

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 КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Направление подготовки
(специальность)

[1] 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

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
7	2	72	16	0	32		24	0	3
8	3-4	108- 144	12	0	48		12-48	0	Э
Итого	5-6	180- 216	28	0	80	40	36-72	0	

АННОТАЦИЯ

В рамках настоящей дисциплины изучаются основы физики твердого тела включающие представления о строении кристаллов, методах исследования структуры и различных физических свойствах твердых тел. В курсе изложены основы теории твердого тела, принципы описания, расчета и анализа атомной структуры, физических свойств материалов, дефектов и квазичастиц. Описаны особенности электронного строения и природа физических явлений в твердых телах различных классов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения учебной дисциплины состоят в том, чтобы ввести студентов в круг понятий, представлений, концепций и моделей, используемых в задачах физики твердого тела, подготовить их к изучению последующих специализированных экспериментальных и теоретических курсов по физике твердого тела, электроники и компьютерному моделированию. Освоение дисциплины обеспечит комплексную подготовку студента инженерной специальности с глубоким пониманием физики изучаемых процессов.

Задачи дисциплины:

- ознакомление студентов с различными типами кристаллических решеток и типов связей между атомами в твердых телах;
- изучение различных моделей электронного строения твердых тел;
- приобретение студентами навыков расчета электронных характеристик твердых тел.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Изучение дисциплины базируется на компетенциях, сформированных у обучающихся в результате освоения дисциплин Квантовая механика, Дифференциальные и интегральные уравнения, Теория функций комплексного переменного, Статистическая физика. Знание материалов данной дисциплины необходимо при выполнении учебно-исследовательской работы.

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

		опыта)	
производственно-технологический			
Подготовка и проведение технологических процессов производства материалов и изделий фотоники, нанофотоники и оптоэлектроники	Создание и разработка новых приборов, элементной базы, систем и технологий фотоники и оптоинформатики	ПК-3.2 [1] - Способен применять современные технологии наноэлектроники и фотоники к разработке новых устройств и приборов в предметной области <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	3-ПК-3.2[1] - Знать технологические процессы производства и номенклатуру ключевого технологического оборудования, используемого для создания новых приборов и устройств наноэлектроники и фотоники ; У-ПК-3.2[1] - Уметь выбирать и применять современное технологическое оборудование для создания новых приборов и устройств наноэлектроники и фотоники ; В-ПК-3.2[1] - Владеть основными технологическими методами, используемыми в процессе производства приборов и устройств наноэлектроники и фотоники
Осуществление наладки, настройки и опытной проверки отдельных видов элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики в процессе НИОКР и опытного производства	Прикладные и опытно-конструкторские разработки в области фотоники и оптоинформатики	ПК-7 [1] - способен к разработке технических заданий на конструирование отдельных узлов приспособлений, оснастки и специального инструмента, предусмотренных технологией <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	3-ПК-7[1] - Знать требования , предъявляемые к технической документации при конструировании отдельных узлов приспособлений, оснастки и специального инструмента ; У-ПК-7[1] - Уметь анализировать исходные данные и технические требования, предъявляемые к конструируемым узлам

			приспособлений, оснастки и специального инструмента; формулировать и обосновывать требования к разрабатываемым узлам и элементам ; В-ПК-7[1] - Владеть знаниями по вопросам стандартизации, метрологии, технике измерений и контроля качества навыками разработки проектной и рабочей технической документации
Осуществление наладки, настройки и опытной проверки отдельных видов элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики в процессе НИОКР и опытного производства	Прикладные и опытно-конструкторские разработки в области фотоники и оптоинформатики	ПК-8 [1] - способен разрабатывать оптимальные решения при создании продукции приборостроения с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности, а также экологической безопасности <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.037	З-ПК-8[1] - Знать опасные и вредные эксплуатационные факторы, их предельнодопустимые уровни воздействия на человека, технику и окружающую среду при эксплуатации техники и технологий профессиональной деятельности; элементную базу, используемую в изделиях фотоники и оптоинформатики основные области применения устройств фотоники и оптоинформатики ; У-ПК-8[1] - Уметь анализировать технические решения при создании продукции приборостроения с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности, а также экологической безопасности

			обосновывать предлагаемые технические решения при создании продукции приборостроения подбирать по заданным параметрам и характеристикам элементную базу ; В-ПК-8[1] - Владеть методами работы с научнотехнической литературой и информацией
научно-исследовательский			
Анализ поставленной задачи исследований в области фотоники и оптоинформатики на основе подбора и изучения литературных и патентных источников	элементная база, системы и технологии интегральной, волоконной и градиентной оптики, а также микрооптики элементная база полупроводниковых, волоконных и планарных лазеров элементная база, системы, материалы, методы и технологии, обеспечивающие оптическую передачу, прием, обработку, запись и хранение информации элементная база и системы преобразования и отображения информации элементная база и системы на основе наноразмерных и фотоннокристаллических структур системы оптических и квантовых вычислений и оптические компьютеры оптические системы искусственного интеллекта устройства и системы	ПК-4.1 [1] - Способен применять фундаментальные знания из областей физики конденсированного состояния, физики полупроводников и физики наносистем для анализа принципов функционирования оптоэлектронных и электронно-оптических твердотельных устройств радиофотоники, с учетом актуальных мировых научных результатов. <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-4.1[1] - Знать фундаментальные основы физики конденсированного состояния, физики полупроводников и физики наносистем в объеме программы академического бакалавриата, необходимые для анализа принципов функционирования радиофотонных устройств; У-ПК-4.1[1] - Уметь применять полученные знания, а также проводить научный поиск актуальных опубликованных результатов и последних достижений в области твердотельной радиофотоники.; В-ПК-4.1[1] - Владеть навыками анализа и синтеза устройств радиофотоники с целью выделить их наиболее существенные электронные, оптические и иные

	компьютерной фотоники		функциональные характеристики, и сделать вывод о влияющих на них физических процессах.
Анализ поставленной задачи исследований в области фотоники и оптоинформатики на основе подбора и изучения литературных и патентных источников	элементная база, системы и технологии интегральной, волоконной и градиентной оптики, а также микрооптики; элементная база полупроводниковых, волоконных и планарных лазеров; элементная база, системы, материалы, методы и технологии, обеспечивающие оптическую передачу, прием, обработку, запись и хранение информации; элементная база и системы преобразования и отображения информации; элементная база и системы на основе наноразмерных и фотоннокристаллических структур; системы оптических и квантовых вычислений и оптические компьютеры; оптические системы искусственного интеллекта; устройства и системы компьютерной фотоники	ПК-5.1 [1] - Способен применять современные фундаментальные знания из областей физики конденсированного состояния, физики полупроводников и физики наносистем для анализа принципов функционирования радиофотонных и электронно-оптических устройств <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	3-ПК-5.1[1] - Знать фундаментальные основы физики конденсированного состояния, физики полупроводников и физики наносистем в объеме программы академического бакалавриата, необходимые для анализа принципов функционирования радиофотонных и электронно-оптических устройств; У-ПК-5.1[1] - Уметь применять полученные знания, а также проводить научный поиск актуальных опубликованных результатов и последних достижений в области радиофотонных технологий и систем; В-ПК-5.1[1] - Владеть навыками анализа и синтеза устройств радиофотоники с целью выделить их наиболее существенные электронные, оптические и иные функциональные характеристики, и сделать вывод о влияющих на них физических процессах
Экспериментальные исследования в области фотоники и оптоинформатики	Прикладные и опытно-конструкторские разработки в области фотоники и оптоинформатики	ПК-3 [1] - способен к наладке, настройке, юстировке и опытной проверке приборов и систем	3-ПК-3[1] - знать основы теории измерений основы работы с измерительной

новых явлений, материалов, систем и устройств		<i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.037	аппаратурой основы оптикофизических измерений; ; У-ПК-3[1] - Уметь пользоваться основными измерительными и сервисными приборами юстировать оптические установки ; В-ПК-3[1] - Владеть методами и приемами наладки, настройки, юстировки и опытной проверки приборов и систем
проектно-конструкторский			
Разработка отдельных блоков программ, их отладка и настройка для решения задач фотоники и оптоинформатики, включая типовые задачи проектирования, исследования и контроля элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики	Создание и разработка новых приборов, элементной базы, систем и технологий фотоники и оптоинформатики	ПК-6 [1] - способен проводить поверку, наладку и регулировку оборудования, настройку программных средств, используемых для разработки, производства и настройки приборной техники <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	3-ПК-6[1] - Знать общие принципы, правила и методы поверки, наладки и регулировки оборудования, настройки программных средств ; У-ПК-6[1] - Уметь подготавливать испытательное оборудование и измерительную аппаратуру, выбрать метод поверки, наладки и регулировки оборудования, настройки программных средств ; В-ПК-6[1] - Владеть навыками тестирования оборудования, настройки программных средств

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для

	ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (B17)	формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития

	лженаучного толка (В19)	исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для: - формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед; - формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.
--	-------------------------	--

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>7 Семестр</i>						
1	Структура кристаллов. Модель свободного электронного газа	1-8	8/0/16		25	КИ-8	3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2, 3-ПК-4.1,

							У-ПК-4.1, В-ПК-4.1, З-ПК-5.1, У-ПК-5.1, В-ПК-5.1, З-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, З-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, З-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8
2	Основы зонной теории твердых тел	9-16	8/0/16		25	КИ-16	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2, З-ПК-4.1, У-ПК-4.1, В-ПК-4.1, З-ПК-5.1, У-ПК-5.1, В-ПК-5.1, З-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, З-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, З-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		16/0/32		50		
	Контрольные мероприятия за 7 Семестр				50	3	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2, З-ПК-4.1, У-ПК-4.1, В-ПК-4.1, З-ПК-5.1, У-ПК-5.1, В-ПК-5.1, З-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, З-ПК-7,

							У-ПК-7, В-ПК-7, З-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8
	8 Семестр						
1	Эффективная масса	1-8	6/0/24		25	КИ-8	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2, З-ПК-4.1, У-ПК-4.1, В-ПК-4.1, З-ПК-5.1, У-ПК-5.1, В-ПК-5.1, З-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, З-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, З-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8
2	Металлы и полупроводники	9-15	6/0/24		25	КИ-15	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2, З-ПК-4.1, У-ПК-4.1, В-ПК-4.1, З-ПК-5.1, У-ПК-5.1, В-ПК-5.1, З-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, З-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, З-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8
	Итого за 8 Семестр		12/0/48		50		
	Контрольные мероприятия за 8 Семестр				50	Э	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3,

							3-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2, 3-ПК-4.1, У-ПК-4.1, В-ПК-4.1, 3-ПК-5.1, У-ПК-5.1, В-ПК-5.1, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, 3-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, 3-ПК-8, У-ПК-8, В-ПК-8
--	--	--	--	--	--	--	---

* – 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
З	Зачет
Э	Экзамен

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>7 Семестр</i>	16	0	32
1-8	Структура кристаллов. Модель свободного электронного газа	8	0	16
1 - 2	Введение. Кристаллические решетки Кристаллические и аморфные твердые тела; дальний и ближний порядок. Элементарная ячейка. Вектор прямой решетки. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Типы кристаллических решеток.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	Межатомные связи Различные типы связей между атомами в твердых телах. Локализованные и делокализованные связи. Энергия связи.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	Свободный трехмерный электронный газ Волновые функции и закон дисперсии для свободного электрона. Трехмерный свободный электронный газ. Периодические граничные условия. Волновые функции. Энергетический спектр. Энергия Ферми. Поверхность	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0

	Ферми. Плотность состояний. Полная энергия. Функция распределения Ферми-Дирака. Зависимость химического потенциала от температуры.			
7 - 8	Одномерный и двумерный электронный газ Волновые функции. Энергетический спектр. Энергия Ферми. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Полная энергия. Зависимость химического потенциала от температуры.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	Основы зонной теории твердых тел	8	0	16
9 - 10	Теорема Блоха Оператор трансляции. Теорема Блоха. Квазиимпульс. Блоховские волновые функции. Ортонормированность. Граничные условия.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	Модель Кронига-Пенни Модель Кронига-Пенни. Дисперсионное уравнение и его решение. Понятие разрешенных и запрещенных зон. Качественная картина формирования энергетических зон в кристаллах. Число электронных состояний в одной зоне. Зависимость энергии Ферми от концентрации электронов. Приведенная зонная схема. Особенности изменения импульса Ферми и поверхности Ферми при наличии зонной структуры.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	Обратная решетка Обратная решетка. Зоны Бриллюэна и правила их построения. Объем элементарной ячейки обратной решетки.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
15 - 16	Плотность электронных состояний в кристаллах Плотность электронных состояний в кристаллах различной мерности. Плотность состояний в модели Кронига-Пенни.	Всего аудиторных часов		
		2	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
	8 Семестр	12	0	48
1-8	Эффективная масса	6	0	24
1 - 2	Приближение сильной связи Блоховская волновая функция в приближении сильной связи. Общая формула для закона дисперсии в приближении ближайших соседей. Законы дисперсии в одномерной, простой квадратной и простой кубической решетках в приближении ближайших соседей. Функции Ванье, их свойства и связь с волновыми функциями электрона в атоме.	Всего аудиторных часов		
		2	0	8
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	Эффективная масса Эффективная масса электрона в кристалле. Скорость электрона в кристалле. Ускорение и закон движения электрона в кристалле. Сравнение характеристик свободного электрона и электрона в периодическом потенциале.	Всего аудиторных часов		
		2	0	8
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	Блоховские осцилляции Движение электрона в кристалле под действием внешних полей. Ускорение электрона в кристалле. Блоховские осцилляции	Всего аудиторных часов		
		2	0	8
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	Металлы и полупроводники	6	0	24

7 - 8	Понятие квазичастицы Понятие квазичастицы. Дырки. Квазиимпульс, энергетический спектр, эффективная масса и заряд дырок. Дырочная поверхность Ферми.	Всего аудиторных часов		
		2	0	8
		Онлайн		
9 - 10	Металлы и диэлектрики Характерные особенности плотности электронных состояний металла и диэлектрика. Полупроводники и диэлектрики	Всего аудиторных часов		
		2	0	8
		Онлайн		
11 - 12	Основные сведения о полупроводниках Электронное строение полупроводников. Собственные и несобственные полупроводники. Химический потенциал полупроводников. Зависимость концентрации носителей от температуры в собственном полупроводнике. Собственная и примесная проводимость полупроводников.	Всего аудиторных часов		
		2	0	8
		Онлайн		

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>7 Семестр</i>
1	Программный пакет ChemCraft Изучение функционала. Построение атомных моделей. Визуализация
2	Программный пакет VESTA Изучение функционала. Построение атомных моделей. Визуализация
3	Нахождение координат атомов кристалла по заданным векторам примитивных трансляций и базисным векторам Нахождение координат атомов кристалла по заданным векторам примитивных трансляций и базисным векторам
4	Построение ячейки Вигнера-Зейтца Алгоритм построения ячейки Вигнера-Зейтца
5	Расчет плотности состояний свободных электронов Оценка энергии Ферми и импульса Ферми в типичных металлах
6	Расчет плотности состояний двумерного электронного газа Расчет плотности состояний двумерного электронного газа
7	Расчет плотности состояний одномерного электронного газа Расчет плотности состояний одномерного электронного газа
8	Расчет зависимости химического потенциала от температуры Расчет зависимости химического потенциала от температуры для свободного

	одномерного и двумерного электронного газа
9	Расчет примитивных векторов трансляции обратной решетки различных кристаллов по известным примитивным векторам трансляции исходной решетки Расчет примитивных векторов трансляции обратной решетки различных кристаллов по известным примитивным векторам трансляции исходной решетки
10	Построение зон Бриллюэна Алгоритм построения зон Бриллюэна
11	Расчет объема обратной решетки по известным примитивным векторам трансляции исходной решетки Расчет объема обратной решетки по известным примитивным векторам трансляции исходной решетки
12	Расчет плотности электронных состояний в модели Кронига-Пенни Расчет плотности электронных состояний в модели Кронига-Пенни
13	Функционал программы Quantum Espresso Функционал программы Quantum Espresso
14	Задание кристаллической решетки и базиса в программе Quantum Espresso Задание кристаллической решетки и базиса в программе Quantum Espresso
15	Процесс структурной релаксации в программе Quantum Espresso Изучение процесса структурной релаксации в программе Quantum Espresso
16	Получение плотности электронных состояний для цепочки атомов в программе QE Получение плотности электронных состояний для цепочки атомов в программе QE
	<i>8 Семестр</i>
1	Расчет закона дисперсии электрона в различных кристаллах в приближении сильной связи Расчет закона дисперсии электрона в различных кристаллах в приближении сильной связи
2	Расчет плотности электронных состояний в одномерном кристалле и в кристалле с простой квадратной решеткой в приближении сильной связи Расчет плотности электронных состояний в одномерном кристалле и в кристалле с простой квадратной решеткой в приближении сильной связи
3	Программный пакет NTBM Изучение функционала программного пакета NTBM
4	Задание кристаллической решетки и базиса в программе NTBM Задание кристаллической решетки и базиса в программе NTBM
5	Процесс структурной оптимизации в программе NTBM Процесс структурной оптимизации в программе NTBM
6	Структурная оптимизация в программе NTBM Определение равновесной конфигурации графена в программе NTBM
7	Структура и свойства графена Расчет структурных и энергетических характеристик графена в программе NTBM
8	Электронные характеристики графена Расчет плотности электронных состояний графена в программе Quantum Espresso
9	Электронные характеристики графена Расчет зонной структуры графена в программе Quantum Espresso
10	Оценка интегралов перескока и эффективных масс электронов и дырок в типичных металлах Оценка интегралов перескока и эффективных масс электронов и дырок в типичных металлах
11	Расчет скорости и ускорения электронов в кристаллах с различной симметрией

	кристаллической решетки Расчет скорости и ускорения электронов в кристаллах с различной симметрией кристаллической решетки
12	Расчет температурной зависимости химического потенциала и концентрации электронов в зоне проводимости одномерного полупроводника Расчет температурной зависимости химического потенциала и концентрации электронов в зоне проводимости одномерного полупроводника
13	Расчет температурной зависимости химического потенциала и концентрации электронов в зоне проводимости двумерного полупроводника Расчет температурной зависимости химического потенциала и концентрации электронов в зоне проводимости двумерного полупроводника
14	Вычисление химического потенциала собственного полупроводника Вычисление химического потенциала собственного полупроводника
15	Расчет температурной зависимости проводимости собственного полупроводника Расчет температурной зависимости проводимости собственного полупроводника

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы дисциплины используются различные образовательные технологии – во время аудиторных занятий занятия проводятся в форме лекций (с применением компьютерного проектора для иллюстраций сложных математических выкладок и графиков) и практических (семинарских) занятий. Для контроля усвоения студентом разделов данного курса широко используются тестовые технологии, то есть специальный банк вопросов в открытой и закрытой форме, ответы на которые позволяют судить об усвоении студентом данного курса. Самостоятельная работа студентов подразумевает под собой проработку лекционного материала с использованием рекомендуемой литературы для подготовки к тестам. При обсуждении тем лекционных и практических занятий используются следующие интерактивные формы обучения: круглый стол (дискуссия), мозговой штурм (“брейншторм”), case-study (ситуационный анализ). При этом применяется презентативная форма подачи материала, обсуждаются последние научные достижения/публикации, в игровой форме рассказывается о работе с научной литературой.

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)	Аттестационное мероприятие (КП 2)
ПК-3	З-ПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-3.2	З-ПК-3.2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-3.2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-3.2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15

ПК-6	З-ПК-6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-7	З-ПК-7	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-7	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-7	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-8	З-ПК-8	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-8	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-8	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-4.1	З-ПК-4.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-4.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-4.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-5.1	З-ПК-5.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-5.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-5.1	З, КИ-8, КИ-16	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-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка

			«неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.
--	--	--	--

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, Опенцов Л.А., Маслов М.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
2. ЭИ Е 67 Физика твердого тела : , Епифанов Г. И., Санкт-Петербург: Лань, 2022
3. ЭИ М 34 Физика твердого тела : , Ермаков В. Л., Матухин В. Л., Санкт-Петербург: Лань, 2022

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ П 40 Механика твердого тела. Лабораторный практикум : учебное пособие для вузов, Бежанов С. Г. [и др.], Москва: Юрайт, 2022

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<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

Следует уделять больше внимания самостоятельной работе. В случае затруднений, возникающих при решении тех или иных из заданных на дом задач, рекомендуется обратиться к учебникам и задачникам, приведенным в списке литературы, и изучить данную тему более подробно. При подготовке к каждому занятию нужно обязательно повторить материал предыдущих лекций. Кроме того, весьма желательно повторить соответствующий материал из изученных ранее курсов.

В разделе о кристаллических решетках следует обратить внимание на различие формы элементарной ячейки для разных типов решеток, при этом не путать примитивную элементарную ячейку с условной.

Перед лекцией о свободном электронном газе полезно повторить раздел статистической физики о функции распределения Ферми-Дирака и освежить в памяти, как свободные электроны описываются в квантовой механике: какой вид имеют их волновые функции и закон дисперсии.

При изучении раздела о межатомных связях нужно обратить внимание на наличие корреляции между величинами энергии межатомной связи и межатомного расстояния.

В разделе о теореме Блоха нужно уяснить себе различие между импульсом и квазиимпульсом электрона.

Перед лекцией о модели Кронига-Пенни желательно повторить раздел квантовой механики о волновой функции электрона в прямоугольной потенциальной яме, в том числе – о граничных условиях для волновой функции и ее производной.

Изучение раздела об обратной решетке лучше всего начать с повторения материала об обычной («прямой») решетке. При этом следует отдавать себе отчет в том, что первая существует в координатном пространстве, а вторая – в импульсном.

В разделе о приближении сильной связи нужно уяснить, что одним из основных критериев применимости этого приближения является слабое перекрытие атомных волновых функций соседних атомов. Нужно также обратить внимание на сходство и различие атомных орбиталей и функций Ванье.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Дисциплина рассчитана на студентов, предварительно изучивших курс «Квантовая механика». Однако, как показывает практика преподавания, многие студенты недостаточно хорошо владеют аппаратом квантовой механики. Поэтому при изложении ключевых вопросов, касающихся электронных свойств твердых тел, имеет смысл напомнить студентам основные положения квантовой механики, в том числе уравнение Шредингера и т.п.

Тему о кристаллических решетках твердых тел, удобно излагать на примере низкоразмерных (одномерных и двумерных) систем. Это, с одной стороны, облегчает изложение, а с другой – способствует лучшему усвоению студентами материала. Кроме того, такой подход следует использовать при обучении студентов специальностей, связанных с нанотехнологиями.

Рассказывая о различных типах межатомных связей, нужно обязательно привести данные о характерных величинах энергии связи и межатомном расстоянии. Желательно сделать это на конкретных примерах (алмаз, графит и т.п.).

В разделе о свободном электронном газе желательно решить уравнение Шредингера для свободного электрона: такое повторение будет нелишним.

В теме о модели Кронига-Пенни можно ограничиться дельта-функциональным видом потенциала. При этом желательно качественно обсудить отличие такой модели от модели со ступенчатым потенциалом.

Говоря об обратной решетке, нужно обсудить ее сходства и различия с обычной («прямой») решеткой.

Приближение сильной связи следует рассмотреть подробно, дополнительно сравнить с приближением слабой связи.

Некоторые разделы курса можно несколько сократить, отдавая предпочтение физическому содержанию в ущерб математической строгости. Например, рассказывая об

эффективной массе электрона в кристалле, можно ограничиться изотропным случаем и не вводить более общее понятие тензора обратных эффективных масс.

Относительное количество часов, отводимых на изложение лекционного материала и на семинарские занятия можно варьировать – опять же в зависимости от уровня исходной подготовки студентов. В идеале на семинарах разбираются только те из заданных на дом задач, с которыми не справилось большинство студентов. С целью повышения уровня усвоения студентами материала курса можно порекомендовать на каждом семинаре или на каждой лекции проводить тестовые опросы, состоящие из 10 вопросов по материалам предыдущих занятий. Для студентов это является стимулом готовиться к каждому занятию, хотя бы кратко повторяя уже пройденные темы.

Автор(ы):

Катин Константин Петрович

Маслов Михаил Михайлович