

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 4

от 23.07.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ / PHYSICS OF SEMICONDUCTORS

Направление подготовки
(специальность)

[1] 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
6	4	144	30	15	15		30	0	Э
Итого	4	144	30	15	15	0	30	0	

АННОТАЦИЯ

В курсе излагаются основные экспериментальные сведения, теоретические концепции и методы описания переноса, генерации и рекомбинации носителей заряда, поглощения света в различных классах полупроводниковых материалов, включая неупорядоченные полупроводники. Основное внимание уделяется классическим полупроводниковым материалам, таким как кремний и германий.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины являются:

Изучение основных концепций и понятий, экспериментальных результатов и методов теоретического описания явлений в физике полупроводников как составной части физики конденсированного состояния вещества. Сходство и различие металлов, полупроводников и диэлектриков. Знакомство с базовыми электронными и оптическими процессами: собственная и примесная электропроводность полупроводников, колебания решётки и теплоёмкость, процессы переноса, рассеяния, локализации, инжекции, фото- и радиационной генерации, рекомбинации носителей заряда, особенности электронных и оптических процессов в неупорядоченных полупроводниках.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для успешного усвоения данной дисциплины студент должен владеть математическим аппаратом, необходимым для решения дифференциальных и интегральных уравнений, представлениями о физике атомов и молекул, физике твёрдого тела из курса общей физики, владеть понятийным аппаратом и методами решения задач теории электромагнитного поля, квантовой механики, статистической физики, а также феноменологическими представлениями из теории физики конденсированного состояния. Предполагается предварительное изучение следующих дисциплин:

Аналитическая геометрия
Линейная алгебра
Дифференциальные и интегральные уравнения
Общая физика — электричество и магнетизм
Общая физика — атомная физика
Теория поля
Квантовая механика
Теоретическая физика: статистическая физика

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
<p>Математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования</p>	<p>Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и нанoeлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и нанoeлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и</p>	<p>ПК-1 [1] - Способен применять простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>З-ПК-1[1] - Знание физических и математических моделей типовых приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники. ; У-ПК-1[1] - Умение применять физические и математические модели устройств электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; В-ПК-1[1] - Владение стандартными программными средствами компьютерного моделирования устройств и установок электроники и нанoeлектроники</p>

	устройств.		
производственно-технологический			
Проведение технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и микроэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и микроэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.	ПК-8 [1] - Способен выполнять постановку и эксплуатацию определенного технологического процесса или блока технологических операций по производству материалов и изделий электронной техники <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-8[1] - Знание технологий сверхбольших интегральных схем, планарных и иных технологий электроники и микроэлектроники; У-ПК-8[1] - Умение выполнять постановку и эксплуатацию определенного технологического процесса или блока технологических операций по производству СБИС, интегральных СВЧ-систем и других изделий электронной техники.; В-ПК-8[1] - Владение технологическими операциями по производству материалов и изделий электронной техники
Организация метрологического обеспечения производства материалов и изделий электронной техники	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и	ПК-9 [1] - Способен выполнять определенный тип измерительных или контрольных операций при исследовании параметров полупроводниковых	З-ПК-9[1] - Знание параметров полупроводниковых приборов аналоговой, цифровой, радиочастотной и СВЧ-электроники.; У-ПК-9[1] - Умение

	<p>конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и нанoeлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и нанoeлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>	<p>приборов и устройств или в технологическом процессе по производству материалов и изделий электронной техники</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.003</p>	<p>выполнять исследования параметров полупроводниковых приборов и устройств в микро- и нанoeлектронике; В-ПК-9[1] - Владение методами измерений в технологическом процессе по производству материалов и изделий электронной техники</p>
<p>Выполнение работ по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники</p>	<p>Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых</p>	<p>ПК-10 [1] - Способен к модернизации существующих и внедрению новых методов и оборудования для измерений параметров наноматериалов и наноструктур</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.003</p>	<p>З-ПК-10[1] - Знание физических основ современных микро- и нанотехнологий, технологий гетероструктурной и СВЧ-электроники.; У-ПК-10[1] - Умение творчески применять современное оборудование для измерений параметров наноматериалов и наноструктур; В-ПК-10[1] - Владение методами измерений</p>

	<p>задач в области электроники и наноэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>		<p>параметров наноматериалов и наноструктур</p>
<p>монтажно-наладочный</p>			
<p>Участие в монтаже, наладке, настройке, регулировке и поверке измерительного, диагностического, технологического оборудования и программных средств, используемых для решения различных научно-технических, технологических и производственных задач в области электроники и наноэлектроники</p>	<p>Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и наноэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и</p>	<p>ПК-12 [1] - Способен налаживать, испытывать, проверять работоспособность определенного измерительного, диагностического или технологического оборудования, используемого для решения научно-технических, технологических и производственных задач в области электроники и наноэлектроники</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.001</p>	<p>3-ПК-12[1] - Знание типового измерительного, диагностического или технологического оборудования, используемого для решения научно-технических, технологических и производственных задач в области электроники и наноэлектроники; У-ПК-12[1] - Умение налаживать оборудование для решения научно-технических, технологических и производственных задач в области электроники и наноэлектроники ; В-ПК-12[1] - Владение навыками испытаний, проверки</p>

	проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.		работоспособности определённого измерительного, диагностического или технологического оборудования в области электроники и наноэлектроники
--	---	--	--

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (B17)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>6 Семестр</i>						
1	Основные понятия физики твёрдого тела	1-8	16/8/8		25	КИ-8	З-ПК-1, У-ПК-1,

							В-ПК-1, 3-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10, 3-ПК-12, У-ПК-12, В-ПК-12
2	Введение в физику полупроводников	9-15	14/7/7		25	КИ-15	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10, 3-ПК-12, У-ПК-12, В-ПК-12
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		30/15/15		50		
	Контрольные мероприятия за 6 Семестр				50	Э	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10, 3-ПК-12, У-ПК-12, В-ПК-12

* – сокращенное наименование формы контроля

** – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам

Э	Экзамен
---	---------

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	30	15	15
1-8	Основные понятия физики твёрдого тела	16	8	8
1 - 2	Тема 1 Введение. Элементарная теория электропроводности полупроводников Эмпирические особенности (механические, электронные, оптические) полупроводников. Кристаллические и аморфные полупроводники. Теория Друде. Подвижность, время релаксации, длина свободного пробега. Модельные представления о механизме электропроводности собственных и примесных полупроводников	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	Тема 2 Основы зонной теории. Плотность состояний и равновесное энергетическое распределение носителей заряда в полупроводниках. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Электроны проводимости и дырки. Эффективная масса. Приближение сильно связанных электронов. Закон дисперсии. Уровни энергии донорных и акцепторных примесей. Плотность электронных и дырочных состояний. Функция распределения Ферми- Дирака. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Заселённость примесных состояний. Собственные и примесные полупроводники. Зависимость уровня Ферми от температуры и концентрации примеси.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	Тема 3 Колебания атомов кристаллической решётки Акустические и оптические колебания решётки. Фононы. Спектр фононов. Модели Эйнштейна и Дебая. Распределение Бозе- Эйнштейна. Теплоёмкость кристалла в зависимости от температуры.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	Тема 4 Кинетические явления и механизмы рассеяния электронов и дырок Кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации. Неравновесная функция распределения носителей заряда. Механизмы рассеяния электронов и дырок. Рассеяние на ионах примеси, на атомах примеси и дислокациях. Рассеяние на тепловых колебаниях решётки (фононах).	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	Введение в физику полупроводников	14	7	7
9 - 10	Тема 5 Кинетические явления и перенос носителей заряда в полупроводниках. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры. Эффект Холла в полупроводниках. Термоэлектрические явления. Теплопроводность	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	Тема 6 Генерация, перенос и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Неравновесные носители. Квазиуровень Ферми.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		

	Максвелловское время релаксации. Центры рекомбинации. Мономолекулярная и бимолекулярная рекомбинация. Механизмы рекомбинации: межзонная, через ловушки. Механизм Ланжевена. Оже-рекомбинация. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Эффективность фотогенерации. Фотопроводимость. Релаксация фотопроводимости	0	0	0
13 - 14	Тема 7 Неупорядоченные полупроводники. Перенос носителей заряда в материалах с ловушками. Типы беспорядка. Взаимосвязь структурного и энергетического беспорядка. Квазинепрерывный спектр локализованных состояний. Локализация Андерсона. Край подвижности. Модель многократного захвата и освобождения носителей. Подвижность и коэффициент диффузии, контролируемые ловушками.	Всего аудиторных часов		
		4	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
15	Тема 8 Прыжковый перенос носителей заряда Переходы между локализованными состояниями. Уравнение баланса. Прыжковая проводимость Однофононные и многофононные переходы. Модели Миллера- Абрахамса и Маркуса. Понятие транспортного уровня. Понятие о теории протекания и её применение к анализу прыжковой проводимости.	Всего аудиторных часов		
		2	1	1
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 2	Тема 1. Введение. Элементарная теория электропроводности полупроводников Проводимость, удельное сопротивление. Температурные зависимости электропроводности металлов и полупроводников. Вычисление времени релаксации, длина свободного пробега, проводимость.
3 - 4	Тема 2. Основы зонной теории. Плотность состояний и равновесное энергетическое распределение носителей заряда в полупроводниках. Блоховские волновые функции. Квазиимпульс, k- пространство. Зона Бриллюэна. Вычисление эффективной массы. Волновые функции в приближении сильно связанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием атомных волновых функций. Применение статистики Ферми- Дирака для вычисления концентрации электронов и дырок в зонах для собственных и примесных

	полупроводников.
5 - 6	Тема 3 Колебания атомов кристаллической решётки Закон дисперсии для акустических и оптических колебаний на основе модели одноатомной и двухатомной цепочек. Вычисление температурной зависимости теплоёмкости в зависимости от температуры согласно модели Дебая. Колебания двухатомной линейной цепочки
7 - 8	Тема 4 Кинетические явления и механизмы рассеяния электронов и дырок Решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Рассеяние на длинноволновых акустических фонах
9 - 10	Тема 5 Кинетические явления и перенос носителей заряда в полупроводниках Эффект Холла в полупроводниках. Волновые функции локализованных носителей заряда. Сильная и слабая локализация.
11 - 12	Тема 6 Генерация, перенос и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Эффективность разделения электронно- дырочной пары. Соотношение Эйнштейна и условия его применимости. Распределение концентрации носителей заряда при наличии мономолекулярной и бимолекулярной рекомбинации. Рекомбинация Ланжевена. Примеры вычисления константы рекомбинации
13 - 14	Тема 7. Неупорядоченные полупроводники. Перенос носителей заряда в материалах с ловушками. Подвижность в неупорядоченных высокоомных полупроводниках с квазинепрерывным распределением ловушек, в случае квазиравновесной и неравновесной генерации носителей заряда. Анализ переходного тока в условиях времяпролётного эксперимента
15 - 16	Тема 8 Прыжковый перенос носителей заряда Температурная зависимость транспортного уровня для экспоненциального и гауссова распределения прыжковых центров. Порог протекания и прыжковая проводимость. Зависимость прыжковой проводимости от температуры и концентрации носителей

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 2	Тема 1. Введение. Элементарная теория электропроводности полупроводников Проводимость, удельное сопротивление. Температурные зависимости электропроводности металлов и полупроводников. Вычисление времени релаксации, длина свободного пробега, проводимость.
3 - 4	Тема 2. Основы зонной теории. Плотность состояний и равновесное энергетическое распределение носителей заряда в полупроводниках. Блоховские волновые функции. Квазиимпульс, к- пространство. Зона Бриллюэна. Вычисление эффективной массы. Волновые функции в приближении сильно связанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием атомных волновых функций. Применение статистики Ферми- Дирака для вычисления концентрации электронов и дырок в зонах для собственных и примесных полупроводников.
5 - 6	Тема 3 Колебания атомов кристаллической решётки Закон дисперсии для акустических и оптических колебаний на основе модели одноатомной и двухатомной цепочек. Вычисление температурной зависимости теплоёмкости в зависимости от температуры согласно модели Дебая. Колебания двухатомной линейной цепочки
7 - 8	Тема 4 Кинетические явления и механизмы рассеяния электронов и дырок Решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Рассеяние на длинноволновых акустических фонах

9 - 10	Тема 5 Кинетические явления и перенос носителей заряда в полупроводниках Эффект Холла в полупроводниках. Волновые функции локализованных носителей заряда. Сильная и слабая локализация.
11 - 12	Тема 6 Генерация, перенос и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Эффективность разделения электронно-дырочной пары. Соотношение Эйнштейна и условия его применимости. Распределение концентрации носителей заряда при наличии мономолекулярной и бимолекулярной рекомбинации. Рекомбинация Ланжевена. Примеры вычисления константы рекомбинации
13 - 14	Тема 7. Неупорядоченные полупроводники. Перенос носителей заряда в материалах с ловушками. Подвижность в неупорядоченных высокоомных полупроводниках с квазинепрерывным распределением ловушек, в случае квазиравновесной и неравновесной генерации носителей заряда. Анализ переходного тока в условиях времяпролётного эксперимента
15 - 16	Тема 8 Прыжковый перенос носителей заряда Температурная зависимость транспортного уровня для экспоненциального и гауссова распределения прыжковых центров. Порог протекания и прыжковая проводимость. Зависимость прыжковой проводимости от температуры и концентрации носителей

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы используются следующие технологии:

- лекции по курсу традиционного типа, на некоторых лекциях применяется компьютерный проектор для иллюстраций сложных устройств, систем и процессов;
- практические (семинарские) занятия – решение задач студентами, в том числе в интерактивной форме (обсуждение, беседа) с преподавателем;
- лабораторные работы;
- самостоятельная работа студентов

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1	З-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-10	З-ПК-10	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-10	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-10	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-12	З-ПК-12	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-12	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-12	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-8	З-ПК-8	Э, КИ-8, КИ-15

	У-ПК-8	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-8	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-9	З-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15

Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-х балльной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS
90-100	5 – «отлично»	«Зачтено»	A
85-89	4 – «хорошо»		B
75-84			C
70-74			D
65-69	3 – «удовлетворительно»		E
60-64	2 – «неудовлетворительно»	«Не зачтено»	F
Ниже 60			

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ А 71 Введение в теорию полупроводников : , Ансельм А. И., Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. ЭИ Л12 Лабораторный практикум "Компьютерное моделирование наноструктур" : , Подливаев А.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
3. ЭИ Н62 Нестационарные процессы переноса и рекомбинации носителей заряда в тонких слоях органических материалов : учебное пособие для вузов, Никитенко В.Р., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: МедиаСтар, 2006

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. prola.aps.org
 2. www.jetp.ac.ru ()
- <https://online.mephi.ru/>
- <http://library.mephi.ru/>

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Курс включает в себя лекционные, лабораторные и практические занятия. Для успешного освоения курса полезно вспомнить некоторые темы из курса Квантовой механики, например, Волновая функция и энергетический спектр электрона в атоме водорода. На лекционных занятиях рассматриваются теоретические аспекты физики полупроводников. На практических и лабораторных занятиях студенты решают задачи, в том числе и в интерактивной форме (обсуждение). Поощряется активное участие в обсуждении задач, а также умение своевременно задавать вопросы для прояснения всех непонятных моментов по пройденному материалу. Помимо лекционных и семинарских занятий курс включает в себя самостоятельную работу студентов. Данное время отводится для самостоятельной переработки и повторения материала, выполнения домашних заданий, устранения долгов, накопленных во

время семестра, а также для самостоятельной подготовки к сдаче теоретического материала (экзамен). Во время самостоятельной подготовки к сдаче теоретического материала студенты учатся работать с научной литературой.

Итоговые баллы складываются из: 1) результатов контрольной и тестового опроса; 2) результатов контроля посещаемости; 3) результатов оценки работы студента в интерактивном режиме.

Получение положительной оценки по каждой проверочной работе (контрольная и тестовый опрос) является необходимым условием получения итоговой положительной оценки. В случае пропуска или получения отрицательной оценки самостоятельная работа должна быть переделана и сдана во время зачетной недели в конце семестра. Положительная оценка (аттестация) каждого раздела необходима для допуска к зачету.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Курс логически разбит на несколько взаимосвязанных частей. В первом разделе (1-8 недели) рассматриваются основные понятия и подходы физики твердого тела применительно к полупроводникам, во втором (9-16 недели) – основные понятия физики полупроводников, включая и неупорядоченные полупроводники. Преподавателю обязательно следует указать все источники литературы, из которых берётся информация на лекциях. Важно, чтобы информация была донесена до студентов в чёткой и ясной форме. Укажем, на что необходимо обратить особое внимание при раскрытии каждой из тем, перечисленных в программе дисциплины.

При изложении темы 1 "Введение. Элементарная теория электропроводности полупроводников" обратить особое внимание на понятие подвижности, времени релаксации и длины свободного пробега, и на связь данных величин.

При изложении темы 2 "Основы зонной теории. Плотность состояний и равновесное энергетическое распределение носителей заряда в полупроводниках" обратить особое внимание на связь эффективной массы, ширины зоны и интеграла перекрытия, а также на зависимость уровня Ферми от температуры и концентрации примеси.

При изложении темы 3 "Колебания атомов кристаллической решётки" обратить особое внимание на особенности акустических и оптических ветвей колебаний, а также на приближения, сделанные в модели Дебая.

При изложении темы 4 "Кинетические явления и механизмы рассеяния электронов и дырок" обратить внимание на приближение времени релаксации и на особенности вычисления этого времени для различных основных механизмов рассеяния.

При изложении темы 5 "Кинетические явления и перенос носителей заряда в полупроводниках" уделить основное внимание зависимости подвижности носителей заряда от температуры для различных механизмов рассеяния

При изложении темы 6 "Генерация, перенос и рекомбинация неравновесных носителей заряда" подчеркнуть различие квазиуровня Ферми и обычного уровня Ферми.

При изложении темы 7 "Неупорядоченные полупроводники. Перенос носителей заряда в материалах с ловушками" разобрать физические причины возникновения квазинепрерывных "хвостов" локализованных состояний у краёв зон и условие, при котором все состояния локализованы.

При изложении темы 8 "Прыжковый перенос носителей заряда" подчеркнуть связь концепции транспортного уровня и результатов теории протекания.

При проведении практических занятий, на которых студенты сами решают задачи, преподавателю следует обращать внимание на их активность. При этом, полезно опрашивать не только активных студентов, поскольку в противном случае есть риск того, что остальная часть группы не усвоит материал. На все возникающие вопросы лучше всего давать ответы, ссылаясь на определённый источник, который студент может подробнее изучить дома самостоятельно.

Следует обращать внимание на то, чтобы материал, прочитанный на лекциях, и решённые на семинарах задачи позволяли студенту в полном объеме справиться с контрольной работой и тестовым опросом.

Автор(ы):

Никитенко Владимир Роленович, д.ф.-м.н.