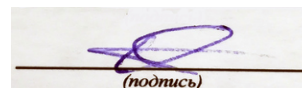


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

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

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



(подпись)

И.С. Огнев

23 мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
«Физическое материаловедение в электронике и нанoeлектронике»

Направление подготовки
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

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 «Физическое материаловедение в электронике и наноэлектронике» 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 «Физическое материаловедение в электронике и наноэлектронике» 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 ОП бакалавриата

Дисциплина «Физическое материаловедение в электронике и наноэлектронике» 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 **Физическое материаловедение в электронике и наноэлектронике** 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 наноэлектроника**. Наряду с другими дисциплинами профессионального цикла дисциплина **Физическое материаловедение в электронике и наноэлектронике** обеспечивает реализацию профиля подготовки **Интегральная электроника и наноэлектроника**.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП бакалавриата

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:

Код компетенции	Формулировка компетенции	Перечень планируемых результатов обучения
Профессиональные компетенции		
ПК-3	готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций	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;• 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;

		<ul style="list-style-type: none"> • 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.
		<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.
		<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 «Физическое материаловедение в электронике и наноэлектронике»

4.1. Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 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
			Контактная работа						Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационная самостоятельная работа		
1	Введение в физику полупроводников.	6	8	8	12	2		10	Фронтальный опрос.
2	Электроны в идеальном кристалле. Основы зонной теории	6	8	6		2		10	Фронтальный опрос.

	полупроводников.								
3	Статистика электронов и дырок в полупроводниках.	6	6	8		2		10	Фронтальный опрос.
4	Границы раздела. Кинетические явления в биполярных полупроводниках. Оптические свойства.	6	6	8	18	2		10	Фронтальный опрос. Контрольная работа.
5	Размерное квантование, квантовые ямы и сверхрешетки. Неупорядоченные полупроводники.	6	2			1		5	Фронтальный опрос.
						2	0,5	33,5	Экзамен
	Всего		30	30	30	11	0,5	78,5	

4.2. Содержание разделов дисциплины

Раздел 1. Ведение 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{r}) 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 Пельте, 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).

4.3.1. 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, 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.

6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса используются:

- для формирования текстовых и графических материалов промежуточной и текущей аттестации – программы Microsoft Office, графический редактор Inkscape;
- для поиска учебной литературы библиотеки ЯрГУ – Автоматизированная библиотечная информационная система "БУКИ-NEXT" (АБИС "Буки-Next").

7. 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.С.Киреев Физика полупроводников. - М.: Высшая школа, 1989. 590 с.
4. А.И.Ансельм, Введение в теорию полупроводников, . Учеб. пособие для вузов 3-е изд., стер.— СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 624 с.
5. 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. Нанопфизика 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.

в) ресурсы сети «Интернет»

1. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ (http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php).
2. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" (<http://www.edu.ru> (раздел Учебно-методическая библиотека) или по прямой ссылке <http://window.edu.ru/library>).
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» (www.biblioclub.ru).

Специального программного обеспечения не требуется.

В качестве Интернет-ресурсов могут быть использованы известные поисковые системы (www.yandex.ru, www.google.ru, www.gigapedia.org). Сайт ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН (www.ioffe.ru) и другие интернет ресурсы с соответствующей тематикой.

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

Аудитории, оборудованные для проведения лекций, практических, лабораторных занятий и консультаций, фонд научной библиотеки университета, компьютеры с доступом в Интернет, оборудование для демонстраций электронных мультимедийных презентаций, лабораторное оборудование Центра коллективного пользования «Диагностика микро и наноструктур».

Автор:

Доцент базовой кафедры нанотехнологий в электронике, к.ф.-м.н. _____ А.Б.Чурилов
(подпись)

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Физическое материаловедение в электронике и нанoeлектронике»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,
характеризующих этапы формирования компетенций**

**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).

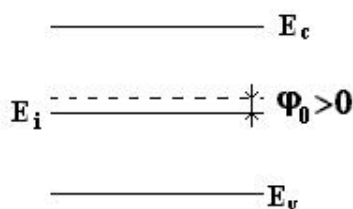
Решение

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 $T=300 \text{ К}$.

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 $T=300 \text{ К}$ до $T=77 \text{ К}$.

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 $T=300 \text{ К}$ $\phi_0 = 0.47 \text{ эВ}$ и при 77 К $\phi_0 = 0.72 \text{ эВ}$, тогда $\Delta\phi_0 = 0.25 \text{ эВ}$

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

	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
$\alpha, \text{эВ/К}$ □	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\chi, \text{эВ}$	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. Метал
 - 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. $\exp(\vec{k}\vec{r})u_k(\vec{r})$; 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. $\bar{v} = \bar{\mathbf{p}}/m_0$
 - 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 непериодический потенциал должен быть малым
 - c. Периодическая составляющая потенциала должна отсутствовать
 - d. Накладываемый непериодический 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. Гальваноманнитные 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{p}) 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).

2. Перечень компетенций, этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкалы оценивания

2.1 Шкала оценивания сформированности компетенций и ее описание

Оценивание уровня сформированности компетенций в процессе освоения дисциплины осуществляется по следующей трехуровневой шкале:

Пороговый уровень - предполагает отражение тех ожидаемых результатов, которые определяют минимальный набор знаний и (или) умений и (или) навыков, полученных студентом в результате освоения дисциплины. Пороговый уровень является обязательным уровнем для студента к моменту завершения им освоения данной дисциплины.

Продвинутый уровень - предполагает способность студента использовать знания, умения, навыки и (или) опыт деятельности, полученные при освоении дисциплины, для решения профессиональных задач. Продвинутый уровень превосходит пороговый уровень по нескольким существенным признакам.

Высокий уровень - предполагает способность студента использовать потенциал интегрированных знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, полученных при освоении дисциплины, для творческого решения профессиональных задач и самостоятельного поиска новых подходов в их решении путем комбинирования и использования известных способов решения применительно к конкретным условиям. Высокий уровень превосходит пороговый уровень по всем существенным признакам.

3. Методические рекомендации преподавателю по процедуре оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Целью процедуры оценивания является определение степени овладения студентом ожидаемыми результатами обучения (знаниями, умениями, навыками и (или) опытом деятельности).

Процедура оценивания степени овладения студентом ожидаемыми результатами обучения осуществляется с помощью методических материалов, представленных в разделе «Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций»

3.1 Критерии оценивания степени овладения знаниями, умениями, навыками и (или) опытом деятельности, определяющие уровни сформированности компетенций

Пороговый уровень (общие характеристики):

- владение основным объемом знаний по программе дисциплины;
- знание основной терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы без существенных ошибок;
- владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках рабочей программы дисциплины;
- усвоение основной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- знание базовых теорий, концепций и направлений по изучаемой дисциплине;
- самостоятельная работа на практических и лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, достаточный уровень культуры исполнения заданий.

Продвинутый уровень (общие характеристики):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме программы дисциплины;
- использование основной терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно решать сложные задачи (проблемы) в рамках рабочей программы дисциплины;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических и лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

Высокий уровень (общие характеристики):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам дисциплины;

- точное использование терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- безупречное владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные задачи (проблемы) в рамках рабочей программы дисциплины;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- активная самостоятельная работа на практических и лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

3.2 Описание процедуры выставления оценки

В зависимости от уровня сформированности каждой компетенции по окончании освоения дисциплины студенту выставляется оценка. Для дисциплин, изучаемых в течение нескольких семестров, оценка может выставляться не только по окончании ее освоения, но и в промежуточных семестрах. Вид оценки («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно», «зачтено», «незачтено») определяется рабочей программой дисциплины в соответствии с учебным планом.

Оценка «отлично» выставляется студенту, у которого каждая компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована на высоком уровне.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, у которого каждая компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована не ниже, чем на продвинутом уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, у которого каждая компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована не ниже, чем на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, у которого хотя бы одна компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована ниже, чем на пороговом уровне.

Оценка «зачет» выставляется студенту, у которого каждая компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована не ниже, чем на пороговом уровне.

Оценка «незачтено» выставляется студенту, у которого хотя бы одна компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована ниже, чем на пороговом уровне.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Физическое материаловедение в электронике и нанoeлектронике»

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 «Физическое материаловедение в электронике и нанoeлектронике» 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.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов по дисциплине

Для самостоятельной работы особенно рекомендуется использовать учебную литературу, с подробно разобранными решениями задач по физике полупроводников и физике твердого тела. 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.
- Д.И.Сирота Физика твердого тела. Сборник задач с подробными решениями. Учебное пособие. - М.: Либроком., 2016.— 184 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 книге Д.И.Сироты задачи в доступной форме помогают уяснить физический смысл различных коэффициентов, характеризующих свойства реальных кристаллических материалов, оценить их величину и анизотропию. Данный сборник ставит своей целью помочь студенту разобраться с разными видами задач по физике твердого тела, предполагающих довольно высокий уровень физико-математической подготовки. Сборник полезен для студентов специальностей, связанных с материаловедением, физическими основами микроэлектроники и электронной техники, а также для всех, кому необходимо разобраться с основными понятиями и методами физики твердого тела.

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

Также для подбора учебной литературы рекомендуется использовать широкий спектр интернет-ресурсов:

1. Международный научно-образовательный сайт EqWorld. Сайт EqWorld содержит обширную информацию о различных классах обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), дифференциальных уравнений с частными производными (УрЧП), интегральных уравнений, функциональных уравнений и других математических уравнений. Особое внимание уделено уравнениям математической физики и механики. Приведены таблицы точных решений, описаны методы решения уравнений, есть интересные статьи, даны ссылки на математические программы, указаны адреса научных сайтов, издательств, журналов и др. Имеется динамический раздел

EqArchive, который дает возможность авторам оперативно публиковать свои уравнения и их точные решения, первые интегралы и преобразования. Содержит учебную физико-математическую библиотеку, в которую авторы могут добавлять свои книги и диссертации, а также форум для вопросов и дискуссий.

EqWorld работает на русском и английском языках (главная стр. сайта переведена также на немецкий, французский, итальянский и испанский языки) и предназначен для широкого круга ученых, преподавателей вузов, инженеров, аспирантов и студентов в различных областях математики, механики, физики, химии, биологии и инженерных наук. Все ресурсы сайта являются бесплатными для его пользователей.

EqWorld содержит около 2000 веб-страниц (книги библиотеки не учитываются), его посещают люди из 200 стран мира, средняя посещаемость сайта превышает 3000 человек в сутки. Адреса сайта в Интернете: <http://eqworld.ipmnet.ru/indexr.htm> (рус.), <http://eqworld.ipmnet.ru> (англ.).

2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» (www.biblioclub.ru) - электронная библиотека, обеспечивающая доступ к наиболее востребованным материалам-первоисточникам, учебной, научной и художественной литературе ведущих издательств (*регистрация в электронной библиотеке – только в сети университета. После регистрации работа с системой возможна с любой точки доступа в Internet.).

2. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" (<http://window.edu.ru/library>).

Целью создания информационной системы "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" (ИС "Единое окно ") является обеспечение свободного доступа к интегральному каталогу образовательных интернет-ресурсов и к электронной библиотеке учебно-методических материалов для общего и профессионального образования.

Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" создана по заказу Федерального агентства по образованию в 2005-2008 гг. Главной разработчик проекта - Федеральное государственное автономное учреждение Государственный научно-исследовательский институт информационных технологий и телекоммуникаций (ФГАУ ГНИИ ИТТ "Информика") www.informika.ru.

ИС "Единое окно" объединяет в единое информационное пространство электронные ресурсы свободного доступа для всех уровней образования в России. Разделы этой системы:

Электронная библиотека – является крупнейшим в российском сегменте Интернета хранилищем полнотекстовых версий учебных, учебно-методических и научных материалов с открытым доступом. Библиотека содержит более 30 000 материалов, источниками которых являются более трехсот российских вузов и других образовательных и научных учреждений. Основу наполнения библиотеки составляют электронные версии учебно-методических материалов, подготовленные в вузах, прошедшие рецензирование и рекомендованные к использованию советами факультетов, учебно-методическими комиссиями и другими вузовскими структурами, осуществляющими контроль учебно-методической деятельности.

Интегральный каталог образовательных интернет-ресурсов содержит представленные в стандартизированной форме метаданные внешних ресурсов, а также содержит описания полнотекстовых публикаций электронной библиотеки. Общий объем каталога превышает 56 000 метаописаний (из них около 25 000 - внешние ресурсы). Расширенный поиск в "Каталоге" осуществляется по названию, автору, аннотации, ключевым словам с возможной фильтрацией по тематике, предмету, типу материала, уровню образования и аудитории.

Избранное. В разделе представлены подборки наиболее содержательных и полезных, по мнению редакции, интернет-ресурсов для общего и профессионального образования.

Библиотеки вузов. Раздел содержит подборки сайтов вузовских библиотек, электронных каталогов библиотек вузов и полнотекстовых электронных библиотек вузов. Очень полезными для самостоятельной работы является издания, электронные копии которых широко представлены в различных электронных библиотеках

Для самостоятельного подбора литературы в библиотеке ЯрГУ рекомендуется использовать:

1. Личный кабинет (http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_login.php) дает возможность получения on-line доступа к списку выданной в автоматизированном режиме литературы, просмотра и копирования электронных версий изданий сотрудников университета (учеб. и метод. пособия, тексты лекций и т.д.) Для работы в «Личном кабинете» необходимо зайти на сайт Научной библиотеки ЯрГУ с любой точки, имеющей доступ в Internet, в пункт меню «Электронный каталог»; пройти процедуру авторизации, выбрав вкладку «Авторизация», и заполнить представленные поля информации.

2. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ (http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php) содержит более 2500 полных текстов учебных и учебно-методических материалов по основным изучаемым дисциплинам, изданных в университете. Доступ в сети университета, либо по логину/паролю.

3. Электронная картотека «Книгообеспеченность» (http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_bookreq_find.php) раскрывает учебный фонд научной библиотеки ЯрГУ, предоставляет оперативную информацию о состоянии книгообеспеченности дисциплин основной и дополнительной литературой, а также цикла дисциплин и специальностей. Электронная картотека «Книгообеспеченность» доступна в сети университета и через Личный кабинет.