

**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
Кафедра физики полупроводников**



**Рабочая программа дисциплины
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

направление подготовки: **03.04.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная 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	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание

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

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель учебного курса «Полупроводниковая электроника» – дать магистрантам базовые знания по основным разделам физики полупроводников и полупроводниковых приборов: об электронных свойствах полупроводников и основных физических явлениях в полупроводниках и полупроводниковых приборах, а также о технологии создания и физических принципах работы полупроводниковых приборов.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи курса:

1. Овладение феноменологическим и микроскопическим подходами к описанию свойств кристаллов полупроводников, диэлектриков и металлов.
2. Изучение круга транспортных явлений, используемых для исследования энергетического спектра кристаллов и процессов релаксации различных квазичастиц – электронов и дырок, поляронов, фононов, а также определения параметров полупроводников и полупроводниковых структур.
3. Ознакомление с физическими принципами работы приборов, основанных на электрофизических и транспортных явлениях в полупроводниках: полупроводниковых структурах, полупроводниковых приборах на их основе.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Знать основные транспортные и электрофизические явления в полупроводниках и физические принципы работы полупроводниковых приборов, построенных на этих явлениях; основы экспериментальных методов исследования полупроводников и полупроводниковых микроструктур.</p> <p>Уметь объяснять микроскопические механизмы транспортных и электрофизических явлений в полупроводниках; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать задачи по физике полупроводников на уровне сложности задания.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Учебный курс «Полупроводниковая электроника» относится к спецкурсам магистратуры кафедры физики полупроводников физического факультета НГУ. Для успешного освоения курса «Полупроводниковая электроника» магистранты должны обладать предварительными знаниями основ электродинамики, квантовой механики и статистической физики в объёме бакалавриата физического факультета НГУ. В свою очередь, учебный курс «Полупроводниковая

электроника» предоставляет магистрантам теоретические знания и практические навыки, необходимые для обучения в аспирантуре по специальностям «физика полупроводников» и «физика конденсированного состояния», а также для успешного использования транспортных и электрофизических методов исследования полупроводниковых материалов и наноструктур.

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

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	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные вопросы, задачи для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 36 часов.

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Введение.	1	3	1		2	
2.	Основные физические явления, лежащие в основе полупроводниковых приборов.	2-3	4	1	1	2	
3.	Контакты металл-полупроводник. Диод Шоттки	4	3	1	1	1	
4.	<i>p-n</i> переход. Диод, стабилитрон	5	3	1	1	1	
5.	Полевые транзисторы. МДП структуры. МДП транзистор (MOSFET, FinFET). High-κ диэлектрики	6-7	5	2	1	2	
6.	Биполярные транзисторы	8	6	2	2	2	
7.	Схемы на основе биполярных транзисторов	9	5	1	2	2	
8.	Приборы на основе многослойных <i>p-n</i> переходов и другие приборы	10-11	5	1	2	2	
9.	Интегральные схемы. Технология полупроводникового производства	12-13	3	1	1	1	
10.	Полупроводниковые датчики (магнитное поле, давление, температура)	14	3	1	1	1	
11.	Приборы памяти. ДОЗУ, СОЗУ. Флэш-память, другие приборы энергонезависимой памяти (RRAM, FRAM, MRAM, STT-RAM)	15-16	5	2	2	1	
12.	Основы цифровой электроники	17	5	2	2	1	
13.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
14.	Консультации перед экзаменом						2
15.	Экзамен		4				2
Всего			72	16	16	18	22

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

Введение

Основные направления развития физики и техники полупроводников. Анализ развития рынка полупроводниковых приборов. **(1 час)**

Основные физические явления, лежащие в основе полупроводниковых приборов

Кристаллическая структура. Энергетические зоны. Энергия Ферми. Квазичастицы: электроны, дырки, экситоны, фононы, поляроны. Носители заряда. Генерация и рекомбинация электронов и дырок. Тепловая генерация, концентрация носителей при термодинамическом равновесии. Собственные и примесные полупроводники. Примеси, донорные и акцепторные примеси. Компенсация. Уравнение электронейтральности, закон действующих масс, температурная зависимость энергии Ферми. Явления переноса. Диффузия. Дрейф в электрическом поле. Зависимость дрейфовой скорости от электрического поля и температуры, подвижность. Диод Ганна. Барьеры на границе. Поверхностные состояния. Работа выхода. Двойной заряженный слой. Уровни Тамма. Изгибы зон на поверхности. (1 час)

Контакты металл-полупроводник. Диод Шоттки

Зонные диаграммы. Эффект Шоттки. Омический контакт. Режимы обеднения и обогащения. Процесс переноса заряда. Структуры приборов. (1 час)

***p-n* переход. Диод, стабилитрон**

Зонные диаграммы. Обеднённый слой и барьерная ёмкость. Явления пробоя. Вольт-амперные характеристики. Фотогенерация. Схемные функции. Гетеропереходы. Основы технологии. Точечные диоды. Фотодиод. (1 час)

Полевые транзисторы. МДП структуры. МДП транзистор (MOSFET, FinFET). High-к диэлектрики

Принцип действия полевого транзистора. Основные характеристики приборов. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим переходом. Зонная диаграмма МДП структур. Ёмкость и эквивалентные схемы МДП структур. Вольт-фарадные характеристики. Теория работы МДП транзистора и его основные характеристики. Типы МДП транзисторов. Комплементарные МДП схемы. Технология МДП структур, масштабирование. (2 часа)

Биполярные транзисторы

Зонная диаграмма. Структура и основные режимы работы. Вольт амперные характеристики. Коэффициент усиления тока. Выходные характеристики. Основы технологии. Эквивалентная схема. (2 часа)

Схемы на основе биполярных транзисторов

Характеристики и параметры в режиме малых сигналов. Схема с общим эмиттером. Схема с общей базой. Схема с общим коллектором. Эмиттерный повторитель. Транзистор Дарлингтона. Каскодный усилитель. Биполярный транзистор с изолированным затвором. (1 час)

Приборы на основе многослойных *p-n* переходов и другие приборы

Тиристоры, основные характеристики. Диодный и триодный тиристоры. Полевые тиристоры. Симисторы. Варикапы. Pin диоды. Стабисторы (нормисторы). Варисторы. (1 час)

Интегральные схемы. Технология полупроводникового производства

Составные транзисторы. Дифференциальный усилитель. Выходные каскады. Планарная технология. Трёхмерная технология. Металлизация. Low-к диэлектрики. SILC. Закон Мура. (1 час)

Полупроводниковые датчики (магнитное поле, давление, температура)

Движение в магнитном поле. Эффект Холла. Датчики магнитного поля. Датчики давления. Датчики температуры. (1 час)

Приборы памяти. ДОЗУ, СОЗУ. Флэш-память, другие приборы энергонезависимой памяти (RRAM, FRAM, MRAM, STT-RAM)

Приборы оперативной (энергозависимой) и постоянной (энергонезависимой) памяти. Статическая память (СОЗУ), динамическая память (ДОЗУ): принцип действия. Приборы энергонезависимой памяти, Флэш память. Ресурс записи. Иерархическая структура. Скорость чтения и записи. Перспективы развития. SONOS, TANOS, VeSONOS структуры. Резистивная (RRAM) память, сегнетоэлектрическая (ферроэлектрическая, FRAM) память, магниторезистивная (MRAM, STT-RAM) память. **(2 часа)**

Основы цифровой электроники

Полевой транзистор как ключ. Инвертор. Базовые логические элементы. И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Комбинационные схемы. XOR. Синхронные и асинхронные схемы. RS-, D-триггеры. Метастабильное состояние триггера. Защёлки; асинхронные и синхронные счётчики. Сдвиговый регистр. **(2 часа)**

Программа практических занятий (16 часов)

Основные физические явления, лежащие в основе полупроводниковых приборов

Уравнение электронейтральности, закон действующих масс, температурная зависимость энергии Ферми. **(1 час)**

Контакты металл-полупроводник. Диод Шоттки

Зонные диаграммы контактов металл-полупроводник. **(1 час)**

***p-n* переход. Диод, стабилитрон**

Зонные диаграммы контактов *n*-полупроводник-*p*-полупроводник. **(1 час)**

Полевые транзисторы. МДП структуры. МДП транзистор (MOSFET, FinFET). High-к диэлектрики

Зонная диаграмма МДП структур. Ёмкость и эквивалентные схемы МДП структур? теория работы МДП транзистора и его основные характеристики. Типы МДП транзисторов. Комплементарные МДП схемы. Технология МДП структур, масштабирование. **(1 час)**

Биполярные транзисторы

Зонная диаграмма биполярных транзисторов. Выходные характеристики схем на биполярных транзисторах: с общей базой, с общим коллектором, с общим эмиттером. **(2 часа)**

Схемы на основе биполярных транзисторов

Выходные характеристики составных биполярных и полевых транзисторов. **(2 часа)**

Приборы на основе многослойных *p-n* переходов и другие приборы

C-V характеристики варикапов. Профили легирования и профили срезов различных исполнений варикапов. **(2 часа)**

Интегральные схемы. Технология полупроводникового производства

Масштабирование полупроводниковых микросхем, области применений Low-к и High-к диэлектриков. **(1 час)**

Полупроводниковые датчики (магнитное поле, давление, температура)

Топология, реализация и применение датчиков магнитного поля, давления и температуры. **(1 час)**

Приборы памяти. ДОЗУ, СОЗУ. Флэш-память, другие приборы энергонезависимой памяти (RRAM, FRAM, MRAM, STT-RAM)

Области применения приборов оперативной (энергозависимой) и постоянной (энергонезависимой) памяти. Различие между статической и динамической памятью. Примеры энергонезависимой памяти. (2 часа)

Основы цифровой электроники

Таблицы истинности логических элементов: НЕ, И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, XOR. (2 часа)

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	6
Подготовка к заданиям для самостоятельного решения	6
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Ансельм, Андрей Иванович Введение в теорию полупроводников: [Учеб. пособие для физ. спец. вузов] / А.И. Ансельм 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1978 615 с.: ил. (33 экз.)
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. – 672 с. (8 экз.)
3. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. / С.М. Зи; Пер. с англ. В.А. Гергеля, В.В. Ракитина. Под ред. Р.А. Суриса. – 2-е изд. – М: Мир, 1984. – 455 с. (2 экз.)
4. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Лаб. Базовых Знаний, 2001. – 488 с., ISBN 5-93208-045-0 (1 экз.)

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

5. Т.С. Шамирзаев. Твердотельная электроника: история, современное состояние и перспективы развития: Учебное пособие. URL: http://www.phys.nsu.ru/files/0/kafti/Tverdotelnaya_elektronika_Shamirzaev_T_S_FF_NGU_2011_91s.pdf
6. Квон З.Д., Попов Л.К. Электроны и дырки в тонких слоях полупроводников: учебное пособие. Ч. 1., Новосибирск: НГУ, 2010, 122с.

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

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Интернет-ресурсы:

1. Электронный архив: «Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства» - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>
2. Раздел «Образование» сайта ИФП СО РАН – URL: <http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie>

7.1 Современные профессиональные базы данных

Архив публикаций и презентаций Intel: URL:

http://www.intel.com/pressroom/kits/advancedtech/doodle/ref_HiK-MG/high-k.htm

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

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

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Используется также ПО PDFsam Proffecional, Debian/GNU Linux, LibreOffice, OnlyOffice, Okular.

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

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. 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».

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

Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости осуществляется на практических занятиях преподавателем при решении студентом задач, рекомендованных для практических занятий и домашних заданий, обсуждаются идеи и способы решения. Одновременно с этим проводятся индивидуальные консультации обучающихся.

Промежуточная аттестация

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Он проводится в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются

таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1. Учитывается также и работа обучающегося в семестре: активность на занятиях и сдача заданий.

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области полупроводниковой электроники в профессиональной деятельности.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные транспортные и электрофизические явления в полупроводниках и физические принципы работы полупроводниковых приборов, построенных на этих явлениях; основы экспериментальных методов исследования полупроводников и полупроводниковых микроструктур.	Опрос в начале каждой лекции, экзамен.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь объяснять микроскопические механизмы транспортных и электрофизических явлений в полупроводниках; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать задачи по физике полупроводников на уровне сложности задания.	Опрос в начале каждой лекции, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Полупроводниковая электроника».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно

			значительное количество негрубых ошибок.	несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень контрольных вопросов

1. Какие основные полупроводниковые приборы используются в современной электронике? Какие у них общие свойства и различия.
2. Какой физический смысл у энергии Ферми в металлах, полупроводниках, диэлектриках?
3. Какие уравнения и методы используются для расчёта положения энергии Ферми?
4. Как электрическое поле проникает в металлы, диэлектрики, полупроводники?
5. Какие кинетические явления происходят в металлах, диэлектриках, полупроводниках при приложении внешнего электрического поля?
6. Объяснить суть физических явлений, лежащих в основе диода Ганна. В каких приборах используются диоды Ганна?
7. Что такое поверхность твёрдого тела? К каким явлениям приводит поверхность? Как нивелировать влияние поверхностных состояний на электронные свойства кремния?
8. Что такое контактная разность потенциалов?
9. Нарисуйте зонную диаграмму контакта металл-полупроводник. Объясните принципы построения зонной диаграммы.
10. Нарисуйте зонную диаграмму контакта металл-полупроводник в режимах обеднения и обогащения. Объясните различия.
11. Нарисуйте зонную диаграмму контакта металл-полупроводник при приложении смещения.
12. Чем отличаются диффузия и инжекция зарядов?
13. Объясните вольт-амперную характеристику диода Шоттки, приведите область применения диода Шоттки.
14. Объясните вольт-фарадную характеристику диода Шоттки.
15. Опишите технологический процесс синтеза диода Шоттки.
16. Приведите область применения омических контактов.
17. Нарисуйте зонную диаграмму p-n перехода. Объясните принципы построения зонной диаграммы.
18. Нарисуйте зонную диаграмму p-n перехода в режимах обеднения и обогащения. Объясните принципы построения зонной диаграммы.
19. Назовите основные составляющие тока в p-n переходе.
20. Объясните вольт-амперную характеристику p-n перехода.
21. Что такое обратный ток (ток насыщения) p-n перехода и как он зависит от температуры?
22. Приведите область применения p-n перехода.
23. В чём заключается явление пробоя p-n перехода. Какое практическое значение теплового и электрического пробоя?
24. Перечислите основные параметры стабилитрона.

25. Как устроен полевой транзистор? Каков принцип его работы?
26. В чём заключается ключевое отличие МДП транзистора от полевого транзистора?
27. Что означают термины «обогащение канала», «обеднение канала», «индуцированный канал»?
28. Объясните зависимости тока в канале стока от приложенного напряжения сток-исток и затвор-подложка.
29. Какие режимы работы МДП транзистора вы знаете? Какие параметры МДП транзистора описывают их?
30. Что такое КПОМ технология?
31. Какие физические явления препятствуют дальнейшему масштабированию МПД структур? Какие технологические приёмы позволяют обойти эти препятствия?
32. Нарисуйте и опишите зонные диаграммы МПД структур и транзисторов.
33. Опишите основные технологические циклы производства МПД структур и транзисторов.
34. Нарисуйте и опишите зонные диаграммы биполярных транзисторов (p-n-p и n-p-n).
35. Какие явления лежат в основе работы биполярного транзистора? Какие характеристики описывают работу биполярного транзистора?

Перечень задач для самостоятельного решения

1. Определить температурную зависимость уровня Ферми в монокристаллическом кремнии без легирующих примесей. Как она изменится при легировании кремния фосфором с концентрацией $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$? При легировании бором с концентрацией $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$? При легировании одновременно фосфором и бором с концентрациями $N_d = N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$? Приветствуются как аналитические (численные) методы решения, так и графические.
2. Построить зависимость подвижности от электрического поля для Si и GaAs в широком диапазоне электрических полей (0–10 МВ/см) при температурах $T = 300, 350, 400 \text{ К}$ (каким тепловым режимам и требованиям к работе полупроводниковых приборов соответствуют эти температуры?). Нанести численные метки на оси. Сравните с соответствующими зависимостями для диэлектриков с подвижностью свободных носителей заряда $\mu = 0,1, 1, 10 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.
3. Нарисовать в масштабе зонную диаграмму контакта Si/Au для монокристаллических материалов. Определить зависимость ширины ОПЗ от приложенного смещения. Определить зависимость ёмкости контакта от приложенного смещения. Сравнить с контактами Si/Al, Si/SiO₂/Au, Si/SiO₂/Al.
4. Определить профиль легирования обратно смещённого p-n перехода (варикапа), для которого зависимость резонансной частоты (в совокупности с внешней индуктивностью) линейная от приложенного напряжения $f \sim V$. Для упрощения принять, что площадь варикапа не зависит от координаты. Как измениться профиль легирования при переменной площади?
5. Оценить изменение приложенного напряжения (при сохранении значения электрического поля), протекающего тока, рассеиваемой мощности, времени переключения, производительность прибора при уменьшении линейных размеров МДП транзистора в N раз. Как предотвратить туннельные токи утечек через подзатворный диэлектрик при переходе к следующей проектной норме (масштабировании в 0,7 раз)? При какой проектной норме этот вопрос становится актуальным?
6. Оценить время характеристики материалов (энергетические барьеры на границах разделов, толщины слоёв), используемых для хранения информации в энергонезависимых приборах памяти, к которым предъявляются следующие требования: а) хранения информации в течение 10 лет при температуре 85°C; б) хранения информации в течение 10 лет при температуре 125°C. Какие материалы удовлетворяют этим характеристикам?

Перечень вопросов на экзамен

1. Опишите основные технологические циклы производства биполярных транзисторов.
2. Назовите основные составляющие тока в биполярном транзисторе. Опишите вольт-амперные характеристики.
3. Как связаны токи эмиттера, базы и коллектора?
4. Опишите принцип работы и характеристики схемы с ОБ.
5. Опишите принцип работы и характеристики схемы с ОК.
6. Опишите принцип работы и характеристики схемы с ОЭ.
7. Опишите принцип работы и характеристики тиристора.
8. Что такое диодный тиристор? Чем он отличается от триодного? От полевого?
9. Опишите принцип работы и характеристики симистора.
10. Опишите принцип работы и характеристики варикапа.
11. Опишите принцип работы и характеристики рпн диода. В чём заключается отличие от р-п перехода?
12. Опишите принцип работы и назначение стабилитрона.
13. Чем варистор отличается от варикапа? Опишите принцип работы варистора, назначение.
14. Опишите основные этапы технологии производства СБИС.
15. В чём заключается отличие планарной технологии от вертикальной? Что у них общего?
16. Какие физические явления и процессы ограничивают быстродействие и ресурс СБИС? Какие технологические приёмы позволяют обойти эти ограничения?
17. Опишите области применения high-к и low-к диэлектриков в СБИС.
18. Опишите движение электрона в полупроводнике, помещённого во внешнее магнитное поле.
19. Опишите принцип работы датчиков магнитного поля. Область применения.
20. Опишите принцип работы датчиков давления. Область применения.
21. Опишите принцип работы датчиков температуры. Область применения.
22. Опишите физические явления, лежащие в основе флэш памяти.
23. Какие физические явления и процессы ограничивают быстродействие и ресурс элементов флэш памяти? Какие технологические приёмы позволяют обойти эти ограничения?
24. Какие перспективные виды энергонезависимой памяти вы знаете? Какие физические явления лежат в их основе?
25. Какие полупроводниковые приборы могут быть использованы как ключи? В каких режимах?
26. Как устроен логический инвертор? Как он работает? Объясните его функцию.
27. Как устроен логический элемент И-НЕ? Как он работает? Объясните его функцию.
28. Как устроен логический элемент ИЛИ-НЕ? Как он работает? Объясните его функцию.
29. Как устроена комбинационная схема XOR?
30. Опишите принцип работы RS-триггера. Что такое метастабильное состояние триггера?
31. Опишите принцип работы D-триггера. Что такое метастабильное состояние триггера?
32. Что общего и какие различия у RS- и D-триггеров?
33. Как устроена цифровая защёлка? Объясните принцип её работы.
34. Что такое сдвиговый регистр? Какова область их применимости?
35. В чём отличие асинхронные и синхронные счетчиков? Каковы области их применимости?

Пример билета на экзамен

1. Зонная диаграмма и вольт-фарадная характеристика МДП структуры.
2. Схемные функции биполярных транзисторов.

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

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Полупроводниковая электроника»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного