Лекция 4. Статические характеристики биполярного транзистора при включении с общей базой (ОБ). Влияние температуры на статические характеристики. Малосигнальные параметры биполярного транзистора.

Лекция 5. Работа биполярного транзистора на высокой частоте, основные частотные параметры. Физическая эквивалентная схема биполярного транзистора на высокой частоте.

ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Исследование ВАХ в полупроводниковой структуре с р-п-переходом.
2. Исследование ВАХ в полупроводниковой структуре с двумя взаимодействующими р-п-переходами.

Общие замечания к выполнению контрольной работы.

Целью контрольной работы является закрепление теоретического материала по дисциплине "Физические основы электроники".

Выполнение работы требует творческого подхода, а не формальной подстановки заданных величин в приведенные формулы. Поэтому перед тем, как приступить к выполнению работы, следует разобраться в теоретическом материале по конспекту лекций [1] или по литературе [2]. Студентам не потребуются справочники, поскольку все необходимые для расчетов константы приведены в приложении на с.18.

Задачи охватывают следующие разделы курса:

- физика полупроводников,
- p-n-переход и его свойства,
- принцип полевого управления током в приповерхностных (МДП-структуры) и объемных (с помощью управляющего p-n-перехода) каналах.

Каждой задаче предшествует краткое изложение теории, содержащее необходимые для выполнения заданий основные расчетные соотношения.

Оно ни в коей мере не может рассматриваться как сокращенное учебное пособие в отрыве от конспекта лекций и рекомендованной литературы.

ВЫБОР ВАРИАНТА

Номер варианта задач определяется последними 2 цифрами номера студенческого билета.

СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧ

Задача №1

По заданному при комнатной температуре значению тока I_0 (см. табл. 1) в идеальном несимметричном p-n-переходе, площадью $S=0,1 \text{ см}^2$.

Определить:

1. Материал (Si или Ge), из которого выполнен переход.
2. Тип и концентрацию не основных носителей заряда в базе.
3. Тип и концентрацию примеси, а так же тип и концентрацию основных носителей заряда в базе.
4. Тип и концентрацию основных и неосновных носителей заряда в эмиттере, а так же тип и концентрацию примеси, внесенной в область эмиттера.
5. Контактную разность потенциалов Φ_k для двух значений температур:
 t_1 - комнатная, $t_2 = t_1 + \Delta t$
(значения Δt даны в таблице 1)
6. L-ширину обедненной области или p-n-перехода эмиттер-база. Сделать вывод о влиянии концентрации примеси на L для симметричного и несимметричного p-n-переходов. Изобразить заданный p-n-переход.
7. Записать условие электрической нейтральности для областей эмиттера и базы, а так же для всей системы в состоянии равновесия.
8. Приложить к заданному p-n-переходу сначала прямое, потом обратное напряжение и на одном графике построить вольтамперные характеристики (ВАХ) для двух значений температур t_2 и t_1 (см. п. 5). Пояснить влияние температуры на прямую и обратную ветви ВАХ.
9. Начертить зонные диаграммы в равновесном состоянии, а так же при прямом и обратном напряжении.
10. Рассчитать вольт-фарадные характеристики для барьерной $C_{бар}$ и диффузионной $C_{диф}$ емкостей.
11. Рассчитать R_0 сопротивление постоянному току и $R_{диф}$ переменному току на прямой ветви в точке, соответствующей $I_{пр} = 10 \text{ мА}$, и обратной ветви в точке, соответствующей $U = 1 \text{ В}$. По результатам расчета сделать вывод о самом важном свойстве p-

n-перехода.

12. Начертить малосигнальную электрическую модель заданного p-n- перехода для двух точек (из п. 11).

Студентам у которых предпоследняя цифра номера студенческого билета нечетная- задан p⁺-n-переход, с четной цифрой n⁺-p-переход.

Таблица 1

	последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_0	$0,1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^8$	$0,2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^8$	$0,4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^8$	$0,6 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^8$	$0,8 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^8$
Δt	30	35	15	40	20	24	25	32	10	16

Задача №2.

Задана полупроводниковая структура, в которой управление током в канале осуществляется с помощью поперечного электрического поля.

У студентов с четной последней цифрой номера студенческого билета канал объемный, а с нечетной - приповерхностный.

По заданному в таблице 2 значению U^*

($U^* = U_{отс}$, если канал объемный, и $U^* = U_{пор}$, если канал приповерхностный).

1. Определить тип канала (p или n)

2. Нарисовать, заданную структуру, указать полярность питающих напряжений, назвать выводы и пояснить принцип полевого управления током.

3. Рассчитать и построить на одном графике стоко-затворные ВАХ в режиме насыщения для двух значений длин канала $L-L_1$, соответствующей заданной в таблице удельной крутизне b_1 и $L_2=2L_1$. Сделать вывод о влиянии управляющего действия напряжения затвора на длину канала.

4. Рассчитать и построить зависимость крутизны S от напряжения на затворе для двух, заданных в п.3 значений L.

5. Для трех самостоятельно выбранных значений напряжения на затворе определить напряжение насыщения на стоке и построить семейство стоковых ВАХ, выделив омический участок и участок насыщения (только для одного значения $b = b_1$).

Таблица 2.

	Последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U^*, В$	6	1	-6	-1	5	2	-5	-2	-5.5	0,5
	Предпоследняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$b_1, \frac{мА}{В^2}$	0,25	0,12	0,1	0,2	0,3	0,28	0,26	0,15	0,23	0,18

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.

Указания к задаче 1.

Приступая к решению, следует изучить физику полупроводников, а так же p-n-переход и его свойства.

Основные расчетные соотношения.

ВАХ p-n-перехода описывается уравнением

$$I = I_0 (e^{u/\varphi_T} - 1), \quad (1.1)$$

где $\varphi_T = kT/q$ - температурный потенциал . при комнатной температуре $\varphi_T = 0,026В$,

k -постоянная Больцмана, q - заряд электрона,

T - абсолютная температура ($T_K = 300 К$),

I_0 - тепловой ток, который зависит от температуры и определяется свойствами полупроводникового материала, из которого изготовлен переход.

$$I_0 = S(qD_p/L_p * P_{n0} + qD_n/L_n * n_{p0}), \quad (1.2)$$

где S - площадь перехода,

$D_{n,p}$ - коэффициент диффузии неосновных носителей заряда, соответственно дырок в p- области перехода и электронов в p- области,

P_{n0} и n_{p0} - концентрации неосновных носителей заряда,

$L_{p,n}$ - диффузионные длины неосновных носителей заряда.

Диффузионная длина и коэффициент диффузии связаны соотношением

$$L_{p,n} = \sqrt{D_{p,n} \tau_{p,n}}, \quad (1.3)$$

где $\tau_{p,n}$ - время жизни дырок и электронов (в расчетах можно считать $\tau_{p,n} = 1 \text{ мкс}$). Согласно соотношению Эйнштейна,

$$D_{p,n} = \varphi_T * \mu_{p,n}, \quad (1.4)$$

где $\mu_{p,n}$ - подвижность дырок и электронов соответственно.

Для диапазона температур, в котором находятся p-n-переходы, концентрация основных носителей практически равна концентрации атомов примеси, т.е. в "электронном" полупроводнике "n"- типа концентрация электронов n равна концентрации атомов донорной примеси $N_{дон}$, в "дырочном" полупроводнике "p"- типа концентрация дырок p равна концентрации атомов акцепторной примеси $N_{акц}$, т.е.

$$n_n = N_{дон}, \quad p_p = N_{акц} \quad (1.5)$$

Концентрации неосновных носителей определяются из закона термодинамического равновесия.

для полупроводника p-типа

$$p_p * n_p = n_i^2$$

для полупроводника n-типа

$$n_n * p_n = n_i^2$$

$$(1.6)$$

где n_i - концентрация собственных носителей в полупроводнике.

Величина n_i является одной из важнейших характеристик полупроводникового материала, она определяет концентрацию свободных носителей заряда (электронов и дырок) в собственном (беспримесном) полупроводнике. Для n_i характерна сильно выраженная температура зависимость, которая определяется соотношением:

$$n_i^2 = N_c N_v \exp(-\Delta E_0/kT), \quad (1.7)$$

где ΔE_0 – ширина запрещенной зоны полупроводника,

$N_{c,v}$ – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне полупроводника соответственно.

В (1.7) температурной зависимости N_c, N_v и ΔE_0 можно пренебречь.

Реальный переход чаще всего несимметричен, т.е. концентрация примесей в одной из областей намного (минимум на 2-3 порядка) выше, чем в другой. Область с высокой концентрацией примесей отмечают знаком «+» и называют *эмиттером*, а с малой концентрацией – *базой*.

С учетом того, что $N_{акц} \gg N_{дон}$ или $N_{дон} \gg N_{акц}$ согласно п. 1.5 и 1.6, аналогичные соотношения существуют и между концентрациями неосновных носителей заряда, т.е. $p_{но} \gg p_{ро}$ или $p_{ро} \gg p_{но}$ (при расчете по п. 1.2) эти неравенства позволяют пренебречь одним из слагаемых, поскольку различия между величинами D_p и D_n , а также L_p и L_n невелико.

К числу важнейших параметров перехода относятся дифференциальные параметры:

$$\Gamma_{диф} = dU/dI \text{ и } C_{диф} = dQ/dU.$$

Поскольку p-n – переход – нелинейный элемент (это видно из его ВАХ), то $\Gamma_{диф}$ зависит от режима работы, т.е. от положения рабочей точки. Рабочая точка на прямой ветви задается током, а на обратной ветви напряжением.

С учетом (1.1):

$$\Gamma_{диф пр} = \Phi_T / I_{пр7} \quad (1.8)$$

$$\Gamma_{диф обр} \rightarrow \infty$$

сопротивление постоянному току определяется также в рабочей точке и рассматриваются по закону Ома:

$$R_0 = U/I, \quad (1.9)$$

где $-U$ и I – координаты рабочей точки, т.е. значения напряжения и точка в рабочей точке. $R_0 \neq r_{диф}$, так как ВАХ – нелинейная.

Емкость р-п – перехода относится к числу его дифференциальных параметров: $C = dQ/dU$, где Q – заряд, который может быть связанным или накопленным.

Связанный заряд образует барьерную емкость $C_{бар}$ и обусловлен ионизированными атомами примесей – донорами и акцепторами, расположенными по обе стороны от металлургической границы перехода, причем $|Q_{дон}^+| = |Q_{акц}^-|$, что соответствует условию электронейтральности р-п – перехода в состоянии равновесия.

$C_{бар}$ рассчитывается как емкость плоского конденсатора:

$$C_{бар} = \epsilon \epsilon_0 S / L_{p-n}, \quad (1.10)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная,

ϵ – относительная диэлектрическая постоянная полупроводникового материала,

S – площадь р-п – перехода,

L_{p-n} – ширина р-п – перехода.

Изменение приложенного к р-п – переходу напряжения U влечет за собой изменение ширины перехода и $C_{бар}$.

$$L_{p-n} = \sqrt{(2\epsilon\epsilon_0 / qN_0) (\phi_k - U)}, \quad (1.11)$$

где N_0 – концентрация примесей в базе, ϕ_k – контактная разность потенциалов:

$$\phi_k = \phi_T \ln(N_n N_{дон} / n_i^2). \quad (1.12)$$

Формула (1.11) соответствует несимметричному резкому р-п-переходу.

Помимо связанного, при изменении приложенного напряжения может изменяться накопленный заряд $Q_{\text{нак}}$. Существование последнего для несимметричного перехода обусловлено непрерывной инжекцией подвижных из эмиттера в базу. В результате чего возникает неравновесный заряд инжектированных носителей, вместе с которыми в базе сосредотачивается дополнительный заряд основных носителей, что в целом обеспечивает ее электронейтральность.

$$|Q_{\text{нак}}^+| = |Q_{\text{нак}}^-| = Q_{\text{нак}}$$

Увеличение прямого тока приводит к возникновению инжектированных носителей, т.е. $Q_{\text{нак}}$, что соответствует существованию емкости, называемой диффузионной. Для несимметричного перехода

$$C_{\text{диф}} = (\tau_0 / \varphi_1) * I \quad (1.13)$$

где τ_0 - время жизни неосновных носителей в базе.

Очевидно, что при обратных смещениях переходов диффузионная емкость практически отсутствует.

Обе емкости $C_{\text{диф}}$ и $C_{\text{бар}}$ существуют независимо друг от друга и поэтому при расчете суммарной емкости могут складываться.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Указания к п. 1

Материал легко определить по значению I_0 , который является током неосновных носителей. Их концентрация, согласно (1.6) пропорциональна Π_1^2 , которая по (1.7) зависит от ширины запрещенной зоны ΔE_0 . Поскольку у германия она меньше чем у кремния (см. приложение), т.е. у Ge электронам легче преодолеть запрещенную зону и стать свободными, то $\Pi_{\text{Ge}} \gg \Pi_{\text{Si}}$, поэтому $I_{0\text{Ge}} \gg I_{0\text{Si}}$. В Ge I_0 измеряется в мкА (10^{-6}), а в Si в нА (10^{-9}). Π_{Ge} имеет порядок 10^{13} 1/см³, а в Si 10^{10} 1/см³.

Указания к п. 2

В формуле (1.2) следует пренебречь одним из слагаемых в зависимости от заданного типа перехода р⁺-п или п⁺-р. Здесь очень важно не ошибиться, так как если оставить не то слагаемое, то все дальнейшие расчеты будут неверны.

Концентрация $P_{\text{р0}}$ и $\Pi_{\text{р0}}$ рассчитывается в 1/см², при этом следует использовать данные приложения и формулы (1.2, 1.3, 1.4). Время жизни дырок и электронов независимо от материала можно принять равным $\tau_{\text{р,л}} = 1$ нкс.

Указания к п. 3

Следует правильно назвать примесь и основные носители базы. Использовать формулы (1.5, 1.6).

Указания к п. 4

Прежде всего, надо правильно назвать основные и неосновные носители эмиттера, а так же внесенную в область эмиттера примесь. При расчете концентраций следует считать, что в область эмиттера внесено примеси на несколько порядков больше, чем в область базы, исходя из следующих возможных значений $N_{\text{прим}} = (10^{13} + 10^{18})$ см⁻³.

Указания к п. 5

Для расчетов использовать формулы (1.12, 1.7) и справочные данные, ориентироваться на то, что $\varphi_{\text{Кс}} < 0,4$ В, $0,5 < \varphi_{\text{Кл}} < 0,8$ В.

Указания к п. 6

Согласно (1.11) ширина обедненной области обратно пропорциональна $\sqrt{N_{\text{прим}}}$, поэтому переход (или обедненная область) практически расположен в базе. $L = L_2 + L_6 = L_6$. При расчете в равновесном состоянии $U=0$.

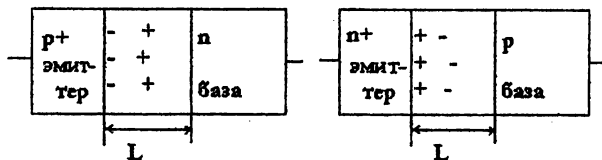


Рис.1.1 Несимметричные p-n-переходы.

Указания к п. 7

Условие электрической нейтральности.

Сумма положительных зарядов равна сумме отрицательных зарядов $\sum^+ q = \sum^- q$.

В полупроводнике p-типа положительный суммарный заряд дырок (основных носителей) уравновешен суммарным зарядом неподвижных, отрицательных ионов акцепторов.

В полупроводнике n-типа отрицательный суммарный заряд основных носителей электронов уравновешен положительным суммарным зарядом ионов доноров.

Нейтральность нарушается только вблизи границ (в обедненной области), хотя в целом p-n-переход тоже нейтрален, т. к. $Q_{дон}^+ = Q_{акц}^-$

Указания к п. 8

Прямое напряжение направлено противоположно Φ_k , поэтому уменьшает потенциальный барьер, что позволяет основным носителям эмиттера легко его преодолеть и создать прямой ток (это ток диффузионный).

Прямые напряжения в (1.1) изменять в диапазоне $0 < U < \Phi_k$. Ориентировочно для германия можно взять следующий ряд напряжений: 0,15 0,2 0,25 0,275 0,3 В, а для кремния: 0,35 0,375 0,4 0,45 0,5В.

График можно ограничить прямым током в 100мА.

Обратное напряжение совпадает с Φ_k , увеличивая потенциальный барьер для основных носителей, которые не могут его преодолеть. Для неосновных носителей это ускоряющее поле и через переход идет ток I_0 .

В п. (1.1) $U_{обр} < 0$.

Расчет покажет, что практически сразу устанавливается ток I_0 . Обычно обратные напряжения бывают больше 1В.

Расчет при температуре $t_2 = t_1 + \Delta t$ по формуле (1.1) требует расчета Φ_t и I_0 по (1.2, 1.6, 1.7). Данные всех расчетов следует свести в таблицу 3 и 4.

Таблица 3.

	$U_{пр}, В$				
$t = t_1$	$I_{пр}, мА$				
	$S_{диф}, пФ$				
	$S_{бар}, пФ$				
$t = t_2$	$I_{пр}, мА$				

Таблица 4.

	$U_{обр}, В$	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-1	-2
$t=t_1$	$I_{обр}$						
	$C_{бар}, пФ$						
$t=t_2$	$I_{обр}$						

$I_{обр}$ Si в нА, $I_{обр}$ Ge в мкА

В табл. 3, 4, расчетные значения записывать с точностью до трех знаков.

При построении ВАХ масштаб прямой и обратной ветки выбирают разными, хотя строятся на одном графике.

Согласно заданию, ВАХ для разных температур надо строить на одном графике.

В выводах о влиянии температуры следует не только констатировать факты, но и пояснить причину.

Указания к п. 9

Зонные диаграммы (они приводятся практически) в любой литературе по полупроводникам) следует чертить одну под другой. Сначала в равновесном состоянии ($U=0$), затем при $U>0$, и наконец, при $U<0$. Не забывать, что ширина р-п-перехода меняется в зависимости от приложенного напряжения.

Указания к п. 10

Согласно (1.13) зависимость $C_{диф}$ от $U_{пр}$ совпадает с прямой веткой ВАХ. Рассчитанные значения $C_{диф}$ поместить в таблицу 3. Расчет $C_{бар}$ ведется по формулам (1.10, 1.11, 1.12).

Для построения ВФХ удобнее формулы (1.10, 1.11), преобразовать так:

$$C_{бар} = C_{б0} / \sqrt{(1-U/\varphi_k)}$$

$$C_{б0} = S \sqrt{(q E E_0 N_0 / 2 \varphi_k)}$$

$C_{б0}$ - значение барьерной емкости при $U=0$.

φ_k уже рассчитано в п. 5, а ряд напряжений следует брать из 3 и 4.

Указания к п. 11

При решении использовать формулы (1.8, 1.9), обратив внимание на разности прямого и обратного токов.

Указания к п. 12

Для малых сигналов в заданной рабочей точке нелинейный р-п-переход заменяют линейной электронной моделью (см. рис. 1.2)

При $U = U_{обр}$, $r_{диф} \rightarrow \infty$, поэтому в модели остается только $C = C_{бар}$. Значение C можно брать из расчетов по п. 10, а $r_{диф}$ по п. 11.

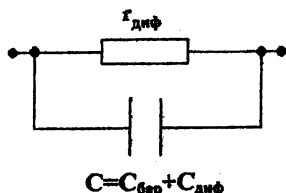


Рис 1.2. Линейная электрическая модель р-п-перехода.

Указания к задаче 2.

Приступая к решению следует изучить эффект поля и принцип полевого управления током в МДП-структурах и в структурах с управляющим р-п-переходом, ВАХ и параметры этих структур.

Основные сведения и расчетные соотношения.

Ток в канале создается дрейфом его основных носителей заряда. Электрод, от которого носители уходят в канал, называют *истоком (И)*, а электрод, принимающий носители в конце канала (при соответствующей полярности напряжения) - *стоком (С)*. Исток, канал и сток имеют одинаковый тип электропроводности (п и р). Если канал n-типа, то рабочие носители - электроны и полярность напряжения на стоке - положительная ($U_{св} > 0$). Если канал р-типа, то рабочие носители - дырки и ($U_{св} < 0$).

Управляющее поперечное электрическое поле создается с помощью электрода, называемого *затвором (З)*. С помощью затвора изменяют сопротивление канала R и следовательно ток через канал.

$$I_c = U_{св} / R \quad R = \rho L / Wh \quad , \text{ где} \quad (2.1)$$

ρ - удельное сопротивление ;

W - ширина канала ;

L - длина канала ;

h - толщина канала .

В структурах с приповерхностным каналом (рис 2.1) металлический (М) затвор изолирован от полупроводникового (П) канала тонким слоем диэлектрика (Д) (МДП-структура). Здесь управление током осуществляется за счет изменения удельного сопротивления канала, вызванного эффектом поля. Канал возникает из-за индукции зарядов (индуцированный канал) при приложении к затвору напряжения больше $U_{пор}$. Чем больше напряжение на затворе по сравнению с $U_{пор}$, тем сильнее канал обогащается основными носителями, тем следовательно меньше его ρ и больше ток через канал.

В структурах с объемным каналом (рис 2.2) затвор выполнен на основе р-п-перехода. Здесь управление током осуществляется за счет изменения толщины канала при приложении к управляющему р-п-переходу обратного напряжения: р-п-переход расширяется, канал сужается, его сопротивление растет, а ток через канал уменьшается. Наконец при напряжениях больше чем напряжение отсечки $U_{отс}$ (р-п) переход полностью перекрывает канал и происходит отсечка тока ($I=0$).

Обе структуры имеют управляющую цепь с источником напряжения между затвором и истоком $U_{зв}$, отдельную от управляемой цепи, в которой под действием напряжения $U_{св}$ протекает ток стока I_c .

Управляющая цепь практически не потребляет ток, поскольку в нее входит либо участок диэлектрика (рис. 2.1), либо обратный смещенный р-п-переход (рис 2.2)

Различают два основных режима работы обеих структур - омический и насыщения. Они видны на стоковых ВАХ:

$$I_c = f(U_{св}), U_{зв} = \text{const} .$$

В первом режиме ток стока линейно зависит от $U_{св}$, т.е. подчиняется закону Ома, и и структура является резистором.

Во втором - ток стока очень слабо зависит от $U_{св}$. Напряжение на стоке, при котором наступает режим насыщения

$$U_{св \text{ нас}} = U_{зв} - U^* . \quad (2.2)$$

Стоко-затворные ВАХ в режиме насыщения ($U_{св} > U_{св \text{ нас}}$) в обеих структурах хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью

$$I_c = 1/2 b (U^* - U_{3н})^2, \quad (2.3)$$

где b - удельная крутизна. Эта величина определяется электрофизическими и геометрическими размерами структуры. В частности, она пропорциональна отношению ширины канала Z к его длине L , т.е.

$$b \sim Z/L. \quad (2.4)$$

Различные варианты ВАХ показаны на рис 2.3

Важным параметром структур является крутизна стоко-затворной ВАХ. Она характеризует управляющее действие затвора и определяется дифференцированием соотношения (2.3)

$$\begin{aligned} S_{мСм} &= dI_c / dU_{3н} \Big|_{U_{стп} = const} \\ S &= b \Big| U^* - U_{3н} \Big| \end{aligned} \quad (2.5)$$

В формуле (2.5) стоит модуль, т.к крутизна во всех вариантах структур- величина положительная.

Следует понимать, что поскольку ВАХ $I_c = f(U_{3н})$ - нелинейная (квадратичная), то ее параметр - крутизна зависит от режима работы, т.е. в каждой точке своя крутизна. Зависимость S от $U_{3н}$, согласно (2.5)- линейная.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Указания к п. 1

Тип канала определяется по полярности заданного напряжения U^* .

Здесь нельзя ошибаться, иначе все дальнейшее решение будет неверным! Поэтому сначала следует разобраться в физике работы заданной структуры.

Указания к п. 2

Структура имеет вид рис 2.1 или 2.2, на котором следует изобразить области, согласно определенному в п.1 типу канала, и проставить полярность напряжений на стоке и затворе (+ или -). Исток, как правило, соединяют с подложкой и заземляют. Кратко описать принцип работы заданной структуры.

Указания к п. 3

График стоко-затворной ВАХ соответствует одному из графиков рис 2.3 в зависимости от варианта. Для построения достаточно 5-6 точек. Расчет ведется по формулам (2.3, 2.4). Расчет S по формуле (2.5). Данные расчета следует свести в таблицу. Все графики можно построить на одном рисунке, отметив их, например, разными цветами.

Не забудьте указать значение $U_{стп}$, V , при котором строятся графики.

Таблица 5

	$U_{стп}, В$						
L_1	I_c, mA						
	$S, мСм$						
L_2	I_c, mA						
	$S, мСм$						

Указания к п. 5

Расчет ведется по формуле (2.2). Следует понимать, что ток стока на стоковых ВАХ и стоко-затворных - один и тот же ток, поэтому удобно расположить стоковые ВАХ рядом со стоко-затворными, как это показано на рис 2.3. ВАХ рисуют в 1 квадрате независимо от

полярности $U_{сн}$. Значение $U_{зн}$ должно соответствовать $I_{с\ max}$; при $U_{зн}$ "

$$I_{с} \approx I_{с\ max}/2, \text{ а при } U_{зн}''' \quad I_{с} \approx I_{с\ max}/4.$$

При построении можно считать, что в режиме насыщения ток стока зависит от $U_{сн}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочные данные и физические постоянные.

Заряд электрона $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Постоянная Больцмана $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8.62 \cdot 10^{-5}$ ЭВ/К.

Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/М.

Свойства Ge & Si при T=300к

Свойства	Ge	Si
диэлектрическая проницаемость	16	11,8
эффективная плотность состояний в валентной зоне, $N_v, \text{ см}^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{18}$	$1,02 \cdot 10^{19}$
эффективная плотность состояний в зоне проводимости, $N_c, \text{ см}^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$
ширина запрещенной зоны ЭВ	0,66	1,12
подвижность электронов, $\mu_n, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{С}$	3900	1500
подвижность дырок, $\mu_p, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{С}$	1900	600

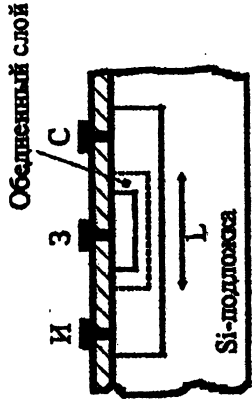


Рис. 2.1. Структура с приповерхностным каналом (МДП-структура)

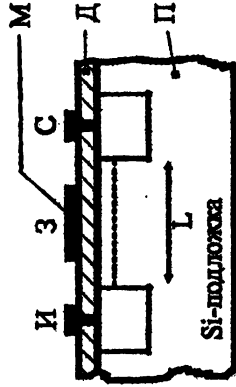


Рис. 2.2. Структура с объемным каналом (управляющим р-п-переходом)

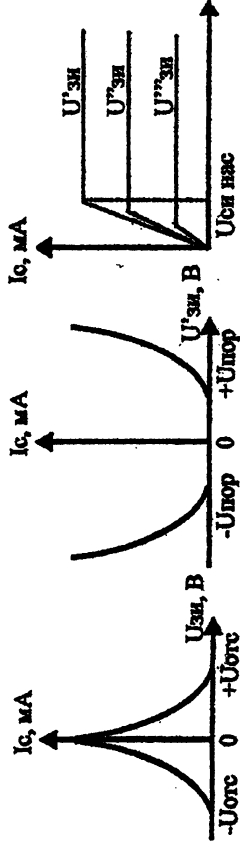


Рис. 2.3. ВАХ полевых структур

Учебно-методическое пособие

по дисциплине

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

для студентов-заочников 2 курса

(направление 11.03.02)

Подписано в печать 11.11.2015г. Формат 60x90 1/16.

Объем 1,4 усл.п.л. Тираж 250 экз. Заказ 5.

ООО «ТР-принт». Москва, ул. Правды, д. 24, стр. 5.

www.tirazhy.ru. +7 (499) 519-01-24