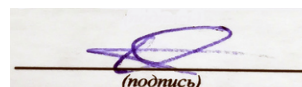


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике
в ЯФ ФГБУН «Физико-технологический институт» РАН

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета



(подпись)

И. С. Огнев

« 23 » мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
«Физика полупроводников и низкоразмерных систем»

Направление подготовки
11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль)
«Интегральная электроника и наноэлектроника»

Форма обучения
очная

Программа одобрена
на заседании кафедры
от «30» марта 2023 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол № 5 от « 25 » апреля 2023 года

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» является: изучение фундаментальных теоретических представлений о полупроводниковых материалах, структурах на их основе и процессах, происходящих в них под действием внешних полей и электромагнитных волн.

Задачами дисциплины «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» является: знакомство основами теоретических представлений о зонной структуре и статистике носителей заряда в полупроводниковых материалах, а также с физическими принципами, лежащими в основе работы барьеров и границ раздела и структур на их основе.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» относится к вариативной части базового блока; является дисциплиной по выбору студента. Ее изучение основывается на знаниях, умениях и владениях, полученных в результате освоения следующих дисциплин: **Электричество и магнетизм, Оптика, Физика атомов и атомных явлений, Электродинамика, Квантовая теория.**

Полученные при освоении дисциплины **Физика полупроводников и низкоразмерных систем** знания, умения и владения необходимы для изучения последующих дисциплин профессионального цикла, а также для продолжения обучения в магистратуре по направлению **11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**. Наряду с другими дисциплинами профессионального цикла дисциплина **Физика полупроводников и низкоразмерных систем** обеспечивает реализацию профиля подготовки **Интегральная электроника и нанoeлектроника**.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
Общепрофессиональные компетенции		
ПК-5 Способен выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники	ИД_ПК-5.1. Знает физические характеристики материалов и изделий электронной техники.	Знать: <ul style="list-style-type: none">• основные этапы развития физики полупроводников, включающие как классический подход, используемый в материаловедении, так и подход на основе квантовой механики, статистической физики и электродинамики сплошных сред;• зонную структуру твердых тел, в особенности полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaAs);• механизмы явлений переноса и основных типов рассеяния в полупроводниковых материалах;

		<ul style="list-style-type: none"> • статистику электронов и дырок в полупроводниках и связанные с этим особенности физических характеристик различных материалов; • явления на поверхности и границах раздела, особенности контактных явлений при внешнем воздействии, обуславливающих генерацию неравновесных носителей заряда; • характерные масштабы величин, основные физические соотношения и константы, относящиеся к этому разделу физики и их размерность; • особенности размерного квантования и квантового туннелирования в полупроводниках и использовании этих явлений для создания нового класса приборов современной наноэлектроники.
	ИД_ПК-5.2. Знает технологические процессы создания материалов, приборов и устройств электроники и наноэлектроники.	<p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • применять знания, полученные при изучении дисциплины Физика полупроводников и низкоразмерных систем, при рассмотрении вопросов, связанных с теоретическими, экспериментальными и технологическими аспектами исследований в физике полупроводников, микро- и наноэлектронике, физике полупроводниковых приборов, оптоэлектронике; • использовать для этого методы и знания полученные при изучении других физических и математических дисциплин.
	ИД_ПК-5.3. Осуществляет настройку приборов и оборудования в соответствии с правилами настройки и эксплуатации.	<p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • специальной терминологией; • навыками решения типовых задач физики полупроводников, связанных с теоретическими и экспериментальными исследованиями основных характеристик полупроводниковых материалов и структур, как основы элементной базы для современной микро- и наноэлектроники.

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости Форма промежуточной аттестации (по семестрам) Формы ЭО и ДОТ (при наличии)
			Контактная работа					самостоятельная работа	
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационн		
1	Введение в физику полупроводников.	6	8	8	12	1		2	Задания для самостоятельной работы Тест для самопроверки ЭУК в LMS Moodle
2	Электроны в идеальном кристалле. Основы зонной теории полупроводников.	6	8	6		1		4	Задания для самостоятельной работы ЭУК в LMS Moodle
3	Статистика электронов и дырок в полупроводниках.	6	6	8		2		6	Задания для самостоятельной работы Контрольная работа. ЭУК в LMS Moodle
4	Границы раздела. Кинетические явления в биполярных полупроводниках. Оптические свойства.	6	6	8	18	1		4	Задания для самостоятельной работы Контрольная работа. ЭУК в LMS Moodle
5	Размерное квантование, квантовые ямы и сверхрешетки. Неупорядоченные полупроводники.	6	2					2	Задания для самостоятельной работы ЭУК в LMS Moodle
						2	0,5	33,5	Экзамен
	Всего		34	34	17	7	0,5	51,5	

Содержание разделов дисциплины

Раздел 1. Введение в физику полупроводников.

1.1. Предмет физики полупроводников. Основные положения и принципы.

Введение. Типы химической связи. Силы Ван-дер-Ваальса (дисперсионное, ориентационное и индукционное взаимодействия). Ионная, ковалентная, металлическая и водородная связи. Кристаллическая решетка. Решетка Бравэ. Решетка с базисом. Прямая и обратная решетки. Обозначения углов, направлений и плоскостей в кристалле. Классификация твердых тел по характеру сил связи и составу (элементарные, бинарные, тройные, органические), по структуре - упорядоченные

кристаллические (например, с тетраэдрической координацией - алмазоподобные, вюрцит), кристаллические с элементами беспорядка (твердые растворы), неупорядоченные - аморфные. Элементарные полупроводники. Si, Ge, GaAs.

1.2. Понятие об энергетических зонах. Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории.

Структура энергетических уровней в атоме. Строение электронных оболочек элементов периодической системы Д.И.Менделеева. Энергия и движение электрона в твердом теле. Энергетический спектр электронов в кристалле. Заполнение энергетических зон. Диэлектрики, полупроводники, металлы. Эффективная масса. Электроны в тепловом равновесии. Вырождение. Проводимость различных типов твердых тел. Дефекты кристаллической структуры (вакансии, примеси, атомы в междоузлиях, дислокации и т.п.) Простейшая модель примесного состояния в полупроводнике. (модель изолированного атома) Легирование полупроводников. Донорная и акцепторная проводимости. Компенсированные и сильно легированные полупроводники. Переходы Мотта и Андерсона.

1.3. Явления переноса в полупроводниках. Механизмы рассеяния носителей. Время релаксации.

Элементарная теория электропроводности полупроводников. Температурная зависимость проводимости для собственных и примесных полупроводников. Подвижность, длина свободного пробега, время релаксации. Функция распределения Ферми. Уровень химического потенциала. Плотность состояний. Концентрация носителей в энергетической зоне. Электропроводность (электронная и дырочная) и подвижность носителей заряда в полупроводниках. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Спектр нормальных колебаний. Температура Дебая. Фононы. Электропроводность. Механизмы рассеяния носителей заряда. Зависимость подвижности и длины свободного пробега электрона от температуры. Теплопроводность полупроводников. Теплопроводность кристаллической решетки. Электронная теплопроводность. Закон Видемана-Франца.

Раздел 2. Электроны в идеальном кристалле. Основы зонной теории полупроводников.

2.1. Уравнение Шредингера для электронов в кристалле. Основные приближения зонной теории.

Общая постановка задачи. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Метод Хартри. Метод Хартри-Фока. Электрон в периодическом поле решетки кристалла. Условие цикличности Борна-Кармана. Ячейка Вигнера – Зейтца. Зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Приближение сильно связанных электронов. Гамильтониан кристалла и изолированного атома. Энергетический спектр идеального кристалла. Локализованные и делокализованные волновые функции. Обменный интеграл. Интеграл перекрытия. Энергетический спектр для случая простой кубической решетки. Основные положения зонной теории.

2.2. Электрон в периодическом поле кристалла. Основные приближения зонной теории.

Движение электрона в идеальном кристалле. Ячейка Вигнера – Зейтца. Первая зона Бриллюэна. Особые точки. Зонная структура твердого тела в модели Кронига – Пенни. Закон дисперсии. Квазиволновой вектор. Число состояний и квазинепрерывный спектр.

2.3. Закон дисперсии. Эффективная масса. Метод эффективной массы.

Закон дисперсии. Основные типы зонной структуры полупроводников. Зонная структура Si, Ge, GaAs. Изоэнергетические поверхности. Эффективная масса электрона. Дырка. Квазиимпульс. Движение носителей в электрическом поле. Связь между силой и ускорением. Тензор обратной эффективной массы. Эллипсоид эффективной массы. Продольная и поперечная эффективные массы.

Изоэнергетические поверхности: радиус-вектор (\vec{p}) и нормаль (\vec{V}) к поверхности.
Метод эффективной массы. Влияние внешних полей на спектр энергии кристалла.
Локализованные состояния.

Раздел 3. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.

3.1. Равновесная статистика носителей заряда в полупроводниках.

Распределение Ферми-Дирака. Плотность состояний и функция распределения электронов по квантовым состояниям. Концентрации электронов и дырок в зонах. Эффективные плотности состояний электронов и дырок в зонах. Невырожденный электронный (дырочный) газ. Вычисление положения уровня Ферми в собственном полупроводнике. Статистика заполнения примесных уровней. Уровень Ферми в полупроводнике с примесями одного типа. Статистика электронов и дырок в компенсированных полупроводниках.

3.2. Пространственно неоднородные равновесные состояния. Неравновесные носители заряда.

Пространственно неоднородные равновесные распределения концентраций. Внутреннее электрическое поле. Экранирование. Линейная теория экранирования. Длина Дебая. Энергетическая диаграмма контакта металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Возникновение неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Оптическая генерация. Темпы генерации и рекомбинации; время жизни. Соотношения между временами релаксации энергии и импульса и временем жизни. Квазиравновесие и квазиуровни Ферми.

Раздел 4. Границы раздела. Кинетические явления в биполярных полупроводниках. Оптические свойства.

4.1. Границы раздела. Поверхностные состояния. Гетеропереходы.

Контактные явления. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Выпрямление на контакте двух металлов. Контакт металла и полупроводника. Выпрямление на контакте металла и полупроводника. Контакт электронного и дырочного полупроводников. Выпрямление на p-n переходе. Эффект поля. Поверхностные состояния. Гетеропереходы.

4.2. Кинетические явления в полупроводниках.

Термоэлектрические явления. Качественная картина эффектов Пельтье, Зеебека. Гальваномагнитные и термомагнитные явления. Эффект Холла. Магнитосопротивление. Термомагнитные явления.

4.3. Оптические свойства полупроводников.

Оптические свойства полупроводников. Генерация и рекомбинация носителей. Фотопроводимость. Спектр поглощения и фоточувствительность. Механизмы поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное, экситонное, на свободных носителях).

Раздел 5. Размерное квантование, квантовые ямы и сверхрешетки. Неупорядоченные полупроводники.

5.1. Основные представления о размерном квантовании в квантовых ямах и сверхрешетках.

Квантовые ямы в полупроводниках. Условия квантования. Подзоны размерного квантования. Плотность состояний в квантовой яме. Ультраквантовый предел. Оптические свойства низкоразмерных структур. Сверхрешетки. Межзонное поглощение света квантовой ямой.

5.2. Основные представления физики неупорядоченных полупроводников.

Случайный потенциал. Хвосты плотности состояний и локализация. Проводимость по локализованным состояниям, закон Мотта для прыжковой проводимости. Оптические переходы в неупорядоченных полупроводниках. Хвосты оптического поглощения (правило Урбаха).

Лабораторный практикум

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость (часы)
1	1	Влияние температуры на электропроводность полупроводников	4
2	1	Физические основы работы терморезистора	4
3	1	Зависимость электропроводности полупроводников от напряжённости электрического поля	4
4	4	Изменение проводимости полупроводника в магнитном поле.	4
5	4	Изучение эффекта Холла в полупроводниках	5
6	4	Температурная зависимость коэффициента термоэдс	4
7	4	Фотопроводимость полупроводников. Определение температурной зависимости чувствительности и кратности фотопроводящих материалов	5
Всего			30

5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

Вводная лекция – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

Академическая лекция (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

Практическое занятие – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

Лабораторные работы - организация учебной работы с реальными материальными и информационными объектами, экспериментальная работа с аналоговыми моделями реальных объектов и физических явлений.

Консультации – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов

рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронный учебный курс «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ, в котором:

- представлены тексты конспектов лекций в виде презентаций по всем темам дисциплины;
- представлены задания для самостоятельной работы обучающихся по темам дисциплины;
- осуществляется проведение отдельных мероприятий текущего контроля успеваемости студентов;
- представлены правила прохождения промежуточной аттестации по дисциплине;
- представлен список учебной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в режиме онлайн;
- посредством форума осуществляется синхронное и (или) асинхронное взаимодействие между обучающимися и преподавателем в рамках изучения дисциплины.

6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются: для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- графический редактор Inkscape (Freeware);
- графический редактор GIMP (Freeware);
- Adobe Acrobat Reader;

7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются: Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»
http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk_cat_find.php

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

1. В.Л.Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников – Физика полупроводников. Учеб. пособие для вузов – М.: Наука, 1990. - 688 с.
2. К.В.Шалимова – Физика полупроводников: Учебник. 4-е изд., стер.— СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 400 с.
3. А.И.Ансельм, Введение в теорию полупроводников, . Учеб. пособие для вузов 3-е изд., стер.— СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 624 с.
4. Г.Г.Зегря, В.И.Перель Основы физики полупроводников, Физматлит, 2009. 334 С.

б) дополнительная литература:

1. Ю Г., Кардона М. Основы физики полупроводников / пер. с англ. И.И. Решиной - 3-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.-560с.
2. М.Грундман - Основы физика полупроводников. Нанозифика и технические приложения. Физматлит, 2012. 772 С. (М. Grundmann - The Physics of Semiconductors. An Introduction Including Devices and Nanophysics. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, 690с. ISBN-10 3-540-25370-X)
3. Бочкарева, Л. В. и др. Физика полупроводников и полупроводниковых приборов : метод. указания / Л. В. Бочкарева, А. С. Рудый, А. Б. Чурилов. - Ярославль.: ЯрГУ, 2007.-66с.
4. В.И.Фистуль. Введение в физику полупроводников. М: Высшая школа. 1984.
5. И.М.Цидильковский. Электроны и дырки в полупроводниках. М: Наука.1972.
6. Ильин В.И., Мусихин С.Ф., Шик А.Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры: Учебное пособие для вузов. - СПб.: Наука, 2000.-100с.
7. Кузнецова И.А. Физическая кинетика полупроводников: учебное пособие. - Ярославль.: ЯрГУ, 2006.-104с.
8. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов - 7-е изд., испр. - СПб.: Лань, 2003.-480с.
9. Л.С.Стильбанс Физика полупроводников. М., «Советское радио», 1967. 452 стр.
10. Р.Смит Полупроводники. М., «Мир», 1982. 560 С.
11. К.Зеегер Физика полупроводников. М., «Мир», 1977. 629 С.
12. Дж.Слэтер Диэлектрики, полупроводники, металлы. М., «Мир», 1969. 648 С.
13. Дж.Блекмор Статистика электронов в полупроводниках, «Мир», М., 1964. 392 С
14. Г.Е.Пикус Основы теории полупроводниковых приборов, «Наука», М.-Л., 1965. 450 С.
15. С.М.Рывкин Фотоэлектрические явления в полупроводниках, Физматгиз, М., 1963. 496 с.
16. В.Л.Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, И.В.Карпенко, А.Г.Миронов Сборник задач по физике полупроводников. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.— 144 с.

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

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- лабораторное оборудование Центра коллективного пользования «Диагностика микро и наноструктур»
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы 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 к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Доцент базовой кафедры нанотехнологий в электронике
в ЯФ ФГБУН ФТИАН им. К. А. Валиева РАН, к.ф.-м.н.

(подпись)

А.Б.Чурилов

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Физика полупроводников и низкоразмерных систем»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущего контроля успеваемости
и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы, используемые в процессе текущей
аттестации**

Контрольная работа

**Примеры задач с ответами и решениями по теме
«Статистика электронов и дырок в полупроводниках»**

Задача 1.1

Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии Si, германии Ge, арсениде галлия GaAs и антимониде индия InSb при комнатной температуре $T=300$ К и температуре жидкого азота $T=77$ К.

Решение

Концентрация собственных носителей заряда n_i имеет сильную температурную зависимость и определяется как

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.1),$$

где эффективная плотность состояний в С и V зонах $N_{c,v}$ также зависит от температуры T и эффективной массы носителей заряда в зоне m^* :

$$N_{c,v} = 2 \left(2\pi \frac{m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \quad (1.2).$$

Ширина запрещенной зоны E_g имеет слабую зависимость от температуры типа $E_g = E_{g0} - \alpha T$. Величины E_{g0} и α приведены в таблице "Свойства полупроводников при $T=300$ К", там же можно найти величины N_c и N_v . Расчет значений эффективной плотности состояний в С и V зонах и концентрации собственных носителей заряда n_i при температуре жидкого азота 77 К приводится ниже.

	Si	Ge	GaAs	InSb
$N_c, \text{см}^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{18}$	$1.4 \cdot 10^{19}$	$5.8 \cdot 10^{16}$	$5.1 \cdot 10^{15}$
$N_v, \text{см}^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{18}$	$6.9 \cdot 10^{18}$	$9.8 \cdot 10^{17}$	$1.5 \cdot 10^{18}$
$n_i, \text{см}^{-3}$	$3 \cdot 10^{-20}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^{-33}$	$1.2 \cdot 10^{10}$

Задача 1.2

Кремний Si и арсенид галлия GaAs легированы донорной примесью до концентрации $N_d=10^{17} \text{ см}^{-3}$. Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда при температуре $T=300 \text{ К}$.

Решение

Примесь полностью ионизована, когда концентрация равновесных электронов равна концентрации легирующей примеси $n_0=N_d$. Из основного соотношения для полупроводников: $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ найдем концентрацию неосновных носителей заряда $p_0 = n_i^2 / n_0$. Для Si $p_0 = 2.6 \cdot 10^3$, для GaAs $p_0 = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$.

Задача 1.3

Рассчитать объемное положение уровня Ферми φ_0 относительно середины запрещенной зоны в собственных полупроводниках – кремнии Si и антимониде индия InSb при температурах $T_1 = 300 \text{ К}$ и $T_2 = 77 \text{ К}$ (с учетом различных значений эффективных масс электронов и дырок).

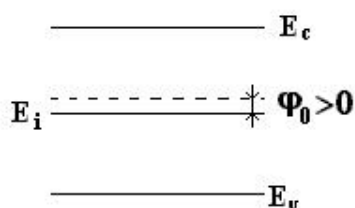
Решение

В собственном полупроводнике $n_0=p_0$ и положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны полупроводника φ_0 можно рассчитать как

$$\varphi_0 = \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_e^*} \right) \quad (1.3)$$

φ_0	300 К	77 К
Si	-0.0124 эВ	-0,0032 эВ
InSb	+0,074 эВ	+0,019 эВ

Т.о., в кремнии уровень Ферми лежит ниже, а в антимониде индия выше середины запрещенной зоны полупроводника E_i .



Зонная диаграмма полупроводника, когда $\varphi_0 > 0$, $m_p^* > m_e^*$.

Задача 1.4

Найти объемное положение уровня Ферми φ_0 в германии Ge марки ГДА-10 при температуре $T=300 \text{ К}$.

Решение

В легированном полупроводнике $p_0 \gg n_i$, положение уровня Ферми φ_0 можно рассчитать по формуле

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_0}{n_i} \right) \quad (1.4)$$

Концентрацию основных носителей p_0 найдем, зная величину удельного сопротивления $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, как

$$p_0 = \frac{1}{q\mu\rho} \quad (1.5),$$

в результате: $p_0 = 3.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_0 = 0.067 \text{ эВ}$.

Задача 1.5

Рассчитать объемное положение уровня Ферми φ_0 относительно середины запрещенной зоны в электронном и дырочном антимониде индия InSb при азотной температуре $T=77 \text{ К}$ и концентрации легирующей примеси $N_{d,a}=10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Решение

Положение уровня Ферми в InSb найдем по формуле:

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_0}{n_i} \quad (1.4),$$

$\varphi_0 = 0.085 \text{ эВ}$.

Чтобы найти φ_0 относительно середины запрещенной зоны, нужно учесть сдвиг уровня Ферми в собственном полупроводнике (см. задача 1.3) на -0.019 эВ , имеем: $\varphi_{0n} = 0.104 \text{ эВ}$ в n-типе InSb и $\varphi_{0p} = 0.066 \text{ эВ}$ в p- InSb. Если рассчитать положение уровня Ферми относительно края C-зоны, то $E_g/2 - \varphi_{0n} = 0.115 - 0.104 = 0.011 \text{ эВ}$ - это не превышает величины $2kT$ (0.013 эВ при $T=77 \text{ К}$) т.е. n-InSb – вырожден, p-InSb – нет.

Задача 1.6

Рассчитать положение уровня Ферми φ_0 в приближении полностью ионизованной примеси в кремнии марки КЭФ-4.5 при температурах $T_1 = 300 \text{ К}$ и $T_2 = 77 \text{ К}$.

Решение

Зная удельное сопротивление $\rho = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, по формуле

$$p_0 = \frac{1}{q\mu\rho} \quad (1.5)$$

найдем уровень легирования $N_d = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а далее по формуле

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_0}{n_i} \quad (1.4)$$

положение уровня Ферми $\varphi_0 = 0.284 \text{ эВ}$ при 300 К и $\varphi_0 = 0.52 \text{ эВ}$ при 77 К .

Задача 1.7

Найти удельное сопротивление ρ электронного и дырочного кремния Si с легирующей примесью $N_{d,a} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

Решение

n-Si $\rho = 0.42 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, p-Si $\rho = 1.05 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Задача 1.8

Рассчитать собственное удельное сопротивление ρ_i монокристаллов кремния Si, германия Ge, арсенида галлия GaAs и антимонида индия InSb при комнатной температуре.

Решение

В собственном полупроводнике удельная электропроводность равна

$$\sigma_i = qn\mu_n + qp\mu_p = qn_i (\mu_n + \mu_p)$$

и соответственно $\rho_i = 1/\sigma_i$:

	Si	Ge	GaAs	InSb
$\rho_i, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$1.9 \cdot 10^5$	43	$6.4 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{-3}$

Задача 1.9

Найти концентрацию легирующей акцепторной примеси для кремния Si и германия Ge, при которой наступает вырождение концентрации свободных носителей заряда при комнатной температуре $T=300 \text{ K}$.

Решение

Вырождение в полупроводнике наступает, когда уровень Ферми F приближается к C – или V – зоне на расстояние порядка kT , т.е. $F - E_v = kT$. В случае полной ионизации примеси концентрация дырок p определяется как

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - F}{kT}\right) \quad (1.6)$$

и равна уровню легирования N_a : $N_a = p = N_v/q$. Для Si: $N_a = 3.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, для Ge: $N_a = 2.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Задача 1.10

Найти, как изменится объемное положение уровня Ферми ϕ_0 в электронном арсениде галлия GaAs с $\rho=1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при изменении температуры от $T=300 \text{ K}$ до $T=77 \text{ K}$.

Решение

$N_d = 7.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Учитывая температурную зависимость n_i

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

вычисляем ϕ_0 : при $T=300 \text{ K}$ $\phi_0 = 0.47 \text{ эВ}$ и при 77 K $\phi_0 = 0.72 \text{ эВ}$, тогда $\Delta\phi_0 = 0.25 \text{ эВ}$

Свойства полупроводников при $T=300\text{K}$

	Si	Ge	GaAs	InSb
ϵ_s	11.9	16	10.9	17
$N_c, \text{см}^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{19}$	$1.04 \cdot 10^{19}$	$4.7 \cdot 10^{17}$	$3.7 \cdot 10^{16}$
$N_v, \text{см}^{-3}$	$1.02 \cdot 10^{19}$	$6.11 \cdot 10^{18}$	$7.0 \cdot 10^{18}$	$1.16 \cdot 10^{19}$
$E_g, \text{эВ}$	1.12	0.66	1.43	0.18
$E_{go}, \text{эВ}$	1.21	0.80	1.56	0.235
$\alpha, \text{эВ/K}$ □	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\chi, \text{эВ}$	4.05	4.0	4.07	4.6
$n_i, \text{см}^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$2.5 \cdot 10^{13}$	$1.1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^{16}$
$\mu_e, \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$	1500	3900	8500	78000
$\mu_p, \text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$	6000	1900	400	5000
n	3.44	4.0	3.4	3.75
$\tau, \text{с}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-8}	10^{-8}
m_{de}^*	1.08	0.56	0.068	0.013
m_{dp}^*	0.56	0.35	0.45	0.6
$l_{добрт}, \text{МКМ}$	24	0.68	2250	

Работа выхода из металлов, эВ

Mg	Al	Ni	Cu	Ag	Au	Pt
3.4	4.1	4.5	4.4	4.3	4.7	5.3

Свойства диэлектриков

	E_g , эВ	$\epsilon_{ст}$	ϵ_{∞}	ρ , $г^{-1}см^{-1}$	$E_{пр}$, В/см
SiO ₂	9,0	3,82	2,13	2,33	$1,2 \cdot 10^7$
Si ₃ N ₄	5,1	6,5	4,2	3,11	$6,0 \cdot 10^6$
Ta ₂ O ₅	4,5	27	5,0	8,53	$6,0 \cdot 10^6$

Примеры задач для контрольной работы

- 1) Вычислить подвижность, которой обладает электрон в образце германия n-типа, если удельное сопротивление германия $\rho=0,1$ Ом·см, а концентрация электронов в нем $n=10^{17}$ см⁻³.
- 2) Вычислить электропроводность германия, содержащего $N_1=10^{17}$ см⁻³ атомов мышьяка и $N_2=5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ атомов галлия.
- 3) Пластика полупроводника n-типа, квадратного сечения с шириной $a=1$ мм помещена в магнитное поле. Ток, проходящий через пластину, равен $I=50$ мА. Величина образовавшейся разности потенциалов Холла составляет $U=10$ мВ. Определить индукцию магнитного поля, если концентрация носителей заряда $n=10^{16}$ см⁻³.
- 4) Сколько электронов и дырок образуется в маленьком кристалле BaO при поглощении им световой энергии $W=10^{-11}$ Дж с длиной волны $\lambda=200$ нм? На каком характерном расстоянии происходит основное поглощение световой энергии, если коэффициент поглощения $\alpha=3 \cdot 10^9$ см⁻¹.
- 5) У кремния ширина запрещенной зоны равна примерно 1.2 эВ, а у германия – 0.75 эВ (при $T=0$ К). Для каких длин волн эти кристаллы непрозрачны?
- 6) Как изменится концентрация электронов в собственном полупроводнике в невырожденном случае при уменьшении температуры от 300 К до 100 К. Считать, что ширина запрещенной зоны равна 1,1 эВ. Зависимостью ширины запрещенной зоны от температуры пренебречь.
- 7) Определите зависимость уровня Ферми от температуры в невырожденном полупроводнике, содержащем один тип одновалентных акцепторов с концентрацией N_a .
- 8) Вычислите эффективное число состояний для двумерной системы с квадратичным законом дисперсии.
- 9) Получите выражение для эффективной плотности состояний в валентной зоне для тяжелых и легких дырок.
- 10) Определите закон изменения концентрации носителей заряда от времени в материале p-типа, если после выключения источника межзонной генерации неравновесных носителей заряда темп рекомбинации $R=a(np-n_0p_0)$, где $a=const$, n , p – неравновесные концентрации электронов и дырок соответственно, n_0 , p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок соответственно.

Для проведения контрольной работы может быть использован задачник В.Л.Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, И.В.Карпенко, А.Г.Миронов Сборник задач по физике полупроводников. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.— 144 с.

1.2 Примеры контрольных вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

1. Приведите примеры полупроводников.
2. Напишите выражение для постоянной Холла.
3. Сформулируйте теорему Блоха.
4. Что такое первая зона Бриллюэна?
5. Дайте определения прямозонного и непрямозонного полупроводников.
6. Приведите примеры многодолинных полупроводников.
7. Напишите выражение для плотности состояний в зоне проводимости в случае изотропного параболического закона дисперсии.
8. Запишите функцию Ферми-Дирака.
9. Запишите выражение для эффективной массы плотности состояний в случае эллиптических изоэнергетических поверхностей.
10. Какие полупроводники называются компенсированными?
11. Запишите выражение для длины экранирования Дебая.
12. Запишите уравнение кинетики рекомбинации в пространственно однородных системах.
13. Запишите уравнение кинетики рекомбинации в пространственно неоднородных системах.
14. Перечислите возможные механизмы рекомбинации.
15. Приведите примеры неупорядоченных полупроводников.

Примеры тестовых заданий по дисциплине

1. Проводимость материала при абсолютном нуле температуры равна нулю. Этот материал:
 - a. Металл
 - b. Полупроводник
 - c. Диэлектрик
 - d. Полупроводник или диэлектрик
2. Волновая функция электрона в периодическом потенциале дается выражением (\vec{r} – радиус-вектор электрона, \vec{k} – произвольный вектор с действительными компонентами):
 - a. $\exp(i\vec{k}\vec{r})u_k(\vec{r})$; где $u_k(\vec{r}) = u_k(\vec{r} + \vec{a})$, \vec{a} – вектор решетки
 - b. $\exp(i\vec{k}\vec{r})u_k(\vec{r})$; где $u_k(\vec{r}) = u_k(\vec{r} + \vec{b})$, \vec{b} – вектор обратной решетки
 - c. $\exp(i\vec{k}\vec{r})u_k(\vec{r})$; где $u_k(\vec{r}) = \text{const}$
 - d. $\exp(i\vec{k}\vec{r})u_k(\vec{r})$; где $u_k(\vec{r}) = u_k(\vec{r} + \vec{a})$, \vec{a} – вектор решетки
3. Какое из предположений не используется в зонной теории?
 - a. Все ядра расположены строго периодически в пространстве
 - b. Взаимодействие электронов друг с другом заменяется некоторым эффективным внешним полем
 - c. Атомные ядра считаются неподвижными
 - d. Электроны не взаимодействуют друг с другом

4. В приближении сильно связанных электронов с увеличением ширины разрешенной зоны эффективная масса электрона:
 - a. Увеличивается
 - b. Уменьшается
 - c. Не изменяется
 - d. Может как увеличиваться, так и уменьшаться
5. Выражение для среднего значения скорости \bar{v} электрона в идеальном кристалле имеет вид (\mathbf{p} – квазиимпульс, m_0 – масса свободного электрона, $E(\mathbf{p})$ – энергия электрона):
 - a. $\bar{v} = \bar{p}/m_0$
 - b. $\bar{v} = \nabla E(\mathbf{p})$
 - c. $v = \sqrt{2m_0 E(\mathbf{p})}$
 - d. $v = 0$, поскольку электрон не находится во внешнем поле
6. Одно из условий применимости метода эффективной массы заключается в том, что:
 - a. Эффективная масса должна слабо отличаться от массы свободного электрона
 - b. Накладываемый неперриодический потенциал должен быть малым
 - c. Периодическая составляющая потенциала должна отсутствовать
 - d. Накладываемый неперриодический потенциал практически не меняется на протяжении постоянной решетки

Список вопросов к экзамену

Основы физики полупроводников

1. Введение. Исторические этапы в развитии физики полупроводников.
2. Типы химической связи. Силы Ван-дер-Ваальса (дисперсионное, ориентационное и индукционное взаимодействия). Ионная, ковалентная, металлическая и водородная связи. Классификация твердых тел по характеру сил связи.
3. Кристаллическая решетка. Решетка Бравэ. Решетка с базисом. Прямая и обратная решетки. Обозначения углов, направлений и плоскостей в кристалле.
4. Элементарные полупроводники. Si, Ge, GaAs.
5. Структура энергетических уровней в атоме. Строение электронных оболочек элементов периодической системы Д.И.Менделеева. Энергия и движение электрона в твердом теле. Энергетический спектр электронов в кристалле.
6. Заполнение энергетических зон. Диэлектрики, полупроводники, металлы. Проводимость различных типов твердых тел.
7. Дефекты кристаллической структуры (вакансии, примеси, атомы в междоузлиях, дислокации и т.п.) Простейшая модель примесного состояния в полупроводнике. (модель изолированного атома). Легирование полупроводников. Донорная и акцепторная проводимости. Компенсированные и сильно легированные полупроводники. Переходы Мотта и Андерсона.
8. Элементарная теория электропроводности полупроводников. Температурная зависимость проводимости для собственных и примесных полупроводников. Подвижность, длина свободного пробега, время релаксации.
9. Эффективная масса. Электроны в тепловом равновесии. Вырождение
10. Функция распределения Ферми. Уровень химического потенциала. Плотность состояний. Концентрация носителей в энергетической зоне.
11. Электропроводность (электронная и дырочная) и подвижность носителей заряда в полупроводниках.
12. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Спектр нормальных колебаний. Температура Дебая. Фононы.

13. Электропроводность. Механизмы рассеяния носителей заряда. Зависимость подвижности и длины свободного пробега электрона от температуры.
14. Теплопроводность полупроводников. Теплопроводность кристаллической решетки.
15. Электронная теплопроводность. Закон Видемана-Франца.
16. Контактные явления. Работа выхода. Контактная разность потенциалов.
17. Выпрямление на контакте двух металлов.
18. Контакт металла и полупроводника. Выпрямление на контакте металла и полупроводника.
19. Контакт электронного и дырочного полупроводников. Выпрямление на p-n переходе.
20. Эффект поля. Поверхностные состояния. Гетеропереходы.
21. Термоэлектрические явления. Качественная картина эффектов Пельтье, Зеебека
22. Гальваномагнитные и термомагнитные явления. Эффект Холла.
23. Магнитосопротивление. Термомагнитные явления.
24. Оптические свойства полупроводников. Генерация и рекомбинация носителей. Фотопроводимость.
25. Спектр поглощения и фоточувствительность. Механизмы поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное, экситонное, на свободных носителях).
26. Оптические свойства низкоразмерных структур. Межзонное поглощение света квантовой ямой.

Электроны в идеальном кристалле. Основы зонной теории.

1. Общая постановка задачи. Адиабатическое приближение.
2. Одноэлектронное приближение. Метод Хартри. Метод Хартри-Фока.
3. Электрон в периодическом поле решетки кристалла. Условие цикличности Борна-Кармана.
4. Ячейка Вигнера – Зейтца. Зона Бриллюэна. Теорема Блоха.
5. Приближение сильно связанных электронов. Гамильтониан кристалла и изолированного атома.
6. Энергетический спектр идеального кристалла. Локализованные и делокализованные волновые функции. Обменный интеграл. Интеграл перекрытия.
7. Энергетический спектр для случая простой кубической решетки. Основные положения зонной теории.
8. Движение электрона в идеальном кристалле. Ячейка Вигнера – Зейтца. Первая зона Бриллюэна. Особые точки.
9. Зонная структура твердого тела в модели Кронига – Пенни.
10. Модель Кронига – Пенни. Закон дисперсии.
11. Квазиволновой вектор. Число состояний и квазинепрерывный спектр.
12. Закон дисперсии. Основные типы зонной структуры полупроводников. Зонная структура Si, Ge, GaAs. Изоэнергетические поверхности.
13. Эффективная масса электрона. Дырка.
14. Квазиимпульс. Движение носителей в электрическом поле. Связь между силой и ускорением.
15. Тензор обратной эффективной массы. Эллипсоид эффективной массы.
16. Продольная и поперечная эффективные массы. Изоэнергетические поверхности: радиус-вектор (\vec{r}) и нормаль (\vec{V}) к поверхности.
17. Метод эффективной массы. Влияние внешних полей на спектр энергии кристалла. Локализованные состояния.

Статистика электронов и дырок в полупроводниках.

1. Распределение электронов по энергетическим уровням. Функция Ферми – Дирака.
2. Плотность состояний. Заселенность уровней.
3. Собственные полупроводники. Концентрация носителей заряда в отсутствие вырождения. Положение уровня Ферми

4. Собственные полупроводники. Эффективная масса плотности состояний.
5. Примесные полупроводники. Положение уровня Ферми.
6. Примесные полупроводники. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в полупроводниках.

Размерное квантование, квантовые ямы и сверхрешетки. Неупорядоченные полупроводники.

1. Квантовые ямы в полупроводниках. Условия квантования. Подзоны размерного квантования. Плотность состояний в квантовой яме.
2. Оптические свойства низкоразмерных структур. Сверхрешетки. Межзонное поглощение света квантовой ямой.
3. Основные представления физики неупорядоченных полупроводников. Случайный потенциал. Хвосты плотности состояний и локализация.
4. Проводимость по локализованным состояниям, закон Мотта для прыжковой проводимости.
5. Оптические переходы в неупорядоченных полупроводниках. Хвосты оптического поглощения (правило Урбаха).

Правила выставления оценки на экзамене.

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично» выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом физики полупроводников; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует терминологию физики полупроводников и физики конденсированного состояния

Оценка «Хорошо» выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствует указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

Оценка «Удовлетворительно» выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагаются в терминах физики полупроводников, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные

нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

Допускается возможность один раз поменять экзаменационный билет, но при этом итоговая оценка автоматически снижается на один балл.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Физика полупроводников и низкоразмерных систем»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Курс направлен на формирование у учащихся знаний основных идей и представлений теории и методов современной физики полупроводников. Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» являются лекции. По ряду тем предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным физическим задачам и отработка навыков расчетов физических характеристик полупроводников. Программа освоения дисциплины предусматривает также проведение цикла лабораторных работ, в которых приобретаются навыки постановки экспериментов по исследованию свойств материалов, а также анализ и интерпретация экспериментальных результатов с использованием знаний приобретенных на лекциях и практических занятиях.

В курсе рассматриваются основные приближения зонной теории твердого тела, влияние внешних воздействий на поведение носителей заряда, статистика электронов и дырок в полупроводниках, статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда, явления в контактах, р-п переход. В курсе также затрагиваются некоторые вопросы физики полупроводниковых систем пониженной размерности, такие как нахождение энергетического спектра электрона в низкоразмерных системах, особенности экранирования электрического поля в системах пониженной размерности

Для успешного освоения дисциплины очень важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные консультации. Основная цель решения задач – помочь усвоить основные положения физики полупроводников. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе),
- подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- подготовку к контролям знаний учащихся, которые проводятся на каждом занятии, зачёту

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия и законы физики полупроводников, а также используемые в физике полупроводников основополагающие модели и теории; уметь решать задачи по основным разделам физики полупроводников; использовать полученные знания для определения параметров и интерпретации физических свойств полупроводников;

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде самостоятельных работ (в аудитории) и двух контрольных работ. Также проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

Экзамен принимается по экзаменационным билетам, каждый из которых включает в себя два теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к экзамену выделяется 3 дня, во время подготовки к экзамену предусмотрена групповая консультация.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать экзамен по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.

Для самостоятельной работы особенно рекомендуется использовать учебную литературу, с подробно разобранными решениями задач по физике полупроводников. К таким можно отнести следующие издания:

- В.Л.Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, И.В.Карпенко, А.Г.Миронов Сборник задач по физике полупроводников. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.— 144 с.

Данные учебные пособия предназначены для проведения практических занятий по курсу физики полупроводников, также будут исключительно полезны и для самостоятельной работы. В сборник включены задачи по основным разделам лекционного курса (статистика, диффузия и дрейф носителей заряда, p - n переходы, контактные и поверхностные явления в полупроводниках).

В начале каждого раздела приведены основные формулы с краткими пояснениями. После списка задач, в конце пособия, даются решения и ответы.