

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

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Направление подготовки
(специальность)

[1] 11.03.04 Электроника и микроэлектроника

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
5	2	72	32	32	0		8	0	3
Итого	2	72	32	32	0	0	8	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
ОПК-1 [1] – Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	З-ОПК-1 [1] – Знание основных законов высшей математики, общей и теоретической физики, применительно к инженерным задачам У-ОПК-1 [1] – Умение применять основные положения и законы высшей математики, общей и теоретической физики, естественных наук к решению задач инженерной деятельности В-ОПК-1 [1] – Владение методами высшей математики и

	естественных наук применительно к задачам электроники и наноэлектроники
--	---

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			
Математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования	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 проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и	ПК-1 [1] - Способен применять простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-1[1] - Знание физических и математических моделей типовых приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники. ; У-ПК-1[1] - Умение применять физические и математические модели устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения; В-ПК-1[1] - Владение стандартными программными средствами компьютерного моделирования устройств и установок электроники и наноэлектроники

	применения электронных приборов и устройств.		
--	---	--	--

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
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 лженаучного толка (B19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития 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/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>5 Семестр</i>						
1	Структура кристаллов. Межатомные связи	1-8	16/16/0		25	КИ-8	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1
2	Основы зонной теории твердых тел	9-16	16/16/0		25	КИ-16	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1
	<i>Итого за 5 Семестр</i>		32/32/0		50		
	Контрольные мероприятия за 5 Семестр				50	3	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1

* – 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

3	Зачет
---	-------

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>5 Семестр</i>	32	32	0
1-8	Структура кристаллов. Межатомные связи	16	16	0
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		
		4	4	0
		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		
		4	4	0
		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 Ферми. Плотность состояний. Полная энергия. Функция распределения Ферми-Дирака. Зависимость химического потенциала от температуры.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	Теорема Блоха Оператор трансляции. Теорема Блоха. Квазиимпульс. Блоховские волновые функции. Ортонормированность. Граничные условия.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	Основы зонной теории твердых тел	16	16	0
9 - 10	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		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	Обратная решетка Обратная решетка. Зоны Бриллюэна и правила их построения. Объем элементарной ячейки обратной решетки.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	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	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0

	электрона в атоме.			
15 - 16	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. Понятие квазичастицы. Дырки. Квазиимпульс, энергетический спектр, эффективная масса и заряд дырок. Дырочная поверхность Ферми.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		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 ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>5 Семестр</i>
1 - 2	Нахождение координат атомов кристалла по заданным векторам примитивных трансляций и базисным векторам. Построение ячейки Вигнера-Зейтца Нахождение координат атомов кристалла по заданным векторам примитивных трансляций и базисным векторам. Построение ячейки Вигнера-Зейтца
3 - 4	Расчет плотности состояний свободных электронов. Оценка энергии Ферми и импульса Ферми в типичных металлах Расчет плотности состояний свободных электронов. Оценка энергии Ферми и импульса Ферми в типичных металлах
5 - 6	Расчет примитивных векторов трансляции обратной решетки различных кристаллов по известным примитивным векторам трансляции исходной решетки. Построение зон Бриллюэна Расчет примитивных векторов трансляции обратной решетки различных кристаллов по известным примитивным векторам трансляции исходной решетки. Построение зон Бриллюэна
7 - 8	Расчет плотности электронных состояний в модели Кронига-Пенни Расчет плотности электронных состояний в модели Кронига-Пенни
9 - 10	Расчет закона дисперсии электрона в различных кристаллах в приближении сильной связи Расчет закона дисперсии электрона в различных кристаллах в приближении сильной связи
11 - 12	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

13 - 14	Оценка интегралов перескока и эффективных масс электронов и дырок в типичных металлах Оценка интегралов перескока и эффективных масс электронов и дырок в типичных металлах
15 - 16	Расчет скорости и ускорения электронов в кристаллах с различной симметрией кристаллической решетки Расчет скорости и ускорения электронов в кристаллах с различной симметрией кристаллической решетки

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)
ОПК-1	З-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16
	У-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16
	В-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16
ПК-1	З-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16

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. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: МедиаСтар, 2006
2. ЭИ Е 67 Физика твердого тела : , Елифанов Г. И., Санкт-Петербург: Лань, 2022

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 538 С50 Сборник задач по физике конденсированного состояния : учебное пособие для вузов, Исаенкова М.Г., Елманов Г.Н., Смирнов Е.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

2. 539.2 Г95 Физика твердого тела для инженеров : учебное пособие для вузов, Осауленко Р.И., Гуртов В.А., Москва: Техносфера, 2012

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