

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

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии

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	32	0	0		40	0	З
8	2	72	24	0	0		21	0	Э
Итого	4	144	56	0	0	0	61	0	

## АННОТАЦИЯ

Основные области физики твердого тела, изучение которых предусмотрено программой курса и специализацией групп по лазерной физике. Рассматриваются основы кристаллографии, а также методы определения кристаллических структур, различные виды кристаллических связей и дефектов в твердых телах. Описаны колебания кристаллической решетки атомов и обосновано введение понятия «фонон». Основное внимание уделяется металлам и полупроводникам в соответствии с требованиями специализации группы. Поэтому подробно обсуждается зонная теория кристаллов наряду со связью зонной структуры с электрическими свойствами металлов и полупроводников. Также даны основы контактных явлений и детальный анализ работы p-n перехода в качестве одного из основных элементов полупроводниковых лазеров.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Показать многообразие физических явлений, протекающих в конденсированной фазе вещества. Научить оценивать характерные энергии, длины, времена релаксации различных физических взаимодействий в веществе, познакомить с основными подсистемами кристаллического состояния – решеткой Браве, фононной и электронной подсистемами. Дать ориентацию в различных экспериментальных методиках и теоретических описаниях, исследующих твердое тело.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Курс опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-математических специальностей: уравнения математической физики, квантовая механика, макроэлектродинамика, теория вероятностей, статистическая физика и термодинамика.

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и университетскому курсу математики. Необходимо уметь работать с операторами, знать дифференциальное и интегральное исчисление, тензорный и векторный анализ, статистику и термодинамику, электричество и магнетизм, в том числе в материальных средах. Необходимо ориентироваться в задачах квантовой механики и статистической физики, основные квантовые и классические распределения, элементы квантовой статистики.

### 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	Объект или	Код и наименование	Код и наименование
--------	------------	--------------------	--------------------

профессиональной деятельности (ЗПД)	область знания	профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
Анализ поставленной задачи исследований в области лазерной техники и лазерных технологий;- математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, разработка программ и их отдельных блоков, отладка и настройка для решения задач лазерной техники и лазерных технологий; проведение экспериментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом; проведение измерений по заданным методикам с выбором технических средств и обработкой результатов; составление описаний проводимых исследований и разрабатываемых проектов; осуществление наладки, настройки, юстировки и опытной проверки лазерных приборов и лазерных технологических систем;	процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; программное обеспечение и компьютерное моделирование в лазерной технике и лазерных технологиях.	ПК-2.6 [1] - Способен к владению основами физики конденсированных сред, использованию знаний о классификации кристаллов на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории, о колебаниях кристаллической решетки и фононах, о магнитных характеристиках твердых тел; к использованию методов исследования структуры, оптических и электрофизических свойств конденсированных сред  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-2.6[1] - Знать: основы физики твердого тела; У-ПК-2.6[1] - Уметь: ориентироваться в многообразии физических явлений твердого состояния; В-ПК-2.6[1] - Владеть: современными теоретическими представлениями при описании взаимодействий атомов и электронных оболочек в кристалле; принципами экспериментального исследования твёрдых тел
Анализ поставленной задачи исследований в области лазерной	процессы взаимодействия лазерного	ПК-1 [1] - Способен к математическому моделированию	З-ПК-1[1] - Знать возможности стандартных пакетов

<p>техники и лазерных технологий;- математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, разработка программ и их отдельных блоков, отладка и настройка для решения задач лазерной техники и лазерных технологий; проведение экспериментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом; проведение измерений по заданным методикам с выбором технических средств и обработкой результатов; составление описаний проводимых исследований и разрабатываемых проектов; осуществление наладки, настройки, юстировки и опытной проверки лазерных приборов и лазерных технологических систем;</p>	<p>излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; программное обеспечение и компьютерное моделирование в лазерной технике и лазерных технологиях.</p>	<p>процессов и объектов лазерной техники и технологий на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>автоматизированного проектирования при математическом моделировании объектов лазерной техники и технологий.; У-ПК-1[1] - Уметь решать типичные математические задачи на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования; В-ПК-1[1] - Владеть навыками самостоятельной разработки программ при математическом моделировании процессов и объектов лазерной техники и технологий</p>
<p>Анализ поставленной задачи исследований в области лазерной техники и лазерных технологий;- математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований,</p>	<p>процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы</p>	<p>ПК-2 [1] - Способен к проведению измерений и исследования различных объектов по заданной методике</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>3-ПК-2[1] - Знать основы электротехники и электроники, основы теории сигналов, основные физические методы измерений и исследований в области профессиональной деятельности.; У-ПК-2[1] - Уметь выбирать и</p>

<p>разработка программ и их отдельных блоков, отладка и настройка для решения задач лазерной техники и лазерных технологий; проведение экспериментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом; проведение измерений по заданным методикам с выбором технических средств и обработкой результатов; составление описаний проводимых исследований и разрабатываемых проектов; осуществление наладки, настройки, юстировки и опытной проверки лазерных приборов и лазерных технологических систем;</p>	<p>генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; программное обеспечение и компьютерное моделирование в лазерной технике и лазерных технологиях.</p>		<p>использовать соответствующие ресурсы и оборудование для проведения исследований и измерений ; В-ПК-2[1] - Владеть методами и приемами исследований, а также навыками измерений по заданной методике в области профессиональной деятельности</p>
<p>Анализ поставленной задачи исследований в области лазерной техники и лазерных технологий;- математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, разработка программ и их отдельных блоков, отладка и настройка для решения задач лазерной техники и лазерных технологий; проведение экспериментальных исследований взаимодействия</p>	<p>процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; программное обеспечение и компьютерное</p>	<p>ПК-3 [1] - Способен к наладке, настройке, юстировке и опытной проверке приборов и систем</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>3-ПК-3[1] - знать основы теории измерений, основы работы с измерительной аппаратурой, основы оптико-физических 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.</p>

лазерного излучения с веществом; проведение измерений по заданным методикам с выбором технических средств и обработкой результатов; составление описаний проводимых исследований и разрабатываемых проектов; осуществление наладки, настройки, юстировки и опытной проверки лазерных приборов и лазерных технологических систем;	моделирование в лазерной технике и лазерных технологиях.		
проектно-конструкторский			
Анализ поставленной проектной задачи в области лазерной техники и лазерных технологий; участие в разработке функциональных и структурных схем на уровне узлов и элементов лазерных систем и технологий по заданным техническим требованиям; расчет, проектирование и конструирование в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов лазерных систем и технологий на схемотехническом и элементном уровнях; разработка и составление отдельных видов технической документации на проекты, их элементы и сборочные единицы; участие в монтаже, сборке (юстировке),	разработка лазерных приборов, систем и технологий различного назначения; элементная база лазерной техники, технологий, систем управления и транспорта лазерного излучения	ПК-4 [1] - Способен к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	З-ПК-4[1] - Знать правила разработки проектной и рабочей технической документации, правила оформления конструкторской документации принципы и методы расчета и проектирования деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием. ; У-ПК-4[1] - Уметь анализировать технические требования, предъявляемые к разрабатываемым узлам и элементам рассчитывать и проектировать детали и узлы приборов и установок, разрабатывать проекты технических описаний установок и приборов, проводить концептуальную и

испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов лазерной техники и отработке элементов и этапов процессов лазерных технологий			проектную проработку типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях ; В-ПК-4[1] - Владеть методами анализа и расчета, навыками конструирования и проектирования в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях, методами расчета и проектирования деталей и узлов приборов и установок с использованием стандартных средств автоматизации
Анализ поставленной проектной задачи в области лазерной техники и лазерных технологий; участие в разработке функциональных и структурных схем на уровне узлов и элементов лазерных систем и технологий по заданным техническим требованиям; расчет, проектирование и конструирование в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов лазерных систем и технологий на схемотехническом и элементном уровнях; разработка и составление отдельных видов технической	разработка лазерных приборов, систем и технологий различного назначения; элементная база лазерной техники, технологий, систем управления и транспорта лазерного излучения	ПК-5 [1] - Способен к участию в монтаже, наладке настройке, юстировке, испытаниях, сдаче в эксплуатацию опытных образцов, сервисном обслуживании и ремонте техники  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.002	З-ПК-5[1] - Знать общие принципы, правила и методы электрических и оптикофизических измерений ; У-ПК-5[1] - Уметь выбрать метод монтажа, наладки настройки, юстировки, испытаний опытного образца разработать схему для монтажа, настройки, юстировки, испытаний формулировать и обосновывать требования к настройке, наладке, юстировке и сдаче в эксплуатацию опытных образцов техники ; В-ПК-5[1] - Владеть навыками монтажа, наладки, настройки, юстировки и

документации на проекты, их элементы и сборочные единицы; участие в монтаже, сборке (юстировке), испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов лазерной техники и отработке элементов и этапов процессов лазерных технологий			проведения испытаний.
Анализ поставленной проектной задачи в области лазерной техники и лазерных технологий; участие в разработке функциональных и структурных схем на уровне узлов и элементов лазерных систем и технологий по заданным техническим требованиям; расчет, проектирование и конструирование в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов лазерных систем и технологий на схемотехническом и элементном уровнях; разработка и составление отдельных видов технической документации на проекты, их элементы и сборочные единицы; участие в монтаже, сборке (юстировке), испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов лазерной техники и отработке элементов и этапов процессов лазерных технологий	разработка лазерных приборов, систем и технологий различного назначения; элементная база лазерной техники, технологий, систем управления и транспорта лазерного излучения	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	З-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 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.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления

		<p>следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.</p>
--	--	---

## 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>7 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	16/0/0		25	КИ-8	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6,

							В-ПК-2.6, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6
2	Раздел 2	9-16	16/0/0		25	КИ-16	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		32/0/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b>				50	3	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3,

							В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6
	<i>8 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	16/0/0		25	КИ-6	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6
2	Раздел 2	9-12	8/0/0		25	КИ-12	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6

							В-ПК-6
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		24/0/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-2.6, У-ПК-2.6, В-ПК-2.6, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6

\* – 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>	32	0	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1</b>	16	0	0
1	<b>Кристаллические структуры</b> Основные определения, решетка Браве, элементарная ячейка, примитивная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца, базисные векторы. Примеры ОЦК и ГЦК решеток, координационные сферы, коэффициент заполнения. Оси симметрии.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
2 - 3	<b>Типы химических связей в твердых телах</b> Классификация твердых тел. Молекулярные кристаллы, их основные физические свойства. Потенциал Леннарда-Джонса, когезионная энергия, модуль упругости. Ионные	Всего аудиторных часов		
		4	0	0
		Онлайн		
		0	0	0

	кристаллы, их основные физические свойства. Потенциал Борна-Майера, постоянная Маделунга, модуль упругости. Валентные и полупроводниковые кристаллы, их основные физические свойства. Металлические кристаллы, их основные физические свойства. Кристаллы с водородной связью, квантовые кристаллы			
4	<b>Обратная решетка</b> Определение, базисные векторы, объем, атомная плоскость, индексы Миллера. Условие дифракции. Построение Эвальда, Бриллиуна. Основные методы определения кристаллических структур из рентгеновского рассеяния (Лауэ, качаний, Дебай-Шерер).	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Дефекты в кристаллах</b> Фононы. Дефекты по Шоттки, по Френкелю. F - центры. Дефекты в ионных кристаллах. Дислокации, поляроны и экситоны.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
6 - 7	<b>Фононы - колебания кристаллической решетки</b> Спектры фононов. Основные свойства фононных мод. Оптические, акустические ветви, поляризация. Способы определения спектров из взаимодействия с электромагнитной волной, из нейтронного рассеяния. Модель Дебая и Эйнштейна. Проблемы классической модели. Теплоемкость и способы ее определения. Вклад электронной подсистемы. Решеточная теплопроводность кристаллов. Температурная зависимость. Процессы переброса. Параметры Грюнайзена.	Всего аудиторных часов		
		4	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Взаимодействие излучения с периодически расположенными в пространстве центрами рассеяния</b> Амплитуда рассеяния. Атомный, структурный факторы. Влияние разупорядочения. Фактор Дебая-Валлера. Определение фононной плотности состояний	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	<b>Раздел 2</b>	16	0	0
9 - 10	<b>Металлическая связь</b> Электронный газ и статистика Ферми-Дирака. Плотность электронных состояний. Уровень Ферми. Средняя энергия электронов. Теплоемкость. Когезионная энергия металла. Параметр $r_s$ . Кинетические явления в металле. Модель Друде-Лоренца.	Всего аудиторных часов		
		4	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Кинетические явления в металлах</b> Электропроводность, диэлектрическая проницаемость. Длина свободного пробега. Скин-эффект. Время релаксации и концентрация примесей. Закон Видемана-Франца. Фононы в металле.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Носители заряда в зонной схеме</b> Движение электрона в периодическом потенциале. Приближение сильной связи. Зоны Бриллюэна. Эффективная масса. Блоховские электроны. Понятие о дырке. Проводимость в зонной схеме.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	<b>Полупроводники</b> Собственный полупроводник. Концентрация электронов и дырок. Закон действующих масс. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Подвижность.	Всего аудиторных часов		
		4	0	0
		Онлайн		
		0	0	0

	Температурная зависимость. Примесный полупроводник. Температурная зависимость концентрации носителей. Примесная зона. Полуметаллические состояния. Равновесные и неравновесные носители заряда. Время жизни. Квазиуровень Ферми. Рекомбинация. Линейная и квадратичная. Поглощение света. Прямые и не прямые переходы. Контактная разность потенциала. Генерация, диффузия и дрейф в примесном полупроводнике.			
15	<b>Термоэлектрические эффекты</b> Эффект Зеебека. Эффект Пельтье. Эффект Томпсона. Вывод формулы для коэффициента термоЭДС.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
16	<b>Гетероструктуры на основе полупроводников</b> Уровни размерного квантования и двумерный электронный газ. Сверхрешетки.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
	8 Семестр	24	0	0
1-8	<b>Раздел 1</b>	16	0	0
1	<b>Контактные явления в полупроводниках</b> Контакт металл- полупроводник. Область обедненного заряда. Запорный слой. Антизапорный слой. Барьер Шоттки. Элементарные представления о p-n - переходе. Выпрямление. Вывод вольтамперной характеристики. Квазиуровень Ферми на границе раздела. Туннельные диоды. Гетеропереход.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Полупроводники в сильных электрических полях</b> ВАХ N-типа. Эффект Ганна. Туннельный эффект.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Генерация и рекомбинация</b> Излучательная рекомбинация. Безизлучательная рекомбинация. Кинетика носителей заряда. Время жизни. Глубокие примеси. Рекомбинация ОЖЭ.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Фотопроводимость</b> Фотомагнитный эффект. Вывод формул для ЭДС фотомагнитного эффекта. Фотомагнитомеханический эффект. Люминесценция. Флюоресценция. Механизмы люминесценции в полупроводниках.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Сегнетоэлектричество</b> Сегнетова соль. Физические основы. Применение.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Эффект Холла</b> Коэффициент Холла и магнитосопротивление. Угол Холла. Методы измерения и интерпретации экспериментальных данных. Особенности поведения магнитосопротивления для многозонных веществ. Квантовый эффект Холла. Эффект Эттингсгаузена	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Циклотронный резонанс</b> Циклотронный резонанс, эксперимент Азбеля-Канера. Эффективная циклотронная масса. Получение	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		

	информации о зонной структуре.	0	0	0
8	<b>Эффект де-Гааза-ван-Альфена</b> Уровни Ландау. Условия проведения эксперимента. Построение поверхностей Ферми. Гигантские квантовые осцилляции поглощения ультразвука в металлах. Восстановление зонной структуры.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-12	<b>Раздел 2</b>	8	0	0
9	<b>Гамма-резонансная спектроскопия</b> Эффект Мессбауэра, "мессбауэровские" изотопы. Интерпретация мессбауэровских спектров. Изомерный сдвиг. Квадрупольное расщепление, расщепление уровней ядра в магнитном поле соседних электронов. Фактор Лэмба-Мессбауэра. Влияние температуры на мессбауэровские спектры.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Аннигиляция позитронов в веществе</b> Диагностика электронной структуры. Основы метода. Источники позитронов. Схема эксперимента для измерений двухквантовой аннигиляции позитронов. Интерпретация экспериментальных данных	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Магнитные резонансы: ЯМР, ЭПР</b> Метод ядерного магнитного резонанса в физике твердого тела. Основы метода. Спектры ЯМР. Продольная и поперечная релаксация. Ядра, представляющие интерес для ЯМР-спектроскопии. Интерпретация спектров ЯМР: положение, интенсивность, дисперсия тонкой структуры. Сдвиг Найта. Метод электронного парамагнитного резонанса. Основы метода. Отличия метода ЭПР от ЯМР-метода. Спектры ЭПР, спин-решеточная и спин-спиновая релаксация. Интерпретация спектров ЭПР.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Двойные резонансы и методы EXAFS</b> Акустический парамагнитный резонанс, акустический ядерный магнитный резонанс, двойной электронно-ядерный резонанс. Общие представления. Фотоэмиссионные и инверсные фотоэмиссионные спектры. Методы XANES, EXAFS - исследование электронной подсистемы твердого тела.	Всего аудиторных часов		
		2	0	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 СЕМИНАРОВ



Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 8	<b>Кристаллические структуры</b> Основные определения. Типы химических связей в твердых телах. Обратная решетка. Условие дифракции. Дефекты в кристаллах. Фононы. Амплитуда рассеяния. Атомный, структурный форм-факторы.
9 - 16	<b>Электронная подсистема</b> Металлическая связь. Электронный газ и статистика Ферми-Дирака. Кинетические явления в металлах. Носители заряда в зонной схеме. Зоны Бриллюэна. Эффективная масса. Полупроводники. Термоэлектрические эффекты. Гетероструктуры на основе полупроводников.
	<i>8 Семестр</i>
1 - 6	<b>Полупроводники</b> Контактные явления в полупроводниках. Генерация и рекомбинация. Фотопроводимость. Эффект Холла.
	<b>Экспериментальные методы исследования твердых тел</b> Циклотронный резонанс. Эффект де-Гааза-ван-Альфена. Гамма-резонансная спектроскопия. Аннигиляция позитронов в веществе. Ядерный магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс. Фотоэмиссионные и инверсные фотоэмиссионные спектры.

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Используются презентации, обсуждения последних научных работ, новые модели в физике конденсированного состояния. Обязательным условием успешного освоения дисциплины является самостоятельная работа студентов, выполнение индивидуальных заданий, работа с 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-1	З-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
ПК-2	З-ПК-2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
ПК-2.6	З-ПК-2.6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-2.6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-2.6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12

ПК-3	З-ПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
ПК-4	З-ПК-4	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-4	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-4	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
ПК-5	З-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
ПК-6	З-ПК-6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	У-ПК-6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12
	В-ПК-6	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-6, КИ-12

### 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	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. ЭИ А 71 Введение в теорию полупроводников : учебное пособие, Ансельм А. И., Санкт-Петербург: Лань, 2016
2. 538.9 ПЗ0 Основы физики конденсированного состояния : учебное пособие, Петров Ю.В., Долгопрудный: Интеллект, 2013
3. ЭИ П 19 Полупроводниковые приборы : Учебное пособие для вузов, Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. 539.2 Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , Маймистов А.И., Николаев И.Н., Москва: НИЯУ МИФИ, 2009
5. ЭИ Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , Маймистов А.И., Николаев И.Н., Москва: МИФИ, 2009
6. 538.9 С24 Сверхтекучесть и бозе-конденсация : учебное пособие для вузов, Маймистов А.И. [и др.], Москва: МИФИ, 2008
7. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, Кашурников В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
8. 530 Л22 Теоретическая физика Т.3 Квантовая механика. Нерелятивистская теория, Ландау Л.Д., Москва: Физматлит, 2024
9. 53 Л22 Теоретическая физика Т.5 Статистическая физика.Ч.1, Ландау Л.Д., Москва: Физматлит, 2013
10. ЭИ К12 Теоретическая физика твердого тела : , Собакин В.Н., Каган Ю.М., Ивлиев С.В., М.: МИФИ, 2009
11. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Шалимова К. В., Санкт-Петербург: Лань, 2022
12. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
13. 536 К31 Численные методы квантовой статистики : , Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: Физматлит, 2010

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 533 Ч-43 Введение в физику плазмы : , Чен Ф.Ф., М.: Мир, 1987

2. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: Наука, 1978
3. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., Москва: Физматлит, 1963
4. 530.5 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: Физматгиз, 1962
5. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: МедиаСтар, 2006
6. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: Гостехиздат, 1957
7. 538.9 Б87 Квазичастицы в физике конденсированного состояния : , Кульбачинский В.А., Брандт Н.Б., М.: Физматлит, 2005
8. 621.38 О-62 Оптоэлектроника Ч.1 Физические основы полупроводниковой оптоэлектроники. Когерентная оптоэлектроника, , Москва: Янус-К, 2010
9. 530 3-17 Принципы теории твердого тела : , Займан Дж., Москва: Мир, 1966
10. 53 3-17 Принципы теории твердого тела : , Займан Дж., Москва: Мир, 1974
11. 539.2 Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , Маймистов А.И., Николаев И.Н., М.: МИФИ, 1998
12. 539.2 Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : Учеб. пособие, Маймистов А.И., Николаев И.Н., М.: МИФИ, 1990
13. 539.2 М13 Теория твердого тела : , Маделунг О., М.: Наука, 1980
14. 621.37 С80 Физика полупроводников : , Стилбанс Л.С., М.: Сов. радио, 1967
15. 530 У98 Физика твердого тела : , Томсон Р., Уэрт Ч., М.: Мир, 1966
16. 539.2 Г95 Физика твердого тела : учеб. пособие для техн. ун-тов, Гуревич А.Г., СПб: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2004
17. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.1 , Ашкрофт Н. , М.: Мир, 1979
18. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.2 , Ашкрофт Н. , М.: Мир, 1979
19. 539.2 М13 Физика твердого тела. Локализованные состояния : , Маделунг О., М.: Наука, 1985
20. 539.2 Б87 Экспериментальные методы исследования энергетических спектров электронов и фононов в металлах : Физические основы, Чудинов С.М., Брандт Н.Б., М.: МГУ, 1983

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. Freemat (<http://freemat.sourceforge.net>)
2. Компилятор Fortran (<http://gcc.gnu.org/wiki/GFortran>)

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. сайт кафедры №70 НИЯУ МИФИ (<http://kaf70.mephi.ru/>)

2. сайт Американского физического общества (<http://www.aps.org>)

3. сайт издательства Elsevier ()

<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**

необходимо твердо усвоить современные представления о кристаллических структурах, о методах их экспериментального определения, о фононной и электронной подсистемах твердого тела, о классификации твердых тел. Следует изучить основные методы определения фононного спектра, плотности фононных состояний. Понимать значение фактора Дебая-Валлера в амплитуде рассеяния. Иметь представление о дефектах структуры, об элементарных возбуждениях. Знать особенности ионной связи, расчета постоянной Маделунга.

Необходимо уметь оценивать характерные параметры различных подсистем в конденсированной фазе, уметь ориентироваться в многообразии физических явлений твердого состояния. Знать особенности электронной подсистемы твердого тела, вид блоховской волновой функции, особенности зонной структуры и движения блоховского электрона во внешних полях. Уметь объяснить различие металла и диэлектрика, полуметалла и полупроводника. Рассчитывать статистику электронов и дырок, понимать значение эффективной массы для динамики носителей заряда. Знать основные методы определения концентрации носителей и знака их заряда, методы расчета зонной структуры, примесных состояний.

Необходимо владеть современными теоретическими представлениями при описании взаимодействий атомов и электронных оболочек в кристалле, о термодинамических, оптических, магнитных и электрофизических свойствах твердых тел, а также представлять основные резонансно-магнитные и другие экспериментальные методы.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Необходимо дать студентам основные представления об электронной и фононной подсистемах твердого тела.

Курс опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-математических специальностей: уравнения математической физики, квантовая механика, макроэлектродинамика, теория вероятностей, статистическая физика и термодинамика. Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и университетскому курсу математики. Необходимо проверить умение работать с операторами, знать дифференциальное и интегральное исчисление, тензорный и векторный анализ, статистику и термодинамику, электричество и магнетизм, в том числе в материальных средах. Необходимо, чтобы студенты ориентировались в задачах квантовой механики и статистической

физики, основные квантовые и классические распределения, элементы квантовой статистики. В процессе освоения материала следует дать основные представления об электронной и фононной подсистемах твердого тела, о классификации межатомных связей, слагающих конденсированное состояние, о различных методах экспериментального исследования этих подсистем. Следует рассказать об основных общепринятых теоретических представлениях о физических процессах в твердых телах, об отличии твердого состояния от других агрегатных состояний вещества. Необходимо научить понятию о дальнем и ближнем порядке, о дефектах кристаллической структуры, о кинетических и термодинамических свойствах и моделях, описывающих эти свойства. Необходимо обсудить основные методы исследования структуры твердого тела: рентгеновские и нейтронные, методы измерения фононных спектров. Научить методам изучения зонной структуры: циклотронный резонанс, эффект де-Гааза-ван-Альфена, аннигиляция позитронов, фотоэмиссия, ЯМР и ЭПР, эффект Мессбауэра, эффект Холла. Достаточно подробно рассмотреть физику полупроводников, диффузию и дрейф носителей заряда, рекомбинацию и генерацию, контактные явления, поглощение, особенности эффекта Холла в полупроводниках. Рассказать о примесных полупроводниках, о донорах и акцепторах, о температурной зависимости проводимости, о квазиуровнях Ферми.

Автор(ы):

Кашурников Владимир Анатольевич, д.ф.-м.н.,  
профессор

Иванов Андрей Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент