



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

ИНСТИТУТ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель ОП

(подпись)

Крайнова Г.С.

(Ф.И.О.)

« 15 » декабря 2021 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора департамента общей и
экспериментальной физики

(подпись)

Короченцев В. В.

(Ф.И.О.)

« 15 » декабря 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Физика полупроводников и низкоразмерных систем

Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Нанотехнологии в электронике

Форма подготовки очная

курс 3 семестр 5

лекции 32 час.

практические занятия не предусмотрены

лабораторные работы 34 час.

в том числе с использованием МАО лек. - / пр. / лаб. 34 час.

всего часов аудиторной нагрузки 66 час.

в том числе с использованием МАО 34 час.

самостоятельная работа 78 час.

в том числе на подготовку к экзамену 36 час.

контрольные работы (количество) не предусмотрены (5)

курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены

зачет 0 семестр

экзамен 5 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки **11.03.04 Электроника и нанoeлектроника** утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 19 сентября 2017 г. № 927 (с изменениями и дополнениями).

Рабочая программа обсуждена на заседании

департамента общей и экспериментальной физики

протокол № 3 от « 29 » ноября 2021 г.

И.о. директора департамента к.х.н., доцент Короченцев В. В.

Составители: к.ф.-м.н. Стеблій Максим Евгеньевич, к.ф.-м.н. Стеблій Екатерина Васильевна

Оборотная сторона титульного листа РПД

I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:

Протокол от « ____ » _____ 20__ г. № _____

Директор департамента _____
(подпись) (И.О. Фамилия)

II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:

Протокол от « ____ » _____ 20__ г. № _____

Директор департамента _____
(подпись) (И.О. Фамилия)

III. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:

Протокол от « ____ » _____ 20__ г. № _____

Директор департамента _____
(подпись) (И.О. Фамилия)

IV. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры/департамента:

Протокол от « ____ » _____ 20__ г. № _____

Директор департамента _____
(подпись) (И.О. Фамилия)

Цели и задачи освоения дисциплины:

Цель: изучение теории полупроводников, изучение основ зонной теории и статистики электронов в полупроводниках, а также изучение закономерностей важнейших явлений в полупроводниках: явлений переноса, эффектов сильного поля, фотопроводимости, контактных явлений и фотовольтаических эффектов.

Задачи:

- ознакомление студентов с понятиями теории полупроводников: электронная и дырочная проводимость, собственная и примесная проводимость;
- изучение понятий донорной и акцепторной примесей, компенсации примесей;
- знакомство с основными классами полупроводниковых материалов;
- изучение закономерностей поведения неравновесных носителей заряда в полупроводниках.

«Физика полупроводников и низкоразмерных систем» опирается на квантово-механические представления, является фундаментальным курсом, закладывающим основы для последующих дисциплин направления подготовки «Электроника и наноэлектроника».

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие профессиональные компетенции:

Тип задач	Код и наименование профессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Научно-исследовательский	ПК-2 Способен аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	ПК -2.1 Выбирает методики проведения исследований параметров и характеристик устройств и установок электроники и наноэлектроники
		ПК -2.2 Проводит экспериментальные исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и наноэлектроники
		ПК -2.3 Готовит научно-технические отчеты, публикации по результатам выполненных исследований

Сервисно-эксплуатационный	ПК-5 Способен к сервисному обслуживанию измерительного, диагностического, технологического оборудования	ПК-5.1 Соблюдает правила эксплуатации технологического оборудования
		ПК-5.2 Осуществляет диагностику неполадок и частичный ремонт измерительного, диагностического, технологического оборудования
		ПК-5.3 Проводит мониторинг диагностического, технологического оборудования

ПК -2.1 Выбирает методики проведения исследований параметров и характеристик устройств и установок электроники и нанoeлектроники	Знает возможные методики проведения исследований различных параметров и характеристик устройств электроники и нанoeлектроники
	Умеет выбирать методики для проведения конкретных исследований устройств нанoeлектроники
	Владеет навыками выбора методик для проведения исследований конкретных характеристик и параметров устройств нанoeлектроники для получения достоверных результатов
ПК -2.2 Проводит экспериментальные исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	Знает методики проведения экспериментальных исследований характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники
	Умеет проводить исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники
	Владеет методами и навыками проведения исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники
ПК-2.3 Готовит научно-технические отчеты, публикации по результатам выполненных исследований	Знает требования оформления научно-технических отчетов, публикаций по результатам выполненных исследований
	Умеет составлять и оформлять научно-технические отчеты, готовить публикации по результатам выполненных исследований с учетом существующих требований
	Владеет навыками подготовки научно-технических отчетов, публикаций по результатам выполненных исследований в соответствии с предъявляемыми требованиями
ПК-5.1 Соблюдает правила эксплуатации технологического оборудования	Знает принципы работы и правила эксплуатации технологического оборудования
	Умеет использовать нормативные данные эксплуатации технологического оборудования

	Владеет навыками использования технологического оборудования в соответствии с правилами эксплуатации
ПК-5.2 Осуществляет диагностику неполадок и частичный ремонт измерительного, диагностического, технологического оборудования	Знает этапы диагностики неполадок и как провести частичный ремонт измерительного, диагностического, технологического оборудования
	Умеет осуществлять диагностику неполадок и частичный ремонт измерительного, диагностического, технологического оборудования
	Владеет навыками диагностики неполадок и частичного ремонта измерительного, диагностического, технологического оборудования
ПК-5.3 Проводит мониторинг диагностического, технологического оборудования	Знает методы мониторинга измерительного, диагностического и технологического оборудования, используемого в области электроники и наноэлектроники
	Умеет проводить работы по мониторингу измерительного, диагностического и технологического оборудования
	Владеет навыками мониторинга диагностического, технологического оборудования, используемого в области электроники и наноэлектроники

2. Трудоёмкость дисциплины и видов учебных занятий по дисциплине

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 4 зачётные единицы 144 академических часа).

(1 зачетная единица соответствует 36 академическим часам)

Видами учебных занятий и работы обучающегося по дисциплине являются:

Обозначение	Виды учебных занятий и работы обучающегося
Лек	Лекции
Лаб	Лабораторные работы
СР	Самостоятельная работа обучающегося в период теоретического обучения
Контроль	Самостоятельная работа обучающегося и контактная работа обучающегося с преподавателем в период промежуточной аттестации

Структура дисциплины:

Форма обучения – очная.

№	Наименование раздела дисциплины	С е м е с т р	Количество часов по видам учебных занятий и работы обучающегося					Конт роль	Формы промежуточной аттестации
			Лек	Лаб	Пр	ОК	СР		
1	Раздел 1. Полупроводниковые материалы и Механизмы проводимости	5	11	12	-				УО-1; УО-2; ПР-2; ПР-6
2	Раздел 2. Зонная теория полупроводников. Статистика электронов в полупроводниках	5	11	12	-	-	42	36	
	Раздел 3. Кинетические и контактные явления в полупроводниках	5	10	10	-				
	Итого:		32	34		-	42	36	

I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

Лекционные занятия (32 час.)

Раздел 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕХАНИЗМЫ ПРОВОДИМОСТИ (11 часов)

Тема 1. Электропроводность полупроводников (4 часа)

Основные свойства полупроводников и их применение в современной технике. Влияние температуры, освещения, примесей и других факторов на электропроводность. Собственная проводимость, электронный и дырочный механизмы проводимости в классическом и квантовом представлении. Примесная проводимость. Доноры и акцепторы. Концентрация и подвижность носителей заряда.

Тема 2. Полупроводниковые материалы (4 часа)

Классификация полупроводников по типам химических связей и свойствам. Важнейшие для современной техники полупроводниковые материалы: кремний, германий, соединения элементов III и V группы, соединения элементов II и VI группы, и др.

Тема 3. Неравновесные носители заряда в полупроводниках (3 часа)

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Время жизни. Диффузия и дрейф. Уравнение непрерывности, частные случаи его применения.

Раздел 2. ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. СТАТИСТИКА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ (11 часов)

Тема 4. Основы зонной теории полупроводников. (7 часов)

Приближение сильной связи. Обменное взаимодействие. Обменная энергия. Образование энергетических зон при сближении атомов. Свойства энергетических зон. Приближение слабой связи. Электрон в потенциальном ящике с гладким дном. Модель Кронига-Пенни. Возникновение энергетических зон. Свойства зон (сравнение с «сильной связью»).

Зависимость энергии электрона от волнового вектора в разрешенной зоне. Разрешенные состояния электрона. Теорема Блоха. Условия цикличности Борна-Кармана. Число состояний в зоне. Квазиимпульс электрона. Зоны Бриллюэна.

Заполненность энергетических зон электронами. Различие между металлами. Полупроводниками. Диэлектриками. Примеры (см. табл. Менделеева – 1, 2, 3, 4 группы, а также NaCl). Структура энергетических зон (зависимость энергии от волнового вектора) Ge, Si, GaAs и других полупроводников. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Однодолинные и многодолинные полупроводники.

Эффективная масса электрона в кристалле. Электроны и дырки. Тензор эффективной массы. Элементарная теория примесных состояний в кристалле. Водородоподобная модель примесного центра, ее применимость. Примеры доноров и акцепторов в германии и кремнии, в полупроводниковых соединениях. Примесные зоны.

Тема 5. Статистика электронов в полупроводниках. (4 часа)

Основные положения статистики Ферми-Дирака. Понятие об уровне Ферми. Вычисление концентрации носителей заряда в полупроводнике. Вырожденный и невырожденный полупроводник.

Собственная проводимость. Примесная проводимость. Случаи высоких и низких температур.

Раздел 3. КИНЕТИЧЕСКИЕ И КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ (10 часов)

Тема 6. Кинетические явления в полупроводниках. (5 часов)

Взаимодействие носителей заряда с кристаллической решеткой в полупроводнике. Подвижность. Измерение подвижностей и концентраций. Температурная зависимость подвижности при разных механизмах рассеяния.

Явления переноса в полупроводнике. Электропроводность. Зависимость от температуры. Практическое применение.

Электропроводность при сильном электрическом поле. Ударная ионизация. Туннельный эффект, эффект Ганна

Тема 7. Контактные явления в полупроводниках. (5 часов)

Контактная разность потенциалов (КРП), методы измерения, природа КРП. Контакт металл-полупроводник. Запорные и антизапорные слои. Толщина запирающего слоя. Выпрямление на контакте двух металлов, на контакте металл-полупроводник. Изготовление P-N перехода. Выпрямление на нем. P-N переход в равновесии. Уравнение Пуассона. Характеристики электрического поля в P-N переходе. Инжекция и экстракция носителей заряда через P-N переход.

Теория тонкого P-N перехода. Применение P-N перехода: диод, триод. Полупроводниковый лазер. Гетеропереход.

II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Лабораторные работы (34 часа)

Лабораторная работа №1. Эффект Холла. Определение концентрации, подвижности и знака носителей заряда в полупроводниках (*контрольно-расчетная работа*) (6 часов).

1. Подбор и изучение теоретического материала (в т.ч. лекционного) по теме лабораторной работы.

2. Постановка задач, определение порядка проведения лабораторной работы, выполнение заданий практической части лабораторной работы.

3. Обработка результатов эксперимента, построение графиков.

4. Формулировка описательной части, формулировка выводов, составление отчета.

5. Защита лабораторной работы: сдача краткой теории по теме работы, объяснение экспериментальных результатов, их возможного расхождения с теорией.

Лабораторная работа №2. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости электропроводности (*контрольно-расчетная работа*) (5 часов).

1. Подбор и изучение теоретического материала (в т.ч. лекционного) по теме лабораторной работы.

2. Постановка задач, определение порядка проведения лабораторной работы, выполнение заданий практической части лабораторной работы.

3. Обработка результатов эксперимента, построение графиков.

4. Формулировка описательной части, формулировка выводов, составление отчета.

5. Защита лабораторной работы: сдача краткой теории по теме работы,

объяснение экспериментальных результатов, их возможного расхождения с теорией.

Лабораторная работа №3. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника по спектральной характеристике фотопроводимости (контрольно-расчетная работа) (6 часов).

1. Подбор и изучение теоретического материала (в т.ч. лекционного) по теме лабораторной работы.

2. Постановка задач, определение порядка проведения лабораторной работы, выполнение заданий практической части лабораторной работы.

3. Обработка результатов эксперимента, построение графиков.

4. Формулировка описательной части, формулировка выводов, составление отчета.

5. Защита лабораторной работы: сдача краткой теории по теме работы, объяснение экспериментальных результатов, их возможного расхождения с теорией.

Лабораторная работа №4. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда по кривым релаксации фотопроводимости (контрольно-расчетная работа) (5 часов).

1. Подбор и изучение теоретического материала (в т.ч. лекционного) по теме лабораторной работы.

2. Постановка задач, определение порядка проведения лабораторной работы, выполнение заданий практической части лабораторной работы.

3. Обработка результатов эксперимента, построение графиков.

4. Формулировка описательной части, формулировка выводов, составление отчета.

5. Защита лабораторной работы: сдача краткой теории по теме работы, объяснение экспериментальных результатов, их возможного расхождения с теорией.

Лабораторная работа №5. Выпрямление на контакте двух полупроводников. Вольт-амперные характеристики р-п переходов (контрольно-расчетная работа) (6 часов).

1. Подбор и изучение теоретического материала (в т.ч. лекционного) по теме лабораторной работы.

2. Постановка задач, определение порядка проведения лабораторной работы, выполнение заданий практической части лабораторной работы.

3. Обработка результатов эксперимента, построение графиков.

4. Формулировка описательной части, формулировка выводов, составление отчета.

5. Защита лабораторной работы: сдача краткой теории по теме работы, объяснение экспериментальных результатов, их возможного расхождения с теорией.

Лабораторная работа №6. Фотоэлектрические преобразователи: фотодиоды и фотосопротивления (контрольно-расчетная работа) (6 часов).

1. Подбор и изучение теоретического материала (в т.ч. лекционного) по теме лабораторной работы.

2. Постановка задач, определение порядка проведения лабораторной работы, выполнение заданий практической части лабораторной работы.

3. Обработка результатов эксперимента, построение графиков.

4. Формулировка описательной части, формулировка выводов, составление отчета.

5. Защита лабораторной работы: сдача краткой теории по теме работы, объяснение экспериментальных результатов, их возможного расхождения с теорией.

Задания для самостоятельной работы

Требования: Перед каждой лабораторной работой обучающемуся

необходимо изучить Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика полупроводников и низкоразмерных систем», ответить на контрольные вопросы, подготовить шаблон для отчета.

III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» и включает в себя:

- план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;
- характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;
- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнении	Форма контроля
1	В течение семестра	Подготовка к лабораторным занятиям, изучение литературы	42 часа	Работа на лабораторных занятиях (ПР-6), УО-1 (собеседование/устный опрос)
7	16-18 неделя семестра	Подготовка к экзамену	36 часов	экзамен
Итого:			78 часов	

Рекомендации по самостоятельной работе студентов

Планирование и организация времени, отведенного на выполнение заданий самостоятельной работы.

Изучив график выполнения самостоятельных работ, следует правильно её организовать. Рекомендуется изучить структуру каждого задания, обратить внимание на график выполнения работ, отчетность по каждому заданию предоставляется в последнюю неделю согласно графику. Обратить внимание, что итоги самостоятельной работы влияют на окончательную оценку по итогам освоения учебной дисциплины.

Работа с литературой.

При выполнении ряда заданий требуется работать с литературой. Рекомендуется использовать различные возможности работы с литературой: фонды научной библиотеки ДВФУ (<http://www.dvfu.ru/library/>) и других ведущих вузов страны, а также доступных для использования научно-библиотечных систем.

В процессе выполнения самостоятельной работы рекомендуется работать со следующими видами изданий:

а) Научные издания, предназначенные для научной работы и содержащие теоретические, экспериментальные сведения об исследованиях. Они могут публиковаться в форме: монографий, научных статей в журналах или в научных сборниках;

б) Учебная литература подразделяется на:

- учебные издания (учебники, учебные пособия, тексты лекций), в которых содержится наиболее полное системное изложение дисциплины или какого-то ее раздела;

- справочники, словари и энциклопедии – издания, содержащие краткие сведения научного или прикладного характера, не предназначенные для сплошного чтения. Их цель – возможность быстрого получения самых общих представлений о предмете.

Существуют два метода работы над источниками:

– сплошное чтение обязательно при изучении учебника, глав монографии или статьи, то есть того, что имеет учебное значение. Как правило, здесь требуется повторное чтение, для того чтобы понять написанное. Старайтесь при сплошном чтении не пропускать комментарии, сноски, справочные материалы, так как они предназначены для пояснений и помощи. Анализируйте рисунки (карты, диаграммы, графики), старайтесь понять, какие тенденции и закономерности они отражают;

– метод выборочного чтения дополняет сплошное чтение; он применяется для поисков дополнительных, уточняющих необходимых сведений в словарях, энциклопедиях, иных справочных изданиях. Этот метод крайне важен для повторения изученного и его закрепления, особенно при подготовке к зачету, экзамену.

Для того чтобы каждый метод принес наибольший эффект, необходимо фиксировать все важные моменты, связанные с интересующей вас темой.

Тезисы – это основные положения научного труда, статьи или другого произведения, а возможно, и устного выступления; они несут в себе большой объем информации, нежели план. Простые тезисы лаконичны по форме; сложные – помимо главной авторской мысли содержат краткое ее

обоснование и доказательства, придающие тезисам более весомый и убедительный характер. Тезисы прочитанного позволяют глубже раскрыть его содержание; обучаясь излагать суть прочитанного в тезисной форме, вы сумеете выделять из множества мыслей авторов самые главные и ценные и делать обобщения.

Конспект – это способ самостоятельно изложить содержание книги или статьи в логической последовательности. Конспектируя какой-либо источник, надо стремиться к тому, чтобы немногими словами сказать о многом. В тексте конспекта желательно поместить не только выводы или положения, но и их аргументированные доказательства (факты, цифры, цитаты).

Писать конспект можно и по мере изучения произведения, например, если прорабатывается монография или несколько журнальных статей.

Составляя тезисы или конспект, всегда делайте ссылки на страницы, с которых вы взяли конспектируемое положение или факт, – это поможет вам сократить время на поиск нужного места в книге, если возникает потребность глубже разобраться с излагаемым вопросом или что-то уточнить при написании письменных работ.

Методические рекомендации по выполнению заданий для самостоятельной работы и критерии оценки.

Самостоятельная работа при подготовке к лабораторным работам.

От обучающегося требуется:

Свободно ориентироваться в теории по теме, подготавливаемой лабораторной работы, отвечать на все контрольные вопросы, знать используемый метод.

Собеседование (устный опрос) позволяет оценить знания и кругозор студента, умение логически построить ответ, владение монологической речью и иные коммуникативные навыки.

Опрос – важнейшее средство развития мышления и речи. Обучающая функция опроса состоит в выявлении деталей, которые по каким-то причинам оказались недостаточно осмысленными в ходе учебных занятий и при подготовке задания по самостоятельной работе.

Критерии оценки. Используется зачетная система. Во время опроса допускается не более 1-й ошибки или неточности.

IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/	Контролируемые	Код индикатора достижения	Результаты обучения	Оценочные средства – наименование
------	----------------	---------------------------	---------------------	-----------------------------------

п	модули/ разделы / темы дисциплин ы	компетенции		текущий контроль	промежу точная аттестаци я
1	Раздел I. Полупровод никовые материалы и механизмы проводимос ти	ПК-2. 1 Выбирает методики проведения исследований параметров и характеристик устройств и установок электроники и нанoeлектрони ки	Знает возможные методики проведения исследований различных параметров и характеристик устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседовани е / устный опрос;	вопросы к экзамену 1-15, задание тип 1
			Умеет выбирать методики для проведения конкретных исследований устройств нанoeлектроники	УО-1 собеседовани е / устный опрос; ПР-6 лабораторная работа	
			Владеет навыками выбора методик для проведения исследований конкретных характеристик и параметров устройств нанoeлектроники для получения достоверных результатов	ПР-2 контрольная работа ПР-6 лабораторная работа	
		ПК-2.2 Проводит эксперименталь ные исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектрони ки	Знает методики проведения экспериментальных исследований характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседовани е / устный опрос	вопросы к экзамену 1-15, задание тип 1
			Умеет проводить исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседовани е / устный опрос; ПР-6 лабораторная работа	
			Владеет методами и навыками проведения исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	ПР-6 лабораторная работа; ПР-2 контрольная работа	

		ПК-2.3 Готовит научно-технические отчеты, публикации по результатам выполненных исследований	Знает методики проведения экспериментальных исследований характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседование / устный опрос	вопросы к экзамену 1-15, задание тип 1,2
	Умеет проводить исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники		ПР-6 лабораторная работа		
	Владеет методами и навыками проведения исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники		ПР-6 лабораторная работа		
2	Раздел 2. Зонная теория полупроводников. Статистика электронов в полупроводниках.	ПК-2. 1 Выбирает методики проведения исследований параметров и характеристик устройств и установок электроники и нанoeлектроники	Знает возможные методики проведения исследований различных параметров и характеристик устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседование / устный опрос; ПР-2 контрольная работа	вопросы к экзамену 16-25, задание тип 2,3
			Умеет выбирать методики для проведения конкретных исследований устройств нанoeлектроники	УО-1 собеседование / устный опрос; ПР-6 лабораторная работа	
			Владеет навыками выбора методик для проведения исследований конкретных характеристик и параметров устройств нанoeлектроники для получения достоверных результатов	ПР-6 лабораторная работа; ПР-2 контрольная работа	
		ПК-5.1 соблюдает правила эксплуатации технологического оборудования	Знает принципы работы и правила эксплуатации технологического оборудования	УО-1 собеседование / устный опрос;	вопросы к экзамену 16-25, задание тип 2,3
Умеет использовать нормативные данные эксплуатации технологического оборудования	УО-1 собеседование / устный опрос; ПР-6				

				лабораторная работа		
			Владеет навыками использования технологического оборудования в соответствии с правилами эксплуатации	ПР-2 контрольная работа ПР-6 лабораторная работа		
3	Раздел 3. Кинетические и контактные явления в полупроводниках.	ПК-2.2 проводит экспериментальные исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	Знает методики проведения экспериментальных исследований характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседование / устный опрос;	вопросы к экзамену 26-35, задание тип 4, 5	
			Умеет проводить исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	УО-1 собеседование / устный опрос; ПР-6 лабораторная работа		
			Владеет методами и навыками проведения исследования характеристик приборов, схем, устройств электроники и нанoeлектроники	ПР-2 контрольная работа ПР-6 лабораторная работа		
		ПК-5.2 осуществляет диагностику неполадок и частичный ремонт измерительного, диагностического, технологического оборудования	Знает принципы работы измерительного, диагностического, технологического оборудования	УО-1 собеседование / устный опрос;		вопросы к экзамену 26-35, задание тип 4, 5
			Умеет осуществлять диагностику неполадок и частичный ремонт измерительного, диагностического, технологического оборудования	УО-1 собеседование / устный опрос; ПР-6 лабораторная работа		
			Владеет навыками сервисного обслуживания измерительного, диагностического, технологического оборудования	ПР-2 контрольная работа ПР-6 лабораторная работа		
		ПК-5.3	Знает методы мониторинга	УО-1 собеседование		

		проводит мониторинг диагностического, технологического оборудования	измерительного, диагностического и технологического оборудования, используемого в области электроники и нанoeлектроники	е / устный опрос;	
			Умеет проводить работы по мониторингу измерительного, диагностического и технологического оборудования	УО-1 собеседование / устный опрос; ПР-6 лабораторная работа	
			Владеет навыками мониторинга диагностического, технологического оборудования, используемого в области электроники и нанoeлектроники	ПР-2 контрольная работа ПР-6 лабораторная работа	

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также качественные критерии оценивания, которые описывают уровень сформированности компетенций, представлены в разделе VIII.

V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Физика полупроводников и полупроводниковые приборы: Учебное пособие / Панюшкин Н.Н. - Воронеж: ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2015. - 131 с. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/858616>

2. Шалимова, К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учебник / К.В. Шалимова. — Электрон.дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/648>

3. Дикарева, Р. П. Физика твердого тела и полупроводников. Исследование температурной зависимости энергии Ферми методом термоЭДС [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Р. П. Дикарева, С. П. Хабаров. —

Электрон.текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2011. — 20 с. — 978-5-7782-1666- 2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45185.html>

4. Дикарева, Р. П. Физика твердого тела и полупроводников. Определение времени жизни неосновных носителей заряда методом модуляции проводимости [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Р. П. Дикарева, С. П. Хабаров. — Электрон.текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2011. — 24 с. — 978-5-7782-1667-9. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45186.html>

Дополнительная литература

1. Дитина З.З. «Лабораторные работы по физике полупроводников и низкоразмерных систем», учебно-методические пособие, изд-во ДВГУ, 2006. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:307927&theme=FEFU>

2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990. – 688 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:30032&theme=FEFU>

3. Киреев П.С. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975. – 584 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:411006&theme=FEFU>

4. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам. Под ред. Шалимовой К.В. М.: Энергоатомиздат, 1967, 483с.

5. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. М.: Советское радио, 1974, 328с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:669245&theme=FEFU>

6. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1987, 239с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:412667&theme=FEFU>

7. Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В., Гаврилов А.Е. Моделирование зонной структуры полупроводников: Учебное пособие по лекционному курсу «Физика полупроводников». - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 33 с.

<http://window.edu.ru/resource/241/40241>

8. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. – М.: Высшая школа, 1984. – 352 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:669724&theme=FEFU>

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. Федеральный портал «Российское образование» <http://www.edu.ru/>
2. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru/>
3. Теоретические сведения по физике и подробные решения демонстрационных вариантов тестовых заданий, представленных на сайте Росаккредагентства (www.fepo.ru)
4. Российский портал «Открытого образования» <http://www.openet.edu.ru>
5. www.biblioclub.ru – Электронная библиотечная система «Университетская библиотека - online»
6. www.iqlib.ru – Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия
7. www.affp.mics.msu.su

Перечень информационных технологий и программного обеспечения

1. При осуществлении образовательного процесса по дисциплине используется общее программное обеспечение компьютерных учебных классов (Windows XP, MicrosoftOffice и др.).

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. База данных Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
2. База данных Web of Science <http://apps.webofknowledge.com/>

VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

В процессе обучения студент должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы обычно составляет по времени 30% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которым каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины или на кафедре.

Главное в период обучения своей специальности – это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на следующий день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием как успешной учебы, так и последующей работы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Организация деятельности студента на лекции

Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий производится с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Необходимо обозначить вопросы, термины, материал, который вызывает трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Только если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практических работах.

Материал лекций необходимо закреплять самостоятельно. В первую очередь, на следующий день необходимо еще раз проработать материал лекции. Практика показывает, что если не сделать этого в течение двух-трех дней, то большая часть материала забудется. В дальнейшем процесс забывания идет по экспоненте. При изучении материала обязательно использование учебников и других материалов по дисциплине. Необходимо найти контрольные вопросы по

соответствующей теме, ответить на них. В случае, если по теме есть задачи, то их необходимо решить и сверить с правильными вариантами ответов (при наличии). В случае затруднений необходимо проконсультироваться у преподавателя.

Во всех различных ситуациях, приводящих к ошибочным действиям, некорректным выводам и/или ответам необходимо проанализировать причины, приведшие к ошибкам. Работа над ошибками является одним из условий процесса совершенствования знаний и навыков, а следовательно, успешной учебы и работы.

VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Лекционные занятия проводятся в стандартных лекционных аудиториях лабораторного корпуса (корпус L). Лабораторные работы проводятся в специализированной лаборатории (корпус L), оснащенной лабораторными стендами, состоящими из стандартного оборудования (осциллографы, амперметры, вольтметры, магазины сопротивлений и пр.), позволяющими производить лабораторные работы в полном объеме.

VIII. ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Для дисциплины «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» используются следующие оценочные средства:

Устный опрос:

1. Собеседование (УО-1)
2. Коллоквиум (УО-2)

Письменные работы:

1. Контрольная работа (ПР-2)
2. Лабораторная работа (ПР-6)

Устный опрос

Устный опрос позволяет оценить знания и кругозор студента, умение логически построить ответ, владение монологической речью и иные коммуникативные навыки.

Обучающая функция состоит в выявлении деталей, которые по каким-то причинам оказались недостаточно осмысленными в ходе учебных занятий и при подготовке к зачёту.

Собеседование (УО-1) – средство контроля, организованное как

специальная беседа преподавателя с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.

Коллоквиум (УО-2) – средство контроля усвоения учебного материала темы, раздела или разделов дисциплины, организованное как учебное занятие в виде собеседования преподавателя с обучающимися.

Письменные работы

Письменный ответ приучает к точности, лаконичности, связности изложения мысли. Письменная проверка используется во всех видах контроля и осуществляется как в аудиторной, так и во внеаудиторной работе.

Контрольная работа (ПР-2) – средство проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу.

Лабораторная работа (ПР-6) – средство для закрепления и практического освоения материала по определенному разделу.

Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины

Оценочные средства для промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной. Форма отчётности по дисциплине – экзамен (5-й семестр). Форма экзамена - «устный опрос в форме ответов на вопросы», «практические задания по типам». Допуск к экзамену возможен только после защиты отчетов по всем лабораторным работам, сдачи всех тестов и контрольных работ курса.

Методические указания по сдаче экзамена

Экзамен принимается ведущим преподавателем. При большом количестве групп у одного преподавателя или при большой численности потока по распоряжению заведующего кафедрой (заместителя директора по учебной и воспитательной работе) допускается привлечение в помощь ведущему преподавателю других преподавателей. В первую очередь привлекаются преподаватели, которые проводили лабораторные занятия по дисциплине в группах.

В исключительных случаях, по согласованию с заместителем директора Школы по учебной и воспитательной работе, заведующий кафедрой имеет право принять экзамен в отсутствие ведущего преподавателя.

Во время проведения экзамена студенты могут пользоваться рабочей программой дисциплины, а также с разрешения преподавателя, проводящего экзамен, справочной литературой.

Время, предоставляемое студенту на подготовку к ответу на экзамене, должно составлять не более 30 минут. По истечении данного времени студент должен быть готов к ответу.

Присутствие на экзамене посторонних лиц (кроме лиц, осуществляющих проверку) без разрешения соответствующих лиц (ректора либо проректора по учебной и воспитательной работе, директора Школы, руководителя ОПОП или заведующего кафедрой), не допускается. Инвалиды и лица с ограниченными возможностями здоровья, не имеющие возможности самостоятельного передвижения, допускаются на экзамен с сопровождающими.

Вопросы к экзамену

1. Электронная и дырочная проводимость в полупроводниках.
 - А) Классическое представление.
 - Б) Квантово-механическое представление.
2. Примеси донорные и акцепторные. Определения, примеры, задачи.
 - А) Как создать проводимость р или n-типа в Si, Ge.
 - Б) Как создать проводимость р или n-типа в соединении элементов третьей и пятой группы.
 - В) Как создать проводимость р или n-типа в соединении элементов второй и шестой группы.
 - Г) Роль примеси Si (Ge) в соединении элементов третьей и пятой группы.
 - Д) Примесные уровни. Общие свойства донорных и акцепторных уровней. Отличие донорных и акцепторных уровней при $T=0K$.
 - Е) Компенсация примесей, полная и частичная компенсация примесей.
 - Ж) Произведение концентраций основных и неосновных носителей (закон действующих масс).
3. Что такое подвижность носителей заряда? Определение. Размерность. Величина подвижности в собственном, примесном, компенсированном полупроводнике (у кого подвижность больше и почему). Сравнить подвижность электронов и дырок.
4. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры в собственном полупроводнике. Формула, график, объяснение. Зависимость концентрации электронов от температуры в полупроводнике n-типа. Формула, график, объяснение.
5. Назвать основные классы полупроводников. Примеры, назвать 3-4

материала в каждом классе (моноатомные, бинарные соединения).

6. Типы химической связи в полупроводниках. Примеры (3-4 материала) на каждый тип связи.

7. Зависимость ширины запрещенной зоны от типа химической связи. Примеры изоэлектронного ряда полупроводников (строка в таблице Менделеева). Задачи.

8. Зависимость ширины запрещенной зоны от порядкового номера Z элемента, входящего в состав полупроводников (столбец в таблице Менделеева). Задачи.

9. Диффузия носителей заряда в полупроводнике. Определение. Диффузионный ток дырок, одномерный и трехмерный случай. Диффузионный ток электронов. Диффузионная длина. Время жизни.

10. Дрейф носителей заряда. Определение. Подвижность. Дрейфовый ток дырок, электронов.

11. Полный ток в полупроводнике (формула).

12. Уравнение непрерывности для дырок, для электронов. Одномерный и трехмерный случаи. Стационарное состояние.

13. Волновые свойства микрочастиц. Гипотеза де Бройля. Экспериментальные доказательства волновых свойств частиц.

14. Состояния электрона в кристалле. Волновой вектор. Правила его квантования. Условие Борна-Кармана.

15. Приближение сильной связи. Образование энергетических зон в кристалле. Число уровней. Ширина зоны. Вырожденные и гибридные зоны.

16. Зависимость $E(k)$ для простой кубической решетки. Общие свойства функции $E(k)$. Период функции $E(k)$. Зоны Бриллюэна.

17. Эффективная масса электронов и дырок. Зависимость энергии электрона от квазиимпульса вблизи краев зон.

18. Водородоподобная модель примесного центра.

19. Функции Ферми-Дирака. Уровень Ферми.

20. Плотность состояний в свободной и валентной зонах.

21. Концентрация электронов и дырок в полупроводнике, общий случай (вывод формулы).

22. Невырожденный полупроводник. Вырожденный полупроводник. Положение уровня Ферми, формулы для Концентрации носителей заряда.

23. Собственный невырожденный полупроводник. Зависимость уровня Ферми и концентрации носителей от температуры. Собственный вырожденный полупроводник.

24. Невырожденный полупроводник N-типа. Случай низких температур.

25. Невырожденный полупроводник N-типа. Случай высоких температур.

26. Зависимость концентрации электронов и уровня Ферми от температуры в полупроводнике N-типа в широком диапазоне температур.

27. Зависимость концентрации дырок и уровня Ферми от температуры в полупроводнике P-типа в широком диапазоне температур.

28. Концентрация неосновных носителей в полупроводнике. Закон «действующих масс» для невырожденного полупроводника.

29. Контактная разность потенциалов. Ее происхождение, величина, способ измерения.

30. Двойной заряженный слой на контакте двух кристаллов. Толщина заряженных слоев в металле и в полупроводнике (оценка).

31. Контакт металла и полупроводника N-типа, два случая. Проводимость приконтактного слоя полупроводника.

32. Контакт металла и полупроводника P-типа, два случая. Запорный и антизапорный слой.

33. Электрическое поле в P-N переходе. Зависимость напряженности и потенциала от координаты. Изгиб энергетических уровней свободной и валентной зон.

34. Толщина заряженных слоев в P-N переходе. Толщина P-N перехода.

35. Гетеропереход. Зонная диаграмма. Основное отличие гетероперехода от гомоперехода.

Типы экзаменационных заданий

Тип 1. Определите ширину запрещенной зоны полупроводника по заданной температурной зависимости электропроводности.

Тип 2. Определите вольт-амперные и световые характеристики фотоэлектрических преобразователей: фотосопротивления и фотодиода при помощи лабораторного оборудования.

Тип 3. Определите ширину запрещенной зоны по заданной спектральной характеристике фотопроводимости.

Тип 4. Определите вольт-амперные характеристики селенового и кремниевого выпрямителей. По ним определите статическое и дифференциальное сопротивление.

Тип 5. Определите зависимости тока и напряжения при подаче на селеновый и кремниевый выпрямители синусоидального напряжения. Получить на экране осциллографа ВАХ каждого из выпрямителей.

Критерии выставления оценки студенту на экзамене

К экзамену допускаются обучающиеся, выполнившие программу обучения по дисциплине, прошедшие все этапы текущей аттестации.

Баллы (рейтинговой оценки)	Оценка экзамена (стандартная)	Требования к сформированным компетенциям
86-100	«зачтено» / «отлично»	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.
76-85	«зачтено» / «хорошо»	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.
61-75	«зачтено» / «удовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.
0-60	«не зачтено» / «неудовлетворительно»	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

Оценочные средства для текущей аттестации

Текущая аттестация студентов по дисциплине проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация проводится в форме контрольных мероприятий (собеседования, коллоквиумов, лабораторных работ, контрольных работ) по

оцениванию фактических результатов обучения студентов и осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);
- степень усвоения теоретических знаний;
- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;
- результаты самостоятельной работы.

Составляется календарный план контрольных мероприятий по дисциплине. Оценка посещаемости, активности обучающихся на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий ведётся на основе журнала, который ведёт преподаватель в течение учебного семестра.

Типовые задания к лабораторным работам

Определение ширины запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости электропроводности.

В работе в качестве исследуемых образцов используются два термосопротивления. Они изготовлены из материалов с большим температурным коэффициентом сопротивления. Размеры образцов: $l=10$ мм, $d=2$ мм.

Образцы помещены в ультратермостат, который автоматически поддерживает заданную температуру с точностью $\pm 0,5$ град. Сопротивление R измеряется мостом постоянного тока МО-62 по схеме моста Уитсона.

1. Измерить температуру t воды в термостате и при этой температуре измерить сопротивления обоих образцов R_1 и R_2 .

2. С помощью контактного термометра задать температуру $\approx 20^\circ\text{C}$ (или выше), включить нагреватель и мотор (мешалку) термостата. Когда стабильно установится заданная температура, снова измерить R_1 и R_2 . Температуру увеличивать через $5-10^\circ\text{C}$. (15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80°C) и при каждой температуре измерять оба образца. Результаты измерений занести в таблицу.

3. Определить по соответствующим формулам ширину запрещенной зоны. В полупроводнике $R(T)=Ae^{B/T}$ и $\alpha=dR/R*1/dT=dR/dT*1/R=-B/T^2$; в металле $R(t) = R_0(1+\alpha t)$. $R=\rho l/S$, отсюда $\rho=RS/l$, $\sigma=1/\rho=l/(RS)=l/(SA)*e^{-B/T}=\sigma_0e^{-B/T}$. $\sigma_{\text{собств.}}=en\mu_n+er\mu_p=e(\mu_n+\mu_p)n=e(\mu_n+\mu_p)n_0e^{-\Delta E/2kT}=\sigma_0e^{-\Delta E/2kT}$.

Сравнивая формулы, получим $\Delta E=2kB$. Так можно найти ΔE , если известна B . Чтобы найти B , надо измерить R при двух разных температурах $R_1=Ae^{B/T_1}$,

$R_2 = Ae^{B/T_2}$; $R_1/R_2 = e^{B(T_2-T_1)/(T_1T_2)}$, $B = (T_1T_2)/(T_2-T_1) \ln(R_1/R_2)$. $\sigma = \sigma_0 e^{-\Delta E/2kT}$. Находим $\ln \sigma = \ln \sigma_0 - (\Delta E/2k) * (1/T)$.

Сравниваем это выражение с уравнением прямой линии $y = a - bx$ и видим следующее: если зависимость $\sigma(T)$ построить в координатах $y = \ln \sigma$, $x = 1/T$, то получим прямую, у которой тангенс угла наклона связан с ΔE : $\text{tg} \varphi = -\Delta E/2k$. Отсюда следует второй способ определения ΔE : $\Delta E = -2k * \text{tg} \varphi$.

Вольтамперные и световые характеристики фотоэлектрических преобразователей: фотосопротивления и фотодиода.

1. Фотосопротивление (ФС)

1. Снять вольтамперную характеристику $I = I(U)$ фотосопротивления типа ФСК-6 в темноте и при трех различных освещенностях. Освещенность устанавливать светофильтрами. Напряжение на ФС изменять от 0 до 30 вольт.

2. Построить график $I = I(U)$ при трех различных освещенностях и в темноте.

3. Построить световую характеристику, т.е. зависимость тока от освещенности Φ . Освещенность откладывать в относительных единицах.

2. Фотодиод (ФД) в фотодиодном режиме

Снять зависимость $I = I(U)$ при трех различных освещенностях и в темноте. Напряжение питания изменять от 0 до 20 В. Построить графики $I = I(U)$ и $I = I(\Phi)$. Сравнить их с графиками для фотосопротивления, объяснить различия.

3. Фотодиод в вентильном режиме (без внешнего источника тока)

1. Снять зависимость фототока от сопротивления нагрузки R при максимальной освещенности (фильтр 0). В качестве нагрузки использовать магазин сопротивлений МСР-63. Построить график зависимости фототока от сопротивления нагрузки $I_\Phi = I_\Phi(R)$. Прodelать то же самое при меньших освещенностях (фильтры 1 и 2).

2. Измерить ЭДС холостого хода U_{xx} (разность потенциалов на фотодиоде при разомкнутой цепи, т.е. при $R = \infty$) при трех значениях освещенности (фильтры 0, 1, 2). Для измерения использовать вольтметр с большим внутренним сопротивлением.

3. Измерить ток короткого замыкания $I_{кз}$ (ток в цепи, когда $R = 0$) при трех значениях освещенности (фильтры 0, 1, 2).

4. Измеренные значения U_{xx} и $I_{кз}$ занести в таблицу и проанализировать.

Критерии оценки лабораторных работ

Оценка	Требования
«зачтено»	Студент выполняет лабораторную работу в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности проведения измерений, правильно самостоятельно определяет цель работы;

	самостоятельно, рационально выбирает необходимое оборудование для получения наиболее точных результатов проводимой работы. Грамотно и логично описывает ход работы, правильно формулирует выводы, точно и аккуратно выполняет все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики, вычисления и т.п., умеет обобщать фактический материал. Допускается два/три недочёта или одна негрубая ошибка и один недочёт. Работа соответствует требованиям и выполнена в срок.
«не зачтено»	Студент выполнил работу не полностью, объём выполненной части не позволяет сделать правильные выводы; не определяет самостоятельно цель работы; в ходе работы допускает одну и более грубые ошибки, которые не может исправить, или неверно производит наблюдения, измерения, вычисления и т.п.; не умеет обобщать фактический материал. Лабораторная работа не выполнена.

Критерии оценки отчетов по лабораторным работам

Оценивание защиты лабораторной работы проводится при представлении отчета в электронном или печатном виде, по двухбалльной шкале: «зачтено», «не зачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он представляет к защите отчет по лабораторной работе, удовлетворяющий требованиям по поставленным заданиям, по оформлению, демонстрирует владение методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если он не владеет методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы, допускает существенные ошибки в работе, представляет отчет с существенными отклонениями от правил оформления письменных работ.

Задания к контрольным работам

Задания к контрольной работе №1

1. Почему при сближении атомов разрешенные энергетические уровни электрона в атоме (атомный уровень) расщепляется в зону?
2. На сколько уровней расщепляется простой (невырожденный) атомный уровень?
3. Какое максимальное количество электронов может разместиться на уровнях простой разрешенной зоны кристалла?
4. Когда возникает обменное взаимодействие между атомами? Почему оно называется обменным?
5. Что называется обменной энергией A ? Как связана ширина разрешенной зоны с обменной энергией? (Например, в простой кубической решетке).
6. Какая зона называется вырожденной зоной? Чему равно число состояний в вырожденной зоне?

7. Какая зона называется гибридной? Чему равно число состояний в ней?
8. Набор квантовых чисел, которые задают состояние электрона в атоме?
9. Набор квантовых чисел, которые задают состояние электрона в кристалле.
10. Правила квантования компонент вектора \mathbf{k} в кристалле.
11. Свойства функции $E(\mathbf{k})$ в кристалле (4).
12. Какие из этих свойств функция $E(\mathbf{k})$ сохранит, если электрон выйдет из кристалла (т.е. станет свободным)?
13. Что такое первая зона Бриллюэна? (дать определение)
14. Первая зона Бриллюэна в простой кубической решетке. Пределы изменения компонент волнового вектора \mathbf{k} (или \mathbf{p}).
15. Гипотеза де Бройля. Длина волны частицы.
16. Чему равен вектор импульса частицы?
17. Чему равен волновой вектор волны?
18. Связь векторов \mathbf{p} и \mathbf{k} ?
19. Задача: Расщепление атомных уровней в энергетические зоны в кристаллах алмаза (рис. 227, стр. 50 Шалимова) кремния, германия (рис. на лекции, см. тетрадь).

Задания к контрольным работам №2,3

1. Функция Ферми-Дирака (формула, график, физический смысл).
2. Функция Максвелла – Больцмана (формула, график, физический смысл).
3. Условие, при котором функция Ферми-Дирака переходит в функцию Максвелла-Больцмана.
4. Что такое уровень Ферми? Дать определение (их несколько).
5. Положение уровня Ферми в невырожденном собственном полупроводнике при $T=0$ К.
6. Положение уровня Ферми в невырожденном полупроводнике n- типа при $T=0$ К.
7. Положение уровня Ферми в невырожденном полупроводнике p- типа при $T=0$ К.
8. Положение уровня Ферми в полностью вырожденном полупроводнике n- типа.
9. Положение уровня Ферми в полностью вырожденном полупроводнике p- типа.
10. Положение уровня Ферми в частично вырожденном полупроводнике а) n- типа, б) p- типа.
11. Значение параметра η в случаях 8, 9, 10, а также в невырожденном полупроводнике.

12. Куда сдвигается уровень Ферми при нагревании полупроводника в случае 5, 6, 7? Формула и график зависимости уровня Ферми от температуры для каждого случая 5, 6, 7.

13. Концентрации электронов и дырок в полупроводнике, общий случай (через интегралы Ферми).

14. Концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике через параметр η .

15. Концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике через уровень Ферми (F).

16. Уравнение электронейтральности для а) собственного полупроводника, б) полупроводника n- типа, в) полупроводника p- типа.

17. Концентрация электронов и дырок (формулы и графики $n(T)$, $\ln n(1/T)$)

18. а) в собственном полупроводнике,

19. б) в полупроводнике n-типа (случай низких и высоких температур),

20. в) в полупроводнике p- типа (случай низких и высоких температур).

21. График $\ln n = f(1/T)$ для полупроводника n-типа в широком диапазоне температур. Рассмотреть три области температур. Каждую область охарактеризовать с помощью формул из п.17.

22. График $\ln p = f(1/T)$ для полупроводника p- типа в широком диапазоне температур. Рассмотреть три области температур. Каждую область охарактеризовать с помощью формул из п.17.

23. Что такое истощение примесных уровней? Чему равна концентрация основных и неосновных носителей при этом явлении?

Вопросы к контрольным работам №4,5

1. Работа выхода. Определение.

2. Связь работы выхода и уровня Ферми.

3. Величина контактной разности потенциалов (КРП) через работы выхода.

4. Величина КРП через уровни Ферми.

5. Почему возникает КРП?

6. Почему КРП не дает тока?

7. Что такое обедненный слой?

8. Изменение удельной электропроводности в обедненном слое по сравнению объемом полупроводника а) увеличивается, б) уменьшается, в) не изменяется.

9. Что такое обогащенный слой?

10. Изменение удельной электропроводности в обогащенном слое по сравнению объемом полупроводника а) увеличивается, б) уменьшается, в) не изменяется.

11. При каком соотношении работы выхода на контакте металла и полупроводника n-типа возникает обедненный слой.
12. При каком соотношении работы выхода на контакте металла и полупроводника p-типа возникает обедненный слой.
13. На каких слоях происходит выпрямление тока: обедненных или обогащенных?
14. Как изменяется концентрация неосновных носителей в обедненных слоях: а) увеличивается, б) уменьшается, в) не изменяется.
15. Высота потенциального барьера на P-N переходе в отсутствие внешнего напряжения через уровни Ферми.
16. Высота потенциального барьера на P-N переходе в отсутствие внешнего напряжения через концентрации примесей при полной ионизации примесей (два варианта).
17. Высота потенциального барьера при прямом и обратном включении P-N перехода.
18. Толщина P-N перехода через концентрации основных носителей (общий случай).
19. Толщина P-N перехода через концентрации примесей при полной их ионизации.
20. Толщина P-N перехода при прямом и обратном включении.
21. Упрощение формул № 18, 19, 20 для несимметричного P-N перехода. Пояснить, что такое «несимметричный P-N переход».
22. Толщины заряженных слоев в P- и N-областях через концентрации основных носителей и через концентрации примесей при их полной ионизации. Отношение толщин.
23. Зависимость напряженности электрического поля P-N перехода от координаты. График и формулы для P- и N-областей.
24. В какой точке напряженность поля максимальна? Чему равно это максимальное значение?
25. Чему равно среднее значение напряженности поля? Выразить его через максимальное значение и через КРП.
26. Зависимость потенциала электрического поля P-N перехода от координаты. Формулы для P- и N-областей и график с указанием начала отсчета потенциала.
27. Распределение КРП между заряженными слоями P- и N-областей, связь с толщинами слоев.
28. Контакт металла с полупроводником как частный случай несимметричного PN перехода. Рассмотреть толщины заряженных слоев, графики напряженности и потенциала.

29. Уравнение Шокли, формула и график.

30. Ток насыщения через концентрации неосновных носителей, через концентрации основных носителей, через концентрации примесей при их полной ионизации.

31. Коэффициент инжекции электронов, определение и формулы через концентрации носителей неосновных и основных, и через концентрации примесей.

32. Коэффициент инжекции дырок определение и формулы через концентрации носителей неосновных и основных, и через концентрации примесей.

33. Зонная диаграмма гетероперехода. Основное отличие гетероперехода от гомоперехода.

Критерии оценивания

Оценка	Требования
«зачтено»	Студент показал развернутый ответ на вопрос, знание литературы, обнаружил понимание материала, обоснованность суждений, неточности в ответе исправляет самостоятельно.
«не зачтено»	Студент обнаруживает незнание вопроса, неуверенно излагает ответ.