

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/04-577

от 27.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.03.02 Ядерные физика и 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, экс./зач./КР/КП
8	2	72	17	17	0	38	0	З
9	3	108	18	18	0	36	0	Э
Итого	5	180	35	35	0	74	0	

## АННОТАЦИЯ

Данная дисциплина является одной из основных при подготовке по профилю физики твердого тела

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Показать многообразие физических явлений, протекающих в конденсированной фазе вещества. Познакомить с электронной подсистемой твердых тел, дать необходимые теоретические модели, научить ориентироваться в современной физике металлов. Подготовить к изучению физики сверхпроводников.

### 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 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 и пользоваться соответствующими формулами.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

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

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

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной	математические модели, методы исследования и разработок, компьютерные программы, результаты	ПК-3 [1] - Способен проводить физические эксперименты по заданной методике, составлять описания проводимых исследований, отчетов,	З-ПК-3[1] - знать основные физические законы и методы обработки данных ; У-ПК-3[1] - уметь работать по заданной методике, составлять

<p>области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; проведение фундаментальных и прикладных математических и физических исследований, направленных на решение инженерных, технических и информационных задач; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных компьютерных технологий; сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области</p>	<p>исследования</p>	<p>анализу результатов и подготовке научных публикаций</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.028</p>	<p>описания проводимых исследований и отчеты, подготавливать материалы для научных публикаций; В-ПК-3[1] - владеть навыками проведения физических экспериментов по заданной методике, основами компьютерных и информационных технологий, научной терминологией</p>
---	---------------------	---	--

<p>по профилю специализации; участие в обобщении полученных данных, формировании выводов, в подготовке научных и аналитических отчетов, публикаций и презентаций результатов научных и аналитических исследований; участие в создании новых методов и технических средств исследований и новых разработок; создание программ и комплексов программ на базе стандартных пакетов для выполнения расчетов в рамках математических моделей, участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей; подготовка данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций, участие во внедрении результатов исследований и разработок.</p>			
<p>участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей; выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка</p>	<p>проектный компьютерные алгоритмы и программы, техническая документация</p>	<p>ПК-4 [1] - Способен к расчету и проектированию элементов систем в соответствии с техническим заданием, требованиями безопасности и принципами CDIO  <i>Основание:</i></p>	<p>З-ПК-4[1] - знать типовые методики планирования и проектирования систем ; У-ПК-4[1] - уметь использовать средства автоматизации проектирования;; В-ПК-4[1] - владеть</p>

<p>математической модели явления, аналитические и численные расчеты; изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования, сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; разработка проектной и рабочей технической документации: плана работ, технического задания и научно-технического отчета.</p>		<p>Профессиональный стандарт: 24.028</p>	<p>методами расчета и проектирования деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием, требованиями безопасности и принципами СИО</p>
<p>участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей; выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка математической модели явления, аналитические и численные расчеты; изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования, сбор и обработка научной и</p>	<p>компьютерные алгоритмы и программы, техническая документация</p>	<p>ПК-5 [1] - Способен проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений при разработке установок и приборов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.028</p>	<p>З-ПК-5[1] - знать методы анализа для технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов; ; У-ПК-5[1] - уметь проводить предварительные технико-экономическое обоснование проектных решений при разработке установок и приборов; В-ПК-5[1] - владеть методами проведения предварительного технико-экономического</p>

аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; разработка проектной и рабочей технической документации: плана работ, технического задания и научно-технического отчета.			обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
--	--	--	---

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
-----------------------------	-------------------------	------------------------------------

#### 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>8 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	9/9/0		25	КИ-8	З-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, З-ПК-

							5, У- ПК-5, В- ПК-5
2	Часть 2	9-15	8/8/0		25	КИ-15	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
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		17/17/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	3	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
	<i>9 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	9/9/0		25	КИ-8	3-ПК-3, У- ПК-3, В- ПК-3, 3-ПК-4, У-

							ПК-4, В- ПК-4, З-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5
2	Часть 2	9-16	9/9/0		25	КИ-16	З-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3, З-ПК- 4, У- ПК-4, В- ПК-4, З-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5
	<i>Итого за 9 Семестр</i>		18/18/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 9 Семестр</b>				50	Э	З-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3, З-ПК- 4, У- ПК-4, В- ПК-4, З-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5

\* – 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:



<b>Обозначение</b>	<b>Полное наименование</b>
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>8 Семестр</i>	17	17	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	9	9	0
1 - 3	<b>Тема 1. Свободный электронный газ.</b> Формула Друде для проводимости металла. Длина свободного пробега, частота столкновений.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
4 - 5	<b>Тема 2. Приближение времени релаксации.</b> Эффект Холла, коэффициент Холла.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
6 - 8	<b>Тема 3. Высокочастотные явления в металлах.</b> Высокочастотная проводимость, плазменная частота, скин-эффект	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	8	8	0
9	<b>Тема 4. Электронный газ в модели Зоммерфельда.</b> Распределение Ферми-Дирака, обоснование модели Зоммерфельда. Критика модели Друде.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
10 - 11	<b>Тема 5. Плотность квантовых состояний в зоне проводимости.</b> Энергия Ферми, импульс Ферми, поверхность Ферми.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Тема 6. Теплоемкость электронного газа.</b> Теплоемкость электронного газа в модели Зоммерфельда.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Тема 7. Электронный газ в слабом магнитном поле.</b> Магнитная восприимчивость электронов проводимости. Парамагнетизм Паули.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
14 - 15	<b>Тема 8. Электронный газ в сильном квантующем магнитном поле.</b> Зоны Ландау, циклотронная частота. Эффекты де Гааза - ван Альфена, Шубникова - де Гааза.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<i>9 Семестр</i>	18	18	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	9	9	0
1 - 3	<b>Тема 9. Зонная теория твердых тел.</b> Теорема Блоха. Метод сильной связи, функции Ванье	Всего аудиторных часов		
		3	3	0

		Онлайн		
		0	0	0
4 - 6	<b>Тема 10. Задача Кронига-Пенни.</b> Образование запрещенных зон в кристалле. Приведенная зонная схема. Зоны Бриллюэна. Эффективная масса квазичастиц. Дырки.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
7 - 8	<b>Тема 11. Разрешенные энергетические зоны в конденсированном состоянии.</b> Образование разрешенных зон из-за уширения атомных уровней в конденсированном состоянии.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
9-16	<b>Часть 2</b>	9	9	0
9 - 10	<b>Тема 12. Кинетическое уравнение Больцмана.</b> Вывод уравнения. Интегралы столкновений. Примеры упрощенных вариантов уравнения.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
11 - 12	<b>Тема 13. Основные типы столкновений квазичастиц в твердом теле.</b> Механизмы столкновений, основные формулы. Характерные времена	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
13 - 14	<b>Тема 13. Теплопроводность электронного газа.</b> Закон Видемана-Франца	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
15 - 16	<b>Тема 14. Термоэлектрические явления.</b> ТермоЭДС, эффект Пельтье, эффект Зеебека.	Всего аудиторных часов		
		2	2	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

## 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-3	З-ПК-3	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-3	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-3	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-4	З-ПК-4	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-4	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-4	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-5	З-ПК-5	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-5	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-5	З, КИ-8, КИ-15	Э, 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 твердо 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
60-64			

			изложении программного материала.
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 Н99 Solid-State Physics : An Introduction to Principles of Materials Science, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009
2. ЭИ А 71 Введение в теорию полупроводников : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
3. ЭИ Д 14 Поверхностные свойства сплавов на основе свинца, олова, индия, кадмия : учебное пособие, Москва: Физматлит, 2016
4. 53 Л22 Теоретическая физика Т.5 Статистическая физика.Ч.1, Москва: Физматлит, 2013
5. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
6. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
7. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
8. 530 Л22 Теоретическая физика Т.3 Квантовая механика. Нерелятивистская теория, , Москва: Физматлит, 2008
9. 538.9 С24 Сверхтекучесть и бозе-конденсация : учебное пособие для вузов, В. А. Кашурников [и др.], Москва: МИФИ, 2008
10. ЭИ К31 Современные проблемы физики конденсированного состояния : , В. А. Кашурников, А. В. Красавин, Москва: МИФИ, 2008
11. 536 К31 Численные методы квантовой статистики : , В. А. Кашурников, А. В. Красавин, Москва: Физматлит, 2010
12. 539.2 Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2009
13. ЭИ К12 Теоретическая физика твердого тела : , Ю. М. Каган, В. Н. Собакин, С. В. Ивлиев, М.: МИФИ, 2009

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , М.: МИФИ, 2001
2. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007
3. 537 А71 Введение в теорию полупроводников : Учебное пособие для вузов, А. И. Ансельм, Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008
4. 539.2 Г95 Физика твердого тела : учеб. пособие для техн. ун-тов, А.Г. Гуревич, СПб: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2004
5. 621.38 Г95 Твердотельная электроника : учебное пособие для вузов, В. А. Гуртов, Москва: Техносфера, 2008
6. 53 К31 Квантовые сильнокоррелированные системы: современные численные методы : учебное пособие для вузов, В. А. Кашурников, А. В. Красавин, Москва: МИФИ, 2007
7. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Ч. Киттель , М.: МедиаСтар, 2006

#### 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**

Программа курса является довольно насыщенной и поэтому требует постепенного детального изучения. Прежде, чем переходить к детальному изучению названных выше разделов физики полупроводников, необходимо усвоить основные сведения о физике твердого тела, включая строение твердых тел, классификацию кристаллов (металлы, диэлектрики, полупроводники) и виды связей в кристаллах.

Нужно знать основы зонной теории: постановку задачи нахождения собственных значений энергии и волновых функций электронов в кристалле, понимать, какие упрощающие предположения лежат в основе адиабатического и одноэлектронного приближения. Понять, какие предпосылки позволили найти вид волновой функции электрона в кристалле (сформулировать теорему Блоха). Следует понять смысл и необходимость введения понятия эффективной массы. Знать суть метода эффективных масс, его основные преимущества и

ограничения. Знать принцип экспериментальных методов определения компонентов тензора эффективных масс.

Также особое внимание необходимо уделить изучению поведения электрона в полупроводниках различных типов, включая примесные и собственные полупроводники, следует обратить внимание на влияние примесей на проводимость полупроводника.

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

Дать основы зонной теории: поставить задачу нахождения собственных значений энергии и волновых функций электронов в кристалле, вводя упрощающие предположения, лежащие в основе адиабатического и одноэлектронного приближения. Показать основные предпосылки, позволившие найти вид волновой функции электрона в кристалле (сформулировать теорему Блоха).

Разъяснить смысл и необходимость введения понятия эффективной массы, а также суть метода эффективных масс, его основные преимущества и ограничения. Познакомить студентов с экспериментальными методами определения компонентов тензора эффективных масс.

Автор(ы):

Герасимов Иван Александрович

Ананьин Олег Борисович, д.ф.-м.н., с.н.с.