

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Основы микроэлектроники**

направление подготовки: 03.04.01 Прикладные математика и физика

Форма обучения: очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)			
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем		
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	144	32	32		58	18	2		2

Всего 144 часов / 4 зачётные единицы, из них:  
- контактная работа 68 часов

ПК-1

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2024

## **Содержание**

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы .....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы .....	3
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося .....	3
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	4
5. Перечень учебной литературы .....	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся..	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины .....	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине .....	6
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....	6
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	7
Приложение 1 Аннотация по дисциплине	

## **1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с установленными в программе индикаторами достижения компетенций**

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-1</b> Способность осваивать и применять специализированные знания в области физико-математических и (или) естественных наук в своей профессиональной деятельности.	<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности.	<b>Знать:</b> принципы работы полупроводниковых приборов и их физические пределы быстродействия  <b>Уметь:</b> объяснить различие металлов, полупроводников и диэлектриков с точки зрения зонной теории  <b>Владеть:</b> способами построения кристаллической решётки, обратной решётки, зоны Бриллюэна

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Основы микроэлектроники» является одной из дисциплин по выбору по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. Курс «Основы микроэлектроники» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата. Дисциплина дает магистранту необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения проектов на стыке областей физики, математики и информационных технологий.

## **3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося**

Трудоемкость дисциплины – 4 з.е. (144 часа)

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен

№	Вид деятельности	Semestr
		1
1	Лекции, час	32
2	Практические занятия, час	32
3	Лабораторные занятия, час	-
4	Занятия в контактной форме, час, из них	68

5	из них аудиторных занятий, час	64
6	в электронной форме, час	-
7	консультаций, час	2
8	промежуточная аттестация, час	2
9	Самостоятельная работа, час	76
10	Всего, ч	144

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

Лекции (32 часа)

Наименование темы и их содержание	Объем, час
Ведение. Полупроводники в современной электронике и оптоэлектронике. Исторический обзор и перспективы микроэлектроники.	2
Структура, методы роста и исследования полупроводников.	2
Динамика кристаллической решётки. Фононы.	2
Элементы зонной теории твердого тела.	2
Статистика электронов и дырок в полупроводниках.	2
Примеси в полупроводниках.	2
Кинетические явления в полупроводниках	2
Термоэлектрические и термомагнитные явления. Диффузионный ток.	2
Поверхность полупроводника, поверхностные состояния. Область пространственного заряда - ОПЗ. Гетерограница, гетероструктуры.	2
Контакт металл-полупроводник. Диод Шоттки.	2
P-n переход.	2
Приборное применение p-n переходов. Биполярный транзистор.	2
Эффект поля. МДП-транзистор.	2
Приборы на основе МДП-структур.	2
Элементы планарной технологии.	2
Проблемы и предельные параметры планарной технологии. Наноэлектроника.	2

Практические занятия (32 часа)

Содержание практического занятия	Объем, час
<b>Зонная структура твердых тел.</b> Роль дефектов в полупроводниках. Собственные и примесные полупроводники. Примеси акцепторного и донорного типа. Компенсация. Водородоподобная модель примесных уровней. Вырожденный и невырожденный электронный газ. Распределения Ферми –Дирака, Максвелла–Больцмана. Функции распределения электронов на примесных уровнях. Плотность состояний. Интеграл Ферми.	4
Эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный полупроводники. Закон действующих масс. Уровень Ферми собственного полупроводника. Уравнение электронейтральности. Уровень Ферми донорного и акцепторного полупроводника. Эффективная масса для расчета плотности состояний	4

Тепловая скорость электронов. Время релаксации, длина свободного пробега. Механизмы рассеяния и подвижность. Проводимость. Эффективная масса для расчета проводимости. Эффект Холла. Дрейф в электрическом поле.	2
Насыщение дрейфовой скорости. Эффект Ганна. Диффузия свободных носителей. Соотношение Эйнштейна. Диффузионно-дрейфовое уравнение. Амбиполярная диффузия. Диэлектрическая релаксация. Дебаевская длина экранирования. Эффект Дембера. Инжекция и рекомбинация.	4
Механизмы рекомбинации. Время жизни неосновных носителей заряда. Квазиуровни Ферми. Встроенное электрическое поле. Эффект Зеебека. Уравнение непрерывности.	2
Уравнение непрерывности. Термоэлектронная работа выхода металла и полупроводника. Эффект Шоттки. Уровень Ферми контактирующих тел. Правила построения зонных диаграмм. Поверхностные состояния. Зонные диаграммы реальной поверхности полупроводников. Зонные диаграммы контакта металл–полупроводник.	4
Приближение обеднения, электрическое поле, потенциал, толщина и емкость области пространственного заряда. Вольт–амперная характеристика идеального барьера Шоттки. Омический контакт. Полевой транзистор с барьером Шоттки.	2
Методы получения $n-p$ перехода. Зонная диаграмма $n-p$ перехода. Приближение обеднения, электрическое поле, потенциал, толщина и емкость области пространственного заряда.	2
Туннельный и лавинный пробой. Вольт–амперная характеристика. Длинная и короткая база. Генерация и рекомбинация в ОПЗ. Полевой транзистор с управляющим $n-p$ переходом.	2
Биполярный транзистор: энергетическая диаграмма, принцип работы, составляющие базового тока, вольт–амперная характеристика, активный режим, усиление по току. Время пролета носителей через базу.	2
Энергетическая диаграмма МОП–структуры. Пороговое напряжение. Вольт–фарадная характеристика. Заряд в окисле.	2
Полевой транзистор с изолированным затвором на основе структуры металл–окисел–полупроводник. Приборы с зарядовой связью. Основные этапы изготовления МОП-транзистора с поликремниевым затвором.	2

Проведение семинарских занятий осуществляется в форме практической подготовки, предусматривающей участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью в области информационных технологий, связанных с проведением научных и практических работ.

#### Самостоятельная работа студентов (76 ч)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	24
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	34
Подготовка к экзамену	18

## **5. Перечень учебной литературы**

1. Володин В.А. Физические основы микроэлектроники, Новосибирск: НГУ, 2009, 191 с., ISBN 978-5-94356-672-1 (13 экз.)
2. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника, М.: Высшая школа, 1991, 352 с. , ISBN 5060008207 (4 экз.)

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

1. Гинзбург И.Ф. Введение в физику твёрдого тела: Части 1-3, Новосибирск: НГУ, 1998, 363 с.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников, М.: Наука, 1990, 685 с.
3. Питер Ю., Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников, М. Физматлит, 2002, 541 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

### ***7.1 Ресурсы сети Интернет***

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет;
- «Российская национальная платформа открытого образования» (<http://openedu.ru/>), edX ([www.edx.org](http://www.edx.org));
- Веб-страницы ведущих международных центров СИ.

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС, электронную почту.

### ***7.2 Современные профессиональные базы данных:***

- Реферативно-поисковая база данных Reaxys (Elsevier)
- Реферативно-библиографическая база данных Scopus (Elsevier)
- Реферативно-библиографическая база данных SciFinder (Chemical Abstracts Service)
- Библиометрическая база данных Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.)
- База данных полнотекстовых научных журналов JSTOR.
- Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ)
- Электронные ресурсы российской научной библиотеки eLibrary.ru
- Электронные ресурсы издательства American Chemical Society (ACS)
- Электронные ресурсы издательства Annual Reviews
- Электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier
- Электронные ресурсы издательства The Royal Society of Chemistry (RSC)
- Электронные ресурсы издательства Wiley

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

### ***8.1 Перечень программного обеспечения***

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий приложения для работы с документами и презентациями.

## ***8.2 Информационные справочные системы***

Не используются.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

- Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации;
- Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения представлен в разделе 1.

### ***10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине***

#### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости осуществляется контролем посещения занятий обучающимся и выполнения запланированных работ.

### ***Промежуточная аттестация:***

Для успешного прохождения курса обучающиеся должны продемонстрировать знания физических процессов, протекающих в базовых полупроводниковых элементах, которые составляют основу современных цифровых и аналоговых интегральных схем.

Итоговая аттестация по дисциплине проводится в устной форме путем ответов на вопросы, освещаемые во время учебных занятий.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### ***Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Основы микроэлектроники»***

Таблица 10.1

Код компетенции	Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
ПК-1	<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности.	<b>Знать:</b> принципы работы полупроводниковых приборов и их физические пределы быстродействия	Экзамен.
		<b>Уметь:</b> объяснить различие металлов, полупроводников и диэлектриков с точки зрения зонной теории	Работа на семинарских занятиях при обсуждении типовых ошибок, затруднений, а также идей по решению задач рамках дисциплины.
		<b>Владеть:</b> способами построения кристаллической решётки, обратной решётки, зоны Бриллюэна	Работа на семинарских занятиях при решении задач в рамках дисциплины.

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<b>Решение заданий:</b> – задание решено правильно,	<b>Отлично</b>

- работа оформлена аккуратно, четкие рисунки и чертежи,
- осмысленность, логичность и аргументированность изложения материала,
- точность и корректность применения терминов и понятий.

«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. В ответах на вопросы преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.

**Экзамен:**

- самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,
- точность и корректность применения терминов и понятий,
- наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.

При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.

**Решение заданий:**

- задание решено правильно,
- работа оформлена аккуратно, четкие рисунки и чертежи,
- осмысленность, логичность и аргументированность изложения материала, наличие затруднений в формулировке собственных суждений,
- точность и корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок.

*Хорошо*

«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. Отвечает на дополнительные вопросы.

В ответах на вопросы преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.

**Экзамен:**

- самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, наличие затруднений в объяснении отдельных процессов и явления, а также при формулировке собственных суждений,
- точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок,
- наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.

**Решение заданий:**

- задание решено правильно,
- работа оформлена неаккуратно
- неосознанность и неосновательность выбранных методов анализа,
- нет осмысленности в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации,
- корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок.

*Удовлетворительно*

«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. При ответах на вопросы допускает ошибки

**Экзамен:**

- теоретический и фактический материал в слабой степени подкреплен ссылками на научную литературу и источники,
- частичное понимание и неполное изложение причинно-следственных связей,
- самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, в объяснении процессов и явлений, а также затруднений при формулировке собственных суждений,
- корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок,
- наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.

**Решение заданий:**

- задание решено неправильно,
- компилятивное, неосмысленное, нелогичное и неаргументированное изложение материала,
- грубые ошибки в применении терминов и понятий,  
«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. На дополнительные вопросы не отвечает.

*Неудовлетво  
-рительно*

**Экзамен:**

- фрагментарное и недостаточное представление теоретического и фактического материала, не подкрепленное ссылками на научную литературу и источники,
- непонимание причинно-следственных связей,
- отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала,
- грубые ошибки в применении терминов и понятий,
- отсутствие ответов на дополнительные вопросы.

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения***

**Перечень примерных контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы:**

**1. Кристаллическая решетка**

**1.1.** Сколько атомов приходится на элементарную ячейку и чему равно координационное число в кристаллических структурах простой кубической, ОЦК и ГЦК?

**1.2.** Основываясь на характеристиках кристаллической структуры типа алмаза, рассчитайте следующие параметры кремния ( $a=0,543$  нм)

- число атомов, содержащихся в элементарной ячейке и координационное число
- атомный радиус структуры (длину отрезка, соединяющего два ближайших узла)
- число атомов, приходящихся на единицу площади в кристаллических плоскостях (111), (100) и (110). (Три указанные здесь плоскости существенны для технологии полупроводниковых приборов.)

**1.3.** Доказать, что плоскость с миллеровскими индексами ( $hkl$ ) отсекает на осях координат отрезки, пропорциональные  $a/h$ ,  $b/k$ ,  $c/l$ .

**1.4.** Доказать свойства векторов обратной решетки:

- 1) Вектор обратной решетки  $K_{hkl}$  перпендикулярен плоскости с миллеровскими индексами ( $hkl$ ) прямой решетки.

2) Межплоскостное расстояние  $d_{hkl}$  для семейства плоскостей  $(hkl)$  в прямой решетке равно  $d_{hkl} = 2\pi / |\mathbf{K}_{hkl}|$ .

Вычислить межплоскостное расстояние для плоскостей  $(111)$ ,  $(321)$  простой кубической решетки с параметром  $a$ .

**1.5.** Предположим, что каждый атом в кристаллической решётке представляет собой твёрдый шар, такой, что поверхности шаров, соответствующих ближайшим соседним атомам, соприкасаются. Найдите относительную долю объёма элементарной ячейки, занятую атомами, если кристаллическая решётка: а) простая кубическая, б) объемноцентрированная кубическая, в) гранецентрированная кубическая, г) типа алмаза.

**1.6.** Показать, что для гранецентрированной кубической решётки обратная решётка – объёмноцентрированный куб и, наоборот.

**1.7.** Показать, что объём элементарной ячейки обратной решётки  $V_r = (2\pi)^3 / V_d$ , где  $V_d$  - объём ячейки элементарной ячейки в прямом пространстве.

**1.8.** Изобразить плоскости  $(331)$ ,  $(3\bar{1}\bar{2})$  простой кубической решетки.

**1.9.** Изобразить решётку алмаза, выделить ковалентные связи в решётке.

**1.10.** Изобразить три первые зоны Бриллюэна двумерной обратной решётки, являющейся центрированным квадратом, показать, что их объемы равны.

**1.11.** Найти связь между дифракцией электронных волн (условие дифракции Вульфа-Брэгга) и обратной решёткой (вывести условие дифракции через вектор обратной решётки)

## 2. Зонная структура полупроводников

**2.1.** Вычислить собственные значения и собственные функции оператора трансляции идеального бесконечного кристалла (теорема Блоха).

**2.2.** Используя модель Кронига–Пени, рассчитать зонный спектр электрона в одномерной кристаллической решётке (параметры  $\varepsilon$  и  $c$  задает преподаватель).

**2.3.** Показать, что электронная волна в линейной цепочке атомов с периодом  $a$  может распространяться только при значениях волнового вектора

$$\frac{\pi}{a} m < k_m < \frac{\pi}{a} (m+1), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Изобразить закон дисперсии электрона в одномерном кристалле и объяснить его.

**2.4.** Рассчитать вероятность ( $T$ ) туннелирования электрона с энергией  $E$  через потенциальный барьер высотой  $V_0$  и толщиной  $d$  ( $E < V_0$ ).

**2.5** Получить выражение для определения ширины запрещенной зоны полупроводника из температурной зависимости проводимости.

**2.6.** Определить характер энергетического спектра носителей заряда в полупроводнике, помещенном в постоянное электрическое поле  $\varepsilon$ .

**2.7.** Рассчитать вероятность ( $T$ ) образования электронно–дырочной пары в электрическом поле  $\varepsilon$ , используя результаты задач 2.5, 2.6 и модель туннелирования электрона через треугольный барьер. Вычислить величину  $\varepsilon$  для Si, Ge и GaAs при  $T = 1$ ?

**2.8.** Вывести выражение для определения эффективной массы носителей заряда из экспериментов по циклотронному резонансу (изотропный случай). Нарисовать зависимости энергии, групповой скорости и обратной эффективной массы электронов от волнового вектора в первой зоне Бриллюэна одномерной решётки, используя

$$\text{выражение } E_k = E_0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}.$$

**2.9.** Изобразить изоэнергетические поверхности в Si, Ge и GaAs в проекции на плоскость  $k_x k_y$ . Где больше эффективная масса электрона в Ge и GaAs: в направлении  $k_{[111]}$  или  $k_{[100]}$  относительно изоэнергетической поверхности?

- 2.10.** Найти связь между ускорением электрона в кристалле и внешней силой.
- 2.11.** Рассчитать граничную длину волны излучения, необходимую для фотогенерации электронно-дырочных пар в Ge, Si и GaAs. Изобразить переходы на зонной диаграмме данных полупроводников, рассчитать величину изменения волнового вектора электрона и величину волнового вектора фотонов, вызывающего переход, сопоставить и объяснить различие.
- 2.12.** Используя условия цикличности Борна – Кармана определить число квантовых состояний электрона  $N_{dk}$  в элементе объема  $dk$  зоны Бриллюэна, рассчитанное на единицу объема кристалла.

### 3. Статистика свободных носителей при тепловом равновесии

- 3.1.** Используя водородоподобную модель рассчитать энергию залегания примесных уровней и боровский радиус связанного электрона в Ge, Si и GaAs.
- 3.2.** Вывести выражение для плотности состояний  $N(E)$  в случае изотропного закона дисперсии.
- 3.3.** Определить уровень (энергию) Ферми  $E_F$  в зоне проводимости для вырожденного электронного газа (изотропный случай). Рассчитать  $E_F$  зависимости от концентрации электронов в интервале  $n = 10^{15} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$  (построить график).
- 3.4.** В вырожденном полупроводнике уровень Ферми находится в зоне проводимости. Используя интеграл Ферми, определить энергию Ферми вырожденного электронного газа. Сравнить полученный результат с результатом задачи 3.3.
- 3.5.** Рассчитать температурные зависимости: эффективной плотности состояний  $N_c$ ,  $N_v$  (в  $\text{см}^{-3}$ ), уровня Ферми  $E_F$  (в эВ) и концентрации  $n_i$  (в  $\text{см}^{-3}$ ) для собственных Si, Ge и GaAs в интервале  $T = 200 - 700$  К. В расчетах обязательно учесть температурную зависимость ширины запрещенной зоны.

*Указание.* Построить графики для каждого параметра; собственную концентрацию строить в логарифмическом масштабе от обратной температуры. Каждый параметр для Si, Ge и GaAs выводить в едином масштабе на один рисунок.

**3.6.** Показать, что для невырожденного полупроводника равновесные концентрации электронов и дырок связаны с собственной концентрацией следующими выражениями:

$$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}, \quad p_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}.$$

- 3.7.** Найти связь концентрации электронов в полупроводнике с уровнем Ферми, если известно, что при малых значениях  $k$  закон дисперсии имеет вид

$$E(k) = E_c + \frac{(1 - ak^2)\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

*Указание.* Отсчет энергии  $E$  вести от края ЗП. Разложить функцию  $k^2(E)$  по малому параметру.

- 3.8.** Доказать, что в полупроводнике  $n$ - типа

$$n_n = \frac{1}{2} N_d \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}} \right], \quad p_n = \frac{1}{2} N_d \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}} \right],$$

где  $n_n$  и  $p_n$  - концентрация основных и неосновных носителей соответственно.

- 3.9.** Используя зонную диаграмму GaAs и параметры электронов в Г- и L- долинах, найти зависимость уровня Ферми от концентрации и рассчитать отношение концентраций электронов в основном и дополнительном минимумах при  $T = 300$  К. При какой температуре они выровняются и возможно ли это достигнуть реально?

- 3.10.** Получить выражения для температурной зависимости уровня Ферми и концентрации носителей заряда в примесных полупроводниках ( $n$ - и  $p$ -типа). Рассмотреть случаи низких и высоких температур.

**3.11.** Рассчитать и построить температурные зависимости уровня Ферми (в эВ) и концентрации носителей заряда (в  $\text{см}^{-3}$ ) в Si, Ge и GaAs, легированных либо донорными, либо акцепторными примесями с концентрацией  $5 \times 10^{14}$ ,  $10^{16}$  и  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (тип примеси задает преподаватель). Определить температуру, при которой происходит истощение примеси и температуру перехода к собственной проводимости. При какой температуре ионизована половина примеси и 95% примеси?  
**Указание.** Зависимость концентрации от обратной температуры строить в логарифмическом масштабе.

#### 4. Свободные носители в полупроводниках

**4.1.** Используя распределение Максвелла-Больцмана получить выражение для средней тепловой скорости электронов и плотности потока носителей через плоскость, обусловленную тепловым движением. Рассчитать среднюю тепловую скорость электронов в Si, Ge и GaAs при  $T = 300 \text{ К}$ .

**4.2.** Вычислить удельное сопротивление ( $\rho$ ) собственных Si, Ge и GaAs.

**4.3.** Получить выражения для амбиполярного коэффициента диффузии ( $D_{\text{amb}}$ ), амбиполярной подвижности ( $\mu_{\text{amb}}$ ), максвелловского времени релаксации ( $\tau_m$ ) и дебаевской длины экранирования ( $L_D$ ) в полупроводниках. Вычислить данные параметры для Si, Ge и GaAs, легированных донорной примесью с концентрацией  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

**4.4.** Рассчитать разность потенциалов между освещенной и неосвещенной частями Si, Ge и GaAs *n*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  в отсутствие поверхностной рекомбинации, если темп поверхностной фотогенерации  $g_s = 10^{15} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ . Толщина образца  $d$  много больше диффузионной длины неосновных носителей.  $L_p = 0,1 \text{ см}$ .

**4.5.** В однородный полубесконечный полупроводник при  $x = 0$  стационарно инжектируются дырки. Определить концентрацию введеных дырок при  $x = 0$ , если коэффициент инжекции (отношение дырочного тока к полному току)  $\xi = 0,5$ , полная плотность тока  $j = 1,6 \text{ mA}/\text{см}^2$ ,  $L_p = 0,1 \text{ см}$ ,  $D_p = 50 \text{ см}^2/\text{с}$ . Дрейфом пренебречь.

**4.6.** Легированные фосфором с  $N_d = 5 \times 10^{14}$  и  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  пластины Si и Ge, толщиной 300 мкм, находятся в вакуумной камере на теплоизолирующем держателе. Вычислить приложенное напряжение к пластинам (контакты расположены на нижней и верхней плоскостях пластин), при котором начинается тепловой пробой, то есть достигается температура, соответствующая собственной проводимости.

**Указание.** В расчетах использовать результаты задачи 3.11.

**4.7.** Найти распределение неравновесных дырок в длинном нитевидном образце Ge *n*-типа при стационарной инжекции дырок в точке и при наличии электрического поля 5 В/см вдоль образца. Температура комнатная, полупроводник невырожден,  $L_p = 0,09 \text{ см}$ .

**4.8.** Вычислить максимальную рабочую частоту МОП-транзистора с каналом *n*- и *p*-типа на Si, Ge и GaAs. Длина канала  $L = 1 \text{ мкм}$ . Напряжение исток-сток – 1 В. Фактор рассеяния (отношение подвижности носителей в объеме полупроводника к подвижности в канале, обусловленное наличием поверхности) носителей в канале равен 2. Что ограничивает рабочую частоту данных приборов?

**4.9.** Вычислить время пролета носителей через базу биполярных *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов, то есть время, которое требуется неосновным носителям, чтобы пересечь область базы толщиной  $W_b$  вследствие диффузии. Считать базу тонкой, то есть  $W_b \ll L_n, L_p$ . Сопоставить результаты для приборов, изготовленных на Si, Ge и GaAs с толщиной базы 5 мкм.

**4.10.** Имеется образец Ge в форме параллелепипеда размером  $1 \times 0,2 \times 0,1 \text{ см}$  и концентрацией легирующей примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Вдоль образца приложено напряжение 10 В. Перпендикулярно направлению тока действует магнитное поле с индукцией 0,5

Тл. Вычислить напряжение Холла между контактами к узким сторонам боковой поверхности образца.

**4.11.** Определить напряженность электрического поля, при котором электрон за время свободного пробега приобретает кинетическую энергию , достаточную для перевода его из Г-долины в верхнюю L-долину GaAs (вся энергия приобретается при движении в нижней Г-долине).

**4.12.** Рассчитать температурную зависимость проводимости GaAs в предположении постоянства времени релаксации в Г- и L- долинах и независимости подвижности от T (учесть зависимость  $E_g(T)$  и  $n_i(T)$ ). Концентрация донорной примеси  $N_D = 1 \times 10^{16}$  и  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

## 5. Контакт металл-полупроводник, п-р переход

*Указание.* Ко всем задачам необходимо изображать зонные диаграммы.

**5.1.** Рассчитать толщину ОПЗ в Si ( $q\chi=4,05 \text{ эВ}$ )  $n$ -типа с  $N_D = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в зависимости от толщины зазора  $d$  между металлом (Pt,  $q\Phi_M=5,7 \text{ эВ}$ ) и полупроводником. Рассмотреть предельные случаи большого и очень малого зазора.

**5.2.** Определить зависимости электрического поля  $\epsilon(x)$  и потенциала  $\varphi(x)$  в обогащенном приповерхностном слое Si  $n$ -типа и его толщину при  $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Показать, что половина объемного заряда в омическом контакте Шоттки располагается на глубине до  $\sqrt{2}L_D$  от поверхности.

*Указание.* Длину Дебая определять от концентрации электронов  $n_s$  вблизи поверхности.

**5.3.** Определить длину Дебая  $L_D$  для собственного полупроводника.

**5.4.** Вычислить и нарисовать зависимости толщины обедненного слоя, электрического поля, заряда и емкости от обратного напряжения в диапазоне  $V=0 - 20 \text{ В}$  для Au/ $n$ -тип Si диода Шоттки. Считать  $N_D = 10^{14}, 10^{16}$  и  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . ( $q\Phi_M=5,1 \text{ эВ}$ ,  $q\chi=4,05 \text{ эВ}$ ). Определить зависимость  $\Phi_S(N_D)$ .

Построить ВАХ диода с учетом эффекта Шоттки. Провести сравнение диффузационной и диодной теории барьера Шоттки.

**5.5.** Как диоды с барьером Шоттки, так и омические контакты сформированы напылением Al на поверхность Si. ( $q\Phi_M=4,3 \text{ эВ}$ ,  $q\chi=4,05 \text{ эВ}$ ). Для идеального соответствия теории Шоттки найти допустимый диапазон концентраций в случае каждого типа контакта. Рассмотреть области, легированные примесями как  $p$ - , так и  $n$ -типа. Найти толщину ОПЗ для  $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

**5.6.** Построить зонные диаграммы контакта металл–полупроводник  $p$ -типа в равновесии, при прямом и обратном смещениях. Рассмотреть случаи  $\Phi_M > \Phi_s$  и  $\Phi_M < \Phi_s$ .

**5.7.** Показать, что при контакте металла с полупроводником  $p$ -типа ( $\Phi_M < \Phi_s^{(p)}$ ) высоту барьера Шоттки можно определить из выражения

$$qV_{Bs}^{(p)} = E_g - (\Phi_M - \chi)q = E_g - qV_{Bs}^{(n)}.$$

Найти зависимость тока насыщения  $j_0$  от уровня легирования  $N_A$ . Рассчитать  $j_0$  для Si с  $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

*Указание.* Учесть, что при обратном смещении ток термоэлектронной эмиссии из полупроводника в металл не изменяется и равен току насыщения  $j_0$ .

**5.8.** Нарисовать зонную диаграмму Si диода–прототипа с алюминиевыми контактами к  $n^+$ – и  $p^+$ –областям в равновесии.

**5.9.** В приближении обеднения рассчитать контактную разность потенциалов ( $V_i$ ), зависимости электрического поля  $\epsilon(x)$ , потенциала  $\varphi(x)$ , толщину ОПЗ ( $W_d$ ), емкость при обратном смещении  $C(V_{обр})$ . Нарисовать зависимости  $\epsilon(x)$ ,  $\varphi(x)$  и  $C(V_{обр})$ . Как экспериментально можно определить  $V_i$ ?

**5.10.** Рассчитать контактную разность потенциалов симметричного *n-p* перехода при  $T = 50$  и  $300$  К для Si и Ge, в которых *n*- и *p*-области легированы, соответственно, фосфором и бором с концентрацией  $10^{15}$  см $^{-3}$ .

**5.11.** Рассчитать величину пробивного напряжения несимметричного *n-p* перехода в зависимости от величины критического электрического поля  $\epsilon_{\text{проб.}}$ , при котором наступает пробой.

**5.12.** Построить ВАХ симметричного Si-диода в зависимости от уровня легирования (выбрать любые четыре значения в интервале  $10^{17}$ – $10^{19}$  см $^{-3}$ ) с учетом туннельного пробоя. Диффузионные длины электронов и дырок принять равными 0,1 см.

*Указание.* Использовать результаты задачи 2.7.

## 6. Система металл – окисел – полупроводник

**6.1.** Построить зонные диаграммы неидеальной МОП-структурь в случае подложки *p*-типа в равновесии и в режиме плоских зон (рассмотреть оба случая равновесного состояния – обогащения и обеднения).

**6.2.** Построить зонные диаграммы идеальной МОП-структурь в случае подложки *n*-типа при приложении внешнего напряжения (рассмотреть три состояния).

**6.3.** Найти напряжение плоских зон, пороговое напряжение и емкость МОП-структурь с затвором из Al ( $q\Phi_m=4,3$  эВ) и Si *n*-типа с  $N_D=3\times 10^{15}$  см $^{-3}$ . Толщина диоксида кремния  $d_{\text{ox}}=100$  нм ( $\epsilon(\text{SiO}_2)=4$ ). Построить вольт-фарадные (ВЧ) характеристики в случае отсутствия и наличия встроенного заряда в диэлектрике (положительного и отрицательного).

**6.4.** МОП-структурь ( $Q_{\text{ox}}=0$ ) имеет подложку из кремния *p*-типа с концентрацией  $N_a=10^{15}$  см $^{-3}$ . Толщина окисла - 0,2 мкм, затвор - алюминиевый. Приложенное к затвору напряжение создает обедненную область толщиной 0,65 мкм. За счет эффекта обеднения на поверхности полупроводника создается электрическое поле напряженностью  $10^4$  В/см. Вычислить: а) поверхностный потенциал; б) напряжение на затворе; в) пороговое напряжение, учитывая, что плотность индуцированного подвижного заряда равна нулю; г) емкость при малых сигналах и на высоких частотах в режиме сильной инверсии.

**6.5.** Оценить число электронов в канале МОП-транзистора с длиной канала 0,2 мкм и шириной 2 мкм при напряжении  $V_G=1,5$  В. ( $d_{\text{ox}}=10$  нм,  $\epsilon(\text{SiO}_2)=4$ ).

**6.6.** В окисле на границе раздела системы окисел - полупроводник имеется некоторый фиксированный заряд  $Q_s$ . Примесь в объеме полупроводника полностью ионизована. Найти и построить зависимость заряда  $Q_s$  от поверхностного потенциала.

**6.7.** Рассчитать ВАХ МОП-транзистора.

## Примеры вопросов для самостоятельного изучения и подготовки к экзамену.

1. Основные элементы интегральных схем. Физические принципы их работы.
2. Элементы планарной технологии. Базовые процессы создания МОП-транзистора с поликремниевым затвором.
3. Основные физические свойства полупроводников. Методы получения кристаллического кремния.
4. Кристаллическая решетка: решетки Бравэ, кристаллическая структура основных полупроводников, ковалентная связь.
5. Индексы Миллера. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.
6. Образование энергетических зон в твердых телах. Классификация твердых тел: металлы (проводники), изоляторы (диэлектрики), полупроводники, полуметаллы.
7. Зонная структура кремния, германия, арсенида галлия. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Прямые и непрямые переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости.

8. Электрон в периодическом поле: теорема Блоха, общие свойства электрона в периодическом поле (энергия, квазиимпульс). Число квантовых состояний в зоне Бриллюэна.
9. Модель Кронига – Пенни. Закон дисперсии для электрона в одномерной решетке.
10. Модель слабой связи. Зависимость эффективной массы от  $E_g$ .
11. Модель сильной связи. Зависимость эффективной массы от ширины разрешенной зоны.
12. Энергетический спектр электрона в постоянном электрическом поле. Туннельный эффект.
13. Тензор обратной эффективной массы. Эффективная масса как динамическая характеристика электрона. Циклотронный резонанс. Дырки почти заполненной валентной зоны, легкие и тяжелые дырки.
14. Роль дефектов в полупроводниках. Собственные и примесные полупроводники. Примеси акцепторного и донорного типа. Компенсация. Водородоподобная модель примесных уровней.
15. Вырожденный и невырожденный электронный газ, критерии вырождения. Распределения Ферми – Дирака, Максвелла–Больцмана. Функции распределения электронов на примесных уровнях. Зависимость уровня Ферми вырожденного электронного газа от концентрации.
16. Плотность состояний электронного газа. Статистика электронов и дырок при тепловом равновесии. Эффективная плотность состояний.
17. Невырожденный и вырожденный полупроводники, критерии вырождения. Закон действующих масс. Уровень Ферми собственного полупроводника, температурная зависимость. Связь концентрации электронов и дырок с собственным уровнем Ферми.
18. Уравнение электронейтральности. Уровень Ферми донорного и акцепторного полупроводника: зависимость от температуры.
19. Температурная зависимость концентрации носителей в примесном полупроводнике. Эффективная масса для расчета плотности состояний в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
20. Тепловая скорость электронов. Время релаксации, длина свободного пробега. Подвижности, ее связь с эффективной массой носителей заряда и временем релаксации. Механизмы рассеяния и подвижность. Подвижность в случае действия нескольких механизмов рассеяния. Зависимость подвижности электронов и дырок от концентрации примесей.
21. Проводимость, ее связь с подвижностью носителей. Эффективная масса для расчета проводимости в полупроводнике с анизотропным законом дисперсии. Эффект Холла.
22. Дрейф в электрическом поле. Насыщение дрейфовой скорости. Явление перехода электронов в верхнюю долину в GaAs. Эффект Ганна.
23. Диффузия свободных носителей. Соотношение Эйнштейна. Диффузионно-дрейфовое уравнение.
24. Амбиполярный коэффициент диффузии и амбиполярная подвижность. Диэлектрическая релаксация. Дебаевская длина экранирования. Эффект Дембера.
25. Инжекция и рекомбинация. Время жизни неосновных носителей заряда. Квазиуровни Ферми. Связь встроенного электрического поля с градиентом концентрации носителей заряда. Эффект Зеебека.
26. Уравнение непрерывности. Решение уравнения непрерывности для стационарного случая.
27. Термоэлектронная работа выхода металла и полупроводника. Эффект уменьшения работы выхода в электрическом поле (эффект Шоттки). Определение работы выхода по току термоэлектронной эмиссии.
28. Уровень Ферми контактирующих тел в состоянии равновесия (термодинамический и статистический подходы). Правила построения зонных диаграмм.

29. Поверхностные состояния. Зонные диаграммы реальной поверхности полупроводников  $n$ - и  $p$ -типа. Физические механизмы обогащения, обеднения инверсии.
30. Контакт металл–полупроводник при различных соотношениях работ выхода металла и полупроводника  $n$ - и  $p$ -типа в состоянии равновесия и при приложении внешнего напряжения.
31. Контакт металл–полупроводник: зонная диаграмма в приближении обеднения, ход электрического поля и потенциала в области объемного заряда. Толщина ОПЗ. Емкость обратно смещенного барьера Шоттки. Определение концентрации легирующей примеси и контактной разности потенциалов из измерений вольт–фарадной характеристики.
32. Вольт–амперная характеристика идеального барьера Шоттки (диодная теория), поправка тока насыщения на эффект Шоттки
33. Диффузионная модель вольт–амперной характеристики идеального барьера Шоттки. Определение высоты барьера из измерений вольт–амперной характеристики
34. Омический контакт. Идеальный обогащенный контакт Шоттки и тунNELьный контакт к полупроводнику  $n$ - и  $p$ -типа: зонные диаграммы и физические механизмы работы.
35. Зонная диаграмма  $n-p$  перехода (диода–прототипа) в состоянии термодинамического равновесия. Внутреннее электрическое поле и потенциал в зависимости от уровня легирования донорами и акцепторами. Толщина ОПЗ.
36. Приложение внешнего электрического поля к  $n-p$  переходу: энергетическая диаграмма, электрическое поле, емкость. Туннельный и лавинный пробой обратно смещенного  $n-p$  перехода.
37. Вольт–амперная характеристика  $n-p$  перехода: дырочная и электронная компоненты тока. Длинная и короткая база. Влияние генерации и рекомбинации в ОПЗ на вид ВАХ.
38. Система металл–окисел–полупроводник: энергетическая диаграмма идеальной МОП–структуры в режиме обогащения, обеднения и инверсии, пороговое напряжение (случай полупроводника  $n$ -типа).
39. Система металл–окисел–полупроводник: энергетическая диаграмма идеальной МОП–структуры в режиме обогащения, обеднения и инверсии, пороговое напряжение (случай полупроводника  $p$ -типа).
40. Емкость идеальной структуры металл–окисел–полупроводник ( $n$ - и  $p$ -типа) в зависимости от напряжения. Природа заряда в окисле. Влияние заряда на пороговое напряжение и напряжение плоских зон.
41. Полевой транзистор с изолированным затвором на основе структуры металл–окисел–полупроводник (МОП–транзистор): вольт–амперная характеристика.
42. Полевой транзистор с управляющим  $n-p$  переходом. Полевой транзистор с барьером Шоттки. Принципы их работы.
43. Биполярный транзистор: энергетическая диаграмма ( $p-n-p$  и  $n-p-n$ ), принцип работы. Составляющие базового тока.
44. Биполярный транзистор: ВАХ, активный режим, усиление по току. Время пролета носителей через базу.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям ФГОС ВО, хранятся на кафедре-разработчике РПД в электронном виде.

# **Лист актуализации рабочей программы дисциплины «Основы микроэлектроники»**

## Приложение 1

### Аннотация рабочей программы дисциплины «Основы микроэлектроники»

Программа дисциплины «Основы микроэлектроники» составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется кафедрой автоматизации физико-технических исследований физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) для обучающихся магистратуры.

Цель дисциплины – ознакомить студентов с физическими процессами, протекающими в базовых полупроводниковых элементах, которые составляют основу современных цифровых и аналоговых интегральных схем.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающихся профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-1</b> Способность осваивать и применять специализированные знания в области физико-математических и (или) естественных наук в своей профессиональной деятельности.	<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности.	<b>Знать:</b> принципы работы полупроводниковых приборов и их физические пределы быстродействия  <b>Уметь:</b> объяснить различие металлов, полупроводников и диэлектриков с точки зрения зонной теории  <b>Владеть:</b> способами построения кристаллической решётки, обратной решётки, зоны Бриллюэна

Курс рассчитан на один семестр. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов и экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: работа на семинарских занятиях при решении задач в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачетные единицы.